

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
À L'OBTENTION DE LA  
MAÎTRISE GÉNIE DE LA CONSTRUCTION  
M. Ing.

PAR  
CÉSAR BARCO

INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE DE COMPACTAGE DES PLAQUES  
D'ENROBÉS SUR LA RÉSISTANCE À L'ORNIÉRAGE

MONTREAL, LE 16 JANVIER 2007

© Droits réservés de César Barco

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ  
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. ou Mme Michèle Saint-Jacques, directeur de mémoire  
Génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Alan Carter, codirecteur de mémoire  
Génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Gabriel Assaf président du jury  
Génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Michel Paradis, examinateur externe  
Responsable - Secteur enrobés bitumineux  
Ministère des Transports du Québec - Laboratoire des chaussées

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC  
LE 14 DÉCEMBRE 2006  
À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

# **INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE DE COMPACTAGE DES PLAQUES D'ENROBÉ SUR LA RÉSISTANCE À L'ORNIÉRAGE**

César Barco

## **SOMMAIRE**

Les enrobés bitumineux ont un comportement viscoélastique régi par les caractéristiques de leurs composants (granulats et bitume). Afin d'être intégré à l'enrobé, le bitume doit être chauffé afin de modifier sa viscosité. Par contre, lorsque le bitume est chauffé, il s'oxyde. De ce fait, la température est un facteur important pendant tout le processus de fabrication de l'enrobé bitumineux (malaxage et compactage).

Le but de cette recherche consiste à évaluer l'influence de la température de compactage sur les profondeurs des ornières de plaques d'enrobés. Pour ce faire, une revue de la littérature a été effectuée et un plan d'expérimentation a été développé. Deux enrobés standard du MTQ ont été sélectionnés, soit l'enrobé ESG-10 et l'enrobé GB-20. Trente quatre plaques ont été compactées à  $\pm 5$ ,  $\pm 7$  et  $\pm 10^{\circ}\text{C}$  de la température de compactage requise par le projet de norme LC 26-400 du MTQ. Toutes les plaques ont ensuite été soumises à l'essai d'orniérage, avec l'orniéreur LCPC, suivant rigoureusement toute la procédure.

Les résultats démontrent que la température de compactage de plaque a peu d'influence sur les profondeurs des ornières mesurées à l'orniéreur. Cependant, la corrélation entre la température et l'orniérage s'améliore avec le nombre de cycles de chargement.

Après cette recherche, nous recommandons d'adapter le plan de balayage de compaction des plaques aux épaisseurs de celles-ci et il est préférable de compacter la plaque aussitôt après le malaxage plutôt que de la remettre à l'étuve afin de limiter le degré d'oxydation du bitume.

## **INFLUENCE OF THE COMPACTION TEMPERATURE OF ASPHALT MIXES SPECIMENS ON RUTTING RESISTANCE**

César Barco

### **ABSTRACT**

Asphalt mixes have a viscous-elastic behavior controlled by the characteristics of their components (aggregates and bitumen). Temperature is an important factor during all the process of asphalt mix manufacturing (mixing and compacting). The bitumen is heated in order to modify its viscosity before it is mixed with the aggregate. However, when the bitumen is heated, it oxidizes.

The goal of this research is to evaluate the influence of the compaction temperature on rut depths of asphalt mixes specimens. An experimental procedure was developed, after a literature review, to carry out this research. Two MTQ standard asphalt mixes were selected (one ESG-10 and one GB-20). Thirty four specimens were compacted with  $\pm 5$ ,  $\pm 7$  and  $\pm 10^{\circ}\text{C}$  of the compaction temperature required by MTQ's standard LC 26-400. All the specimens were submitted to a rutting test, with a LCPC rut tester.

The results show that the compaction temperature has little influence on the rut depth. However, a correlation was found between the compaction temperature and rutting which improves with the number load cycles. As a result of this research, we recommend to adapt the compaction sweeping plan of the specimens to its thickness. In addition, in order to limit the bitumen oxidation it is preferable to compact the specimens right after mixing rather than putting it into the oven for a curing period.

## REMERCIEMENTS

Je dois remercier premièrement mes directeurs de recherche, Mme Michèle St-Jacques et M. Alan Carter, qui m'ont apporté tout leur soutien et savoir-faire pour mener à bon terme ce mémoire.

Je dois également remercier M. Alain Desjardins technicien du laboratoire et M. Antony Barberi, stagiaire, qui m'ont aidé lors du programme expérimental.

Finalement, je dois remercier Francia et Maria Alejandra, ma femme et ma fille, pour leur support moral tout au long de ce mémoire.

## TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE .....	i
ABSTRACT .....	ii
REMERCIEMENTS .....	iii
TABLE DES MATIERES .....	iv
LISTE DES TABLEAUX .....	vii
LISTE DES FIGURES .....	ix
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1    REVUE DE LA LITTÉRATURE .....	3
1.1        Composants de l'enrobé bitumineux .....	3
1.1.1    Liant .....	3
1.1.2    Granulats .....	6
1.1.3    Mastic (Mortier) Bitumineux .....	7
1.2        Enrobés bitumineux .....	8
1.3        Rhéologie des enrobés bitumineux .....	9
1.3.1    Classes de comportement des enrobés bitumineux .....	10
1.3.2    Propriétés mécaniques des bitumes .....	12
1.4        Types d'essais .....	15
1.5        Essais homogènes et non homogènes sur enrobés .....	16
1.5.1    Essais non homogènes .....	16
1.5.2    Essais homogènes .....	26
1.6        Sommaire .....	31
CHAPITRE 2    ORNIÉRAGE .....	32
2.1        Introduction .....	32
2.2        Définition de l'orniérage (déformations permanentes) .....	32
2.3        Facteurs qui influencent l'apparition de l'orniérage .....	35
2.4        Essais utilisés pour l'étude de l'orniérage .....	37
2.4.1    Essais de mesure directe des ornières .....	37
2.4.2    Essais de corrélation .....	42
2.4.3    Essais de simulation de trafic utilisés pour mesurer l'orniérage .....	47
2.5        Sommaire .....	62
CHAPITRE 3    INTERPRÉTATION DE LA NORME .....	64
3.1        Introduction .....	64
3.2        Révision des méthodes d'essais et des procédures au laboratoire .....	65
CHAPITRE 4    MATÉRIAUX ET MÉTHODE D'EXPÉRIMENTATION .....	67
4.1        Introduction .....	67

4.2	Choix des essais.....	67
4.2.1	Orniérage.....	67
4.2.2	Densité.....	68
4.2.3	Granulométrie.....	70
4.3	Choix des matériaux.....	70
4.3.1	Bitumes.....	70
4.3.2	Granulats.....	70
4.3.3	Mélanges.....	71
4.4	Paramètres des essais.....	74
4.5	Méthode d'expérimentation.....	75
4.5.1	Essais de caractérisation des matériaux.....	76
4.5.1.1	Essais de granulométrie.....	76
4.5.1.2	Essais de densité des granulats.....	76
4.5.2	Révision des normes.....	78
4.5.3	Essais à l'orniéreur.....	79
4.5.3.1	Préparation des matériaux.....	79
4.5.3.2	Malaxage de l'enrobé.....	80
4.5.3.3	Compactage des plaques.....	81
4.5.3.4	Essais à l'orniéreur.....	83
4.6	Sommaire.....	85
CHAPITRE 5	RÉSULTATS ET ANALYSES.....	86
5.1	Introduction.....	86
5.2	Résultats à l'orniéreur de l'enrobé ESG-10.....	86
5.2.1	Régression non linéaire / régression polynomiale de deuxième degré.....	90
5.3	Résultats à l'orniéreur de l'enrobé GB-20.....	92
5.4	Analyse de résultats des moyennes de plaques compactées à la même température.....	96
5.5	Analyse des résultats par analyse de covariance.....	100
5.5.1	Analyse de covariance de l'enrobé ESG-10.....	101
5.5.2	Analyse de covariance de l'enrobé GB-20.....	102
5.6	Comparaison des densités avant et après l'orniérage.....	104
5.6.1	Enrobé ESG-10.....	104
5.6.2	Enrobé GB-20.....	105
5.7	Analyse de covariance: température versus densité brute.....	107
CONCLUSION	.....	109
RECOMMANDATIONS	.....	113
ANNEXE 1 Normes AFNOR P 98-250-2 et P 98-253-1	.....	115
ANNEXE 2 Méthode d'essai LC 26-400	.....	134
ANNEXE 3 Méthode d'essai LC 26-410	.....	145

ANNEXE 4 Tableaux des densités des plaques par la méthode volumétrique .....	154
ANNEXE 5 Rapports des essais à l'orniéreur. Enrobé ESG-10 .....	156
ANNEXE 6 Rapports des essais à l'orniéreur. Enrobé GB-20 .....	165
BIBLIOGRAPHIE .....	173

## LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau I	Composants du bitume.....4
Tableau II	Comportement des enrobés bitumineux selon la charge appliquée et la déformation.....12
Tableau III	Critère d'évaluation de la résistance à l'orniérage à l'aide de l'essai de cisaillement répété à hauteur d'éprouvette constante.....47
Tableau IV	Critères de résistance à l'orniérage.....62
Tableau V	Résumé des résultats des granulométries.....71
Tableau VI	Caractéristiques des mélanges du programme expérimental.....71
Tableau VII	Analyse granulométrique pour fabriquer l'enrobé GB20.....72
Tableau VIII	Analyses granulométrique pour fabriquer l'enrobé ESG-10.....73
Tableau IX	Paramètres d'essais.....75
Tableau X	Résumé des densités des gros granulats.....77
Tableau XI	Résumé des densités des granulats fins.....78
Tableau XII	Résultats des essais à l'orniéreur sur l'enrobé ESG-10.....87
Tableau XIII	Coefficients de variation des profondeurs des ornières selon le nombre de cycles. Enrobé ESG-10.....89
Tableau XIV	Résultats des essais à l'orniéreur sur l'enrobé GB-20.....93
Tableau XV	Coefficients de variation des ornières selon le nombre de cycles. Enrobé GB-20.....95
Tableau XVI	Moyennes des ornières entre plaques compactées à la même température selon le nombre de cycles. Enrobé ESG-10.....97
Tableau XVII	Moyennes des ornières entre plaques compactées à la même température selon le nombre de cycles. Enrobé GB-20.....98

Tableau XVIII	Coefficients de corrélation entre la température de compactage des plaques et les profondeurs des ornières selon les cycles. Enrobé ESG-10.....	101
Tableau XIX	Coefficients de corrélation entre les pourcentages de vides et les profondeurs des ornières selon les cycles. Enrobé ESG-10.....	102
Tableau XX	Coefficients de corrélation entre la température de compactage des plaques et les profondeurs des ornières selon les cycles. Enrobé GB-20.....	103
Tableau XXI	Coefficients de corrélation entre les pourcentages de vides des plaques et les profondeurs des ornières selon les cycles. Enrobé GB-20.....	103
Tableau XXII	Comparaison des densités des plaques avant et après l'essai à l'orniéreur. Enrobé ESG-10.....	105
Tableau XXIII	Comparaison des densités des plaques avant et après l'essai à l'orniéreur. Enrobé GB-20.....	106
Tableau XXIV	Densités des morceaux de plaque qui n'ont pas été soumis à l'orniéreur.....	107
Tableau XXV	Coefficients de corrélation de l'analyse de covariance des températures de compactage versus densités brutes. Enrobés ESG-10 et GB-20.....	108

## LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1	Deux exemples du comportement rhéologique.....	10
Figure 2	Comportement type des bétons bitumineux.....	11
Figure 3	Classes de comportement des bitumes en fonction de $ \varepsilon $ et T.....	13
Figure 4	Isothermes et courbe maîtresse à 10°C d'un enrobé avec du bitume pur.....	14
Figure 5	Marteau de compaction Marshall et appareil de mesure de la stabilité et du fluage Marshall.....	18
Figure 6	Presse de compactage à cisaillement giratoire.....	19
Figure 7	Appareil pour l'essai Brésilien (Soiltest Stabilometer).....	22
Figure 8	Schéma des sollicitations induites par le trafic.....	23
Figure 9	Appareil de fatigue en flexion pour enrobés bitumineux M2F.....	24
Figure 10	Appareil de mesure du module complexe des matériaux bitumineux.....	25
Figure 11	Schéma d'un équipement de flexion à chargement aux tiers-points cyclique.....	26
Figure 12	Appareil pour essais rhéologiques MAER.....	28
Figure 13	Résultats classiques pour l'essai de traction directe sur enrobés.....	29
Figure 14	Appareil MTS pour l'essai TSRST.....	30
Figure 15	Orniérage à grand rayon.....	33
Figure 16	Ornière à grand rayon.....	33
Figure 17	Orniérage à faible rayon.....	34
Figure 18	Ornière à faible rayon.....	34
Figure 19	Zone de restriction dans la courbe de masse volumique maximale.....	36
Figure 20	Transversoprofilographe numérique VEC 450.....	38
Figure 21	Transversoprofilographe QPM.....	39

Figure 22	Transversoprofilographe à ultrasons TUS.....	40
Figure 23	Analyseur de routes automatique ARAN (Automatic road analyser).....	42
Figure 24	Profondeurs d'ornières d'enrobés versus la résistance à la compression diamétrale.....	44
Figure 25	Essai de cisaillement répété à hauteur d'éprouvette constante.....	46
Figure 26	Manège de fatigue du LCPC, Nantes (France).....	49
Figure 27	Essieu à roues jumelées / Essieu à roues simples en tridem.....	50
Figure 28	National Center for Asphalt Technology (NCAT) Test Track, Alabama.....	52
Figure 29	Camion avec train à trois remorques, NCAT Test Track, Alabama.....	53
Figure 30	Orniéreur APA (Asphalt Pavement Analyzer).....	54
Figure 31	Orniéreur Hamburg (Hamburg Wheel Tracking Device).....	55
Figure 32	Orniéreur PURWheel (PURWheel Testing Device).....	56
Figure 33	Compacteur de plaques du LCPC.....	58
Figure 34	Compactage d'une plaque avec le compacteur du LCPC.....	58
Figure 35	Orniéreur du LCPC.....	59
Figure 36	Localisation des points de mesure des profondeurs d'ornières dans une plaque.....	61
Figure 37	Évolution de la profondeur des ornières lors de l'essai à l'orniéreur.....	61
Figure 38	Système de pesage des plaques d'enrobé dans l'eau.....	69
Figure 39	Plaque d'enrobé coupée pour calculer le postcompactage après l'essai à l'orniéreur.....	69
Figure 40	Courbe granulométrique. Enrobé GB-20.....	73
Figure 41	Courbe granulométrique. Enrobé ESG-10.....	74
Figure 42	Malaxeur, capacité 60 kg.....	81
Figure 43	Compacteur de plaques type LCPC.....	82
Figure 44	Plaques de 50 mm d'enrobé compacté.....	83

Figure 45	Emplacement des sondes de température dans l'orniéreur (plaque gauche).....	84
Figure 46	Résumé des résultats des essais à l'orniéreur. Enrobé ESG-10.....	88
Figure 47	Moyennes et écarts types des profondeurs des ornières selon le nombre de cycles. Enrobé ESG-10.....	89
Figure 48	Courbes de tendance des résultats à l'orniéreur. Enrobé ESG-10.....	91
Figure 49	Résumé des résultats des essais à l'orniéreur. Enrobé GB-20.....	94
Figure 50	Moyennes et écarts types des profondeurs des ornières selon le nombre de cycles. Enrobé GB-20.....	94
Figure 51	Courbes de tendance des résultats à l'orniéreur. Enrobé GB-20.....	96
Figure 52	Courbes de tendance et coefficients de détermination des moyennes des résultats des plaques compactées à la même température. Enrobé ESG-10.....	98
Figure 53	Courbes de tendance et coefficients de détermination des moyennes des résultats des plaques compactées à la même température. Enrobé GB-20.....	99

## INTRODUCTION

L'importance de l'enrobé bitumineux dans le monde est incontestable. Chaque jour plusieurs kilomètres de sentiers, de rues, de routes, d'autoroutes, de pistes d'aéroports sont construits pour accroître les échanges et donner un dynamisme aux régions.

La performance des enrobés bitumineux est une préoccupation de tous, car elle affecte l'économie de toute la population. Une route bien construite contribue au bien-être de tous les usagers. La route doit être sécuritaire et confortable sous n'importe quel climat.

Au Québec, le climat est très variable tout au long de l'année, avec des écarts de température pouvant atteindre 60°C. L'enrobé doit donc être conçu pour résister à ces écarts. Durant l'été, l'enrobé est ramolli dû aux hautes températures. Ceci s'ajoute au trafic et, dans certains cas, à un affaiblissement de la structure de la chaussée, dû au dégel printanier, donnant des conditions propices à l'apparition d'ornières.

L'orniérage ou déformation permanente est une problématique des chaussées souples qui diminue la durée de vie de la chaussée, diminue également le niveau de confort et crée un risque pour les usagers. La résistance des enrobés bitumineux à l'orniérage dans les zones moyennement sollicitées à très sollicitées est une des exigences du ministère des Transports du Québec (MTQ). Cette résistance est mesurée à l'aide du projet de méthode d'essai LC 26-410 (Vérification de la résistance au fluage des enrobés au moyen de l'essai d'orniérage).

C'est sur cet essai que le présent mémoire s'appuie pour connaître l'influence de la température de compactage des plaques d'enrobé sur la profondeur des ornières. Pour atteindre cet objectif, deux enrobés standards du ministère des Transports du Québec ont été ciblés, soit l'enrobé ESG-10 (enrobé semi-grenu 10 mm pour couche de surface) et

l'enrobé GB-20 (enrobé grave bitume 20 mm pour couche de base). Ils sont formulés de sorte que le premier enrobé soit susceptible à l'orniérage et le deuxième ne le soit pas.

La revue de la littérature cerne les connaissances actuelles sur les enrobés bitumineux : composants, rhéologie, comportement et propriétés mécaniques. Il y a des brefs résumés sur les essais les plus utilisés pour leur caractérisation. Ces essais sont classés selon l'homogénéité de l'état de contrainte et de déformation à l'intérieur de l'échantillon. La susceptibilité à l'orniérage des enrobés bitumineux ainsi que les essais existant pour l'évaluer sont également discutés. Des essais pour mesurer l'orniérage directement ou par corrélation avec d'autres caractéristiques de l'enrobé sont également analysés.

Avant de commencer le programme expérimental, la révision des normes a été faite avec l'intention de minimiser les sources possibles de variation des résultats lors des essais à l'ornière. Ensuite, la sélection des matériaux, granulats et bitumes, a été effectuée. La caractérisation des granulats et des bitumes a également été faite afin de confirmer les données des fournisseurs.

Dans le programme expérimental, pour chacun des deux enrobés, le compactage des plaques a été fait en faisant varier la température de  $\pm 5$ ,  $\pm 7$  et  $\pm 10^{\circ}\text{C}$ , de la température spécifiée par le projet de norme LC 26-400 (Compactage des plaques d'enrobé). Ensuite, toutes les plaques ont été soumises à l'essai d'orniérage. Les résultats sont présentés et analysés à l'aide des méthodes statistiques pour établir la relation entre la température de compactage des plaques d'enrobé et l'orniérage. La relation entre la densité des plaques et la température a également été analysée.

## **CHAPITRE 1**

### **REVUE DE LA LITTÉRATURE**

Ce chapitre présente de manière sommaire les constituants d'un enrobé bitumineux, leur rhéologie, ainsi qu'une classification des essais selon l'homogénéité de la distribution de contraintes et des déformations à l'intérieur des échantillons. Les principaux essais sur les enrobés faits en Europe, aux États-Unis et au Québec sont décrits à la fin du chapitre.

#### **1.1 Composants de l'enrobé bitumineux**

L'enrobé bitumineux ou béton bitumineux est un mélange homogène de matériaux granulaires et de bitume qui, selon les caractéristiques de chacun d'eux, réagit de différentes façons. Les granulats sont la structure de l'enrobé et le bitume est le liant qui tient toutes les particules ensemble. Avant d'approfondir sur l'enrobé, il est important d'étudier les particularités de ses composants : le bitume (le liant), et les granulats.

##### **1.1.1 Liant**

Le bitume est l'un des plus anciens matériaux de construction. Il était déjà utilisé par les Sumériens (6000 av. J.-C.), par d'anciennes cultures de l'Inde (3000 av. J.-C.) et par les Égyptiens (2600 av. J.-C.) (Roberts et al., 1991). Dans l'ère moderne, l'utilisation du bitume s'est intensifiée après le développement de techniques de raffinage du pétrole dont le bitume est un sous-produit. L'invention de l'automobile a accru la nécessité de recouvrir les chaussées pour éviter le soulèvement de la poussière, pour augmenter le niveau de commodité et augmenter également le niveau de sécurité des usagers.

Le bitume est décrit comme un mélange complexe de différentes structures de molécules de carbone et hydrogène, d'où vient le nom d'hydrocarbonés (Hunter, 2000). Il contient aussi des quantités distinctes d'oxygène, de soufre, d'azote et de nitrogène. La complexité du mélange de molécules qui forment le bitume lui donne ses propriétés caractéristiques. Le bitume présente deux phases : la phase continue qui est constituée principalement de saturés, aromatiques et résines (maltènes) et la phase dispersée, constituée d'asphaltènes. La combinaison de ces deux phases forme un modèle colloïdal. Les bitumes peuvent être séparés en trois grandes classes, les bitumes dits « sols » dont les propriétés rhéologiques sont essentiellement newtoniennes, les bitumes dits « gels », typiquement des bitumes soufflés très rigides dont les propriétés rhéologiques à température ambiante sont non newtoniennes. Une classe intermédiaire, appelée « sol-gel », correspond aux bitumes intermédiaires (Lesueur, 2002). Les caractéristiques de chacun des constituants du bitume (Maltènes et Asphaltènes) sont données dans le tableau I.

Tableau I  
Composants du bitume

Caractéristiques	Maltènes			Asphaltènes
	Saturés	Aromatiques	Résines	
<b>% dans le bitume (massique)</b>	5 % - 10 %	40 % - 65%	10% (Lesueur 2002)	5 % - 25 %
<b>Masse moléculaire (g/mol)</b>	300 – 2 000	300 – 2 000	500 – 50 000	1 000 – 100 000
<b>Couleur</b>	incolore - jaunâtre	rouge - brun sombre	noire – brun foncé	noir
<b>Constituant</b>	Carbone, Hydrogène	Carbone, Hydrogène et Soufre	Carbone, Hydrogène Azote, Oxygène et Soufre	Carbone, Hydrogène Azote, Oxygène et Soufre
<b>Propriétés données au bitume</b>	viscosité et fluidité	viscosité et fluidité	adhésivité et ductilité	résistance et rigidité

(Source : Hunter, 2000)

**Les propriétés du bitume** déterminent les variations de rigidité de l'enrobé produit par les sollicitations dans la vie de la chaussée (Corté et Di Benedetto, 2004). D'où l'importance de connaître les propriétés mécaniques et physiques du bitume.

Le bitume est noir et de consistance variable à température ambiante selon son type et sa source. Durant le processus de raffinage du bitume, il est possible de contrôler les propriétés du bitume pour améliorer sa performance à haute et à basse température selon les nécessités d'utilisation (Asphalt Institute, 1983).

Les propriétés physiques du bitume comme décrites dans le tableau I, sont : l'adhésivité, la rigidité, la sensibilité à la température et la viscosité (Asphalt Institute, 1983).

L'une des propriétés principales du bitume est la viscosité qui joue un rôle primordial dans l'utilisation du bitume. La viscosité du bitume varie selon la température. À température ambiante il est plutôt dur, et à haute température il devient plus liquide. Cette transition subie par le bitume, de matériau liquide à solide et vice-versa, donne au bitume la classification de matériau thermoplastique (Hunter, 2000).

En Europe, la classification du bitume est faite encore selon l'indice de pénétration. Par contre, aux États-Unis et dans certaines provinces du Canada, le bitume est classé selon sa performance à haute et à basse température. Le grade de performance (PG H-L) (Performance Grade) indique la température maximale **H** en °C (degré Celsius), au-dessus de laquelle le bitume est susceptible d'avoir des déformations permanentes et la température minimale **L** en °C, au-dessous de laquelle le bitume est susceptible de se fissurer par retrait thermique (Roberts et al., 1991).

**L'oxydation du bitume** est la création d'asphaltènes à partir des résines et l'évaporation de la fraction légère (Young et al., 1998), ce qui rend le bitume plus dur (rigidification) et diminue son adhésivité et sa ductilité (Krebs et Walker, 1971).

L'oxydation constitue la principale cause du durcissement du bitume. Elle est largement dépendante de la température, du temps d'exposition à l'air ambiant et de l'épaisseur du film de bitume effectif. Au-dessus de 100°C, le degré d'oxydation double pour chaque augmentation de 10°C (Cochet, 1993).

D'un point de vue rhéologique, le vieillissement et le durcissement du bitume se traduisent par une perte d'élasticité, laquelle aura pour effet de modifier le comportement de l'enrobé sur la route. De ce fait, les revêtements âgés seront plus susceptibles aux fissurations thermiques et moins susceptibles à l'orniérage (Cochet, 1993).

### **1.1.2 Granulats**

Les matériaux granulaires sont classifiés en trois groupes selon leur origine géologique : les ignées (ou magmatiques), les roches sédimentaires, et les roches métamorphiques (Roberts et al., 1991).

Il existe d'autres sources de matériaux granulaires dénommés artificiels, car ils sont sous-produits de l'industrie, comme les laitiers, les cendres volantes, les scories et les résidus de mines.

Les propriétés des granulats sont d'une importance capitale pour la vie utile de la chaussée. Lorsque les caractéristiques géologiques sont connues, il est possible d'identifier les problèmes associés au type particulier de granulat exposé pendant la durée de vie de la chaussée (Hunter, 2000).

Les granulats sont souvent décrits comme de matériaux inertes qui ne sont pas affectés par leur environnement. Au contraire, les granulats sont rarement inertes et ils subissent des changements rapides durant les travaux d'ingénierie. Par exemple, certains granulats

peuvent perdre jusqu'à 50% de dureté lorsqu'ils sont mouillés. De façon similaire, d'autres granulats perdent leur adhérence pendant l'été et la récupèrent à l'hiver (Hunter, 2000).

Les principales caractéristiques des granulats pour l'utilisation dans la construction de routes sont : la ténacité, la résistance aux chocs, la dureté et la propreté (Hunter, 2000).

La granulométrie, la résistance à la rupture, la résistance à l'attrition et la forme apportent principalement de la stabilité à l'enrobé. Par contre, la porosité et la nature de la surface du granulat sont importantes pour l'interaction granulat - bitume (Krebs et Walker, 1971). Pour la confection des enrobés bitumineux, les granulats les plus utilisés proviennent de la pierre concassée produite dans des carrières.

### **1.1.3 Mastic (mortier) bitumineux**

Un mastic bitumineux est composé du bitume et du filler (appelé « fines »). Par définition, les fines correspondent aux particules passant par un tamis de 80  $\mu\text{m}$ . Par conséquent, c'est le mastic qui est le véritable liant. Il a été remarqué que c'est le mastic qui enrobe le squelette granulaire et non le bitume seul (Olard, 2003). Le mastic bitumineux peut être considéré comme une suspension à condition que les particules minérales n'entrent pas en contact les unes avec les autres (Olard, 2003).

Le filler complète la granulométrie du mélange en remplissant une partie des vides entre les particules. Étant donné qu'elles sont noyées dans le bitume, les particules de filler n'ont aucun contact les unes avec les autres. L'ajout de filler dans l'enrobé permet d'améliorer la compatibilité, la cohésion et l'imperméabilité en augmentant la teneur en bitume. L'ajout de filler augmente également la viscosité du liant ce qui a pour effet d'augmenter la viscosité de l'enrobé. Une partie des huiles volatiles du bitume est adsorbée par le filler, qui restitue lentement ces huiles à la masse d'enrobé pendant la

durée de vie de la vie de la chaussée, diminuant ainsi le vieillissement dû à l'évaporation de ces huiles (Olard, 2003).

La compatibilité (la bonne adhésivité à leur interface) entre les particules de filler et le bitume dépend de la classe de filler utilisé. En particulier, l'utilisation de filler « actif » (se dit d'un filler ayant une interaction plus ou moins grande avec certains bitumes) semble améliorer les propriétés du mastic et donc de l'enrobé. Le filler dit « actif » semble avoir un effet beaucoup plus marqué sur le bitume, et ainsi sur le mastic, qu'un filler « inerte » (sans interaction avec le bitume) (Olard, 2003).

Selon Lesueur et al. (1999), l'utilisation de chaux hydratée (filler « actif ») produit une amélioration de la tenue au désenrobage, une résistance à l'orniérage accrue, une plus grande souplesse, une plus grande ténacité à basse température, une augmentation de la cohésion des mastics et une meilleure résistance au vieillissement. Il semble que la chaux hydratée réagit à la fois avec les granulats et le bitume en modifiant le comportement du mélange.

## **1.2 Enrobés bitumineux**

Il existe plusieurs types d'enrobés bitumineux utilisés dans la construction de routes qui sont utilisés selon la classe de voie de circulation : les autoroutes, les routes nationales, les routes régionales, les routes collectrices, les chemins d'accès aux ressources et les routes locales de niveau 1, 2 et 3 (Site internet du MTQ, 2006). La formulation de l'enrobé dépend aussi des matériaux disponibles, des fondations et du climat.

Selon le MTQ, les enrobés bitumineux à utiliser sur les autoroutes au Québec sont :

- Pour une couche de base : EB-20, GB-20;
- Pour une couche unique : EB-14, ESG-14;

- Pour une couche de surface : EB-10S, ESG-10, EGA-10, EG-10;
- Pour une couche de correction : EC-10, EB-10C et EB-5;
- Pour les corrections d'ouvrages d'art : EC-10, EB-10C, EB-5, mais utilisés avant la pose d'une membrane;
- Pour les surfaces d'ouvrages d'art : EB-10S, ESG-10 et EGA-10 seulement si recouvert d'une membrane (Site internet du MTQ, 2006).

Les types d'enrobés mentionnés pour plusieurs utilisations diffèrent dans leur granulométrie et dans le type et la teneur en bitume utilisé.

### **1.3 Rhéologie des enrobés bitumineux**

La rhéologie des enrobés bitumineux, selon Hunter (2000), est définie comme l'étude des déformations et du fluage de la matière. La rhéologie explique le comportement des corps quand ils sont soumis à des contraintes. Les corps peuvent réagir de façon élastique, visqueuse ou entre les deux (qu'on appelle viscoélastique), dépendant du matériau, de la charge et de la vitesse de chargement (fréquence).

Un matériau qui réagit de façon nettement élastique est celui qui a une déformation instantanée quand il est soumis aux charges et qui reprend son état initial tout de suite après le déchargement. Par contre si le matériau exerce une résistance interne à l'écoulement (dépendance entre la contrainte et la vitesse de déformation), on dit que c'est un matériau visqueux. En effet, la viscosité est une mesure de son frottement interne (Corté et Di Benedetto, 2004). La viscosité fait en sorte que la contrainte et la déformation sont déphasées. Par exemple, si un matériau est soumis à des cycles de chargement et de déchargement, et que les déformations suivent des cycles qui sont en phase ( $0^\circ$ ) avec les cycles de chargement, alors le comportement est élastique. Au contraire, si les cycles sont complètement déphasés ( $90^\circ$ ) le comportement est dit parfaitement visqueux.

En réalité, tous les matériaux, et en particulier les enrobés, ont un comportement entre les deux (figure 1). C'est-à-dire qu'ils présentent un angle de déphasage  $\delta$  qui varie entre  $0^\circ$  et  $90^\circ$  ( $0^\circ < \delta < 90^\circ$ ) (Hunter, 2000).

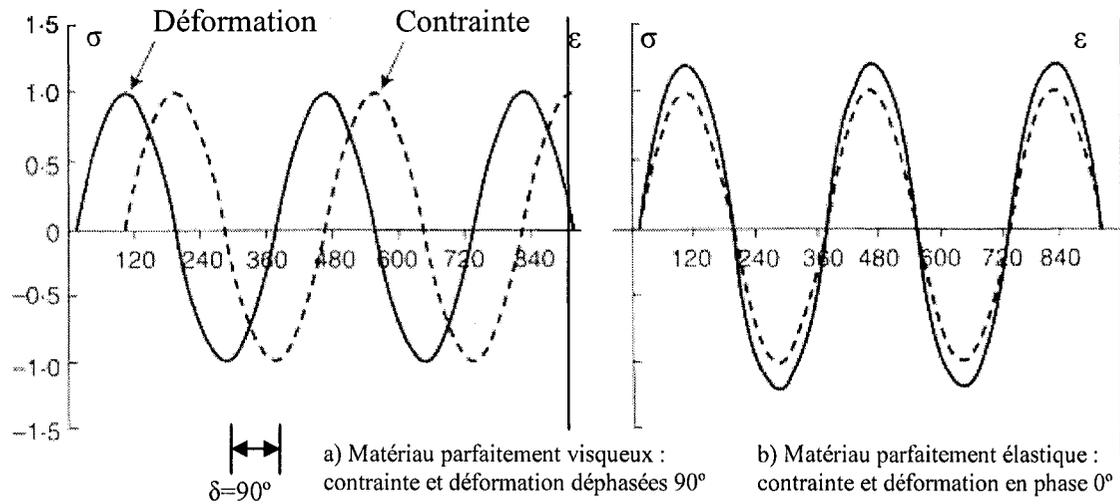
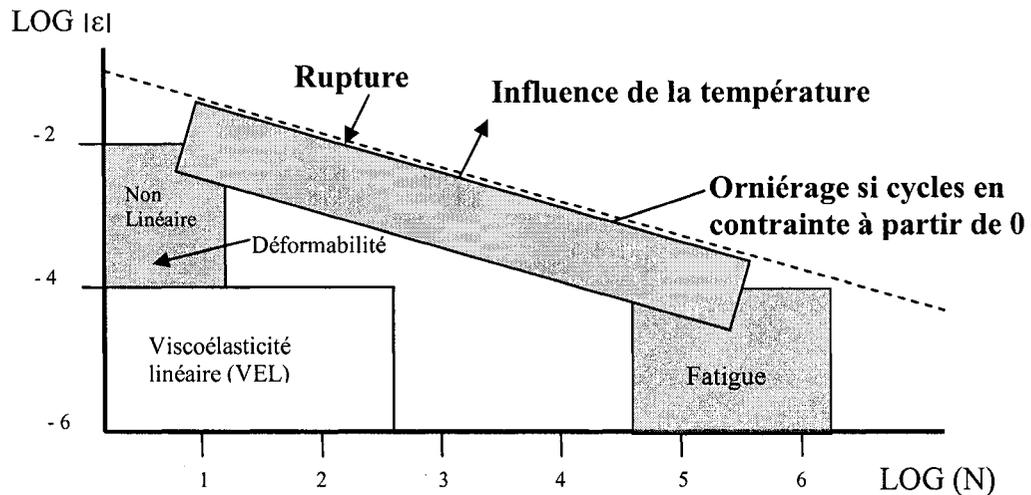


Figure 1 Deux exemples du comportement rhéologique  
(Source : adapté de Hunter, 2000)

### 1.3.1 Classes de comportement des enrobés bitumineux

Les enrobés bitumineux ont un comportement complexe. La figure 2 et le tableau II permettent d'identifier les quatre principaux types de comportement des enrobés bitumineux en considérant l'amplitude de la déformation ( $\epsilon$ ) et le nombre de cycles de chargement appliqué ( $N$ ) (Di Benedetto, 1990).



Où  $\varepsilon$  : déformation et  
 N : nombre de chargements

Figure 2 Comportement type des bétons bitumineux  
 (Source : adapté de Di Benedetto, 1990)

La figure 2 montre la grandeur des différents domaines de comportement du mélange bitumineux pour une température donnée. Les limites montrées correspondent évidemment à des ordres de grandeur qui peuvent varier sensiblement selon le matériau, la température et le type de sollicitation, soit compression, cisaillement, etc. (Olard, 2003).

Les quatre propriétés mécaniques les plus importantes pour les mélanges d'enrobés bitumineux sont : la rigidité ou le module, le comportement en fatigue, le comportement à l'orniérage qui correspond à l'accumulation de déformations permanentes, et la propagation des fissures au travers de la structure de la chaussée. Le phénomène de fissuration thermique est, quant à lui, un aspect important qui introduit un couplage thermique/mécanique (Olard, 2003).

Tableaux II

Comportement des enrobés bitumineux selon la charge appliquée et la déformation.

Chargement appliqué	Déformation	Comportement
Faible	Quelques pour-cent	Non linéaire
Quelques centaines de cycles	Faibles (<10 <sup>-4</sup> )	Viscoélastique linéaire
Plusieurs dizaines de milliers de cycles	Faibles	Fatigue
Cycles déviatoires en contrainte	Irréversibles, proche de la rupture	Orniérage

(D'après Di Benedetto, 1990)

### 1.3.2 Propriétés mécaniques des bitumes

La rigidité d'un bitume est exprimée par le module complexe. Celui-ci dépend, entre autres de la température. Pour des températures normalement inférieures à -20 °C, le bitume est fragile et le module de cisaillement ( $G^*$ ) tend vers 1 GPa, indépendamment des conditions de mesure (température, fréquence du chargement) et de la nature du bitume (Lesueur, 2002). Par contre, pour des températures supérieures à 60 °C, le bitume est plus liquide avec une viscosité ( $\eta_0$ ) reliée au module complexe par l'équation 1.1.

$$\eta_0 \omega = G^*(\omega) \quad (\text{éq. 1.1})$$

Où :  $\omega$  = fréquence du chargement en rad/s.

Entre ces deux extrêmes, qui couvrent l'ensemble du domaine d'emploi des liants routiers, le bitume a un comportement viscoélastique (Lesueur, 2002).

La figure 3 permet d'observer les comportements des bitumes d'après l'amplitude de la déformation ( $|\epsilon|$ ) et de la température (T), à une vitesse de déformation déterminée. La figure 3 montre également des particularités comme :

- les domaines fragile et ductile;
- la rupture fragile, qui peut être caractérisée par la ténacité  $K_c$  ou l'énergie de rupture  $G_c$  (Mécanique linéaire de la rupture);
- le comportement élastique linéaire, caractérisé par les modules E et G;
- le domaine viscoélastique linéaire, caractérisé par les modules complexes  $E^*$  et  $G^*$ ;
- le comportement purement visqueux (newtonien), caractérisé par la viscosité  $\eta$ ;
- pour des déformations de l'ordre de quelques pour cent, le domaine où le comportement est fortement non linéaire.

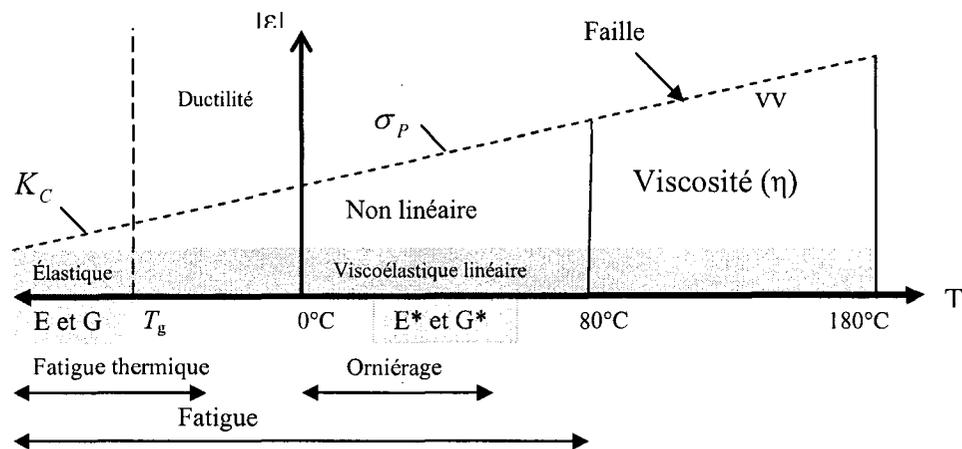


Figure 3 Classes de comportement des bitumes en fonction de  $|\epsilon|$  et T  
(Source : adapté de Olard, 2000)

La mesure du module complexe est une excellente manière de décrire la performance des bitumes. Le module complexe a deux parties  $E'$  (partie réelle) et  $E''$  (partie complexe) qui donnent respectivement la partie élastique et la partie visqueuse du comportement. En d'autres mots,  $E''$  est la partie irréversible et  $E'$  la partie réversible

des déformations. On peut représenter graphiquement le module complexe à partir des isothermes en fonction de la fréquence en base logarithmique. En déplaçant les isothermes selon un facteur de translation ( $a_T$ ), qui est égal à 1 à la température de référence ( $T_S$ ), on obtient une courbe unique appelée Courbe maîtresse (Di Benedetto et De La Roche, 1998). Un exemple est montré à la figure 4.

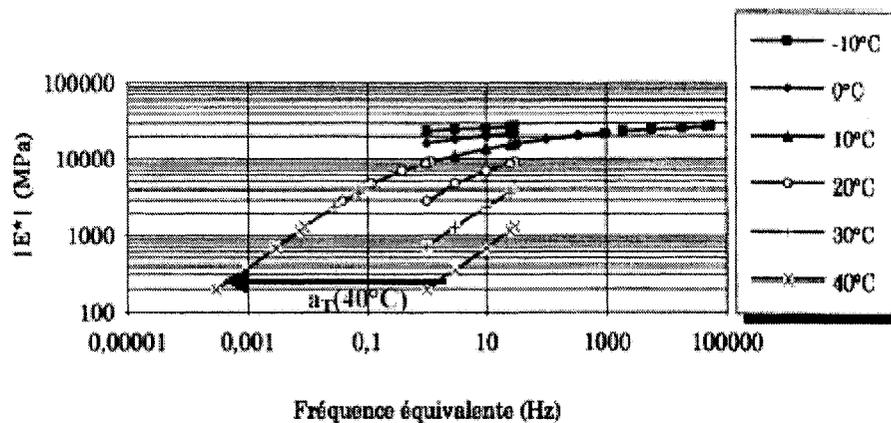


Figure 4 Isothermes et courbe maîtresse à 10°C, d'un enrobé avec du bitume pur.

(Source : Di Benedetto et De La Roche, 1998)

Il existe différentes façons de calculer le facteur de translation ( $a_T$ ), comme il est démontré dans les deux équations suivantes :

$$\log(a_T) = \frac{\Delta H}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_S} \right) \quad (\text{éq. 1.2})$$

Où  $\Delta H$  est l'énergie d'activation de la relaxation et  $R$  la constante de gaz parfaits (Huet 1963).

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T - T_S)}{C_2 + (T - T_S)} \quad (\text{éq. 1.3})$$

Où  $C_1$  et  $C_2$  sont deux constantes du matériau qui varient avec la température de référence  $T_g$  (Ferry, 1980).

#### 1.4 Types d'essais

Les matériaux sont testés pour connaître leurs propriétés fondamentales. Plus précisément, faire des tests sur des matériaux vise à déterminer leurs propriétés physiques, mécaniques, chimiques, thermiques, électromagnétiques et optiques. Il est possible de grouper les essais sur les matériaux de façon générale, selon Jacobs et Kilduff (2005), dans quatre types d'essais :

**Les essais mécaniques** mesurent l'aptitude des matériaux de prendre la charge ou de résister à l'action mécanique des forces externes comme la tension, la compression, le cisaillement, la torsion et l'impact. Ces essais peuvent être statiques ou dynamiques. Usuellement, ces essais causent des dommages permanents aux échantillons.

**Les essais non destructifs** évaluent les matériaux et leurs composants de manière à ne pas influencer leur caractère. Ils détectent, localisent, mesurent et évaluent des discontinuités, des défauts et d'autres imperfections des matériaux.

**Les essais physiques** déterminent les propriétés physiques des matériaux, lorsqu'il n'y a pas de changement dans leur composition chimique. Ils incluent la détermination de la densité et des propriétés électriques, optiques, thermiques et mécaniques.

**Les essais chimiques** déterminent les propriétés chimiques des matériaux. Ils incluent des tests de résistance des matériaux à l'oxydation et à la corrosion.

Pour les enrobés bitumineux, il y a un intérêt particulier pour les essais mécaniques qui peuvent être classés d'après l'interprétation de l'essai lui-même ou selon l'homogénéité des éprouvettes utilisées lors des essais.

Di Benedetto et Corté (2004) classent les essais selon trois catégories:

**Les essais empiriques** qui ne permettent pas de mesurer les propriétés intrinsèques des matériaux. La relation entre les résultats des essais et le comportement d'usage des matériaux est tiré de l'expérience. Un exemple de ces essais est l'essai Marshall.

**Les essais de simulation** qui, comme son nom l'indique, recréent de façon approximative les conditions réelles à échelle réduite. Ils ont beaucoup d'inconvénients dus principalement aux facteurs d'échelle et aux conditions limites qui restreignent l'interprétation des résultats à la catégorie d'empiriques. Par contre, les améliorations de ces essais pour surmonter les contraintes citées sont une voie tout à fait encourageante.

**Les essais de détermination** ont recours à la modélisation de la structure de l'ouvrage et aux lois de comportement de l'enrobé. Ils utilisent également des sollicitations simples pour déterminer des propriétés intrinsèques des matériaux suivant le schéma de la mécanique des milieux continus.

## **1.5 Essais homogènes et non homogènes sur enrobés**

Les essais qui tiennent compte de l'état de contrainte et de déformation sont groupés dans deux catégories : les non homogènes et les homogènes. L'homogénéité est basée sur l'égalité de l'état de contrainte et de déformation en chaque point de l'éprouvette testée. Les essais homogènes permettent le recours aux lois de comportement du corps sans hypothèse complémentaire. Par opposition, les essais non homogènes ont besoin d'hypothèses et de calculs plus ou moins complexes pour modéliser analytiquement ces comportements (Di Benedetto et Corté, 2004).

### **1.5.1 Essais non homogènes**

**L'essai Marshall** qui est toujours utilisé au niveau international, conduit à la détermination directe de la stabilité Marshall (SM) et du fluage Marshall (FM). La SM est la force maximale appliquée et le FM est la valeur de la déformation en 1/10 mm

correspondant à la stabilité. Ces deux paramètres sont liés à la caractérisation empirique de l'orniérage.

Les éprouvettes, compactées par impact, sont immergées dans un bain d'eau à 60°C pendant 30 à 40 minutes. Ensuite, elles sont comprimées à vitesse constante (51 mm/min) en compression diamétrale au moyen de mâchoires hémicylindriques (figure 5).

Cet essai est normalisé dans les normes suivantes :

- Norme ASTM : D 5581 – 96 (Reapproved 2001) *Standard Test Method for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus (6 inch-Diameter Specimen)* et D 6926 – 04 *Standard Practice for Preparation of Bituminous Specimens Using Marshall Apparatus*
- LC 26-020 *Préparation d'éprouvettes pour la méthode Marshall*. Décembre 2003.
- LC 26-060 *Méthode Marshall de détermination de la résistance à la déformation d'éprouvettes*. Décembre 2003.
- NORME 4201 *Enrobés à chaud formulés selon le principe de la méthode Marshall*. Décembre 2005

Ces méthodes d'essai couvrent la compaction et la mesure de résistance à l'écoulement plastique des éprouvettes cylindriques des mélanges d'enrobés bitumineux à l'aide de l'appareil Marshall. Ces essais sont employés dans la conception de mélanges bitumineux en laboratoire. Au Québec, la saison 2007 sera la dernière saison d'utilisation des normes Marshall.

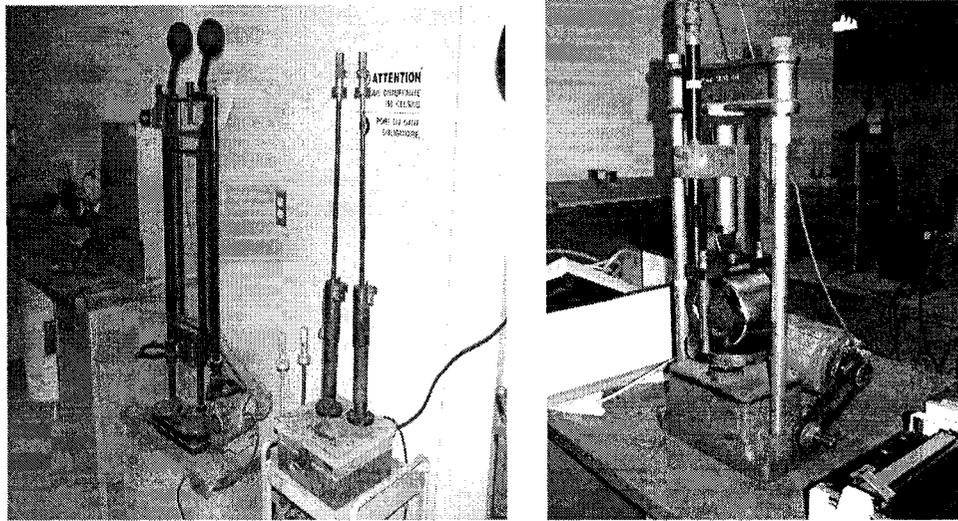


Figure 5 Marteau de compaction Marshall et appareil de mesure de la stabilité et du fluage Marshall

**L'essai à la presse à cisaillement giratoire (PCG)** est un essai de formulation. La particularité de l'appareil réside dans le fait que l'échantillon n'est pas densifié par impact comme dans le cas de la méthode Marshall, mais plutôt par pétrissage qui oriente les grains du squelette minéral sous l'action combinée d'un piston exerçant une pression de 600 kPa et d'un moule cylindrique de 150 mm de diamètre incliné de 1,25 degré, décrivant un mouvement giratoire à 30 tours/minute (figure 6). Ce processus permet d'atteindre des compacités élevées avec de faibles énergies de compactage. Le compactage est obtenu en effectuant le nombre de girations désiré, qui est généralement de 200. La température de l'échantillon est ajustée en fonction du type de bitume utilisé.

Ce mode de compactage traduit la relation linéaire qui existe entre le nombre de passes d'un rouleau compacteur en chantier et le nombre de girations. L'essai à la PCG permet de mesurer l'évolution du pourcentage de vides dans le mélange en fonction du nombre de girations. La courbe du pourcentage de vides en fonction du nombre de girations décrit la maniabilité du mélange qui est utilisée comme critère de formulation des enrobés. Ce critère de maniabilité permet d'exercer une discrimination entre mélanges trop maniables qui ont tendance à présenter des ornières, et mélanges peu maniables, qui

seront perméables, difficiles à compacter en chantier et peu durables (Service des chaussées du ministère des Transports du Québec, 2005). L'essai à la PCG permet également une appréciation qualitative de l'éprouvette densifiée, de la texture de la surface et des risques de ressuage en service.

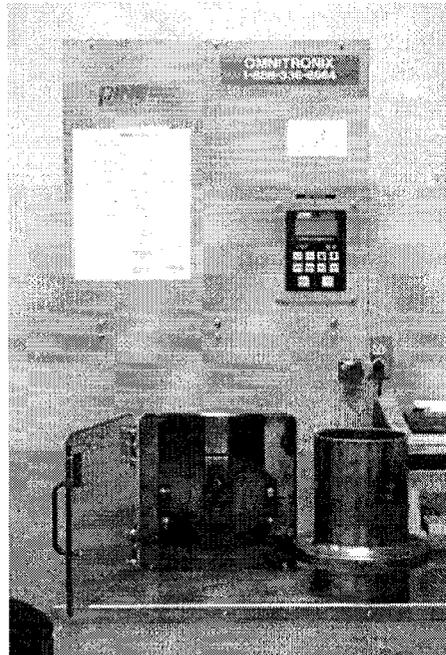


Figure 6 Presse de compactage à cisaillement giratoire

Un autre critère permet d'estimer le compactage ultime subit par le mélange en service. Le mélange doit conserver une quantité minimale de vides d'environ 2 %, à 200 girations, pour éviter l'orniérage ou le ressuage. De plus à 200 girations, l'évaluation visuelle de l'éprouvette confirme la présence ou l'absence de ressuage d'une quantité excessive de bitume (Dongmo, 2005).

L'essai à la PCG est présent dans les normes AFNOR, Européennes et Québécoises :

- Norme NF P 98-252, juillet 1991. *Détermination du comportement au compactage des mélanges hydrocarbonés. Essai de compactage à la presse de cisaillement giratoire (PCG).*

- Normes prEN12697-9 *Mélanges bitumineux. Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie 9 : masse volumique de référence et compacteur giratoire* et prEN 12697-31 *Mélanges bitumineux. Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie 31 : Préparation d'éprouvette et compacteur giratoire.*
- LC 26-003 *Détermination de l'aptitude au compactage des enrobés à chaud à la presse à cisaillement giratoire.* Décembre 2004.

Au Québec la PCG est utilisée pour la formulation des enrobés. Ce qui est normalisé dans la méthode d'essai LC 26-004 et dans la norme 4202 :

- LC 26-004 *Formulation des enrobés à l'aide de la presse à cisaillement giratoire selon la méthode du laboratoire des chaussées.* Décembre 2004;
- Norme 4202 *Enrobés à chaud formulés selon la méthode de formulation du Laboratoire des chaussées.* Décembre 2005.

Aux États-Unis, la PCG, appelée Superpave Gyratory Compactor (SGC), est utilisée dans la méthode SUPERPAVE pour la formulation des enrobés à chaud. L'essai se trouve dans la norme ASTM :

- D 6925 – 03 *Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor.*

**L'essai de compression diamétrale** a pour but d'atteindre un état de traction dans la zone centrale d'un échantillon cylindrique de faible épaisseur. Les grandeurs mesurées au cours de l'essai sont la variation de diamètre de l'éprouvette et la force d'application, à partir desquelles est déduit, par calcul, le module de déformation et la résistance à la

traction du matériau. Cet essai est appelé essai de **traction indirecte** ou encore **essai brésilien**.

Le principal avantage de ce dernier essai réside dans le fait que les éprouvettes peuvent être directement prélevées *in situ* et qu'elles ne doivent pas être collées sur des casques. Cet essai simple dans la pratique présente cependant comme inconvénient que l'état de contraintes dans l'éprouvette n'est pas homogène.

L'essai de traction indirecte est réalisé à 25°C à un taux de chargement de 2 pouces/minute (50,8 mm/minute). L'échantillon d'essai est cylindrique à une épaisseur de 2.5 pouces (63.5 millimètres) et 4 pouces (100 millimètres) de diamètre. La machine d'essai (figure 7) applique une charge par deux bandes de chargement avec les surfaces concaves pour tenir fermement l'échantillon en place.

La charge de compression maximale appliquée au spécimen est enregistrée, et la résistance à la traction du mélange d'enrobé est mesurée en livre par pouce carré ( $\text{kg/mm}^2$ ).

Cet essai se trouve dans la norme ASTM :

- D 3967 Standard Test Method for Tensile Strength Test

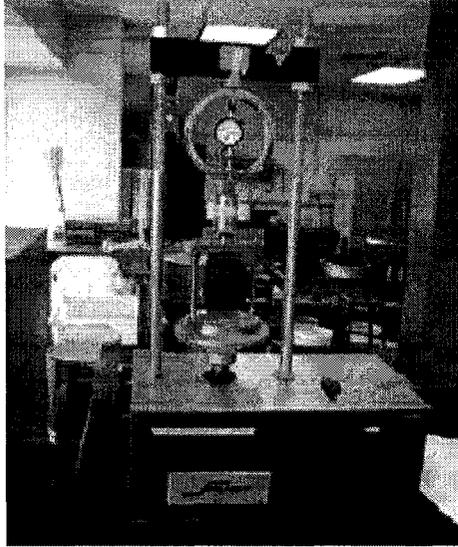


Figure 7 Appareil pour l'essai Brésilien (Soiltest Stabilometer)  
(Source : site internet du Mountain-Plains Consortium, 2006)

**Les essais de fatigue non homogènes** faits en laboratoire consistent à imposer des sollicitations répétées à l'éprouvette de matériau à tester sur le site. Les tractions répétées à la base des couches dans une chaussée, sous l'effet du passage des véhicules, créent des microdégradations qui s'accumulent et peuvent entraîner la ruine du matériau. Il s'agit du phénomène de fatigue qui s'observe pour de nombreux matériaux. Une fissure peut également apparaître et se propager dans la chaussée (Dongmo, 2005). Le schéma de sollicitation induit pour le trafic est montré à la figure 8.

Les essais de fatigue français ont pour objectif de déterminer  $\varepsilon_6$ , une déformation conduisant à la rupture de l'éprouvette pour  $10^6$  chargements, sous certaines conditions d'essais de température et de fréquence. Il y a trois grandes familles d'essais de fatigue non homogène d'après Di Benedetto et Corté (2004) :

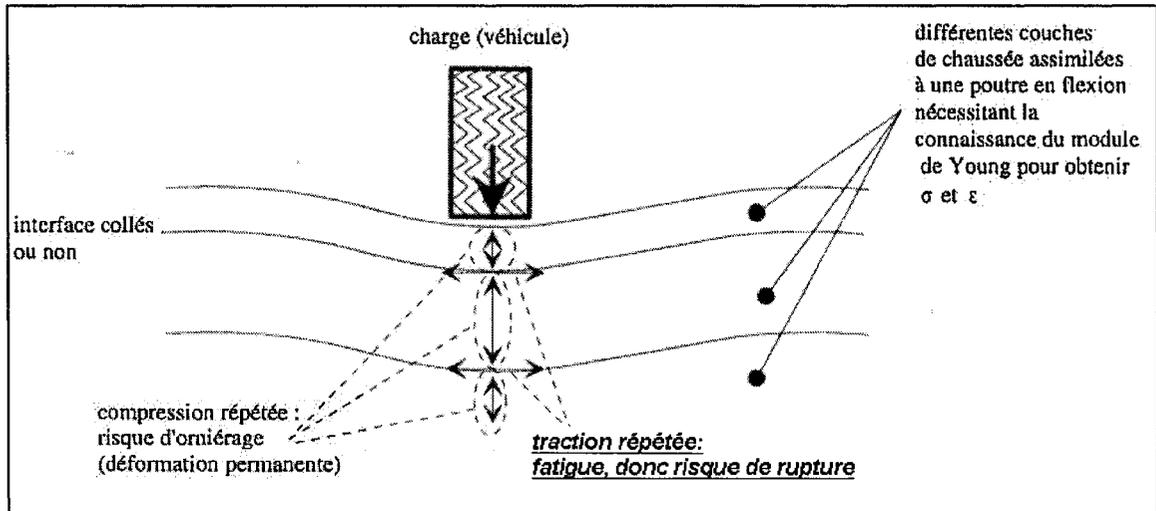


Figure 8 Schéma des sollicitations induites par le trafic  
(Source : adapté de Bonnot, 1984)

- Les essais de flexion (2, 3 et 4 points), qui visent à représenter les efforts répétés de tractions par flexion provoquée dans la chaussée par le passage de véhicules;
- Les essais de traction – compression indirecte, qui ont pour but de représenter directement les efforts de traction engendrés à la base de la chaussée par ces flexions;
- Les essais de cisaillement qui prennent en compte les efforts de cisaillement engendrés dans les couches de surface.

Quel que soit le type d'essai choisi, durant l'essai, la raideur de l'éprouvette diminue à cause de l'endommagement par fatigue. Dans le cas où l'amplitude de la force est maintenue constante en cours de l'essai, l'amplitude de la déformation augmente avec le nombre de cycles de sollicitation jusqu'à la rupture de l'éprouvette. Dans le cas où l'amplitude de la déformation est maintenue constante, l'amplitude de la force décroît en cours de l'essai jusqu'à devenir presque nulle (Di Benedetto et Corté, 2004). La figure 9 montre l'appareil de fatigue en flexion pour les enrobés bitumineux du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

Un exemple d'essai de fatigue est normalisé dans les normes AFNOR :

- Norme NF P 98-261-1, septembre 1992. Détermination de la résistance en fatigue des mélanges hydrocarbonés – Essai par flexion deux points à amplitude de flèche constante sur des éprouvettes trapézoïdales isocèles.

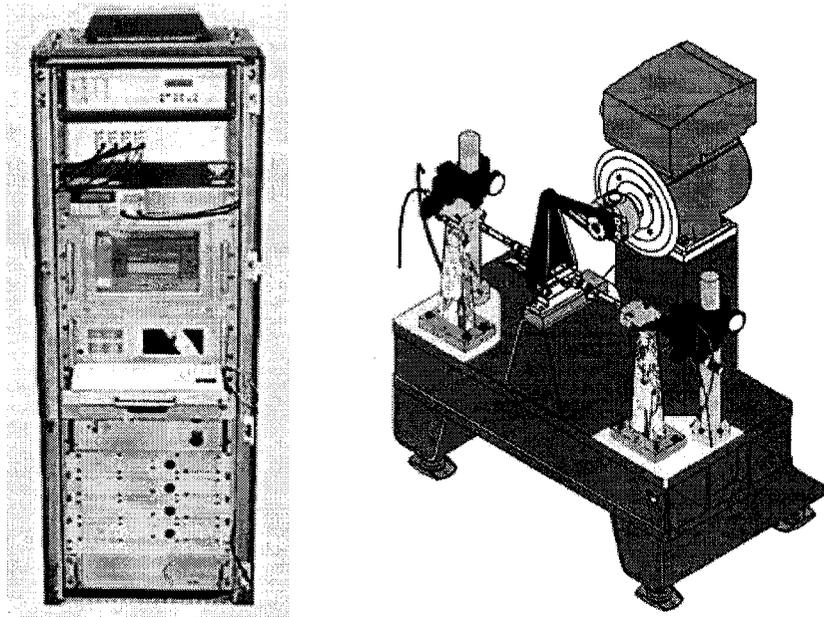


Figure 9 Appareil de fatigue en flexion pour enrobés bitumineux M2F  
(Source : site internet du LCPC, 2006)

L'essai de module complexe sur éprouvettes trapézoïdales constitue l'un des essais pour la caractérisation des matériaux bitumineux. Cet essai permet d'identifier les propriétés viscoélastiques linéaires des matériaux bitumineux dans leur gamme de fréquences et de températures d'utilisation. Les résultats de cet essai permettent ainsi de caler des modèles rhéologiques pour la modélisation des matériaux bitumineux.

Pour la réalisation de cet essai, un appareil comme celui montré à la figure 10 est utilisé. L'appareil est utilisé pour tester deux (ou quatre) éprouvettes simultanément dans les gammes de températures et de fréquences maximales suivantes : de  $-10^{\circ}\text{C}$  à  $60^{\circ}$ , et de 1 à 40 Hz (Site internet du LCPC, 2006).

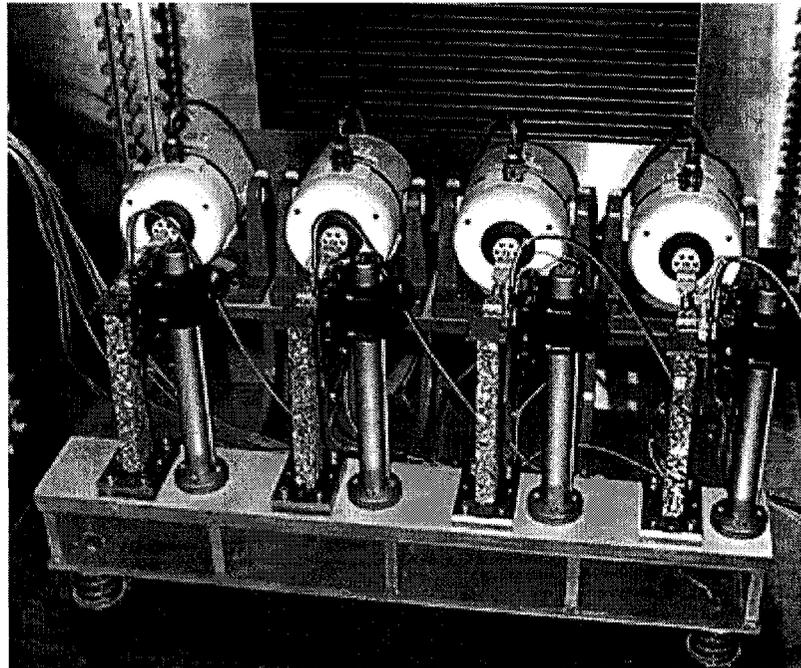


Figure 10 Appareil de mesure de module complexe de matériaux bitumineux  
(Source : site internet du LCPC, 2006)

- Norme ASTM: D 3496 – 99 (Reapproved 2005) *Standard Practice for Preparation of Bituminous Mixture Specimens for Dynamic Modulus Testing.*

Cette méthode d'essai couvre des procédures pour préparer des mélanges d'enrobés bitumineux pour la détermination du module complexe. Les températures recommandées pour l'essai sont 5, 25, et  $40^{\circ}\text{C}$  aux fréquences de chargement sinusoïdal de compression de 1, 4, et 16 hertz pour chaque température. Cette méthode est

applicable à des enrobés bitumineux semblables aux mélanges 3A, 4A, 5A, 6A, et 7A, qui sont définis par la spécification D 3515 de l'ASTM.

- LC 26-700 *Détermination du module complexe des enrobés*. Décembre 2005

Cette méthode d'essai contient le processus de détermination du module complexe ( $E^*$ ) des enrobés bitumineux à l'aide d'un équipement de flexion à chargement cyclique aux tiers-points (figure 11). Le module complexe est déterminé à différentes fréquences et températures afin de caractériser le comportement viscoélastique linéaire de l'enrobé.

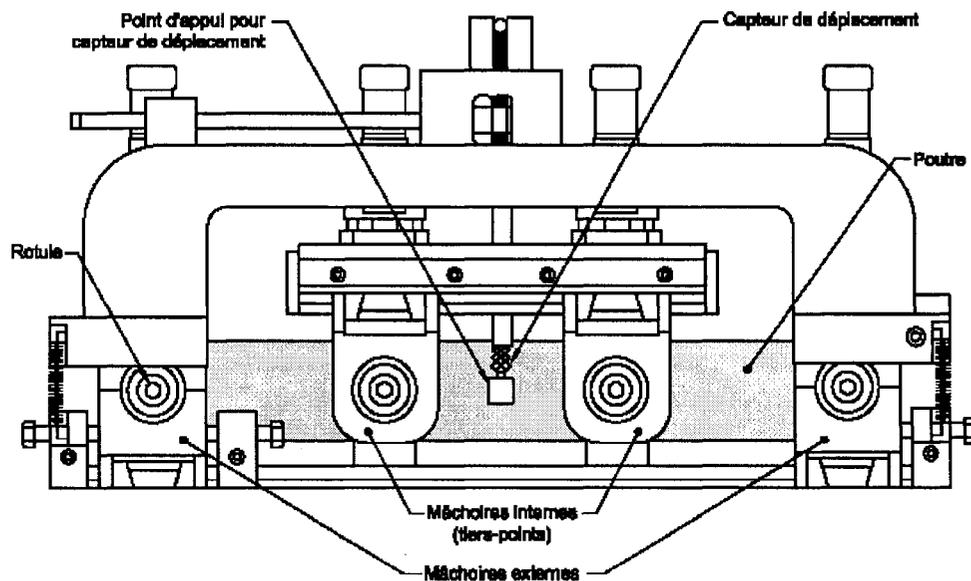


Figure 11 Schéma d'un équipement de flexion à chargement aux tiers-points cyclique  
(Source : Norme MTQ LC 26-700)

### 1.5.2 Essais homogènes

**L'essai de compression simple ou répétée : l'essai de module complexe ( $E^*$ )** est pratique dans le domaine viscoélastique linéaire "VEL" (figure 2). Les éprouvettes sont soumises à des compressions répétées sous chargement sinusoïdal (contrainte

sinusoïdale) à une fréquence de pulsation  $\omega$  (équation 1.4) (Di Benedetto et Corté, 2004).

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t) \quad (\text{éq. 1.4})$$

Où  $\sigma_0$  = contrainte initiale (en Pa);

$\omega$  = pulsation (en Hz).

La réponse dans le matériau est une déformation sinusoïdale qui est retardée par rapport à la contrainte, ce qui se traduit en un angle de déphasage ( $\varphi$ ) (équation 1.5).

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi) \quad (\text{éq. 1.5})$$

Où  $\varepsilon_0$  = déformation initiale;

$\varphi$  = angle de déphasage

Physiquement, le module complexe  $E^*$  représente le rapport des amplitudes de la contrainte sinusoïdale appliquée sur la déformation correspondante.

Le module complexe est un nombre complexe, généralement défini selon deux paramètres, soit la norme du module ( $|E^*|$ ), et l'angle de phase  $\delta$ . Le  $|E^*|$  est généralement utilisé comme module élastique de l'enrobé pour le dimensionnement des chaussées. L'angle de phase  $\delta$  permet d'évaluer le comportement viscoélastique de l'enrobé.

Suite à de nombreuses études sur le module complexe des enrobés bitumineux réalisés entre autres par Di Benedetto et De La Roche (1998), il a été démontré que celui-ci est directement influencé par : la formulation du matériau, la température, la fréquence, la fatigue, et le niveau de sollicitation (Dongmo, 2005).

L'essai de module complexe décrit ci-dessus peut être utilisé pour caractériser la fatigue. Les normes pour les essais de module complexe sont :

- Norme NF P 98-260-1, juin 1992 et NF P 98-260-2, septembre 1992. *Mesure de caractéristique rhéologique des mélanges hydrocarbonés – Partie 1 : Détermination du module et de la perte de linéarité en traction directe et Partie 2 : Détermination du module complexe par flexion sinusoïdale;*
- Norme européenne prEN12697-26 *Mélanges bitumineux. Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie 26 : Rigidité* (Figure 12).

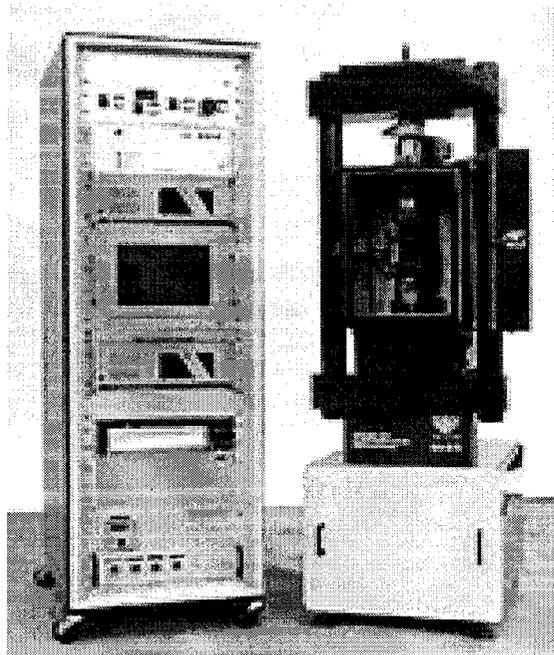
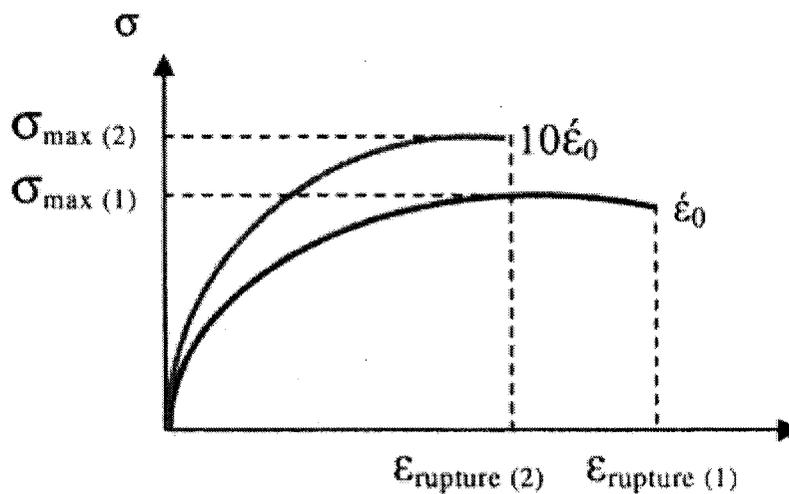


Figure 12 Appareil d'essais rhéologiques MAER  
(Source : site internet du LCPC, 2006)

**L'essai de traction directe** est un essai de traction à température constante et à vitesse de déformation constante. Au cours de l'essai, les paramètres mesurés sont la contrainte, la déformation et la température. La contrainte maximale ou la contrainte de rupture et la déformation correspondante donnant directement accès à la résistance en traction du

matériau testé, pour les conditions d'essais considérées de température et de vitesse. Cet essai peut être utilisé pour caractériser la fatigue.

On observe habituellement que plus la vitesse de déformation imposée est élevée, plus l'enrobé a un comportement rigide (contrainte maximale plus élevée) et plus l'allongement à la rupture est faible (figure 13).



- (1) Essai à vitesse de déformation  $\epsilon'_0$   
 (2) Essai à vitesse de déformation  $10\epsilon'_0$ .

Figure 13 Résultats classiques pour l'essai de traction directe sur enrobés  
 (Source : Olard, 2000)

L'essai de traction directe se trouve dans les méthodes d'essai de l'AASHTO :

- AASHTO TP3-93 Test Method for Determining the Fracture Properties of Asphalt Binder in Direct Tension (DT)

**L'essai de retrait thermique empêché** consiste à soumettre un matériau à une baisse de température contrôlée, ce qui porte l'enrobé à se contracter. Si les mouvements sont empêchés, les variations de température créent des contraintes appelées contraintes

thermiques. Ce type de couplage thermomécanique est à l'origine des problèmes de fissuration observés à basse température sur les chaussées.

Le principe de l'essai de retrait thermique empêché (Thermal Stress Retrained Specimen Test (TSRST)), consiste à maintenir la longueur d'une éprouvette d'enrobé constante en diminuant la température à vitesse constante (généralement  $-10^{\circ}\text{C/h}$ ). La contrainte de traction induite par la variation de température dans l'éprouvette augmente jusqu'à la fracture de celle-ci. L'essai de retrait thermique empêché permet donc de caractériser le comportement de la chaussée à basse température.

L'essai est normalisé par l'AASHTO TP10 (Test Method for Thermal Stress Restrained Specimen Test (TSRST) (figure 14).

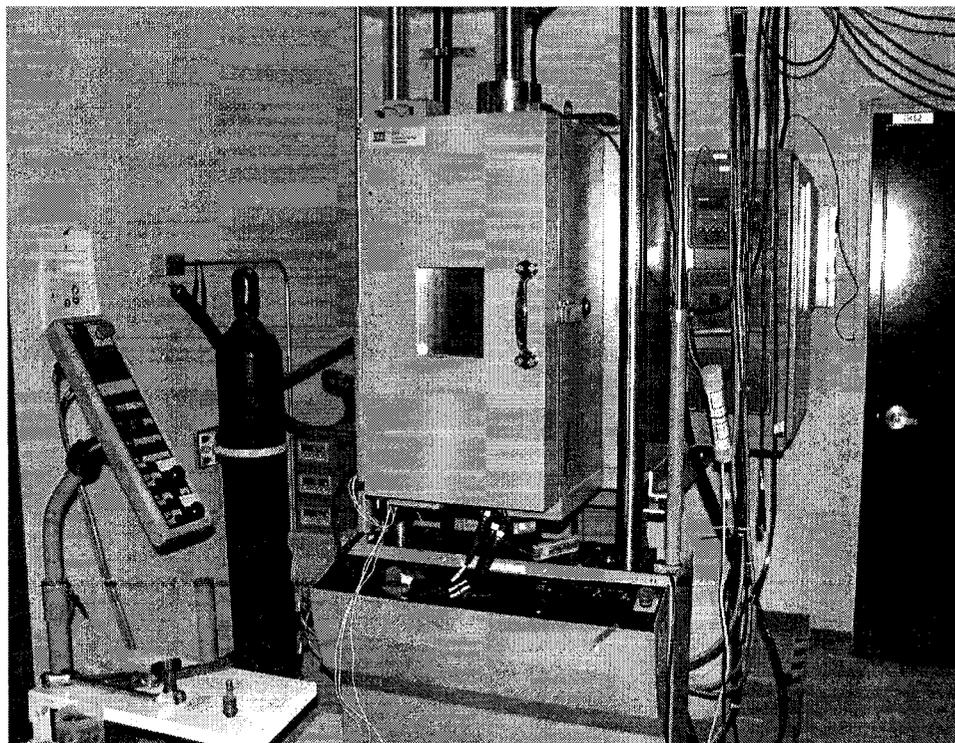


Figure 14 Appareil MTS pour l'essai TSRST

## 1.6 Sommaire

Les enrobés bitumineux sont constitués des granulats et du bitume. Le bitume est le liant entre les particules granulaires. L'angularité de la pierre concassée est importante pour la fabrication des enrobés. Également, la granulométrie et la résistance sont des caractéristiques recherchées dans les granulats.

L'enrobé a un comportement viscoélastique fortement dépendant de la température. La température influence ses propriétés mécaniques : la rigidité ou module complexe, le comportement en fatigue, la résistance à la fissuration thermique, et le comportement à l'orniérage.

La caractérisation des enrobés bitumineux est faite à l'aide des essais homogènes et non homogènes selon la distribution des contraintes et des déformations à l'intérieur de l'échantillon. Les essais de compression répétée pour mesurer le module complexe, de traction directe, et de retrait thermique empêché sont des essais classés comme homogènes. Les essais Marshall, à la presse à cisaillement giratoire, de compression diamétrale, et de flexion sont classés non homogènes.

Dans le prochain chapitre, l'orniérage sera traité dans son ensemble. Il y aura la définition, les types d'ornières, les facteurs qui influencent son apparition et les essais de mesure directe ou indirecte, de même que les essais de simulation de trafic qui mesurent l'orniérage. Tout cela afin d'avoir un aperçu global de l'orniérage.

## **CHAPITRE 2**

### **ORNIÉRAGE**

#### **2.1 Introduction**

L'orniérage des chaussées souples a toujours été un problème important, mais plus particulièrement durant les dernières décennies avec l'augmentation de la charge par essieu et des pressions plus élevées des pneus. L'orniérage diminue la durée de vie d'une chaussée et crée un risque pour l'usager. Des volumes plus élevés de trafic et l'utilisation plus répandue des pneus radiaux avec des pressions plus élevées de gonflage ont augmenté le potentiel d'endommagement des chaussées dû à l'orniérage (Skok et al., 2002). En Europe, la résistance à l'orniérage est une des principales exigences en matière de performance des chaussées en enrobés bitumineux (EUROBITUME, 1999)

Cette partie décrit le phénomène d'orniérage, de même que les mécanismes qui sous-tendent les essais mis au point pour son étude.

#### **2.2 Définition de l'orniérage (déformations permanentes)**

Les déformations permanentes ou ornières sont des dépressions longitudinales dans les traces des roues (Skok et al., 2002). Selon l'origine, on distingue deux types d'orniérage des couches bitumineuses : l'orniérage des couches support et l'orniérage des couches bitumineuses (Dongmo, 2005).

Les ornières des couches de support, appelées ornières de grand rayon ou structurelles (figures 15 et 16), trouvent leur origine dans le tassement du sol support. Elles sont dues à des épaisseurs insuffisantes, un compactage insuffisant et un drainage insuffisant des couches structurelles (Service des chaussées du ministère des Transports du Québec, 2005).

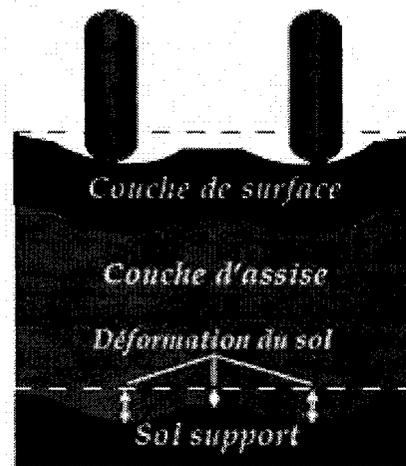


Figure 15 Orniérage à grand rayon  
(Source : site internet du SCREG Procédés et produits, 2006)

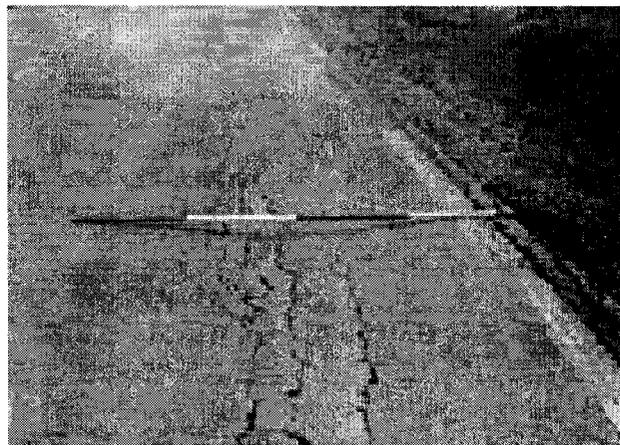


Figure 16 Ornière à grand rayon  
(Source : site internet du MTQ, 2006)

Les ornières dans les couches d'enrobés bitumineux (ornières à faible rayon) (figures 17 et 18), causées par le trafic, sont produites par l'application répétée des charges élevées

sur l'enrobé ou par la résistance au cisaillement insuffisante du mélange bitumineux. Par conséquent, une consolidation et/ou le mouvement latéral de l'enrobé sous le trafic se produit (Skok et al., 2002).

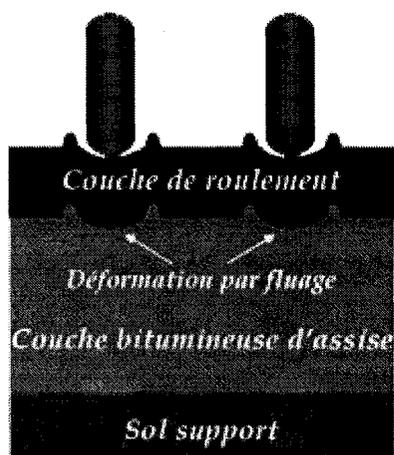


Figure 17 Orniérage à faible rayon  
(Source : site internet du SCREG Procédés et produits, 2006)



Figure 18 Ornière à faible rayon  
(Source : site internet du MTQ, 2006)

### 2.3 Facteurs qui influencent l'apparition de l'orniérage

Deux catégories de facteurs sont responsables de l'apparition des déformations permanentes : la composition de l'enrobé et les sollicitations externes sur l'enrobé. Le premier facteur, relié à la composition de l'enrobé, est la viscosité du liant. Il y a apparition d'ornière lorsque les granulats se déplacent. C'est la viscosité du liant qui permet ou non ce déplacement. Ceci explique la relation très forte entre la viscosité du liant et la susceptibilité de l'enrobé à l'orniérage (Dongmo, 2005).

Pour des liants non modifiés, la valeur H de la classe de performance, soit la température maximale en °C, a une incidence directe sur la résistance à l'orniérage. Plus la valeur H est élevée, meilleure est la résistance à l'orniérage. Cependant, pour des valeurs égales de H, les bitumes modifiés conduisent généralement à une meilleure résistance à l'orniérage (Service des chaussées du ministère des Transports du Québec, 2005).

L'autre composant de l'enrobé est le squelette granulaire qui, selon sa granulométrie et l'angularité de ses particules, donne à l'enrobé une meilleure performance par rapport aux déformations permanentes (Service des chaussées du ministère des Transports du Québec, 2005). Les enrobés avec une granulométrie bien étalée et très proche de la courbe de masse volumique maximale, donc avec un VMA (Vides intergranulaires) faible, sont les plus résistants à l'orniérage (Service des chaussées du ministère des Transports du Québec, 2005). Cependant, un enrobé trop près de cette courbe est plus vulnérable à la fissuration. Il faut s'assurer d'avoir un juste équilibre entre la résistance à l'orniérage et la résistance à la fissuration.

La méthode de calcul LC (Laboratoire des chaussées du MTQ) recommande le respect de la zone de restriction dans la courbe granulométrique pour les enrobés grenus (figure 19). Si la courbe granulométrique d'un enrobé passe par la zone de restriction, cela indique que l'enrobé a trop de fines et qu'il risque d'être susceptible à l'orniérage et

d'être problématique pour sa mise en place (Service des chaussées du ministère des Transports du Québec, 2005).

La compacité du mélange est également un facteur important sur la résistance à l'orniérage. Trop de vides causent un postcompactage sous le trafic. La teneur en vides diminue progressivement jusqu'à atteindre des valeurs voisines de 0 à 1%. L'enrobé se comporte alors comme un "pseudo liquide " et se déforme pour donner des ornières avec des bourrelets caractéristiques (Dongmo, 2005).

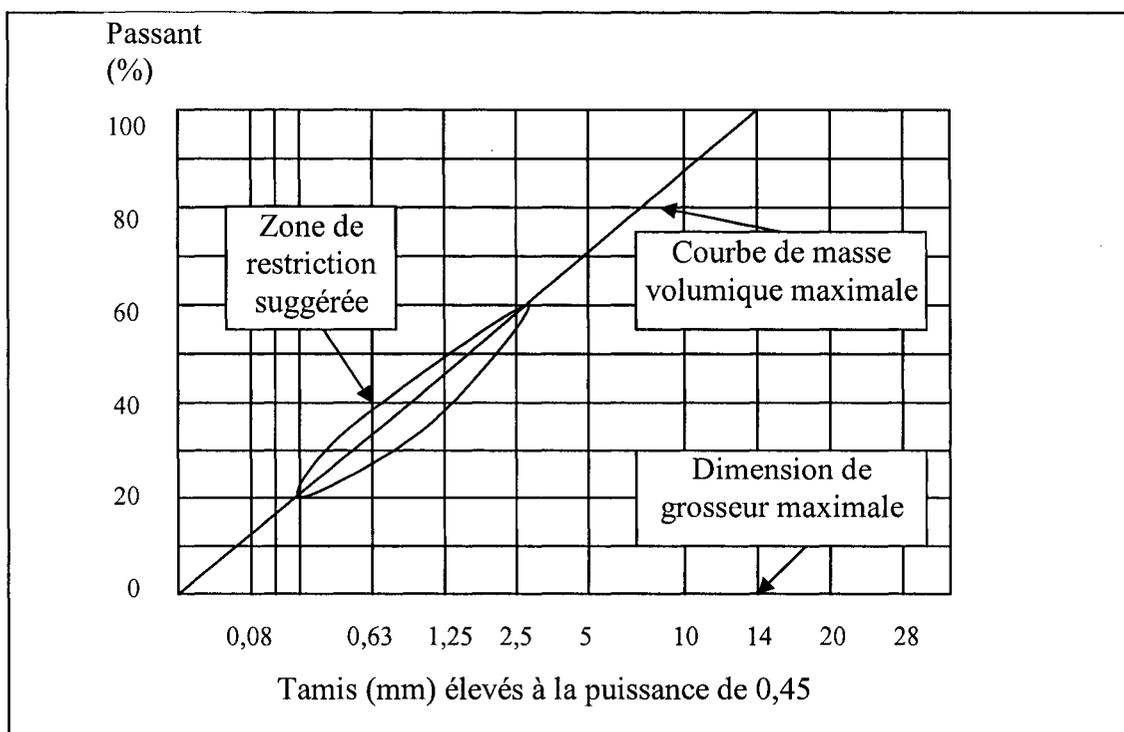


Figure 19 Zone de restriction dans la courbe de masse volumique maximale (Source : Services des chaussées du ministère des Transports du Québec, 2005)

La température, la charge et la vitesse de sollicitation sont des facteurs externes aux matériaux. La température influence directement la viscosité du bitume et le module. Hosfra et Klomp (1972) ont démontré à l'aide d'un simulateur de trafic que l'orniérage augmentait avec un facteur de 250 à 350 lorsque la température passait de 20 à 60°C.

La charge due au trafic est traduite en pression de contact entre le pneu et l'enrobé. Celle-ci induit des efforts de cisaillement dans les couches de surface, principalement au voisinage du pneu, qui pétrissent le matériau. Ces efforts s'ajoutent à la contrainte verticale. Depuis les années 80, la pression moyenne de contact a augmenté d'environ 0,1 MPa à cause de l'augmentation de la pression dans les pneus et aussi à cause de l'augmentation du nombre de tridems. Au Québec, la charge maximal par essieux tridem est de 26 000 kg, et par essieux tandem de 18 000 kg (Site internet du MTQ, 2006).

La fréquence de chargement ou la vitesse de circulation principalement des poids lourds se traduit en fréquence de sollicitation pour l'enrobé. Plus la vitesse du véhicule est réduite, plus le "temps de charge" est important et plus le module apparent du matériau bitumineux est faible. Ce paramètre a un effet similaire à celui de la température. L'orniérage augmente quand la vitesse des véhicules diminue (Odeon, 1995).

#### **2.4 Essais utilisés pour l'étude de l'orniérage**

Il existe de nombreux essais mis au point pour étudier les déformations permanentes ou mesurer la résistance à l'orniérage des mélanges d'enrobés bitumineux. On les classifie en trois groupes d'essais : 1) les essais de mesure directe de la profondeur des ornières dans la chaussée, 2) les essais de corrélation qui font des prédictions des taux de déformation permanente des enrobés, et 3) les essais de simulation de trafic qui mesurent les profondeurs des ornières soit en laboratoire ou soit en simulation à échelle réelle.

##### **2.4.1 Essais de mesure directe des ornières**

**Transversoprofilographe numérique VEC450** (figure 20) est une poutre fixe qui permet de mesurer de façon ponctuelle et automatique les déformations du profil d'une chaussée. La mesure est réglable de 2 à 50 mm pour un profil de plus de 3,5 m de largeur. L'appareil est constitué d'une règle rigide de 4,5 m de longueur, équipée d'un

inclinomètre, d'un chariot porté par la règle et d'un système d'acquisition et de traitement des données.

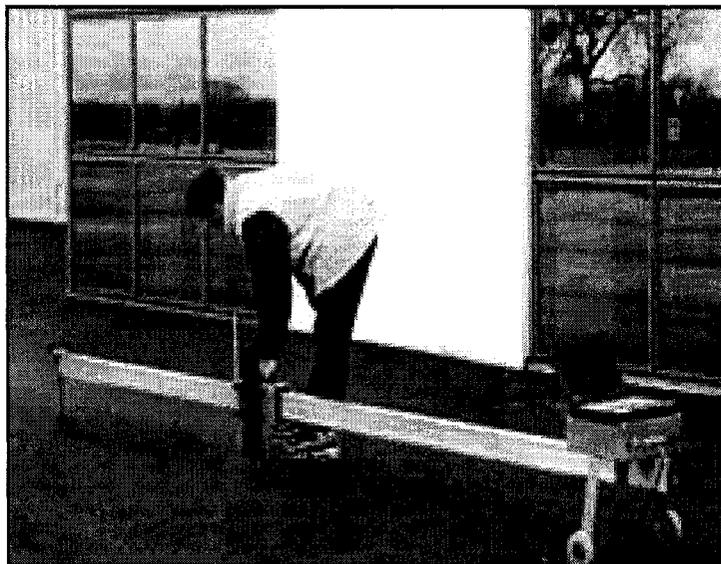


Figure 20 Transversoprofilographe numérique VEC450  
(Source : site internet de Vectra, 2006)

Avec cet appareil, par enregistrement continu sur toute la surface, le relevé statique d'un profil transversal ou longitudinal de la chaussée selon la norme NF P 98-219-4 est effectué (site internet de Vectra, 2006).

**Transversoprofilographe LCPC W1** est un appareil constitué d'une règle rigide en alliage léger de 4 m de long et un chariot enregistreur mobile porté par la règle. La règle repose sur 2 supports coulissants ce qui permet un réglage rapide de la hauteur.

Lors d'un essai sur un profil donné, la règle doit être positionnée horizontalement en utilisant un niveau à bulle de précision. Le chariot est déplacé le long de la règle. Les ordonnées du profil en travers sont exprimées en millimètres et enregistrées en grandeur réelle (échelle 1/1) tandis que, la transmission du système de défilement étant de 1/20, les abscisses sont repérées en échelle réduite.

Le transversoprofilographe permet de déterminer la profondeur maximale de l'ornièrè ainsi que l'éventuelle épaisseur du film d'eau (site internet des Autoroutes et routes de Wallonie, 2006).

**Transversoprofilographe (QPM)** (figure 21) est un appareil utilisé pour faire une représentation graphique du profil transversal des chaussées et de leurs caractéristiques. Il s'applique à l'auscultation routière pour la planification systématique des travaux d'entretien, contrôle des profondeurs des ornières et hauteurs théoriques d'eau dans les ornières pour l'appréciation du risque d'aquaplanage.

Le profil transversal est fait au moyen de 48 capteurs à ultrasons avec positionnement permanent à l'aide d'un système gyroscopique dans les 3 directions et assisté d'un système GPS différentiel. Les mesures sont effectuées tous les 5, 10, 20 ou 25 m, dépendamment de la vitesse du véhicule qui peut atteindre jusqu'à 80 km/h (site internet du SACR S.A., 2006).



Figure 21 Transversoprofilographe QPM  
(Source : site internet du SACR S.A., 2006)

**Transversoprofilographe à ultrasons TUS** est un appareil de mesure en continu de l'uni transversal d'une chaussée par capteurs à ultrasons. L'essai consiste à déterminer

l'ornièrre caractéristique moyenne par section de 100 m. L'appareil utilisé (figure 22) est conforme aux spécifications du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC – France).

L'essai se réalise sur un revêtement propre et sec à une vitesse maximale de 50 km/h. La mesure du profil transversal est faite tous les trois mètres sur chaque voie de circulation. Le logiciel TUS fait le traitement des données qui donnent comme résultats : les ornières caractéristiques, déformation de rive, déformation hors rive, déformation totale, indice de planéité transversal et indice de reprofilage transversal. Le traitement permet également d'obtenir d'autres paramètres tels que déplanéité, bombement, indices de déformation, d'orniérage, etc. (site internet des Autoroutes et routes de Wallonie, 2006).



Figure 22 Transversoprofilographe à ultrasons TUS  
(Source : site internet des Autoroutes et routes de Wallonie, 2006)

**Analyseur de routes automatique ARAN (Automatic road analyser)** (figure 23) est un véhicule multifonctionnel de collecte de données qui recueille l'information en

continu à vitesse élevée, entre 15 mph (24 km/h) et la vitesse de route. Un ARAN est un véhicule particulièrement modifié qui loge un ensemble étendu de sondes et appareils pour mesurer plusieurs paramètres. Les appareils sont : réflectomètres y compris des lasers, des sondes ultrasoniques, un accéléromètre, un système global de positionnement, un gyroscope, des caméras vidéo et un ordinateur.

Le but de ces technologies est de fournir de l'information au sujet de l'état des chaussées. Ces données sont critiques au procédé de décisions de gestion, qui implique des milliards de dollars de capitaux, et aux budgets d'entretien. Un ARAN fournit de l'information pour soutenir de meilleures décisions de gestion des réseaux routiers. Il est capable de mesurer jusqu'à 15 données élémentaires différentes dans un passage simple, avec une grande précision (site internet du Maine DOT, 2006). Une partie de l'information qui peut être rassemblée inclut l'uni (profil longitudinal de la chaussée), l'IRI (Indice de rugosité international) et l'orniérage.

La largeur de voie auscultée, ajustable par pas de 10 cm, est comprise entre 1,90 et 3,60 m. Les profils sont mesurés à intervalles constants déterminés par l'opérateur. Les profils sont relevés à l'aide de capteurs laser ou ultrasonique espacés de 10 cm et fixés sur une rampe de largeur variable. La précision de la mesure est de l'ordre de 1 mm. En plus du profil transversal, une plate-forme inertielle permet de mesurer les angles de tangage et de roulis du véhicule. Ceux-ci sont utilisés pour calculer le profil vrai de la route (site internet de Maine DOT, 2006).



Figure 23 Analyseur de routes automatique ARAN (Automatic Road Analyser)  
(Source : site internet du Maine DOT, 2006)

#### 2.4.2 Essais de corrélation

**L'essai de compression Marshall** mesure les grandeurs de la stabilité Marshall (SM), de la force maximale appliquée et du fluage Marshall (FM). Il existe une relation entre ces résultats et la résistance à l'orniérage (Dongmo, 2005).

Cependant, dans leur étude, Berthelot et al. (1999) ont trouvé que la stabilité Marshall et l'essai d'écoulement plastique des échantillons n'ont montré aucune corrélation statistiquement significative à l'orniérage. La relation avec la rigidité Marshall et le module Marshall s'est également avérée non significative.

**Les essais de compression diamétrale sous chargement répété** ont été utilisés par Thiessen et al. (2000) pour étudier les corrélations entre le taux d'orniérage comme indicateur de performance et les propriétés volumétriques et mécaniques de plusieurs enrobés. Le taux d'orniérage est défini comme le rapport entre la profondeur de l'ornière et la racine carrée du trafic équivalent (nombre d'essieux équivalents, exprimé en millions). L'essai est conduit à une vitesse de 0,1 mm/min. Cette vitesse est bien plus basse que les vitesses couramment employées dans ce type d'essai, et ce afin de mieux

suivre l'établissement des déformations de l'éprouvette. Les déformations verticales et horizontales sont mesurées au cours de l'essai, réalisé à une température de 25 °C.

Selon Brown et Cross (1989), il n'y a aucune corrélation entre l'orniérage et la contrainte appliquée et la déformation. La contrainte de rupture et les déformations de rupture ne semblent pas corrélées à l'orniérage. Cependant, le coefficient de Poisson, qui est le quotient entre la déformation latérale et la déformation axiale, a une très forte corrélation avec l'orniérage.

Dans son étude, Khosla (2005) a utilisé l'essai de compression diamétrale sous chargement répété (Repeated Shear Test, RSCH) pour démontrer la susceptibilité d'un mélange d'enrobé à l'orniérage. Il a prouvé que les mélanges, qui ont une résistance à la traction faible, ont aussi des profondeurs d'ornière plus élevées, tel que présenté à la figure 24.

**L'essai de fluage** consiste à soumettre une éprouvette cylindrique à une compression uniaxiale constante à température constante pour mesurer la déformation à intervalles réguliers de temps. Ce test est homogène et est le plus répandu, du fait de sa simplicité et aussi du fait que la plupart des laboratoires disposent du matériel nécessaire à sa réalisation.

La société SHELL (1991) propose une méthode qui utilise ce type d'essais, effectués à 40 °C dans l'eau sous une contrainte de 0,1 MPa. Le module de l'enrobé est déterminé par l'abaque de Van der Pol. L'analyse des résultats de cet essai et de ceux de mesures d'ornières sur manège a permis de mettre au point le module de prédiction d'orniérage dans le logiciel SPDM (Shell Pavement Design Method) (Verstraeten, 1995).

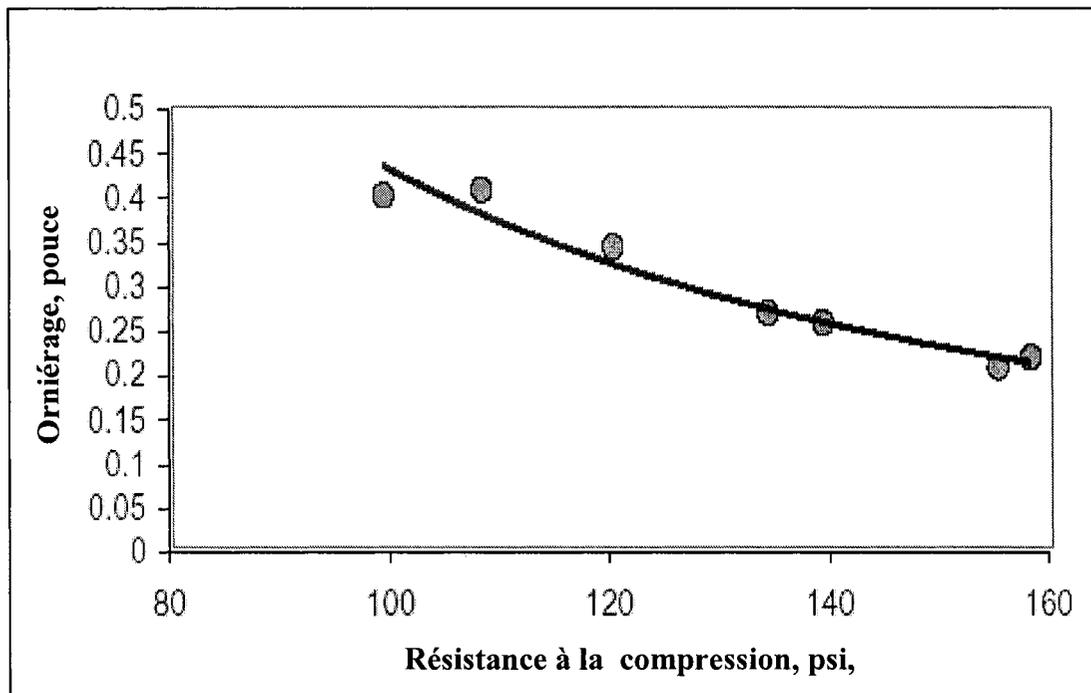


Figure 24 Profondeurs d'ornières d'enrobés versus la résistance à la compression diamétrale.

(Source : Adapté de Khosla, 2005)

L'essai peut mettre en évidence des valeurs seuils de la contrainte ( $\sigma_s(T)$ ) au-dessous de laquelle la déformation permanente se stabilise à long terme. Au-dessus de cette valeur critique, la déformation augmente jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

**Les essais à chargements répétés** sont pratiqués sur des éprouvettes cylindriques d'enrobés bitumineux, chargées axialement, placées à l'intérieur de cellules triaxiales. Les éprouvettes peuvent être obtenues par carottage in situ de couches de chaussées ou par carottage de plaques fabriquées en laboratoire. Les diamètres (D) et hauteurs (H) d'éprouvette utilisés varient sensiblement d'un essai à l'autre (D est généralement

compris entre 50 et 150 mm, tandis que H peut varier de 30 à 200 mm). Les élancements (rapport entre hauteur et diamètre) d'éprouvette utilisés, sont variables entre 0,5 et 2,0.

Comparativement aux essais de fluage, ces essais permettent de reproduire les cycles de charge/décharge, qui jouent un rôle important dans l'évolution des déformations permanentes des enrobés *in situ*. Par rapport aux essais à l'orniéreur, les essais de chargement répété ont deux avantages : 1) ils permettent d'évaluer le comportement des enrobés en conditions distinctes d'intensité de chargement, de vitesse de chargement et de température, de celles proposées par les orniéreurs, et 2) ils sont réalisés pour des conditions de contraintes et de déformations homogènes, les résultats sont produits sous forme de loi de comportement en fonction des paramètres de chargement (Dongmo, 2005). Par contre, ces essais sont insuffisants pour analyser le fluage de l'enrobé, à cause de l'absence de confinement et de mouvement à l'intérieur de l'échantillon (Dongmo, 2005).

**L'essai de cisaillement répété à hauteur d'éprouvette constante RSCH** (Repeated Shear at Constant Height) est l'essai le plus fréquemment utilisé aux États-Unis pour étudier les déformations permanentes (Superpave Shear Tester, SST) (figure 25). Lorsque l'enrobé est bien compacté, le déplacement des granulats produit une dilatation de l'enrobé qui tend à faire augmenter la hauteur de l'éprouvette. Les chercheurs ayant développé la méthode considèrent que ce phénomène, dit de dilatance, doit être supprimé en maintenant la hauteur de l'éprouvette constante, afin de rendre l'essai plus réaliste. Ce phénomène de dilatance a des conséquences très importantes sur la résistance au cisaillement (Bonnot, 1994 et Kandhal, 2002).

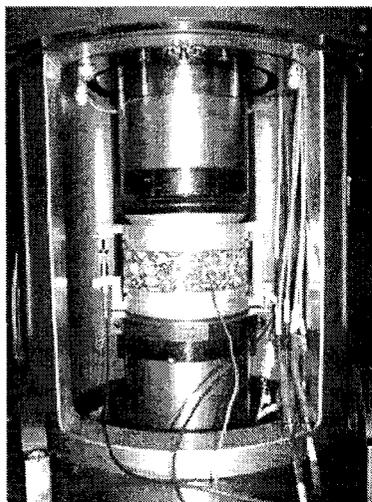


Figure 25 Essai de cisaillement répété à hauteur d'éprouvette constante  
(Source : site internet de l'Asphalt Pavement Technology, 2006)

Une contrainte de cisaillement répétée de 0,070 MPa est appliquée par impulsions de 0,1s suivie de périodes de repos de 0,6 s, pendant 5000 cycles ou jusqu'à une déformation maximale permanente de 5 %, alors que la hauteur de l'éprouvette est maintenue constante. On enregistre la déformation permanente horizontale, et la contrainte verticale nécessaire au maintien de la hauteur constante de l'éprouvette. On relève la courbe de déformation représentant l'évolution du cisaillement en fonction du nombre de cycles de chargement.

Selon une étude de Stuart et Mogawer (2001), dans laquelle le cumul de contrainte permanente de cisaillement a été mesuré à une teneur en vides de 7,0 %, à une température de 50°C et à 5000 cycles. L'effort de cisaillement appliqué était de  $69 \pm 5$  kPa. Avec un temps de chargement de 0,1 s et un temps de repos de 0,6 s. La contrainte permanente cumulative de cisaillement est généralement une meilleure mesure de résistance à l'orniérage, comparée à  $G^*$  et à  $G^*/\sin$ , parce qu'elle explique des changements de la quantité de dommages de cycle à cycle. S'il y a un abaissement des contraintes permanentes cumulatives de cisaillement, cela indique plus de résistance à

l'orniérage. L'équation suivante a été établie dans cette étude comme relation entre les résultats de l'essai SST et l'orniérage :

$$RD = 1,87 + 0.0004 (CPSS); \quad r^2 = 0,92 \quad (\text{éq 1.6})$$

Où RD = orniérage de la couche d'enrobé à 58°C, mm;

CPSS = contrainte permanente cumulative de cisaillement à 5 000 cycles et 50°C;

$r^2$  = coefficient de corrélation.

Les résultats obtenus de cet essai montrent une très forte corrélation à l'orniérage par comparaison aux ornières relevées *in situ* (Anderson et al., 1999). La résistance à l'orniérage se corrèle à la déformation en cisaillement maximale selon le tableau III.

Tableau III

Critère d'évaluation de la résistance à l'orniérage à l'aide de l'essai de cisaillement répété à hauteur d'éprouvette constante.

Déformation en cisaillement maximale (%)	Comportement à l'orniérage
<1	Excellent
$1 < \chi < 2$	Bon
$2 < \chi < 3$	Moyen
$\geq 3$	Mauvais

(Source : Bukowski et Harman, 1997)

#### 2.4.3 Essais de simulation de trafic utilisés pour mesurer l'orniérage

Ces essais ont été mis au point principalement en France, aux États-Unis et en Allemagne. Ils consistent en l'application d'une charge roulante sur l'enrobé dans des

conditions de température fixées entre 45°C et 60°C. Le passage répété de la charge provoque une ornière dont on mesure la profondeur. Il existe plusieurs appareils de ce type, les plus courants sont :

- Le manège de fatigue LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), (France);
- National Center for Asphalt Technology (NCAT) Test Track, (États-Unis);
- L'APA (Asphalt Pavement Analyzer), (États-Unis);
- Le HWTD (Hamburg Wheel Tracking Device), (Allemagne);
- Le PURwheel développé à l'Université de Purdue, (États-Unis);
- L'ornièreur LCPC, (France).

Dans les prochains paragraphes, ces différents appareils seront décrits en mettant en relief leurs principales caractéristiques.

**Le manège de fatigue LCPC** (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) est installé à Nantes-Bouguenais. Il est destiné à étudier le comportement mécanique des structures routières soumises à un trafic lourd accéléré. Il permet de suivre l'évolution d'une chaussée en exerçant en quelques mois le même nombre de charges qu'elle subirait normalement pendant les quinze ou vingt ans de sa durée de vie.

Les essais peuvent concerner les structures de chaussées neuves, mais aussi leurs techniques d'entretien et de renforcement. Les observations et les mesures permettent de suivre sous trafic le comportement à la fatigue et à l'orniérage des matériaux, l'évolution des caractéristiques de surface des chaussées, ou l'usure des pneumatiques.

L'ensemble comprend quatre bras entraînés en rotation par une motorisation électrohydraulique centrale (figure 26). Les charges sont appliquées en bout de bras par des roues jumelées ou des roues simples larges. Le rayon de rotation des charges est réglable entre 15,50 m et 19,50 m par pas de 0,50 m. De plus, les charges effectuent des balayages dans le profil en travers reproduisant ainsi les dispersions observées sous trafic réel. Chaque charge sollicite une bande de roulement réglable jusqu'à 1,60 m de largeur.

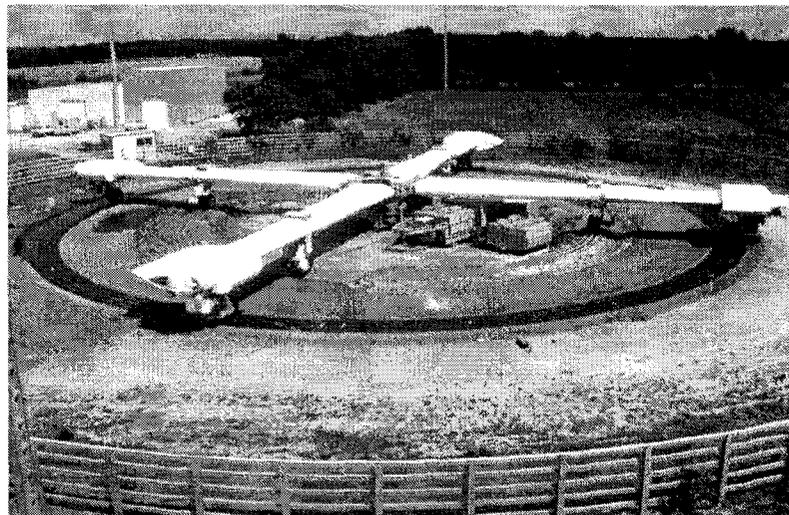


Figure 26 Manège de fatigue du LCPC, Nantes (France)  
(Source : site internet du LCPC, 2006).

Un système de suspension permet de contrôler les charges appliquées aux chaussées expérimentales pendant toute la durée de l'expérience. Elles peuvent être réglées entre 45 kN sur une roue simple et 135 kN sur un essieu tridem à roues simples ou un essieu tandem à roues jumelées (figure 27). La vitesse maximale de chargement est de 100 km/h. Un dispositif de suspension permet de garantir la valeur de la charge appliquée aux vitesses élevées et sur des chaussées présentant des dénivelées ou des dégradations.



Figure 27 Essieu à roues jumelées/ Essieux à roues simples en tridem  
(Source : site internet du LCPC, 2006)

En 1998, l'Association des sociétés françaises d'autoroutes et le LCPC (Laboratoire Central de Ponts et Chaussées) ont réalisé conjointement, avec le manège de fatigue, une étude visant à comparer l'agressivité vis-à-vis de l'orniérage de deux configurations d'essieux : l'essieu à roues simples et l'essieu monté en tridem. L'expérience a été réalisée sur quatre couches de roulement : un béton bitumineux témoin et trois bétons bitumineux à base de liants à faible susceptibilité thermique, proposés par les compagnies pétrolières. Les principales conclusions de l'étude ont été (Corté et al, 1998) :

1. Efficacité des liants spéciaux à faible susceptibilité thermique pour diminuer l'orniérage;
2. Bonne reproduction du comportement observé en vraie grandeur, par l'essai en laboratoire avec l'orniéreur LPC;
3. Mise en évidence du rôle secondaire joué par le temps de repos séparant les chargements, vis-à-vis de l'orniérage des couches de surface;

Une problématique du type d'essai comme le manège de fatigue de Nantes est l'absence de contrôle de la température durant l'essai.

**Le National Center for Asphalt Technology (NCAT) Test Track** faite partie d'une étude commanditée par les départements des transports de l'Alabama, de l'Indiana, de la Florida, de la Géorgie, du Mississippi, de la Caroline du Nord, de l'Oklahoma, de la Caroline du Sud et du Tennessee, de même que par l'administration fédérale des routes aux États-Unis (FHWA). Beaucoup d'appui a été fourni par l'industrie du domaine routier comprenant APAC inc., ASTEC Industries, Caterpillar inc. Compaction America, Vulcan Materials, Ergon Inc. et Koch Materials.

Cette étude examine des réponses dynamiques des sections des chaussées sous le chargement de poids lourds pour établir des liens mécanistes entre la réponse de la chaussée (effort ou contrainte) avec sa performance (orniérage et fissuration).

Des mélanges expérimentaux sont disposés sur 45 sections des chaussées de 200 pieds (60,96 m) dans un ovale de 1.7 mille (2,735 km) de longueur (figure 28). Des sondes pour mesurer la température et l'humidité sont installées de même que des jauges de déformations. Des données d'une station météorologique automatisée *in situ* pour caractériser avec précision l'environnement d'exécution pour chaque section expérimentale sont également disponibles.

Ces structures de chaussées sont prévues pour satisfaire les besoins du trafic avec le traitement minimal extérieur pour maintenir une bonne surface au-dessus d'une durée de vie de 50 ans. Puisque l'attention de l'industrie de la construction des routes a été mise sur les chaussées perpétuelles, la recherche a été orientée afin d'examiner les nombreux facteurs qui contribuent à la longue durée de vie des chaussées. Dans le NCAT Pavement Test Track, les chercheurs examinent les effets d'employer des couches supérieures d'enrobés plus raides combinées avec un contenu élevé de bitume dans les couches inférieures du revêtement souple. On théorise que les couches supérieures plus raides aideront à diminuer l'orniérage, alors qu'employer du bitume additionnel dans les

couches inférieures (% de bitume optimal + 0,5 %) augmentera la résistance à la fatigue de la chaussée. Cela est le concept des chaussées à durée de vie prolongée.

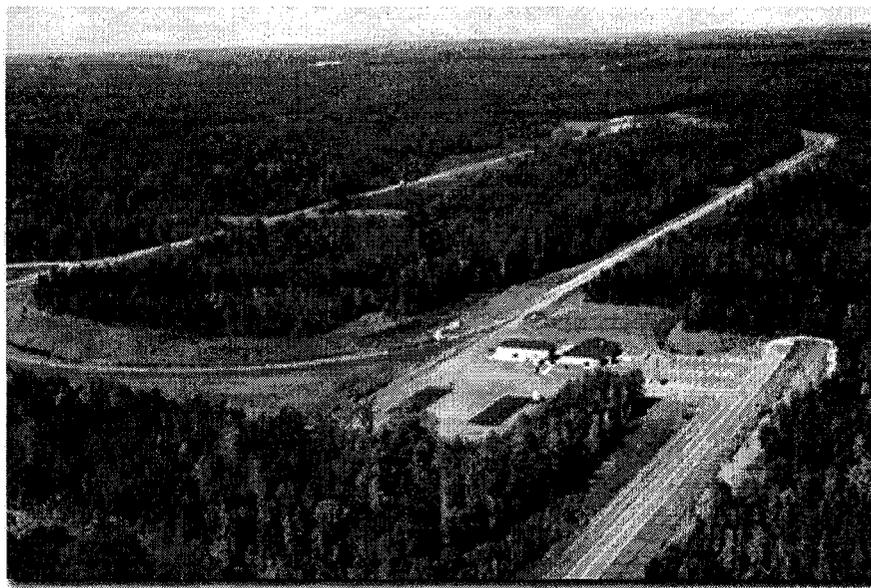


Figure 28 National Center for Asphalt Technology (NCAT) Test Track, Alabama  
(Source: site internet du NCAT Test Track, 2006)

Ce type de recherche est connu en tant qu'essai de performance accéléré, car l'équivalent de 10 à 15 ans de trafic lourd est appliqué sur la piste d'essai en deux ans. Plus de 3,3 millions de milles (5,3 millions de kilomètres) ont été conduits sur la voie du NCAT, afin d'appliquer 20 millions d'ECAS (Équivalent Charge axiale Simple), plus de 2 cycles de vie utile de la chaussée. Les ECAS ont été appliqués avec 4 camions constitués d'un train de trois remorques entièrement chargées.

Chaque camion a tiré une charge de 152 000 livres (69 tonnes) ou 20 000 livres (7,6 tonnes) pour chacun des 7 axes chargés (figure 29), à une vitesse de 45 mph (72 km/h) pendant 17 heures par jour (six jours par semaine).

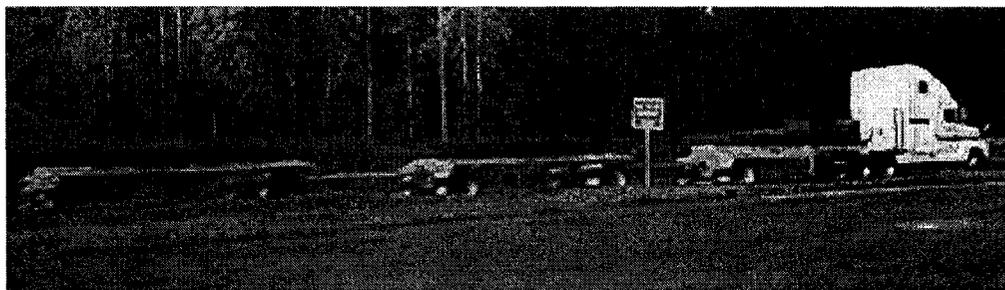


Figure 29 Camion avec train à trois remorques, NCAT Test Track, Alabama  
(Source: site internet du NCAT Test Track, 2006)

L'application des charges lourdes a été accomplie sur cet ovale entre 2003 et 2005, et a repris en septembre 2006 suivant l'accomplissement des activités de reconstruction. À ce moment-là, une flotte de 5 camions fera en moyenne 680 milles (1094 kilomètres) par jour afin d'endommager les sections de chaussées expérimentales.

Pour faire le relevé des données, un profileur à inertie équipé d'un laser fait le balayage à pleine largeur de la chaussée une fois par semaine afin de déterminer la rugosité, la macro - texture, et l'orniérage pour chaque section individuelle. En plus, 3 endroits aléatoires ont été choisis dans chaque section pour servir d'endroit fixe d'essai de densités non destructives. Des profils transversaux sont mesurés le long de ces mêmes endroits chaque semaine de sorte que l'orniérage puisse être calculé.

Comme dans le cas du manège de fatigue du LCPC, pour le NCAT Test Track, il est impossible de contrôler la température d'essai, ce qui gêne la généralisation des résultats.

**L'orniéreur APA (Asphalt Pavement Analyzer)** (figure 30) est un appareil de contrôle multifonctionnel de charge de roue utilisée pour l'évaluation de la déformation permanente, de la fissuration par fatigue et de la susceptibilité à l'humidité des mélanges bitumineux à chaud et à froid. L'APA exerce une charge à l'aide des roues en aluminium

qui font une pression variable de contact (normalement entre 100 et 120 psi (690 et 830 kPa)) qui peut atteindre les 1378 kPa, ce qui représente les conditions de charge réelles des chaussées.



Figure 30 Ornièreur APA (Asphalt Pavement Analyzer)  
(Source: site internet de l'Asphalt Pavement Technology, 2006)

La susceptibilité à la déformation permanente des mélanges bitumineux est évaluée en plaçant les échantillons cylindriques, de 150 mm de diamètre et 75 mm d'épaisseur, sous les charges répétées de roue à une vitesse de 0,6 m/s et en mesurant la profondeur des ornières sous le chemin de roue. L'APA comporte un système d'acquisition de données automatisé, qui relève des mesures des ornières et les montrent dans un format numérique et graphique.

Trois échantillons parallélépipédiques (100 x 300 x 75 mm) ou six échantillons cylindriques peuvent être examinés dans des environnements secs ou submergés (dans l'eau ou tout autre liquide) à des températures contrôlables de 5 à 71°C, et normalement à 8 000 cycles de chargement.

**L'ornièreur Hamburg (Hamburg Wheel Tracking Device)** (figure 31) évalue deux spécimens d'enrobé bitumineux compacts simultanément. Ils sont de 320 mm de longueur, 260 mm de largeur, et 40, 80 ou 120 mm d'épaisseur. La teneur en vides doit

être de  $7 \pm 1\%$ . L'épaisseur de l'échantillon correspond habituellement à trois fois la taille nominale maximale des granulats.

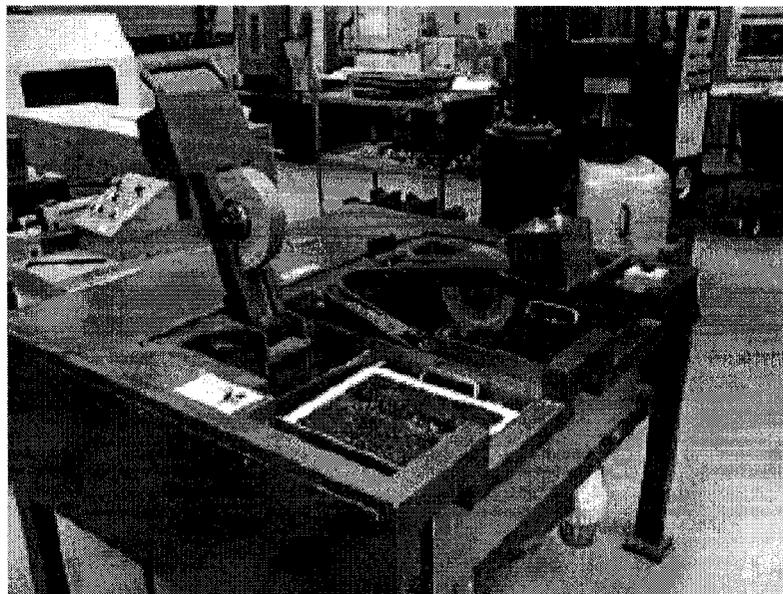


Figure 31 Ornièreur Hamburg (Hamburg Wheel Tracking Device)  
(Source: Aschenbrener, 1995)

Les échantillons sont placés dans un bain d'eau à la température de l'essai (entre 25 et 70°C) pendant 45 minutes, après quoi l'essai est lancé. Les roues en acier (diamètre de 203,5 mm et largeur de 47,0 mm) appliquent une charge de 685 N à une vitesse maximale de 340 mm/s au centre des échantillons, pendant les cycles de chargement (de 10 000 à 20 000 cycles). Des profondeurs d'ornière sont enregistrées tout au long de l'essai et évaluées selon des critères établis par chaque agence (Aschenbrener 1995).

**L'ornièreur PURWheel (Purdue Wheel PURWheel Testing Device)** (figure 32) a été développé à l'Université de Purdue (Indiana). Il permet la simulation des conditions comme l'humidité élevée, la haute température, et le trafic. Deux échantillons (largeur de 29,0 cm et longueur de 31,0 cm) d'enrobé bitumineux à chaud sont compactés avec une

teneur en vides de  $7 \pm 1\%$ . L'épaisseur de l'échantillon est basée sur le type de mélange examiné.

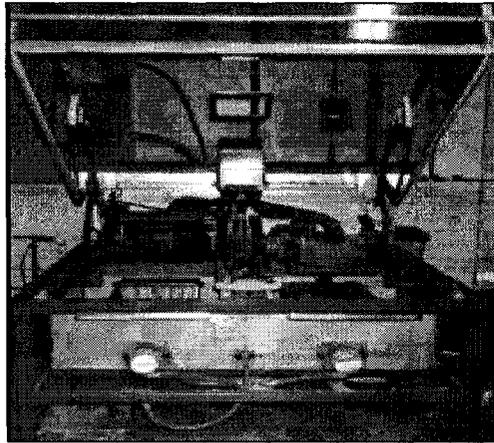


Figure 32 Ornièreur PURWheel (PURWheel Testing Device)  
(Source: Pan et White, 1999)

Le PURWheel permet de tester deux échantillons simultanément, l'un d'eux dans un bain d'eau chaude et l'autre dans un environnement chaud et sec à une température de 55 à 60°C. La charge, appliquée par un pneumatique avec une pression de 793 kPa (115 livres par pouce carré), crée une pression de contact de 620 kPa (90 livres par pouce carré). Le pneu passe au-dessus des échantillons à une vitesse de 332 mm/s pour 20 000 cycles ou jusqu'à 20 mm de déformation. Les résultats des deux échantillons sont comparés en divisant le nombre de cycles nécessaire pour avoir une déformation de 12,7 mm de l'échantillon mouillé par le nombre de cycles pour avoir la même déformation de l'échantillon sec (Pan et White, 1999).

**Le simulateur de trafic LCPC ou ornièreur** exige que les échantillons d'essai soient compactés dans le compacteur de plaques du LCPC. Pour ce faire, il faut suivre la norme NF P 98-250-2, novembre 1991. *Préparation des mélanges hydrocarbonés. Partie 2 : compactage de plaques.* Cette norme est à l'origine de la norme européenne

(prEN12697-33 *Mélanges bitumineux. Méthodes d'essai pour mélanges hydrocarbonés à chaud – Partie 33 : Préparation d'éprouvette et compacteur de plaques*) et de la méthode d'essai québécoise (LC 26-400 *Préparations des enrobés : Compactage de plaque d'enrobé*).

Le but de l'essai est de définir un moyen de compactage de plaques de mélanges hydrocarbonés par l'effet d'une charge roulante (figures 33 et 34). La masse d'enrobé est compactée dans un moule parallélépipède (L=50 cm, l=18 cm, h=10 ou 5 cm et L=60 cm, l = 40 cm, h= 15 ou 20 cm; avec une précision de 0,1 cm dans les dimensions intérieures) à l'aide d'une charge (réglable entre 1 et 10 kN à  $\pm 5\%$  de près) appliquée par une ou plusieurs roues équipées de pneumatiques, qui exécutent des passes à vitesse constante parallèlement à l'axe de la plaque selon un plan de balayage spécifié.

Les températures de chauffage pour le malaxage et le compactage des plaques d'enrobés sont celles indiquées dans la méthode d'essai LC 26-003 portant sur l'essai à la presse à cisaillement giratoire. Cependant, le principe de l'essai est basé sur les normes AFNOR P 98-250-2 *Préparation des mélanges hydrocarbonés; Partie 2 : Compactage de plaques* et P 98-253-1 *Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés; Partie 1 : Essai d'orniérage*, qui sont présentées à l'annexe 1.

Le simulateur de trafic LCPC (figure 35) est un outil de base pour la formulation et l'étude des enrobés bitumineux. L'essai d'orniérage pratiqué sur ce simulateur rend compte de l'influence des différents paramètres sur le comportement à chaud des enrobés. Sa répétitivité et sa reproductibilité qui sont de l'ordre de 1 % au niveau d'une profondeur d'ornière de 7 %, le situent comme un essai fidèle (Brown et Gibb, 1996).

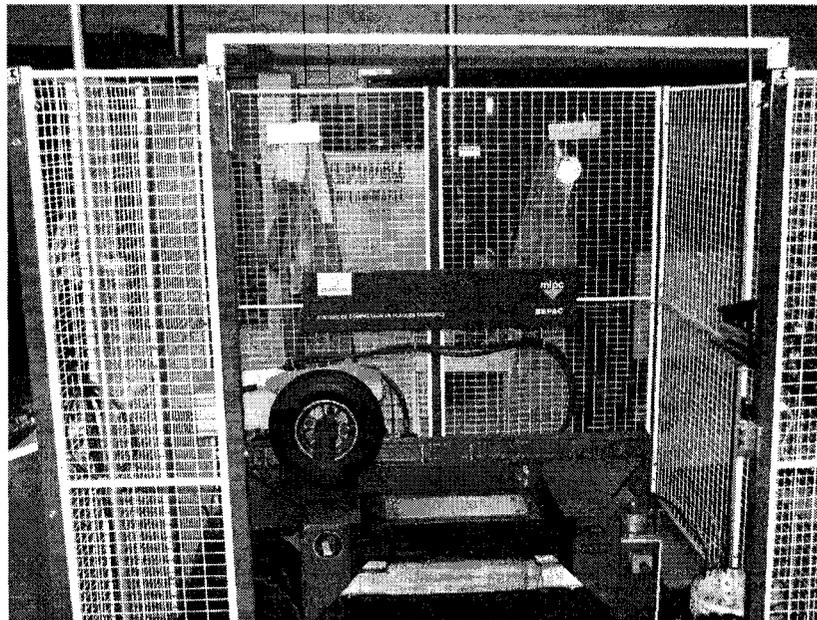


Figure 33 Compacteur de plaques du LCPC

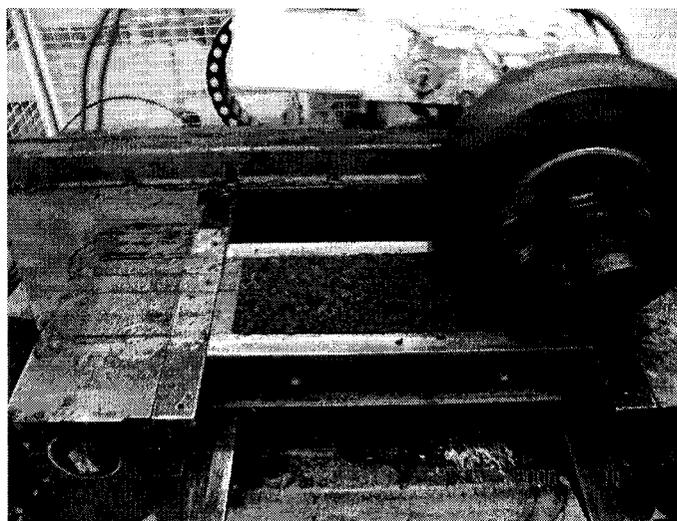


Figure 34 Compactage d'une plaque avec le compacteur du LCPC

Il permet de vérifier en laboratoire l'aptitude des revêtements bitumineux à résister aux déformations du type orniéage – fluage (Service des chaussées du ministère des Transports du Québec, 2005). Il permet également de comparer des enrobés et de les

évaluer par rapport aux exigences spécifiées dans les normes. En revanche, des décalages seraient parfois observés entre les performances en laboratoire et *in situ* (Bonnot, 1984). En plus, il ne permet pas de prendre en compte la variabilité des conditions réelles des chaussées (température, charge, balayage de charge, et l'empilement des couches d'enrobés) (Di Benedetto et Corté, 2004).

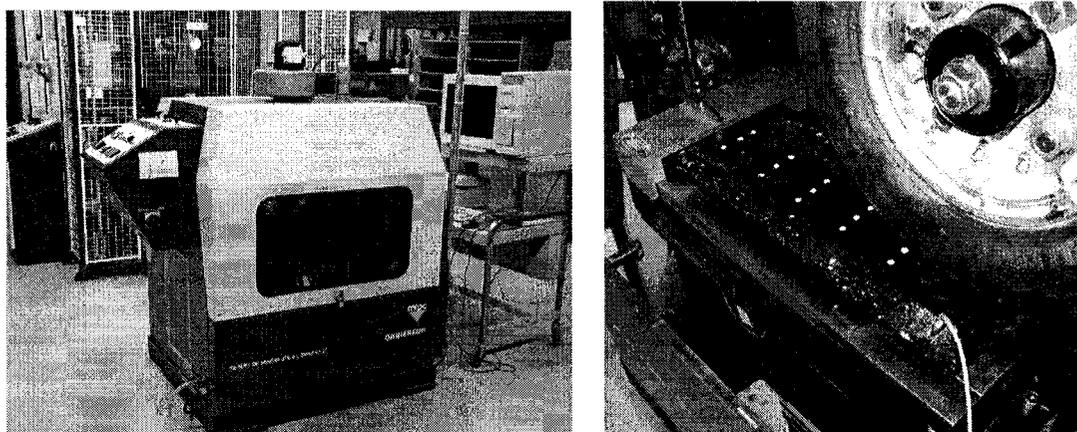


Figure 35 Ornièreur du LCPC

Des éprouvettes parallélépipèdes ( $L=500$  mm,  $l=180$  mm,  $h=100$  ou  $50$  mm) d'enrobés issus d'un prélèvement effectué sur la chaussée ou fabriquées en laboratoire sont soumises aux passages répétés d'une roue équipée d'un pneumatique. La roue exerce une charge constante de  $5000 \pm 5$  N. Elle est gonflée à  $6 \pm 0,3$  bar et est animée d'un mouvement alternatif sinusoïdal à la fréquence de 1 Hz. Pendant l'essai, les plaques d'enrobés sont maintenues à température constante de  $50 \pm 2^\circ\text{C}$ ,  $58 \pm 2^\circ\text{C}$  ou  $60 \pm 2^\circ\text{C}$  selon le PG du bitume. Un enregistrement de l'évolution des profondeurs des ornières en fonction du nombre de passages de la charge est fait.

Les éprouvettes fabriquées selon les spécifications de l'enrobé qui est utilisé sur la route sont soumises au passage d'un pneumatique dans des conditions de charge et de pression analogues à celles qui sont engendrées par les véhicules lourds produisant des ornières. La mesure de la profondeur moyenne de l'orniérage en fonction du nombre de passages

du pneumatique caractérise la résistance à l'orniéage de l'enrobé (Service des chaussées du ministère des Transports du Québec, 2005).

Après le compactage des éprouvettes, une période de cure de 48 heures, à la température de la pièce, est effectuée pour les mélanges en laboratoire avant le début de l'essai à l'orniéreur et de 24 heures pour les échantillons prélevés en chantier. L'essai commence en soumettant les éprouvettes au passage de 1000 cycles effectués par les pneumatiques de l'orniéreur à la température de la pièce. Ensuite, l'orniéreur est chauffé à la température de l'essai. On relève l'ornière à plusieurs reprises (100, 300, 1000, 3000, 10 000 et 30 000 cycles) en cours d'essai sur cinq profils (figure 36). On en déduit la courbe d'évolution de la profondeur moyenne d'ornière en fonction du nombre de cycles (figure 36). Les courbes d'évolution de l'ornière moyenne exprimée en % de l'épaisseur en fonction du nombre de cycles sont généralement de la forme :

$$y = A \left( \frac{N}{1000} \right)^b \quad (\text{éq. 1.7})$$

Où  $b$  = pente de la droite de régression

$A$  = profondeur d'ornière à 1000 cycles.

$N$  = nombre des cycles

Le critère d'acceptation d'une formule d'enrobé à l'aide de l'orniéreur LPC repose sur le tracé de cette courbe (figure 37). Pour les matériaux peu orniérants, cette courbe est linéaire dans un repère semi-logarithmique. Pour les matériaux orniérants, elle est linéaire dans un repère bilogarithmique (Dongmo, 2005).

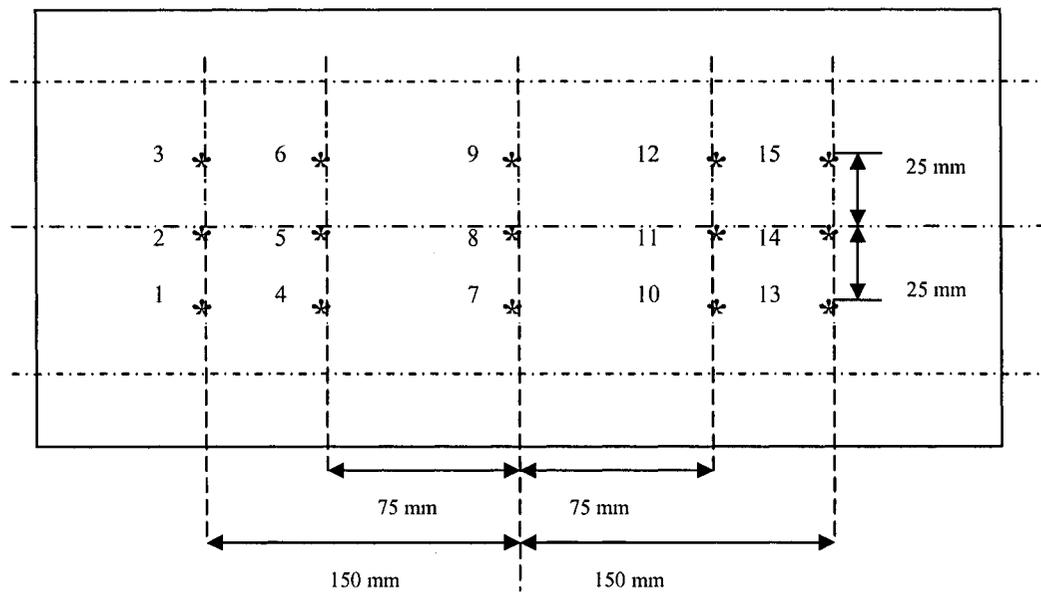


Figure 36 Localisation des points de mesure des profondeurs d'ornières dans une plaque.  
(Source : Projet de méthode d'essai LC 26-410. MTQ 2002)

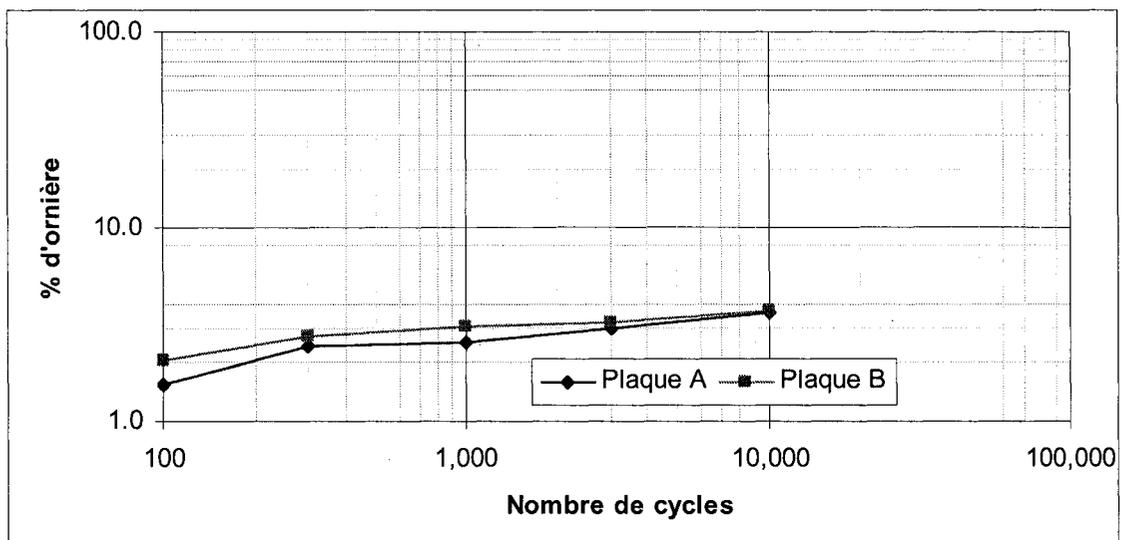


Figure 37 Évolution de la profondeur des ornières lors de l'essai à l'orniéreur

Le tableau IV présente les critères de résistance à l'orniérage.

Tableau IV  
Critères de résistance à l'orniérage

Épaisseur de l'éprouvette (h)	Ornière exprimée en pourcentage de l'épaisseur de l'éprouvette		
	1000 cycles	3000 cycles	30 000 cycles
50 mm	≤ 10	≤ 20	N/A
100 mm	N/A	N/A	≤ 10

N/A : non applicable

(Source : Service des chaussées du ministère des Transports du Québec, 2005)

## 2.5 Sommaire

Les facteurs affectant l'orniérage sont la composition de l'enrobé, de même que la température, la charge appliquée et la fréquence d'application de cette charge. Pour l'étude de l'orniérage, plusieurs méthodes sont utilisées: mesure directe, indirecte et simulation de trafic.

Les essais de mesure directe de l'orniérage ont l'avantage de prendre les profils existants de la chaussée de manière ponctuelle ou en continu. Cela donne un aperçu réel du problème, qui est déjà présent. Par contre, les essais appelés indirects (essais de corrélation), et les essais de simulation de trafic sont réalisés pour prédire le comportement des enrobés à l'orniérage dans la chaussée.

Les essais de corrélation ou de mesure indirecte de l'orniérage utilisent les paramètres mesurés à l'aide d'autres essais pour les corrélérer avec l'essai d'orniérage. Ces essais ont des problèmes de représentabilité des conditions réelles d'apparition de l'orniérage.

Les essais de simulation de trafic mesurent l'orniérage directement dans des éprouvettes en laboratoire ou dans des manèges construits spécialement pour des études du comportement de l'enrobé. Ils évaluent la résistance à l'orniérage des mélanges dans des conditions contrôlées. Cependant, ces essais ont des limitations importantes comme : les effets de bord, l'application de la charge par des roues d'acier, dans certains appareils, et l'impossibilité de contrôler la température dans les essais à vraie grandeur.

L'orniéreur LPC est le simulateur de trafic utilisé au Québec pour la formulation et l'étude des enrobés bitumineux. Cet essai permet de vérifier l'aptitude des enrobés à résister aux déformations permanentes.

Dans le prochain chapitre, la problématique de l'interprétation de la norme et son influence sur la variabilité des résultats de l'essai d'orniérage, fait avec les projets de normes du ministère des Transports du Québec, LC 26-400 (*Préparation des enrobés : Compactage de plaques d'enrobé*) et LC 26 -410 (*Vérification de la résistance au fluage des enrobés au moyen de l'essai à l'orniéreur*) seront discutées.

## CHAPITRE 3

### INTERPRÉTATION DE LA NORME

#### 3.1 Introduction

Les projets de normes LC 26-400 *Préparation des enrobés : Compactage de plaques d'enrobé* et LC 26-410 *Vérification de la résistance au fluage des enrobés au moyen de l'essai à l'orniéreur*, présentées aux annexes 2 et 3, laissent la porte ouverte à plusieurs interprétations. Celles-ci sont la cause d'une grande variabilité des résultats qui a fait l'objet d'un programme d'échanges réalisé par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC, France), Eurovia (Centre de Recherche de Dourdan, France), DJL inc., le ministère des Transports du Québec (MTQ) et le Laboratoire Universitaire sur les Chaussées, Routes et Enrobés Bitumineux (LUCREB) de l'École de technologie supérieure.

Selon St-Jacques et Brosseau (2004), ce programme d'échanges a permis de cibler quelques sources possibles de variations en raison des interprétations possibles du mode opératoire selon le libellé actuel de la norme.

Les différentes interprétations dans la procédure de malaxage et de compactage des plaques, en vue de l'essai à l'orniéreur, sont d'éventuelles sources de variabilité des résultats et par conséquent de litiges entre les entrepreneurs et le MTQ.

Le but de ce mémoire est d'établir une relation entre la température de compactage des plaques d'enrobé et l'orniérage. Par conséquence, la comparaison des résultats est primordiale. La révision des méthodes d'essai et des procédures au laboratoire est donc réalisée afin de diminuer les variations possibles dans les résultats.

### 3.2 Révision des méthodes d'essais et des procédures au laboratoire

**Le curage des plaques d'enrobé** n'est pas mentionné dans la méthode d'essai LC 26-400 (*Préparation des enrobés : Compactage de plaques d'enrobé*). Le curage de l'enrobé est par contre inclus dans les normes LC 26-003 (*Détermination de l'aptitude au compactage des enrobés à chaud à la PCG*), LC 26-045 (*Détermination de la densité maximale*) et ASTM D 6925-3 (*Preparation and Determination of the relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor*). Celui-ci varie de 0,5 à 4 heures et est normalement effectué après le malaxage.

**La température de compaction des plaques** est établie dans l'annexe A de la norme LC 26-400, mais il n'est pas mentionné quoi faire si la température de l'enrobé est inférieure à la température de compactage au moment de compacter la plaque. La température de malaxage et de compactage sont, selon St-Jacques et Brosseaud (2004), sources de variation des résultats de l'essai à l'orniéreur. Pourtant, il n'y a pas de guide à ce sujet dans la norme.

**La quantité d'enrobé** à utiliser pour la fabrication d'une plaque dépend de la densité maximale de l'enrobé et de la compacité visée. La norme LC 26-400 concède qu'il peut y avoir du surplus d'enrobé qu'il faut enlever et peser afin de connaître la compacité réelle de l'enrobé. Cependant, la norme dit que pour calculer la compacité réelle, il suffit d'utiliser la masse réelle d'enrobé dans le moule. Cela peut être interprété de deux façons : 1) utiliser la masse du surplus d'enrobé pour connaître la masse utilisée; ou 2) peser la plaque d'enrobé après le compactage pour calculer la compacité réelle.

Les deux options donneront des résultats différents et il faut souligner que la quantité d'enrobé utilisée est une autre source de dispersion des résultats (St-Jacques et Brosseaud, 2004).

**Le malaxage des plaques de 50 mm**, selon la norme LC 26-400, doit être de deux plaques dans la même gâchée, mais le compactage des plaques est fait une à la fois. Cela signifie que l'enrobé d'une plaque restera dans une panne ou dans le bol de malaxage à la température de la pièce. Une alternative est de le mettre à l'étuve, à la température de compactage en attendant que le compactage de la première plaque soit fini. Avec cette procédure, la méthode de fabrication des deux plaques sera différente. Cela peut entraîner la dispersion des résultats lors de l'essai à l'orniéreur.

Au début de la présente étude, un échange de courriels a été fait avec le responsable du secteur d'enrobés bitumineux du ministère des Transports du Québec afin d'essayer de limiter les sources de dispersion des résultats et aussi de clarifier la procédure.

Il est à noter que deux projets de normes (LC 26-400 et LC 26-410) ont été rédigés en 2006. Ces projets de normes, dans lesquels plusieurs précisions ont été apportées, n'ont été disponibles qu'à la toute fin du présent projet de recherche.

Le prochain chapitre rend compte des choix des matériaux pour le plan expérimental. Le choix des essais pour les caractériser et les paramètres des essais sont présentés. Il y a aussi l'explication détaillée de la méthode d'expérimentation. La procédure de malaxage et de compactage des plaques d'enrobé en vue de l'essai d'orniérage est conçue à la lumière de la révision des méthodes d'essais et des procédures au laboratoire présentée dans ce chapitre.

## **CHAPITRE 4**

### **MATÉRIAUX ET MÉTHODE D'EXPÉRIMENTATION**

#### **4.1 Introduction**

Le but de cette recherche consiste à évaluer l'influence de la température de compactage sur la profondeur des ornières de plaques d'enrobés bitumineux. Pour ce faire, il faut déterminer le type d'essai à réaliser, les types d'enrobés à utiliser de même que le type de bitume et de granulats.

Il est clair que, dépendant du type d'enrobé utilisé, la profondeur des ornières sera différente. Cependant, ce n'est pas clair si un enrobé plus performant à l'orniérage a la même susceptibilité à la température de compactage qu'un enrobé moins performant.

Dans ce chapitre, les matériaux utilisés (granulats et bitume) de même que les types d'enrobés bitumineux testés sont définis. De plus, les méthodes d'essais et le plan expérimental sont expliqués.

#### **4.2 Choix des essais**

##### **4.2.1 Orniérage**

Comme montré dans la revue de la littérature (chapitre 1), il existe plusieurs essais pour la caractérisation de l'orniérage, mais selon le ministère des Transports du Québec l'essai à l'orniéreur type LPC s'avère un outil indispensable pour la formulation des enrobés soumis aux charges lourdes (Service des chaussées du ministère des Transports du Québec, 2005). L'influence de la nature du liant, de l'angularité des granulats, de la dimension de la grosseur nominale maximale des granulats et de la courbe

granulométrique sur la performance à l'orniérage des enrobés a été démontrée par l'usage de cet appareil (Service des chaussées du ministère des Transports du Québec, 2005).

L'essai à l'orniéreur LCPC est un essai qui applique une charge répétée à l'aide d'un pneumatique, contrairement à la majorité des essais du même genre qui utilisent des roues en acier. Cela donne un avantage à l'orniéreur LCPC, car celui-ci représente mieux les conditions de chargement sur chaussée.

Pour l'utilisation de l'orniéreur LCPC dans la caractérisation du phénomène d'orniérage, il faut suivre, au Québec, les projets de normes LC 26-400 *Préparation des enrobés : Compactage de plaques d'enrobé* et LC 26-410 *Vérification de la résistance au fluage des enrobés au moyen de l'essai d'orniérage* qui sont présentés aux annexes 2 et 3.

#### **4.2.2 Densité**

Les densités brutes et maximales de l'enrobé sont nécessaires pour calculer le pourcentage de vides du mélange. Donc, des essais de densité brute sur chaque plaque de mélange d'enrobés de même que des essais de densité maximale pour les deux enrobés testés ont été effectués. Pour mesurer la densité brute, la méthode volumétrique (méthode d'essai LC 26-040) a été utilisée. Cette méthode consiste à peser la plaque dans l'air, dans l'eau (figure 38) et à l'état SSS (saturé superficiellement sec).

Dans le but de voir l'effet de postcompactage après l'essai d'orniérage, des plaques ont été coupées en 6 sections pour connaître leur teneur en vides et les comparer avec celui des plaques avant d'être testées à l'orniéreur (figure 39). La densité a été mesurée dans les quatre morceaux du milieu de la plaque.

Des analyses, de l'effet de la température de compactage sur la densité des plaques, ont été faites, de même que des analyses de l'effet de bord dans l'essai à l'orniéreur.

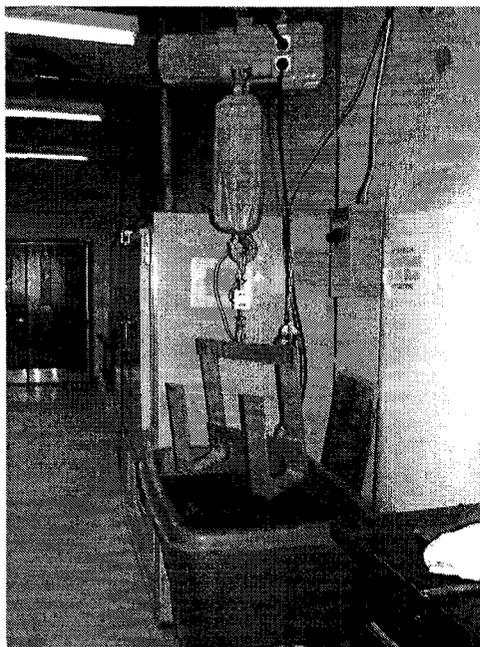


Figure 38 Système de pesage des plaques d'enrobé dans l'eau.

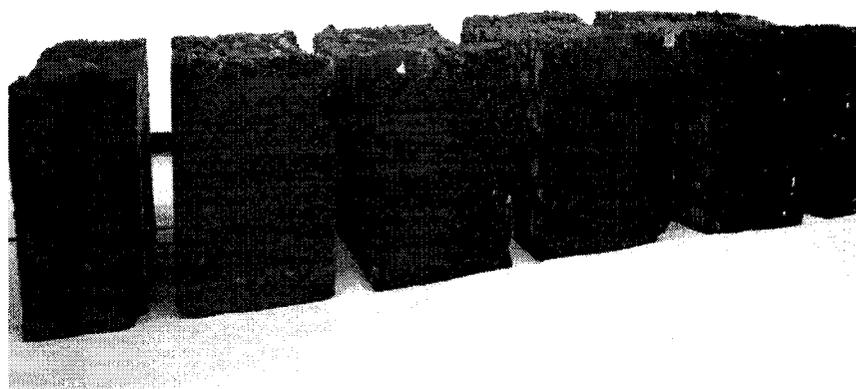


Figure 39 Plaque d'enrobé coupée pour calculer le postcompactage après l'essai à l'orniéreur

### 4.2.3 Granulométrie

Les essais de granulométrie ont été faits selon les normes : LC 21-010 *Échantillonnage*, LC 21-015 *Réduction des échantillons pour essais en laboratoire* et LC 21-040 *Analyse granulométrique par tamisage*. Les granulométries de tous les granulats ont été faites sauf celle du filler. Dans chaque classe granulaire, deux échantillons ont été testés pour comparer les résultats avec ceux du fournisseur.

## 4.3 Choix des matériaux

Pour le programme expérimental, deux enrobés standard du ministère des Transports du Québec ont été choisis, soit un enrobé grave bitume 20 mm, GB-20, et un enrobé semi grenu 10 mm, ESG-10. Le ESG-10 a été formulé afin qu'il soit sensible à l'orniérage, tandis que le GB-20 a été formulé pour avoir une bonne résistance à l'orniérage.

### 4.3.1 Bitumes

Pour faire le programme expérimental, deux types de bitume ont été sélectionnés. Il s'agit d'un bitume PG 58-34 et d'un PG 64-34 avec polymère. Le bitume PG 58-34, qui est moins performant à l'orniérage que le bitume PG 64-34 (avec le même combiné granulométrique), a été utilisé dans la formulation de l'enrobé ESG-10. Le PG 64-34 a été utilisé dans la formulation de l'enrobé GB-20.

### 4.3.2 Granulats

Étant donné que le bitume gouverne la rigidité de l'enrobé (section 1.1.1), et que deux types de bitume ont été choisis pour avoir différentes performances à l'orniérage, un seul type de granulat concassé (granulat Ray-Car) a été utilisé. Ceci pour être certain d'avoir le même comportement et ne pas introduire d'autres inconnus dans nos analyses. Les granulométries sont présentées au tableau V.

Tableau V  
Résumé des résultats des granulométries

TAMIS (mm)	Classe granulaire			
	10-20 mm (% passant)	5-10 mm (% passant)	0-5 C mm (% passant)	0-5 S mm (% passant)
28	100	100	100	100
20	97	100	100	100
14	53	100	100	100
10	15	94	100	100
5	4	9	95	99
2,5	3	3	64	96
1,25	2	2	43	93
630µm	2	2	31	86
315µm	2	2	22	43
160µm	1,7	1,7	16,1	10,4
80µm	1,5	1,6	11,5	3,3

### 4.3.3 Mélanges

Les deux mélanges qui ont été choisis pour le programme expérimental ont les caractéristiques indiquées au tableau VI.

Tableau VI  
Caractéristiques des mélanges du programme expérimental

	Enrobé GB-20	Enrobé ESG-10
<b>Classe de bitume</b>	PG 64-34	PG 58-34
<b>Granulats</b>	10 - 20 mm Ray - Car	5 - 10 mm Ray - Car
	5 - 10 mm Ray - Car	
	0 - 5 mm Criblure Ray- Car	0 - 5 mm Criblure Ray- Car
	0 - 5 mm Sable Banc Gobeil	0 - 5 mm Sable Banc Gobeil
	Calco passant 80 µm Graymont	
<b>% du bitume</b>	4,27 %	5,32 %

Les tableaux VII et VIII montrent l'analyse granulométrique pour chaque mélange alors que les figures 40 et 41 présentent les courbes granulométriques. Les combinés sélectionnés sont ceux qui sont les plus proches de la granulométrie fournie, soit le combiné 1 pour l'enrobé GB-20 et le combiné 4 pour l'enrobé ESG-10.

Tableau VII

Analyse granulométrique pour fabriquer l'enrobé GB-20

TAMIS (mm)	Combiné 1* (%)	Combiné 2 (%)	Combiné 3 (%)	Combiné 4 (%)	Fuseau (%)	Combiné fournisseur (%)
28	100	100	100	100	100	100
20	99	99	99	99	95 – 100	99
14	84	84	84	85	67 – 90	83
10	70	70	70	71	52 – 75	70
5	47	48	48	49	35 – 50	48
2,5	34	35	35	36	N/A	33
1,25	26	27	27	28	N/A	26
630 µm	21	22	22	23	N/A	21
315 µm	14	14	15	15	N/A	14
160 µm	8,5	9,0	9,2	9,4	N/A	8
80 µm	5,9	6,4	6,6	6,7	4 - 8	5,9

\*Combiné 1:10-20 mm 34%, 5-10 mm 20%, 0-5C mm 36%, 0-5S mm 9.2% et Calco 0,8%

N/A : non applicable

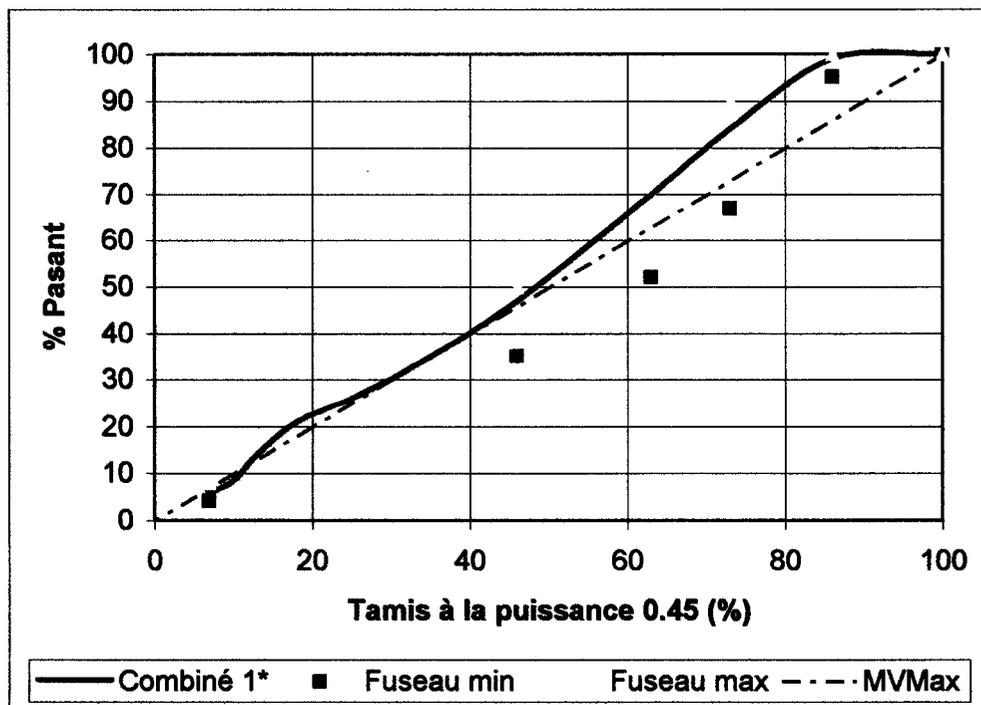


Figure 40 Courbe granulométrique. Enrobé GB-20

Tableau VIII  
Analyse granulométrique pour fabriquer l'enrobé ESG-10.

TAMIS (mm)	Combiné 1	Combiné 2	Combiné 3	Combiné 4*	Fuseau %	Combiné fournisseur (%)
14	100	100	100	100	100	100
10	98	98	98	98	92 – 100	98
5	63	63	63	64	52 – 65	64
2,5	45	45	44	46	46,1	45
1,25	34	34	33	35	30,7 – 36,7	33
630 µm	26	26	26	27	22,8 – 26,8	26
315 µm	17	17	17	17	18,1 – 18,1	17
160 µm	10,0	10,1	10,0	10,2	N/A	10
80 µm	6,8	6,9	6,8	6,9	4 - 10	6,6

\* Combiné 4 : 5-10 mm 36%, 0-5C mm 52% et 0-5S mm 12%

N/A : non applicable

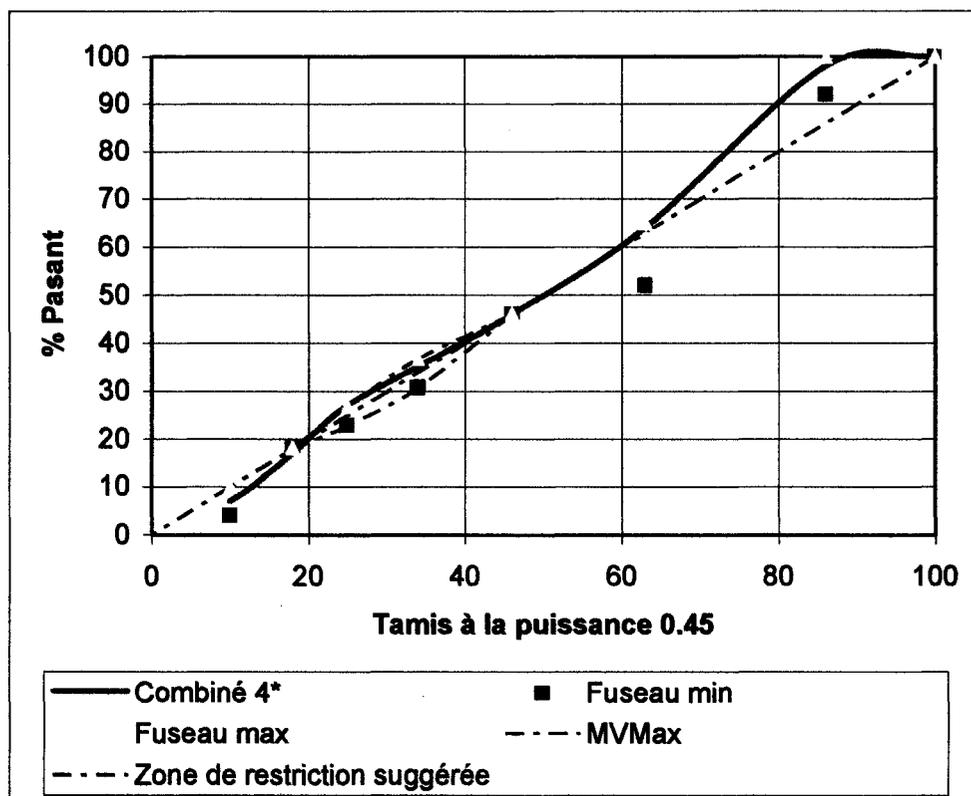


Figure 41 Courbe granulométrique. Enrobé ESG-10

La courbe granulométrique de l'enrobé GB-20 montre une granulométrie bien étalée, très proche de la courbe de masse volumique maximale. Ceci, ajouté à l'angularité du granulat (granulat concassé), donne une bonne résistance à l'orniérage. Par contre, la courbe granulométrique de l'enrobé ESG-10 passe par la zone de restriction et cela rend le mélange plus propice à l'orniérage (section 2.3).

#### 4.4 Paramètres des essais

Les essais effectués dans le programme expérimental sont basés sur les projets des méthodes d'essais LC 26-400 (2001) et LC 26-410 (2002) (annexes 2 et 3). Un résumé des différents paramètres d'essais est présenté au tableau IX.

Tableau IX  
Paramètres d'essais

Paramètres	Type d'enrobé	
	GB-20	ESG-10
Type de bitume	PG 64-34	PG 58-34
T (°C) de chauffage des granulats pour le malaxage	180 ± 2 °C	170 ± 2 °C
T (°C) de chauffage du bitume pour le malaxage	168 ± 2 °C	155 ± 2 °C
T (°C) de compactage du mélange	160 ± 5, 7 et 10°C	143 ± 5, 7 et 10°C
Épaisseur des plaques	100 mm	50 mm
Temps d'attente (avant le début de l'essai à l'ornièreur)	48 heures	48 heures
T (°C) d'essai à l'ornièreur	60 ± 2 °C	60 ± 2 °C
Nombre de cycles	30 000	3 000

#### 4.5 Méthode d'expérimentation

Le programme expérimental est basé sur deux mélanges standard du ministère des Transports du Québec, soit un enrobé ESG-10 et un enrobé GB-20. Au total, 34 mélanges ont été fabriqués, soit 18 mélanges de ESG-10 et 16 mélanges de GB-20, en faisant varier la température de compactage prévue par la norme (LC 26-400) de ± 5, 7 et 10 ° C. Cela donne un écart de température de 20 °C. L'écart de 10 °C au-dessus de la température de compactage était choisi pour ne pas dépasser la température de malaxage et être obligé de réchauffer le mélange après le malaxage. Les écarts de température au-dessous de la température de compactage ont été sélectionnés pour avoir les mêmes écarts qu'au-dessus.

Toutes les plaques ont été soumises à un essai d'orniérage. Pour ce faire, le programme expérimental a été divisé en deux étapes, soit :

- essais de caractérisation des matériaux et révision des normes pour établir pas à pas les processus des essais;
- essais à l'orniéreur.

#### **4.5.1 Essais de caractérisation des matériaux**

Les essais de caractérisation des matériaux ont été faits pour être certains que les matériaux disponibles pour la fabrication des enrobés ont les mêmes caractéristiques que celles décrites par le fournisseur pour la préparation des enrobés GB-20 et ESG-10.

##### **4.5.1.1 Essais de granulométrie**

Les granulométries ont été faites selon le projet de norme LC 21-040.

##### **4.5.1.2 Essais de densité des granulats**

Les essais de densité des granulats ont été faits en accord avec les normes LC 21-065 *Détermination de la densité et de l'absorption du granulat fin* et LC 21-067 *Détermination de la densité et de l'absorption du gros granulat*. Les résumés des résultats sont présentés aux tableaux X et XI.

Les essais de densité brute et d'absorption ont été réalisés avec trois échantillons de gros granulats et deux échantillons des granulats fins. Les moyennes et les écarts types ont été calculés et comparés avec les écarts types calculés avec les données du fournisseur. Un critère d'acceptation des essais donné par les normes LC 21-067 et LC 21-066 est l'écart type des résultats d'une série d'essais faits par un même opérateur. Il doit être inférieur à

0,0049 pour les gros granulats et à 0,0043 pour les fins. Dans notre cas, les écarts types sont de 0,0048 pour les gros granulats et de 0,004 pour les fins.

Tableau X

## Résumé des densités des gros granulats

DENSITÉS DES GROS GRANULATS										
	Granulats								Écart type selon la norme LC 21-067	
	10-20 mm Ray-Car				5-10 mm Ray-Car					
	Fournisseur	Moyenne des essais ETS	Écart type des essais ETS	Écart type des moyennes et fournisseur	Fournisseur	Moyenne des essais ETS	Écart type des essais ETS	Écart type des moyennes et fournisseur	Série des résultats même opérateur	2 résultats différents opérateurs
Densité brute	2,797	2,868	0,0048	0,050	2,872	2,931	0,043	0,042	0,0049	0,035
% absorption	0,67	1,08	0,042	0,29	1,15	1,26	0,04	0,08	0,050	0,51

Un autre critère d'acceptation est l'écart type calculé avec les résultats de deux opérateurs ou deux laboratoires. Dans ce cas, l'écart type doit être inférieur à 0,035 pour les gros granulats et à 0,026 pour les fins. L'écart type des résultats des essais de densité du fournisseur et de nos essais sont de 0,050 pour les gros granulats et de 0,013 pour les fins.

Dans le tableau X, les écarts types des essais de densité brute et d'absorption respectent les critères de répétitivité et de reproductibilité de la norme LC 21-067 (série de résultats effectués par le même opérateur), mais le critère d'acceptabilité n'est pas respecté lors de la comparaison entre les résultats du fournisseur et la moyenne de nos essais de densité brute.

Tableau XI

## Résumé des densités des granulats fins

DENSITÉS DES GRANULATS FINS										
	Granulat								Écart type selon la norme LC 21-066	
	0-5 mm Gobeil				0 - 5 mm Ray - Car				Série des résultats même opérateur	2 résultats différents opérateur
	Fournisseur	Moyenne des essais ETS	Écart type des essais ETS	Écart type des moyennes et fournisseur	Fournisseur	Moyenne des essais ETS	Écart type des essais ETS	Écart type des moyennes et fournisseur		
Densité brute	2,615	2,596	0,004	0,013	2,851	2,775	0,003	0,053	0,0043	0,026
% absorption	0,98	1,30	0,02	0,22	1,30	1,29	0,04	0,007	0,0523	0,44

Les critères d'acceptabilité donnés par la norme LC 21-066 sont respectés sauf dans le cas du granulat 0-5 mm Ray – Car. Lors de la comparaison avec le résultat de la densité brute du fournisseur et la moyenne de nos résultats, il a été remarqué que l'écart type est de 0,053, soit beaucoup plus que celui permis par la norme.

#### 4.5.2 Révision des normes

Les normes LC 26-400, LC 26-410, LC 26-003, LC 26-045, ASTM D 6925-3 et NF P 98- 253-1 ont été consultées afin de s'assurer de la bonne réalisation de la procédure pour l'ensemble des essais de compactage et d'orniérage des plaques. Un échange courriel a également eu lieu avec le responsable du secteur d'enrobés bitumineux du ministère des Transports du Québec – Laboratoire des chaussées afin d'obtenir des

réponses aux questions rencontrées en cours de cette révision. Les questions et les réponses sont présentées à l'annexe 4.

### 4.5.3 Essais à l'orniéreur

Les essais à l'orniéreur ont été faits selon les projets de normes LC 26-400 *Préparation des enrobés : Compactage de plaques d'enrobé* (2001) et LC 26-410 *Vérification de la résistance au fluage des enrobés au moyen de l'essai à l'orniérage* (2002) (annexes 2 et 3).

Après la vérification des normes et l'échange des courriels avec le Ministère, la procédure retenue pour faire les essais d'orniérage est la suivante :

#### 4.5.3.1 Préparation des matériaux

- Les granulats sont mis à l'étuve dans des panes pour les sécher à 110 °C pendant  $\pm 4$  heures.
- Ensuite, la quantité nécessaire de chaque classe granulaire pour préparer une plaque d'enrobé est pesée (équation 4.1). Tous les granulats sont rassemblés dans la même panne et puis celle-ci est mise à l'étuve à la température de malaxage (tableau IX).

$$\text{masse du granulat} = 50\text{cm} \times 18\text{cm} \times h_p \times D_{mm} \times 0,95 \quad (\text{éq. 4.1})$$

Où  $h_p$  = hauteur de la plaque, cm.

$D_{mm}$  = Densité maximale de l'enrobé

0,95 (95%) est la compacité visée de l'enrobé.

- Le bitume est placé dans l'étuve pour le chauffer à la température de malaxage (tableau IX).
- Le bol de malaxage et tous les accessoires utilisés pour cette opération sont mis également dans l'étuve à la température de malaxage.

Avec cette procédure, tout est prêt pour le malaxage des enrobés. Normalement, la préparation des matériaux pour la fabrication de deux plaques est faite le jour avant le malaxage et le compactage. Les plaques sont confectionnées séparément.

#### 4.5.3.2 Malaxage de l'enrobé

- Le bol de malaxage est sorti de l'étuve et placé directement sur la balance qui est mise à zéro.
- Les granulats, pour fabriquer une plaque d'enrobé, sont introduits directement dans le bol du malaxeur.
- Avec la masse exacte du granulat, la masse de bitume nécessaire pour avoir le pourcentage exact est calculée selon l'équation 4.2.

$$\text{masse du mélange} = \frac{\text{masse granulat}}{1 - \% \text{ bitume}} \quad (\text{éq. 4.2})$$

- Un cratère dans les granulats est fait, puis le bitume est sorti de l'étuve.
- La quantité désirée de bitume est versée dans le cratère au centre de la masse de granulats.
- Ensuite, le bol du malaxeur est placé sur le malaxeur (figure 42) qui est mis en marche à vitesse 1, durant le temps nécessaire pour que l'enrobage soit fait (entre 1 et 2 minutes), puis le malaxeur est mis à la vitesse 2, pendant au moins 10 secondes.

- La totalité de l'enrobé est transvidée dans une panne afin de l'emporter au compacteur de plaque, pour les plaques de 50 mm, ou le mettre dans l'étuve, pour les plaques de 100 mm (dans ce programme expérimental).

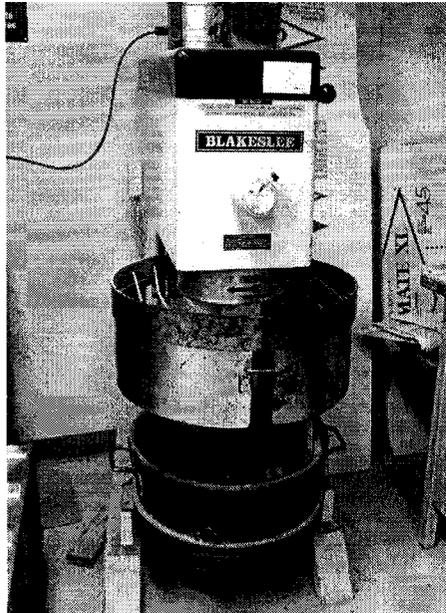


Figure 42 Malaxeur, capacité 60 kg

#### 4.5.3.3 Compactage des plaques

Le compacteur utilisé est de type LCPC (figure 43). Le pneu est gonflé à une pression de  $6 \pm 0,3$  bar. Pour la compaction des plaques, la procédure est la suivante :

- Tout d'abord, la préparation du compacteur est nécessaire avec l'installation du tablier dans la bonne position selon la hauteur de la plaque à compacter, et le moule de la plaque est installé sur le tablier. L'application d'un antiadhésif sur tout ce qui sera en contact avec l'enrobé est nécessaire.
- Tout l'enrobé est vidé dans le moule de la plaque et 50 coups de spatule sont donnés.

- Normalement pour les plaques de 50 mm, la température de l'enrobé est plus élevée que la température de compactage au moment du transvidage dans le moule. Il faut donc attendre la température de compactage souhaitée. Pour les plaques de 100 mm, elles sont sorties de l'étuve à la température de compactage visée. La température est mesurée à l'aide d'un thermomètre digital dont la sonde est placée au cœur du mélange.
- Le plan de balayage spécifié dans l'annexe B de la norme LC 26-400 (annexe 2) est appliqué pour le compactage.
- Après le compactage, les plaques refroidissent à la température de la pièce pendant 48 heures avant le début de l'essai d'orniérage (figure 44).
- Lorsque les plaques sont à la température de la pièce, pour le présent programme expérimental, la compacité des plaques a été mesurée par la méthode volumétrique en utilisant un bain rempli d'eau et une balance (figure 38).

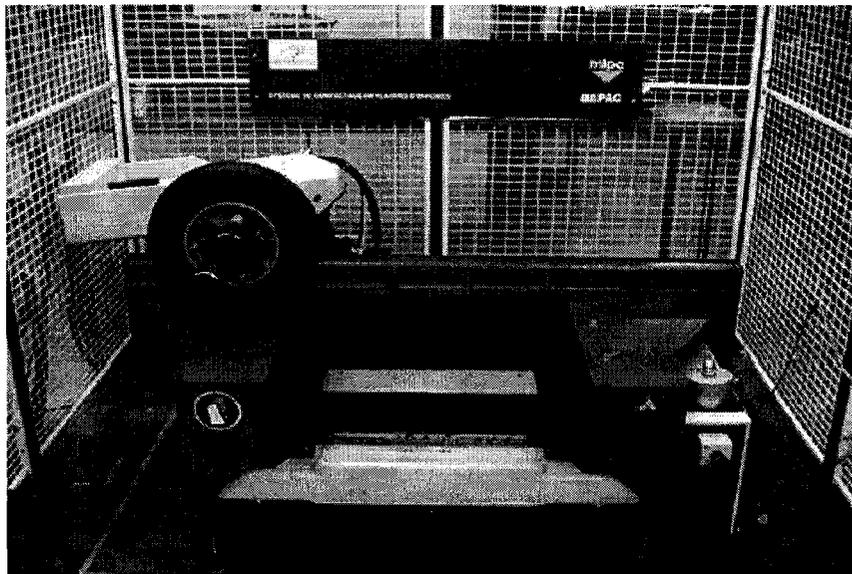


Figure 43 Compacteur de plaques type LCPC

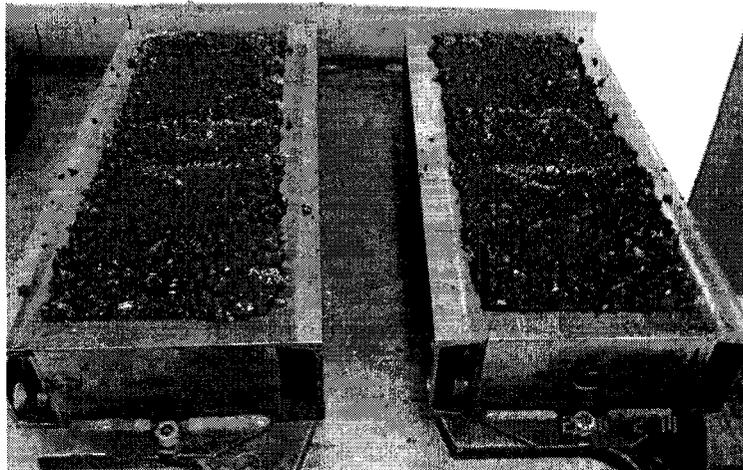


Figure 44 Plaques de 50 mm d'enrobé compacté

#### 4.5.3.4 Essais à l'orniéreur

Les essais à l'orniéreur ont été effectués avec l'orniéreur LCPC (figure 35). Cet essai a déjà été décrit à la section 4.5.3. Mais, il est pertinent de faire la description de la procédure d'essai suivie (méthode d'essai LC 26-410 (annexe 3)) lors du programme expérimental :

- Suite au compactage, les plaques sont placées dans l'orniéreur après une cure de 48 heures à la température de la pièce.
- L'orniéreur a une sonde de température qui normalement est placée dans le coin droit dans la plaque gauche. Quatre autres sondes sont installées. Deux sont placées au milieu de la face extérieure de chaque plaque et les deux autres sont placées à la hauteur des plaques pour contrôler la température de l'air à l'intérieur de l'orniéreur (figure 45).

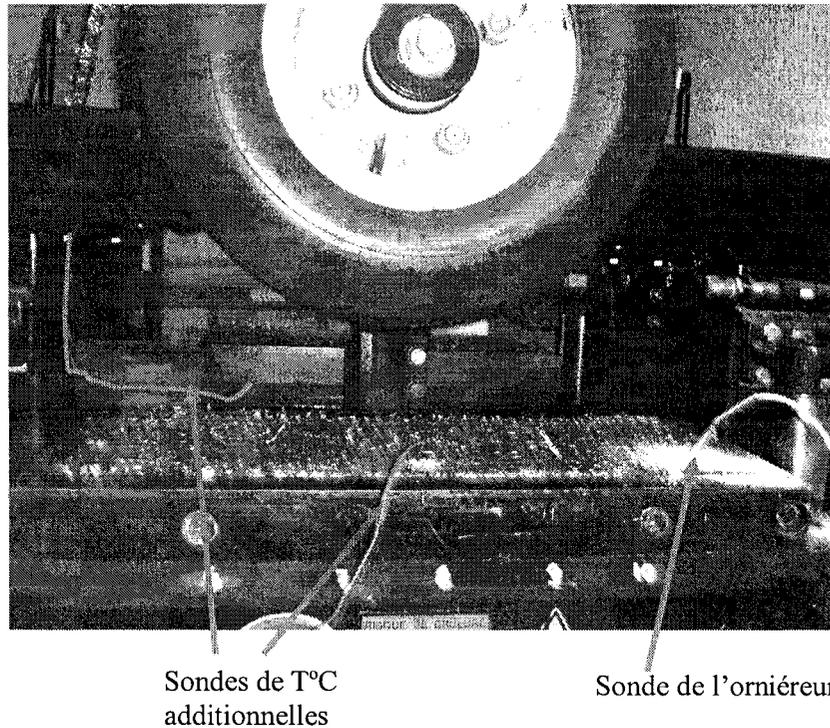


Figure 45 Emplacement des sondes de température dans l'orniéreur (plaque gauche)

- Ensuite, 1 000 cycles à la température de la pièce sont effectués. Après quoi, la profondeur d'ornière est mesurée.
- Puis, l'orniéreur est mis en mode de chauffage. Les cycles à chaud débutent lorsque la température à l'intérieur des plaques est de  $60 \pm 2$  °C, pour les plaques de 50 mm. Pour les plaques de 100 mm, un temps d'attente de  $14 \pm 1$  heure est prévu, pour que la température à l'intérieur des plaques soit de  $60 \pm 2$  °C.
- Après ce délai, les 100 premiers cycles à chaud sont amorcés. Il faut s'assurer que la pression de contact des pneus de l'orniéreur et les plaques soit de  $5 \pm 0,5$  kN. Après les cycles, la mesure des ornières est faite et il faut attendre que les plaques atteignent au minimum 59 °C pour continuer l'essai.
- La profondeur des ornières est également mesurée après 300, 1 000, 3 000 cycles pour les plaques de 50 mm, et après 300, 1 000, 3 000, 10 000, 17 000 et 30 000 cycles pour les plaques de 100 mm.

#### 4.6 Sommaire

Les matériaux choisis pour la réalisation de la méthode d'expérimentation sont des bitumes PG 58-34 et PG 64-34, et des granulats Ray-Car. Les enrobés sélectionnés sont un ESG-10 et un GB-20. La méthode d'expérimentation est basée sur l'essai d'orniérage dans l'orniéreur type LCPC. Trente-quatre plaques d'enrobé, soit 18 mélanges de ESG-10 et 16 mélanges de GB-20 ont été testées. Les plaques d'enrobé ont été compactées à différentes températures dans un écart de 20°C autour de la température de compactage prévue par la norme.

Le chapitre suivant présente les résultats obtenus lors du programme expérimental. Il est important d'essayer d'établir une relation entre la température de compactage des plaques d'enrobé et les profondeurs d'ornières. La relation entre la température et la densité des plaques et la relation entre la densité et l'orniérage ont également été incluses dans les analyses. Les analyses de ces résultats sont réalisées à l'aide de différents paramètres et de méthodes statistiques telles que l'écart type, la moyenne, le coefficient de variation, la régression polynomiale et l'analyse de covariance.

## **CHAPITRE 5**

### **RÉSULTATS ET ANALYSE**

#### **5.1 Introduction**

Le présent chapitre dévoile les résultats obtenus lors du programme expérimental. La présentation des résultats est faite d'abord pour les résultats de l'enrobé ESG-10, et ensuite, pour ceux de l'enrobé GB-20. Une analyse statistique a été effectuée sur les résultats. Dans un premier temps, des courbes de tendance ont été établies et, dans un deuxième temps, une analyse de covariance a été effectuée.

À la fin de ce chapitre, une analyse sur la densité des plaques avant et après les essais d'orniérage est montrée. L'analyse de covariance de la densité des plaques et de la température de compactage a été faite pour établir leur dépendance.

#### **5.2 Résultats à l'orniérage de l'enrobé ESG-10**

Le pourcentage d'orniérage de l'enrobé ESG-10 a été déterminé sur 18 plaques de 50 mm, compactées à différentes températures. Les plaques ont été soumises à l'orniérage jusqu'à 3 000 cycles. Les résultats sont présentés à l'annexe 6 et ils sont résumés dans le tableau XII et montrés à la figure 46. Les résultats des plaques 1 et 2 ne sont pas pris en considération, car elles ont été faites avec l'objectif de mettre au point la procédure. Les résultats des plaques 10 et 11 sont enlevés, car le compactage a été fait à une température trop basse qui sort de l'écart de températures considérées par cette étude.

Le tableau XII montre les profondeurs des ornières lors des essais d'orniérage, la température de compactage des plaques et le pourcentage de vides réel. Il y a deux plaques pour chaque température étudiées. Les pourcentages des ornières entre les

plaques compactées à la même température ont des variations qui vont de 0,08 % jusqu'à 2,5 %. Ceci donne un aperçu de la dispersion des résultats dans l'essai.

Tableau XII

Résultats des essais à l'ornièreur sur l'enrobé ESG-10

% de vides	Écart % de vides	T°C de Compactage	% d'ornièrre Enrobé ESG-10				Écart (3 000 cycles) (%)
			Nombre de cycles				
			100	300	1000	3000	
7,3%	0,2 %	153	3,17	3,88	6,77	8,56	1,51
7,1%		153	2,52	4,82	5,91	10,07	
7,7%	0,1 %	150	1,39	2,74	4,38	6,24	2,50
7,8%		150	2,63	3,70	5,21	8,74	
7,5%	0,1 %	148	2,32	3,65	5,48	6,77	0,08
7,4%		148	2,45	3,70	5,27	6,69	
7,5%	1,1 %	143	2,33	3,77	4,41	6,13	0,11
8,6%		143	1,97	3,39	4,66	6,02	
6,4%	2,1 %	138	1,62	2,97	4,61	5,65	2,10
8,5%		138	2,96	4,08	5,55	7,75	
7,5%	0,6 %	136	2,31	3,87	5,15	6,48	0,88
6,9%		136	2,43	3,91	4,96	7,36	
7,2%	0,1 %	133	2,04	3,37	4,80	6,45	0,18
7,1%		133	2,44	3,33	4,94	6,63	

La température de compactage est présentée de façon décroissante pour faciliter l'analyse des résultats. Il ne semble pas y avoir de relation claire entre la température de compactage et le pourcentage d'ornières. Le pourcentage des vides ne semble pas avoir de relation directe simple avec la température de compactage non plus.

La figure 46 donne l'impression que la température de compactage des plaques n'a pas une influence significative par rapport à la profondeur des ornières. Pour confirmer cette perception, des paramètres statistiques comme la moyenne, l'écart type et le coefficient de variation ont été calculés.

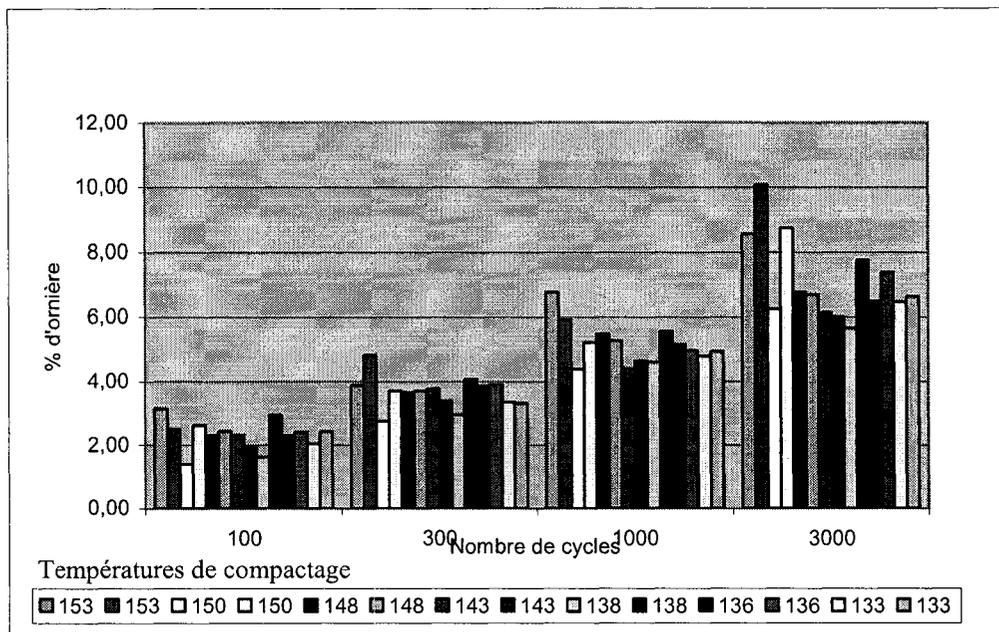


Figure 46 Résumé des résultats des essais à l'ornièreur. Enrobé ESG-10

Avec les moyennes et les écarts types des profondeurs des ornières montrées à la figure 47, le coefficient de variation (CV) (éq. 5.1), qui donne une idée de la dispersion des données autour de la moyenne, a été calculé pour chaque température. Les CV sont montrés dans le tableau XIII.

$$CV = \frac{\text{moyenne}}{\text{écart type}} \quad (\text{éq. 5.1})$$

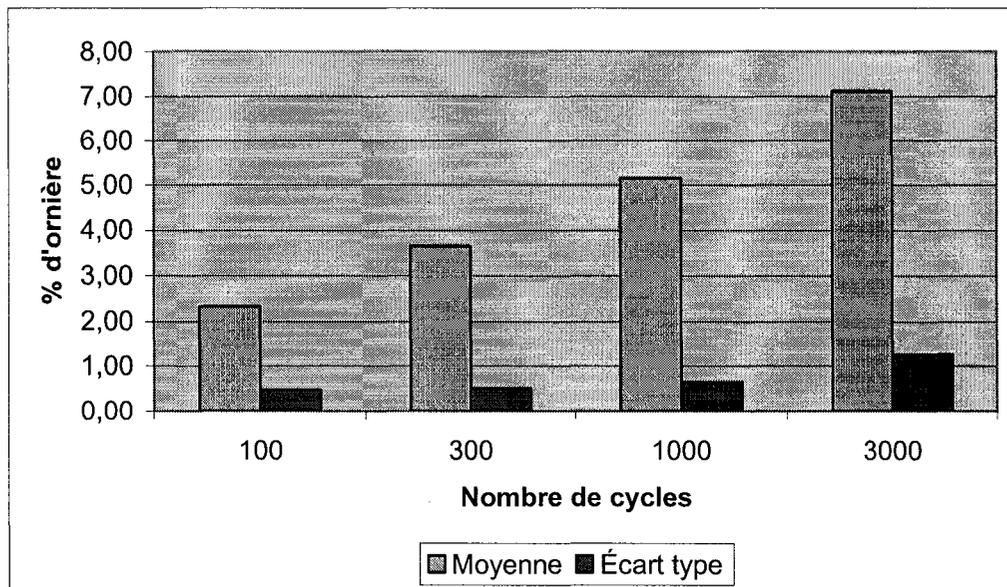


Figure 47 : Moyennes et écarts types des profondeurs des ornières selon le nombre de cycles. Enrobé ESG-10

Tableau XIII

Coefficients de variation des profondeurs des ornières selon le nombre de cycles. Enrobé ESG-10

	Nombre de cycles			
	100	300	1 000	3 000
Coefficient de variation	20 %	14 %	12 %	18 %

Le comportement des coefficients de variation (CV) n'est pas très clair. Dans les premiers 1 000 cycles, le CV baisse de 20 % jusqu'à 12%, pour monter à 18 % pendant les 2 000 derniers cycles. Les CV ne montrent pas de tendance en fonction du nombre de

cycles. Il est donc difficile de tirer des conclusions à partir d'eux. L'utilisation d'autres paramètres statistiques, tels la régression non linéaire, devient donc nécessaire.

### 5.2.1 Régression non linéaire / régression polynomiale de deuxième degré

Avec l'application d'une analyse de régression, on cherche à exprimer la relation entre deux variables  $x$  et  $y$  sous la forme d'une fonction ( $f$ ) qui dépend de manière linéaire ou non linéaire d'un vecteur de paramètres  $\mathbf{B}$  (Seber, G.A., 1989) :

$$\hat{y}_k = f(x_k, \mathbf{B}) \quad (\text{éq. 5.2})$$

Soit une fonction polynomiale de deuxième degré, non linéaire, dans ce cas-ci (éq. 5.3)

$$\hat{y}_k = b_0 + b_1 x_k + b_2 x_k^2 \quad (\text{éq. 5.3})$$

L'équation 5.3 est une courbe qui normalement a la forme d'une parabole selon les valeurs de  $b_0$ ,  $b_1$  et  $b_2$ . Comme pour la régression linéaire, il faut chercher les valeurs des paramètres  $\mathbf{B}$  ( $b_0$ ,  $b_1$  et  $b_2$ ) qui rendent minimale la somme des carrés des écarts pondérés :

$$\text{Somme de carrés des écarts pondérés : } SS = \sum_{k=i}^n (y_k - \hat{y}_k)^2 \quad (\text{éq. 5.4})$$

Le coefficient de détermination ( $R^2 = SS_e / SS_t$ ;  $0 \leq R^2 \leq 1$ ) représente l'ajustement des données à la courbe. La courbe de tendance représente le comportement des deux variables si  $R^2$  est proche de l'unité (Seber, G.A., 1989).

$$SS_t = \sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2$$

$$SS_e = \sum_{k=1}^n (\hat{y}_k - \bar{y})^2$$
(éq. 5.5)

Où  $(y_k - \bar{y})^2$  sont les carrés des écarts des données de la variable dépendante de la moyenne et

$(\hat{y}_k - \bar{y})^2$  sont les carrés des écarts des ordonnées de la courbe de tendance calculée à partir de la moyenne

Les courbes de tendance sont tracées à la figure 48. Les calculs des coefficients de détermination ( $R^2$ ) sont faits à l'aide du logiciel Excel. Ils sont présentés également à la figure 48.

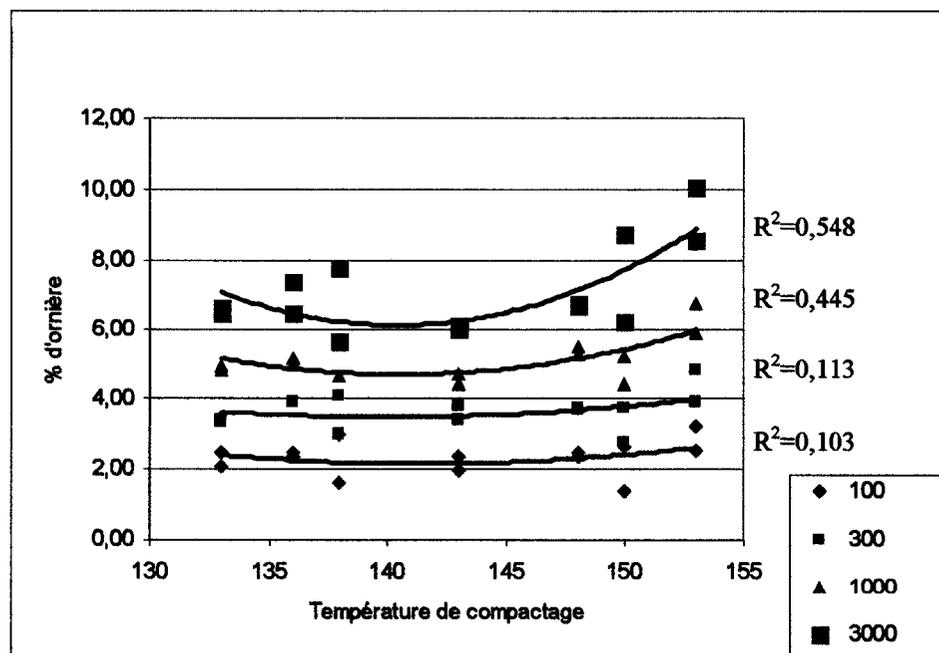


Figure 48 Courbes de tendance des résultats à l'ornièrisme. Enrobé ESG-10

Les courbes de tendance représentent bien le comportement des données lorsque les coefficients de détermination sont proches de l'unité ( $R^2 = 1$ ). Dans le cas présent, ils augmentent de 0,103 à 0,548. Bien que les coefficients de détermination ( $R^2$ ) ne sont pas élevés pour l'ensemble de courbes, il est intéressant d'observer qu'ils augmentent de manière significative avec l'application des cycles. Cela peut signifier que l'influence de la température de compactage n'est vue qu'à un certain nombre de cycles qui peut représenter l'âge de l'enrobé sur la route.

Une autre façon d'interpréter le coefficient de détermination est, par exemple, dans les courbes de tendance à 3000 cycles, où  $R^2 = 0,548$ , on peut dire que 54,8 % des ornières sont dues à la variation de la température et que le pourcentage restant, soit 45,2 % des ornières sont dues à d'autres facteurs distincts à la température de compactage des plaques (Cody et Smith, 1997).

### **5.3 Résultats à l'orniéreur de l'enrobé GB-20**

Les plaques de 100 mm confectionnées avec l'enrobé GB-20 sont soumises à 30 000 cycles de chargement dans l'orniéreur. Il y a un total de 16 plaques. Les résultats des essais à l'orniéreur sont présentés à l'annexe 7 et sont résumés dans le tableau XIV, et à la figure 49. Les résultats des plaques 1 et 2 ne sont pas pris en considération, car elles ont été faites avec l'objectif de mettre au point la procédure. Dans la plaque 1, la température de compactage était de 129°C. C'est une température qui sort de la plage de températures étudiées. À cette température, il était plus difficile de compacter la plaque et de mettre en place tout l'enrobé.

Les variations de la profondeur des ornières, dans les plaques compactées à la même température, sont plus petites que celles observées pour l'enrobé ESG-10. Ces variations vont de 0,11 à 1,09 %. Pour faciliter l'analyse des résultats, la température de compactage des plaques est présentée de façon décroissante. Il ne semble pas y avoir de

relation claire entre la température de compactage des plaques et le pourcentage d'ornièrre. Les pourcentages de vides ne semblent pas avoir de relation directe simple avec la température de compactage non plus.

Tableau XIV

Résultats des essais à l'ornièrre sur l'enrobé GB-20

% de vides	Écart % de vides	T°C de Compactage	% d'ornièrre Enrobé GB-20							Écart (30000 cycles) (%)
			Nombre de cycles							
			100	300	1000	3000	10000	17000	30000	
7,4%	0,2 %	170	2,38	2,72	3,40	3,90	4,44	4,49	5,07	1,09
7,2%		170	1,89	2,27	2,33	2,78	3,42	3,65	3,98	
7,2%	0,2 %	167	2,08	2,43	2,75	3,32	3,59	3,80	4,20	0,42
7,0%		167	1,73	2,09	2,64	3,34	3,53	3,72	3,78	
7,6%	0,2 %	165	1,43	1,95	2,42	2,81	3,26	3,31	3,61	0,26
7,4%		165	1,54	1,62	2,14	2,41	2,99	2,95	3,35	
7,6%	0,7 %	160	1,61	1,89	2,49	2,69	3,24	3,25	3,56	0,21
6,9%		160	1,54	1,99	2,18	2,66	2,96	3,16	3,35	
7,1%	0,3 %	155	1,23	1,95	2,33	2,58	2,97	3,28	3,41	0,47
6,8%		155	1,28	1,68	1,91	2,20	2,75	2,84	2,94	
7,0%	0,3 %	153	1,71	2,01	2,31	2,72	3,14	3,26	3,33	0,84
6,7%		153	2,07	2,47	2,81	3,19	3,70	3,78	4,17	
7,3%	0,1 %	150	1,55	1,70	2,26	2,42	2,84	3,05	3,26	0,11
7,4%		150	1,49	1,85	2,30	2,34	2,62	3,03	3,15	

La profondeur des ornières ne montre pas de tendance, en relation à la température de compactage. Dans le tableau XIV, la température est placée de façon décroissante, mais les profondeurs d'ornières montent et descendent sans aucune logique apparente.

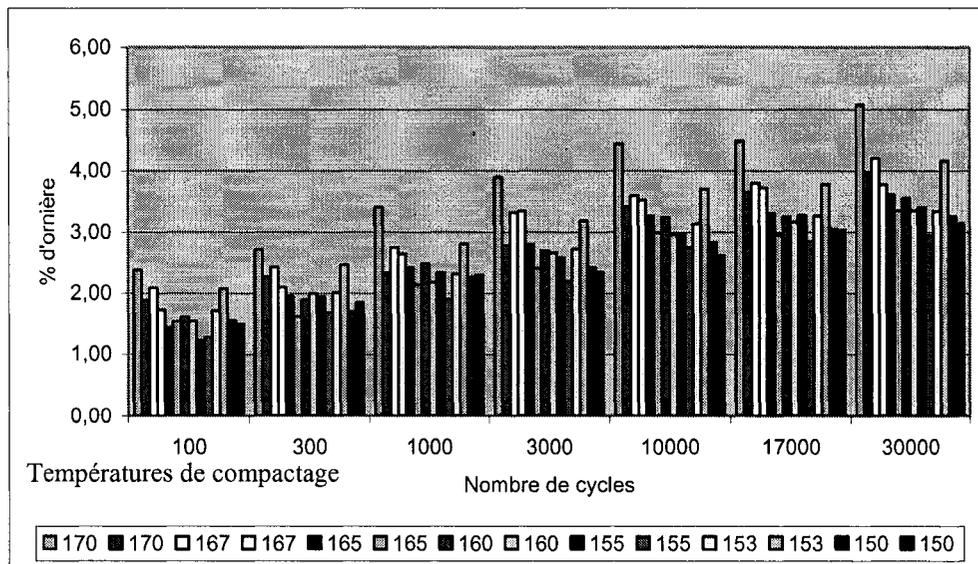


Figure 49 Résumé des résultats des essais à l'orniéreur. Enrobé GB-20

La figure 49 qui résume les résultats obtenus à l'orniéreur de l'enrobé GB-20 montre une tendance similaire à celle de l'enrobé ESG-10 et, comme dans ce cas-là, les moyennes, les écarts types et les coefficients de variation selon les nombres de cycles ont été calculés (figure 50 et tableau XV).

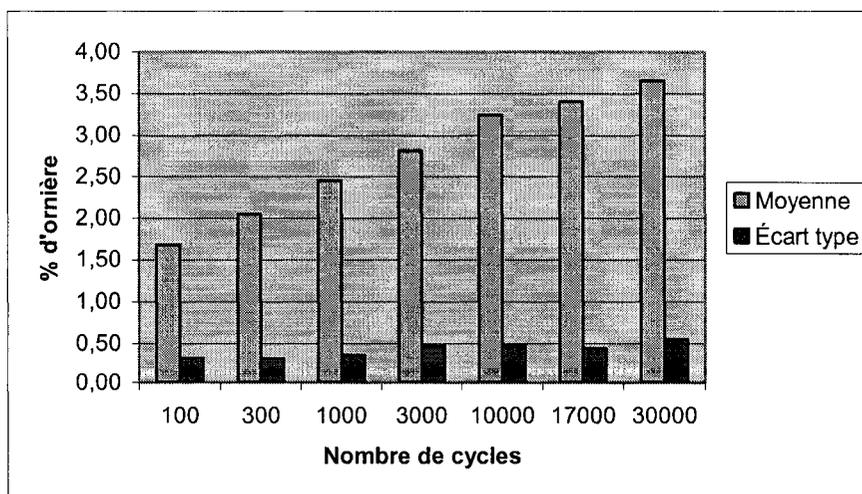


Figure 50 Moyennes et écarts types des profondeurs des ornières selon le nombre de cycles. Enrobé GB-20

Tableau XV

Coefficients de variation des ornières selon le nombre de cycles. Enrobé GB-20

	Nombre de cycles						
	100	300	1 000	3 000	10 000	17 000	30 000
Coefficient de Variation	19%	16%	15%	17%	15%	13%	15%

Dans les résultats obtenus à l'ornièreur de l'enrobé GB-20, les coefficients de variation sont plutôt petits, mais ne présentent pas une tendance claire. Les CV diminuent de 19% à 15% pendant les premiers 1 000 cycles, puis ils ont une légère augmentation pendant les 2 000 cycles suivants et une baisse de 17 à 13% dans les 14 000 cycles suivants. Pour finir en une légère augmentation de 2 % pendant les 13 000 derniers cycles. Ce comportement erratique des coefficients de variation ne donne pas la possibilité de faire des analyses et donc, l'utilisation de l'analyse par régression non linéaire s'avère nécessaire pour faire ressortir la dépendance ou non des profondeurs des ornières avec la température de compactage de plaques. Des courbes de tendance pour l'analyse de régression ont été tracées (figure 51).

Les coefficients de détermination ( $R^2$ ) des résultats à l'ornièreur de l'enrobé GB-20 varient de 0,3104 jusqu'à 0,5172. Ils sont très faibles, mais ils sont croissants avec le nombre de cycles. Il est possible de remarquer que le coefficient de détermination a une légère diminution dans les premiers 1 000 cycles. Il monte ensuite comme dans le cas de l'enrobé ESG-10.

L'ajustement des données aux courbes de tendance n'est pas très approprié donc la courbe ne représente pas le comportement des données. Cela peut signifier que la relation entre les deux variables, température et profondeur d'ornière, n'est pas très claire et que l'ornièrage peut dépendre non seulement de la température, mais aussi d'autres facteurs comme la densité du mélange.

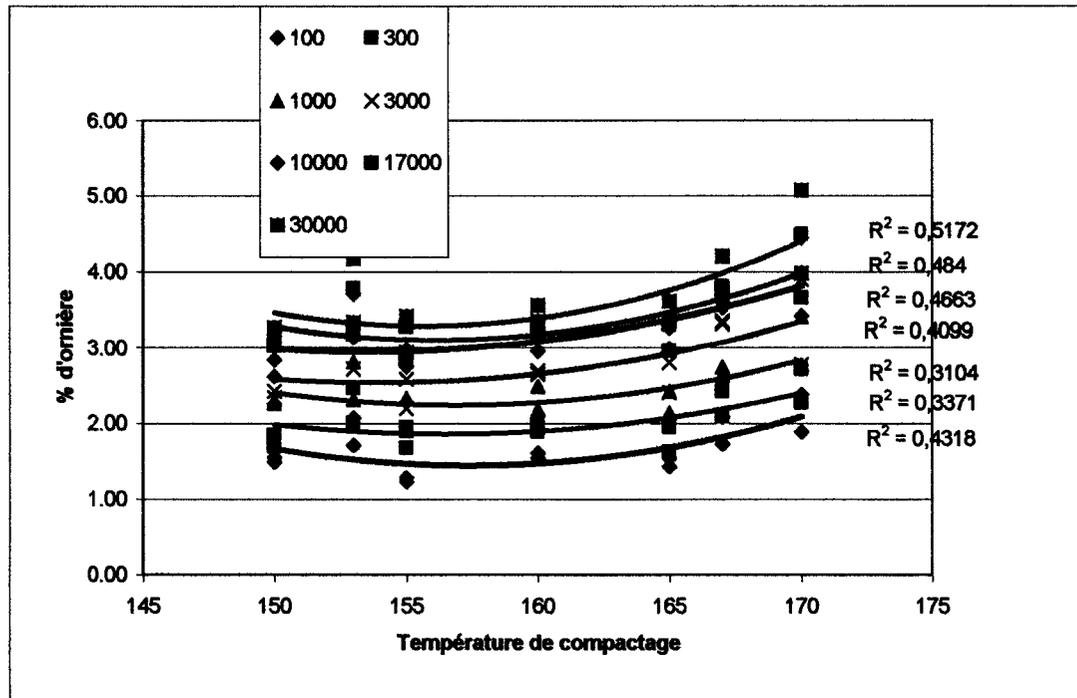


Figure 51 Courbes de tendance des résultats à l'orniéreur. Enrobé GB-20

#### 5.4 Analyse de résultats des moyennes des plaques compactées à la même température

La norme LC 26-410 dit que le pourcentage d'ornière dans un essai à l'orniéreur est la moyenne des résultats entre les deux plaques, soit la plaque du côté A de l'orniéreur et la plaque du côté B. Pour suivre la procédure de la norme, le calcul des moyennes des deux plaques, pour chaque température de compactage a été faite. En plus, le calcul des coefficients de détermination a été fait pour les deux enrobés analysés. Le tableau XVI présente les moyennes des résultats à l'orniéreur des plaques compactées à la même température de l'enrobé ESG-10.

Le comportement de la moyenne entre les résultats des deux plaques compactées à la même température est plutôt erratique. Ils montent et descendent sans aucune logique.

Mais, en regardant les coefficients de détermination, présentés à la figure 52, ils montrent un meilleur comportement que ceux qui ont été calculés avec l'ensemble des données. Il est à noter que l'allure générale des courbes de tendance n'a pas changé.

Tableau XVI

Moyennes des ornières entre plaques compactées à la même température selon le nombre de cycles. Enrobé ESG-10

T°C de Compactage	Plaques	Pourcentage d'ornière (PI %)							
		Nombre de cycles							
		100	$\bar{x}$	300	$\bar{x}$	1000	$\bar{x}$	3000	$\bar{x}$
153	A	3.17	2.84	3.88	4.35	6.77	6.34	8.56	9.31
	B	2.52		4.82		5.91		10.07	
150	A	1.39	2.01	2.74	3.22	4.38	4.80	6.24	7.49
	B	2.63		3.70		5.21		8.74	
148	A	2.32	2.38	3.65	3.67	5.48	5.37	6.77	6.73
	B	2.45		3.70		5.27		6.69	
143	A	2.33	2.15	3.77	3.58	4.41	4.54	6.13	6.08
	B	1.97		3.39		4.66		6.02	
138	A	1.62	2.29	2.97	3.52	4.61	5.08	5.65	6.70
	B	2.96		4.08		5.55		7.75	
136	A	2.31	2.37	3.87	3.89	5.15	5.06	6.48	6.92
	B	2.43		3.91		4.96		7.36	
133	A	2.04	2.24	3.37	3.35	4.80	4.87	6.45	6.54
	B	2.44		3.33		4.94		6.63	

Les coefficients de détermination vont de valeurs faibles, soit 0,22, dans les premiers cycles jusqu'à une valeur de 0,83, qui représente une bonne relation entre les deux variables. Les  $R^2$  augmentent considérablement avec l'application des cycles. Ceci peut confirmer l'influence à long terme de la température de compactage des plaques des enrobés sur l'orniérage.

La même analyse a été faite pour l'enrobé GB-20. Le calcul des moyennes des résultats de l'essai à l'orniéreur des plaques compactées à la même température est présenté au tableau XVII.

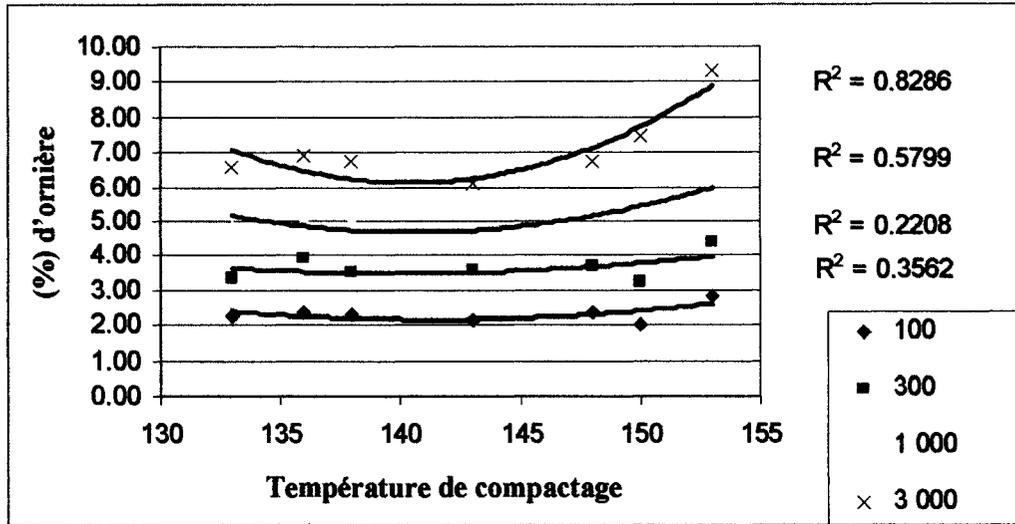


Figure 52 Courbes de tendance et coefficients de détermination des moyennes des résultats des plaques compactées à la même température. Enrobé ESG-10

Tableau XVII

Moyennes des ornières entre plaques compactées à la même température selon le nombre de cycles. Enrobé GB-20

T°C de Compactage	Plaque	Pourcentage d'ornièrre (PI %)													
		Nombre de cycles													
		100	$\bar{x}$	300	$\bar{x}$	1000	$\bar{x}$	3000	$\bar{x}$	10000	$\bar{x}$	17000	$\bar{x}$	30000	$\bar{x}$
170	A	2.38	2.13	2.72	2.49	3.40	2.87	3.90	3.34	4.44	3.93	4.49	4.07	5.07	4.53
	B	1.89		2.27		2.33		2.78		3.42		3.65		3.98	
167	A	2.08	1.91	2.43	2.26	2.75	2.69	3.32	3.33	3.59	3.56	3.80	3.76	4.20	3.99
	B	1.73		2.09		2.64		3.34		3.53		3.72		3.78	
165	A	1.43	1.49	1.95	1.79	2.42	2.28	2.81	2.61	3.26	3.13	3.31	3.13	3.61	3.48
	B	1.54		1.62		2.14		2.41		2.99		2.95		3.35	
160	A	1.61	1.58	1.89	1.94	2.49	2.33	2.69	2.67	3.24	3.10	3.25	3.21	3.56	3.45
	B	1.54		1.99		2.18		2.66		2.96		3.16		3.35	
155	A	1.23	1.25	1.95	1.81	2.33	2.12	2.58	2.39	2.97	2.86	3.28	3.06	3.41	3.17
	B	1.28		1.68		1.91		2.20		2.75		2.84		2.94	
153	A	1.71	1.89	2.01	2.24	2.31	2.56	2.72	2.96	3.14	3.42	3.26	3.52	3.33	3.75
	B	2.07		2.47		2.81		3.19		3.70		3.78		4.17	
150	A	1.55	1.52	1.70	1.77	2.26	2.28	2.42	2.38	2.84	2.73	3.05	3.04	3.26	3.21
	B	1.49		1.85		2.30		2.34		2.62		3.03		3.15	

Dans cet enrobé les moyennes ont un comportement plus clair. Elles descendent avec la température de compactage jusqu'à une certaine température. Puis, elles sont erratiques. Les plaques compactées à 153°C présentent des ornières plutôt hautes, pour tous les cycles. Avec les moyennes entre les résultats des plaques compactées à la même température, les courbes de tendance et les coefficients de détermination ont été calculés. Ils sont présentés à la figure 53.

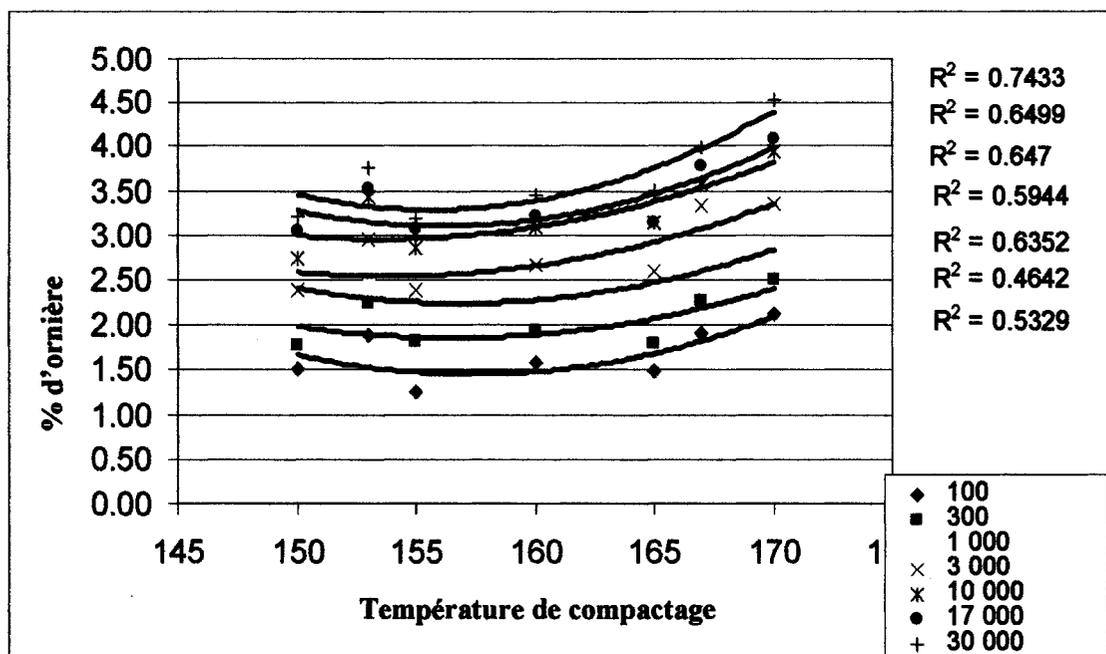


Figure 53 Courbes de tendance et coefficients de détermination des moyennes des résultats des plaques compactées à la même température. Enrobé GB-20

Les coefficients de détermination montrent une meilleure dépendance des ornières avec la température de compactage des plaques, surtout à long terme. En comparant les R<sup>2</sup> calculés avec toutes les données et ceux calculés avec les moyennes, une augmentation de presque 20 % pour l'ensemble des coefficients calculés avec les moyennes des deux enrobés, peut être observée.

### 5.5 Analyse des résultats par analyse de covariance

Pour mesurer la relation de dépendance entre deux variables, l'utilisation de l'analyse de covariance est tout à fait recommandable d'un point de vue statistique. Il s'agit de calculer la covariance ( $S_{xy}$ ) qui est définie comme la moyenne des dispersions des points  $(x_i, y_i)$  dans le plan, par rapport au centre de gravité de tous les points (Droesbeke, 1988) :

$$s_{xy} = \frac{1}{n} \sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (\text{éq. 5.6})$$

Où :  $\bar{x}$  et  $\bar{y}$  : moyennes de séries marginales et

$n$  : nombre de points  $(x_i, y_i)$

La covariance permet de calculer le coefficient de corrélation de Bravais - Pearson qui donne un très bon indice de la relation entre les deux variables et qui est définie comme suit (Droesbeke, 1988) :

$$r = \frac{s_{xy}}{s_x s_y} \quad (-1 \leq r \leq 1) \quad (\text{éq. 5.7})$$

Où :  $s_{xy}$  : covariance

$s_x$  et  $s_y$  : écarts types marginaux

Comme le coefficient de corrélation varie entre -1 et 1, on utilise plutôt ( $r^2$ ). La corrélation des deux variables augmente si  $r^2$  augmente de zéro à un.

Les analyses de covariance des deux enrobés pour mesurer la dépendance des profondeurs des ornières avec la température de compactage des plaques et aussi les pourcentages de vides ont été effectuées. La comparaison entre les variables température

et la teneur en vides peut être intéressante pour savoir quelle variable a le plus d'influence sur l'orniérage.

### 5.5.1 Analyse de covariance de l'enrobé ESG-10

L'analyse de covariance des résultats de l'essai à l'orniéreur a été faite pour constater la dépendance des profondeurs des ornières avec la température de compactage des plaques. Les résumés des résultats des analyses sont présentés au tableau XVIII.

Le comportement des coefficients de corrélation ( $r^2$ ) de l'analyse de covariance est similaire à celui du coefficient de détermination ( $R^2$ ) des courbes de tendance et cela confirme que la dépendance entre la température de compactage de plaque a une faible influence sur la profondeur des ornières. Dans les premiers cycles, l'influence est presque nulle. Cependant, cette influence est croissante avec le nombre de cycles mais demeure quand même faible.

Tableau XVIII

Coefficients de corrélation entre la température de compactage des plaques et les profondeurs des ornières selon les cycles. Enrobé ESG-10

	Enrobé ESG-10			
	Nombre de cycles			
	100	300	1 000	3 000
<b>Coefficient de corrélation (<math>r^2</math>)</b>	0,0271	0,0569	0,1899	0,2463

Pour l'enrobé ESG-10, les coefficients de corrélation augmentent de 0,0271 jusqu'à 0,2463 entre 100 et 3 000 cycles. Cette même tendance a été observée lors du calcul des coefficients de détermination  $R^2$ .

Les mêmes calculs ont été faits avec le pourcentage de vides et les profondeurs des ornières de l'enrobé ESG-10. Le résumé des résultats est montré au tableau XIX.

Tableau XIX

Coefficients de corrélation entre les pourcentages de vides et les profondeurs des ornières selon les cycles. Enrobé ESG-10

	Enrobé ESG-10			
	Nombre de cycles			
	100	300	1 000	3 000
Coefficient de corrélation ( $r^2$ )	0,0395	0,0061	0,0001	0,0006

D'après les résultats, il y a une dépendance très faible des profondeurs des ornières avec le pourcentage de vides des plaques. Le coefficient de corrélation baisse avec l'incrément du nombre de cycles de 0,0395 jusqu'à 0,0001, dans les premiers 1 000 cycles. Dans les derniers 2 000 cycles, il augmente jusqu'à 0,0006.

### 5.5.2 Analyse de covariance de l'enrobé GB-20

Les analyses de covariance des résultats à l'ornièreur de l'enrobé GB-20 ont été faites. Dans un premier temps, l'analyse est faite avec les températures de compactage des plaques et les profondeurs des ornières. Et, dans un deuxième temps, l'analyse est faite avec les pourcentages de vides des plaques et les profondeurs des ornières. Les résultats obtenus sont présentés aux tableaux XX et XXI.

Tableau XX

Coefficients de corrélation entre la température de compactage des plaques et les profondeurs des ornières selon les cycles. Enrobé GB-20

	Enrobé GB-20						
	Nombre de cycles						
	100	300	1 000	3 000	10 000	17 000	30 000
Coefficient de corrélation ( $r^2$ )	0,1966	0,1924	0,1638	0,3041	0,3508	0,2961	0,3355

Dans le tableau XX, le comportement des coefficients de corrélation ( $r^2$ ) de l'analyse de covariance est encore très similaire à celui des coefficients de détermination ( $R^2$ ) des courbes de tendance montré à la section 5.3. Il y a une légère diminution dans les premiers 1 000 cycles de 0,1966 à 0,1638. Dans les 9 000 cycles suivants,  $R^2$  augmente jusqu'à 0,3508. Finalement, dans les 7 000 cycles qui suivent il diminue jusqu'à 0,2961, puis remonte pendant les 13 000 derniers cycles. Le coefficient de corrélation a donc un comportement plus ou moins erratique.

Tableau XXI

Coefficients de corrélation entre les pourcentages de vides des plaques et les profondeurs des ornières selon les cycles. Enrobé GB-20

	Enrobé GB-20						
	Nombre de cycles						
	100	300	1 000	3 000	10 000	17 000	30 000
Coefficient de corrélation ( $r^2$ )	0,0426	0,0134	0,1060	0,0422	0,0768	0,0583	0,1078

Cependant, il faut noter qu'il y a une différence marquée dans les valeurs entre les premiers 1 000 cycles et les cycles finaux. Ceci peut être un indice de l'influence à long

terme de la température de compactage des plaques sur l'orniérage. Mais les valeurs des coefficients de corrélation sont quand même petits. Il y a donc une faible dépendance de l'orniérage avec la température de compactage des plaques de l'enrobé GB-20.

Quant aux coefficients de corrélation entre les pourcentages de vides et les profondeurs des ornières, ils sont trop petits et leurs comportements sont erratiques (tableau XXI). Ils diminuent pendant les premiers cycles. Ils augmentent pendant les 7 000 cycles suivants. Puis diminuent dans les derniers 20 000 cycles. Cela donne comme conclusion que le pourcentage de vides, dans la plage de valeur étudiée, n'a que très peu d'influence sur l'apparition des ornières dans les plaques soumises à l'orniéreur.

## **5.6 Comparaison des densités avant et après l'orniérage**

Pour pouvoir comparer la densité des plaques avant et après l'essai d'orniérage, deux plaques de l'enrobé ESG-10 et deux plaques de l'enrobé GB-20 ont été sélectionnées. Les plaques ont été coupées en six morceaux. Les quatre morceaux du milieu ont été retenus pour mesurer la densité brute dans chacun d'eux.

### **5.6.1 Enrobé ESG-10**

Le tableau XXII présente les résultats des essais de densité des plaques 10 et 11 faits avant et après l'essai d'orniérage, de même que les densités des morceaux de plaques. Le tableau montre, après l'essai à l'orniéreur, une densité 1,44% plus élevée dans la plaque 10 et 1% plus élevée dans la plaque 11. Cela se traduit en une perte de vides de 1,5% dans les deux plaques.

Dans les morceaux de la plaque 10, la densité est plus élevée dans les deux morceaux des extrémités de la plaque après l'essai à l'orniéreur. Tandis que dans la plaque 11, la

densité est plus élevée dans une seule extrémité. Cela peut être provoqué par le fluage de l'enrobé sous la charge.

Tableau XXII  
Comparaison des densités des plaques avant et après l'essai à l'orniéreur. Enrobé ESG-10

	Enrobé ESG-10							
	Plaque 10				Plaque 11			
Db plaque avant l'essai à l'orniéreur	2,424				2,424			
Db plaque après l'essai à l'orniéreur	2,459				2,448			
	M10-1	M10-2	M10-3	M10-4	M11-1	M11-2	M11-3	M11-4
Db morceau après l'essai à l'orniéreur	2,467	2,452	2,448	2,469	2,442	2,448	2,450	2,453

La pression de la roue dans l'orniéreur tend à créer un mouvement de particules, mais ce dernier est empêché par le moule de la plaque. Cela cause la densification de l'enrobé dans le voisinage des parois du moule. La granulométrie de l'enrobé ESG-10 permet le mouvement de particules dû à son haut contenu de particules fines.

### 5.6.2 Enrobé GB-20

Les résultats des essais de densité sur les plaques 7 et 9 de l'enrobé GB-20 sont présentés au tableau XXIII. L'augmentation de la densité après l'essai à l'orniéreur dans la plaque 7 d'enrobé GB-20 est de 1,88% et dans la plaque 9 de 2,1%. Cette augmentation de la densité a comme résultat une perte de vides dans les plaques de l'ordre de 1,8%. La perte de vides est plus élevée dans l'enrobé GB-20 que dans l'enrobé ESG-10. L'explication est peut-être dans la granulométrie des deux enrobés. La courbe granulométrique de l'enrobé GB-20 est plus éloignée de la courbe de masse volumique maximale, donc il a un VAM (vides intergranulaires) plus élevé que l'enrobé

ESG-10. Une autre cause probable est la différence entre les épaisseurs des plaques, soit 50 mm pour les plaques de ESG-10 et 100 mm pour les plaques de GB-20. Les plaques de 100 mm sont compactées avec la même énergie de compaction que les plaques de 50 mm.

Tableau XXIII  
Comparaison des densités des plaques avant et après l'essai à l'orniéreur. Enrobé GB-20

	Enrobé GB-20							
	Plaque 7				Plaque 9			
Db plaque avant l'essai à l'orniéreur	2,463				2,462			
Db plaque après l'essai à l'orniéreur	2,510				2,513			
	M7-1	M7-2	M7-3	M7-4	M9-1	M9-2	M9-3	M9-4
Db morceau après l'essai à l'orniéreur	2,503	2,518	2,509	2,507	2,513	2,524	2,517	2,501

Dans l'enrobé GB-20, le comportement de la densité dans les morceaux de plaques est différent de celui de l'enrobé ESG-10. La densité est plus élevée dans les morceaux du milieu des deux plaques. Cela peut être expliqué par l'effet de bord. Les parois du moule empêchant le mouvement des particules produit par l'application de la charge.

Il est important de noter que, dans toutes les plaques coupées, la densité a présenté des variations de 0,9% de la valeur de la densité et une variation moyenne des teneurs en vides de 0,8% à l'intérieur d'une même plaque. Ces différences sont présentes également dans la plaque qui n'a pas été soumise à l'essai d'orniérage (tableau XXIV)

Dans la plaque 2, qui n'a pas été soumise à l'orniéreur, le comportement de la densité des morceaux de plaque est semblable à celui des plaques après l'essai d'orniérage. Il est intéressant de faire remarquer que la densité de la plaque est moindre que la densité des morceaux.

Tableau XXIV

Densités des morceaux de plaque qui n'ont pas été soumis à l'orniéreur

	Enrobé GB-20			
	Plaque 2			
Db plaque	2,463			
	M2-1	M2-2	M2-3	M2-4
Db morceau	2,499	2,512	2,500	2,485

Une cause possible de cette diminution de la densité est qu'il est probable que les deux bouts de plaque, qui ne sont pas pris en considération, aient des densités inférieures aux autres morceaux.

### 5.7 Analyse de covariance : température versus densité brute

La variabilité de la densité dans les plaques est due à l'arrangement de particules durant le processus de fabrication et de compactage de la plaque. Cet arrangement de particules granulaires enrobées par le bitume dépend de la quantité de bitume et de sa viscosité qui dépend à son tour de la température à laquelle le compactage est fait. Donc, penser que la densité du mélange dépend de la température de compactage de la plaque est tout à fait possible. L'analyse de covariance entre la température de compactage et la densité brute des plaques a été faite pour mesurer cette dépendance (tableau XXV).

Dans l'analyse de covariance de la température de compactage et de la densité brute des plaques, les coefficients de corrélation ( $r^2$ ) sont très proches de zéro ( $r^2$  varie de zéro à un). Ils sont donc trop faibles.

Tableau XXV

Coefficients de corrélation de l'analyse de covariance des températures de compactage versus densités brutes. Enrobés ESG-10 et GB-20

	Enrobé ESG-10	Enrobé GB-20
Coefficients de corrélation ( $r^2$ )	0,0906	0,02397

Donc, pour l'ensemble des données, la densité dépend très peu de la température de compactage des plaques.

## CONCLUSION

Les constituants de l'enrobé bitumineux sont les granulats et le bitume. Ce dernier sert de liant entre les granulats. Pour la fabrication des enrobés, la pierre concassée est utilisée pour l'angularité de sa surface. Cette angularité augmente la stabilité du squelette granulaire et la résistance à l'orniérage.

La température influence presque toutes les propriétés du bitume et, par conséquent, le comportement des enrobés bitumineux. La température influence sa rigidité, son comportement en fatigue et son comportement à l'orniérage. La température influence également l'oxydation du bitume qui dépend aussi du temps d'exposition et de l'épaisseur du film de bitume effectif.

Il existe plusieurs essais pour caractériser les enrobés bitumineux. Ils sont classés selon l'homogénéité de l'état de contrainte et de déformation à l'intérieur de l'échantillon pendant l'essai.

Une caractéristique importante des enrobés est sa résistance aux déformations permanentes ou orniérage. L'orniérage est une problématique des chaussées souples qui a son origine dans des facteurs comme la composition de l'enrobé, la température, la charge et la fréquence d'application de cette charge. Les essais pour étudier l'orniérage des enrobés bitumineux sont classés comme essais de mesure directe, essais de corrélation et essais de simulation de trafic.

Au Québec, la formulation des enrobés est faite avec la méthode LC (Laboratoire des chaussées) qui inclue la résistance aux déformations de type ornières comme paramètre. Pour mesurer cette résistance à l'orniérage, les projets de normes LC 26-400 *Préparation des enrobés : Compactage de plaques d'enrobé* et LC 26-410 *Vérification*

*de la résistance au fluage des enrobés au moyen de l'essai d'orniérage*, qui est un essai de simulation de trafic, sont utilisés.

Les méthodes d'essais incluent le malaxage, le compactage des plaques et l'essai à l'orniéreur. Avec les versions utilisées de ces projets de normes, il est possible d'introduire des variations dans la procédure par différentes interprétations de celle-ci.

La série d'essais réalisés dans cette recherche, commanditée par le MTQ, montre la variabilité des résultats obtenus lors d'essais à l'orniéreur. Les profondeurs d'ornières des plaques compactées à la même température (température de compactage spécifiée par la norme  $\pm 5, \pm 7, \pm 10^{\circ}\text{C}$ ) montrent des variations qui peuvent aller jusqu'à 2,5 %, pour l'enrobé ESG-10 et jusqu'à 1,09 % pour l'enrobé GB-20.

Une observation qui ressort de cette étude, c'est que, dans l'écart des températures étudiées (température de compactage selon le projet de norme LC 26-400  $\pm 10^{\circ}\text{C}$ ), la température de compactage des plaques n'a pas d'influence significative sur le pourcentage d'ornière. Les valeurs faibles des coefficients de détermination,  $R^2 < 0,55$ , ne permettent pas d'établir une relation entre la température de compactage des plaques et les profondeurs d'ornières. La faible quantité de données ne permet toutefois pas de faire une analyse statistique plus détaillée.

Par contre, l'augmentation de la valeur du coefficient de corrélation de presque 40 %, avec l'augmentation du nombre de cycles, peut être un indice de l'influence de la température de compactage sur le comportement à long terme de l'enrobé.

Si les analyses sont faites avec les moyennes des résultats des plaques compactées à la même température et non avec toutes les données, l'influence de la température de compactage sur la profondeur d'ornière s'accroît. Le coefficient de détermination

augmente de plus de 20 %, soit de 0,55 à 0,83 pour l'enrobé ESG-10 et de 0,51 à 0,74 pour l'enrobé GB-20.

Les valeurs presque nulles des coefficients de corrélation ( $r^2$ ) dans les analyses de covariance indiquent que le pourcentage de vides des plaques n'a pas d'influence significative sur les profondeurs des ornières. Ce qui permet de dire que l'orniérage dépend plus de la température de compactage des plaques que du pourcentage de vides.

Il est important de mentionner que même si l'influence de la température de compactage des plaques d'enrobé a peu d'influence sur l'orniérage, la température à laquelle les plaques sont compactées a une certaine limite. Si la température est trop basse, la mise en place de l'enrobé est plus difficile.

Le comportement des enrobés en laboratoire est toutefois différent de celui observé en chantier. Ceci est dû à plusieurs facteurs. Par exemple, en laboratoire, les conditions de température et d'humidité sont plus ou moins contrôlées, alors qu'en chantier elles ne le sont pas. En laboratoire, le malaxage est fait à la température requise par la norme et, tout de suite après le malaxage, l'enrobé est compacté à la température souhaitée. La situation est différente en chantier puisqu'il faut transporter l'enrobé de la centrale d'enrobage vers le site. Le temps entre le malaxage et le compactage est plus long qu'en laboratoire. Durant le transport, l'enrobé refroidi et les granulats ont plus de temps pour absorber le bitume avant le compactage.

Un autre aspect qui est très différent entre le laboratoire et le chantier est la méthode de compactage. En laboratoire, le compactage est effectué selon un plan de balayage décrit dans la norme. En chantier, l'opérateur du compacteur peut, au besoin, ajouter des passes pour obtenir le compactage désiré. De plus, il est possible de vibrer l'enrobé en chantier. À cause de cela, même si le compactage devient difficile dû à une température

plus basse de l'enrobé, il est possible d'obtenir le compactage désiré en chantier; ce qui n'est pas le cas en laboratoire.

En laboratoire, l'enrobé est mis dans des moules d'acier pour la fabrication des plaques. Lors du compactage en laboratoire, il y a des effets de bord qui sont dus au voisinage de l'enrobé avec les parois d'acier et qui causent des réactions différentes de l'enrobé dans ce secteur de la plaque. Les effets de bord ne sont pas présents en chantier. Le confinement de l'enrobé dans le moule peut mener à une distribution de forces différentes dans la masse d'enrobé, peut empêcher le contact de l'enrobé avec l'air, et causer une diminution plus lente de la température de l'enrobé. Il est à noter que les effets de bord sont également présents lors de l'essai à l'orniérage.

Donc, l'influence de la température de compactage de l'enrobé peut être très différente en laboratoire par rapport au chantier. Les conclusions présentées ici ne sont applicables que pour les enrobés fabriqués en laboratoire et compactés dans la plage de température étudiée dans cette recherche, soit  $160 \pm 5$ ,  $\pm 7$  et  $\pm 10^\circ\text{C}$  pour l'enrobé GB-20 et  $143 \pm 5$ ,  $\pm 7$  et  $\pm 10^\circ\text{C}$  pour l'enrobé ESG-10.

## RECOMMANDATIONS

Lors de l'étude, il a été remarqué que le plan de balayage pour le compactage des plaques est le même pour les plaques de 50 mm et les plaques de 100 mm. Or le degré de compactage dépend de la force appliquée pour le compactage et de l'épaisseur de la couche à compacter. Il est donc possible de déduire que l'énergie déployée dans les deux cas n'est pas la même et que les plaques de 100 mm sont moins sollicitées en termes d'énergie de compactage que celles de 50 mm. Pour faire la correction de ceci, il faudrait effectuer un plan d'expériences où l'énergie nécessaire pour atteindre le grade de compactage souhaité serait mesurée et ensuite modifier le plan de balayage de manière qu'il exerce une énergie similaire dans les deux cas.

D'autre part, pour connaître l'influence réelle de l'oxydation sur l'orniérage, des essais d'orniérage avec des enrobés préparés avec du bitume exposé à différents degrés d'oxydation pourraient être réalisés.

Dans la conclusion de cette étude, il a été précisé que la quantité de données, dans chaque plage de température, n'était pas suffisante pour faire des analyses statistiques plus détaillées. De ce fait, il faudrait ajouter plus d'essais à la présente étude pour combler cette déficience.

Il serait aussi possible d'augmenter les écarts de température de compactage afin d'établir des limites où la température de compactage commence à avoir une influence plus importante sur les résultats de l'essai d'orniérage.

Il serait également important de fixer les paramètres d'acceptation de l'essai d'orniéage dans la norme LC 26-400. L'écart maximal entre les pourcentages des ornières des deux plaques pourrait être établi.

La reproduction des conditions réelles en laboratoire est importante afin d'avoir des résultats représentatifs. Pour ce faire, il serait intéressant de compacter et tester des plaques d'enrobés de plus grandes dimensions afin d'éviter les effets de bord. De plus, avoir un orniéreur dans lequel il est possible de contrôler l'humidité et la vitesse de déplacement de la roue permettrait de mieux simuler les conditions réelles. Finalement, il serait préférable que la roue passe sur l'enrobé dans une seule direction et non en aller-retour comme cela est fait actuellement. L'aller-retour de la roue, en plus de ne pas être représentative des conditions réelles, cause un mouvement des granulats dans deux directions, ce qui pourrait affecter la résistance à l'orniéage.

**ANNEXE 1**

**Normes AFNOR P 98-250-2 *Préparation des mélanges hydrocarbonés***

**Partie 2 : *Compactage des plaques***

**Et**

**P 98-253-1 *Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés***

**Partie 1 : *Essai d'orniérage***

# norme française

Essais relatifs aux chaussées

## Préparation des mélanges hydrocarbonés

### Partie 2 : Compactage des plaques

E : Tests relating to pavements — Preparation of bituminous mixtures —  
Part 2 : Plates compaction

D : Strassenbau-Prüfungen — Vorbereitung der teerhaltigen Mischungen —  
Teil 2 : Verdichtung der Platten

Norme française homologuée par décision du Directeur Général de l'afnor  
le 5 octobre 1991 pour prendre effet le 5 novembre 1991.

**correspondance** À la date de publication de la présente norme, il n'existe pas de norme ou de projet de norme européenne ou internationale sur le sujet.

**analyse** La présente norme a pour objet de définir une méthode de compactage de plaques parallélépipédiques de mélanges hydrocarbonés à l'aide d'une charge roulante.

**descripteurs** **Thésaurus International Technique** : chaussée, produit hydrocarboné, mélange, préparation, plaque, essai, compactage, conditions d'essai.

modifications

corrections

TA  
368  
A77

{ P98-  
250-2  
1881

## 1 Objet

La présente norme a pour objet de définir un moyen de compactage de plaques de mélanges hydrocarbonés par l'effet d'une charge roulante. Les modalités et l'énergie de compactage sont adaptées selon le type et la destination des plaques.

## 2 Domaine d'application

Le domaine d'application comprend les mélanges hydrocarbonés à chaud ou à froid fabriqués en laboratoire ou prélevés sur chantier.

## 3 Définitions — Symboles — Abréviations

### 3.1 Définitions

**passé** : un aller ou un retour de la charge roulante.

**np** : nombre de passes.

**axe de la plaque** : axe de symétrie de la plaque parallèle à la plus grande dimension du moule.

**axe latéral** : axe d'une passe parallèle à la plus grande dimension du moule, situé à une distance  $a$  de l'axe de la plaque.

**position arrière** : axe latéral le plus éloigné de la face avant de l'appareil.

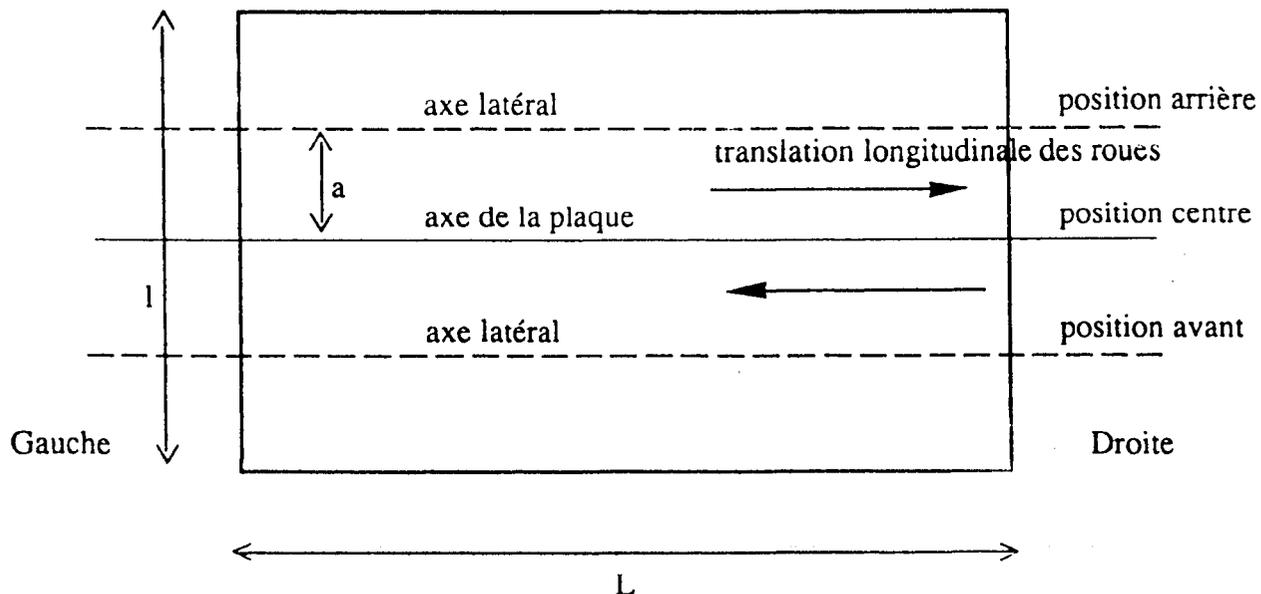
**mode «axe bloqué»** : mode de fonctionnement de l'appareil tel que la hauteur de l'axe de la roue reste constante par rapport au bord supérieur du moule pendant une passe.

**mode «axe libre»** : mode de fonctionnement de l'appareil tel que la charge appliquée sur la plaque reste constante au cours d'une passe.

**plan de balayage** : ensemble des modalités de passage de la ou des roues sur la plaque, définies par le nombre, l'ordre d'exécution et les valeurs de la translation latérale.

### 3.2 Symboles — Abréviations

#### SCHEMA D'UNE PLAQUE - VUE DE DESSUS



L	: longueur intérieure du moule en centimètres.
l	: largeur intérieure du moule en centimètres.
h	: hauteur intérieure du moule en centimètres.
M	: masse de la plaque en grammes.
MVR	: masse volumique réelle du mélange hydrocarboné en grammes par centimètre cube.
v %	: pourcentage de vides de la plaque.
F	: charge appliquée sur les pneumatiques en kilonewtons.
$V_t$	: vitesse de translation longitudinale des roues en centimètres par seconde.
position centre	: axe de la plaque.
position avant	: axe latéral le plus proche de la face avant de l'appareil.
a	: valeur de la translation latérale en centimètres.
E (np)	: épaisseur de la plaque en cours de compactage en centimètres.
E	: épaisseur finale de la plaque en centimètres.

#### 4 Principe

Une masse donnée de mélange hydrocarboné est compactée dans un moule parallélépipédique à l'aide d'une charge appliquée par une ou plusieurs roues équipées de pneumatiques. Celles-ci peuvent tourner librement autour de leur axe. La ou les roues exécutent des passes à vitesse constante parallèlement à l'axe de la plaque selon un plan de balayage spécifié. Au cours du compactage la surface de l'éprouvette est maintenue affleurante au bord supérieur du moule par un dispositif permettant de compenser la réduction du pourcentage de vides en résultant.

Si le comportement du mélange hydrocarboné ne permet pas un compactage avec des roues équipées de pneumatiques, un cylindre métallique peut être utilisé.

#### 5 Appareillage

— Un ou plusieurs moules de dimensions intérieures à 0,1 cm près :

L = 50 cm, l = 18 cm, h = 10 ou 5 cm,

ou

L = 60 cm, l = 40 cm, h = 15 ou 20 cm.

— Un dispositif permettant de compacter les plaques dans les moules suivant le principe décrit à l'article 5.

Ce dispositif doit :

- permettre d'appliquer une charge  $F$  sur la ou les roues, réglable entre 1 et 10 kN à  $\pm 5\%$ ,
- comporter une ou plusieurs roues équipées de pneumatiques sans sculpture de dimension  $400 \times 8$  <sup>1)</sup>,
- comporter éventuellement un cylindre métallique lisse de diamètre compris entre 42 cm et 80 cm, de longueur de génératrice égale à  $17,5 \text{ cm} \pm 0,2 \text{ cm}$  ou  $39 \text{ cm} \pm 0,5 \text{ cm}$  et d'épaisseur comprise entre 0,4 cm et 0,8 cm,
- permettre la translation de la charge roulante à la vitesse  $V_1$  constante à 10 % près,
- comporter un système de positionnement de la ou des roues sur les différents axes de compactage selon des valeurs de  $a$  prédéterminées,
- permettre un mode de fonctionnement à axe libre et un mode à axe bloqué,
- comporter éventuellement une ou plusieurs cales de dimensions appropriées pour réaliser des plaques d'épaisseur  $E$  spécifiée différente de la hauteur  $h$  du moule,
- comporter un dispositif de mesure de l'épaisseur  $E$  (np) en continu ayant une résolution inférieure ou égale à 0,1 cm,
- comporter un système permettant de ramener la surface de la plaque affleurante au bord supérieur du moule périodiquement en cours de compactage.

## 6 Préparation des éprouvettes

### 6.1 Masse des plaques

La masse  $M$  est fonction de la masse volumique réelle MVR du mélange hydrocarboné, des dimensions du moule, de l'épaisseur  $E$  de la plaque et du pourcentage de vide escompté  $v\%$  pour les modalités de compactage choisies.

$$M = L \times l \times E \times \text{MVR} (100 - v \%).$$

### 6.2 Remplissage du moule

On charge le moule avec la masse  $M$  à 0,1 % près du mélange hydrocarboné à la température de référence, en répartissant le mélange dans le moule.

Les températures de référence de préparation des éprouvettes de mélanges à base de bitume pur sont définies comme suit :

bitume 80/100	: 140 °C $\pm$ 5 °C
bitume 60/70	: 150 °C $\pm$ 5 °C
bitume 40/50	: 160 °C $\pm$ 5 °C
bitume 20/30	: 180 °C $\pm$ 5 °C

Pour les autres liants hydrocarbonés, les températures de référence de fabrication des mélanges seront celles définies par le fournisseur.

La température de référence et le mode de préparation du mélange hydrocarboné sont indiqués sur la feuille d'essai et doivent figurer sur les procès-verbaux d'essais utilisant les plaques ainsi confectionnées.

## 7 Mode opératoire

### 7.1 Conditions d'essai

- Nombre de roues :
  - 1 pour les plaques de dimension 50 cm × 18 cm × E,
  - 2 roues jumelées distantes de 18 cm ± 0,1 cm pour des plaques de dimension 60 cm × 40 cm × E.
- Vitesse de translation  $V_t$  comprise entre 20 et 50 cm/s.
- Pression de gonflage à l'arrêt : suivant mode de compactage à ± 0,3 bar.
- Charge F : suivant mode de compactage à ± 5 % en valeur relative.

### 7.2 Procédures de compactage

Plusieurs types de procédures de compactage peuvent être réalisés, en fonction de l'énergie à appliquer, de la dimension des plaques, de l'état de surface recherché.

#### 7.2.1 Compactages à énergie déterminée

##### 7.2.1.1 Compactage faible — Type 1

Tableau 1 : modalités de compactage faible pour plaques L = 50 cm, l = 18 cm

Nombre de passes						Pression du pneu en bar	F en kN	Départ	a en cm	Mode de fonctionnement
Position roues										
Avant		Centre		Arrière						
	Cumulé *		Cumulé *		Cumulé *					
1						1	1	droite	7,5	axe bloqué
				1						
		1								
1										
				1						
2	2					3	2	droite	4,5	axe libre
				2	2					
		1	1							
4	6									
				4	6					
		2	3							
2	8									
				2	8					
		1	4							
1						3	2		4,5	axe bloqué
				1						
		1								
1										
				1						
		1								

\*) Le nombre de passes cumulé est noté seulement pour le fonctionnement en mode axe libre

## 7.2.1.2 Compactage fort — Type 2

Tableau 2 : modalités de compactage fort pour plaques L = 50 cm, l = 18 cm

Nombre de passes						Pression du pneu en bar	F en kN	Départ	a en cm	Mode de fonctionnement
Position roues										
Avant		Centre		Arrière						
	Cumulé *		Cumulé *		Cumulé *					
1						1	1	droite	7,5	axe bloqué
				1						
		1								
1										
				1						
		1								
2	2					6	5	droite	4,5	axe libre
				2	2					
		1	1							
2	4									
				2	4					
		1	2							
4	8									
				4	8					
		2	4							
8	16									
				8	16					
	4	8								
8	24									
				8	24					
		4	12							
4	28									
				4	28					
	2	14								
2	30									
				2	30					
		1	15							
2	32									
				2	32					
		1	16							
1						6	5		4,5	axe bloqué
				1						
		1								
1										
				1						
		1								

\*) Le nombre de passes cumulé est noté seulement pour le fonctionnement en mode «axe libre».

7.2.1.3 Compactage faible — Type 1 bis

Tableau 3 : modalités de compactage faible pour plaques L = 60 cm, l = 40 cm

Nombre de passes						Pression du pneu en bar	F en kN	Départ	a en cm	Mode de fonctionnement
Position roues										
Avant		Centre		Arrière						
	Cumulé *		Cumulé *		Cumulé *					
1										
				1		1	2	droite	7,5	axe bloqué
		1								
1										
				1						
		1								
2	2					3	4	droite	6,3	axe libre
				2	2					
		1	1							
4	6			4	6					
		2	3							
2	8									
				2	8					
		1	4							
1						3	4		6,3	axe bloqué
				1						
		1								
1										
				1						
		1								

\*) Le nombre de passes cumulé est noté seulement pour le fonctionnement en mode «axe libre».

## 7.2.1.4 Compactage fort — Type 2 bis

Tableau 4 : modalités de compactage fort pour plaques L = 60 cm, l = 40 cm

Nombre de passes						Pression du pneu en bar	F en kN	Départ	a en cm	Mode de fonctionnement
Position roues										
Avant		Centre		Arrière						
	Cumulé *		Cumulé *		Cumulé *					
1						1	2	droite	7,5	axe bloqué
				1						
		1								
1										
				1						
		1								
2	2					6	10	droite	4,5	axe libre
				2	2					
		1	1							
2	4									
				2	4					
		1	2							
4	8									
				4	8					
		2	4							
8	16									
				8	16					
		4	8							
8	24									
				8	24					
		4	12							
4	28									
				4	28					
		2	14							
2	30									
				2	30					
		1	15							
2	32									
				2	32					
		1	16							
1						6	10		6,3	axe bloqué
				1						
		1								
1										
				1						
		1								

\*) Le nombre de passes cumulé est noté seulement pour le fonctionnement en mode «axe libre».

### 7.2.2 Compactage à pourcentage de vides recherché

Les modalités définies au paragraphe 7.2.1 ne permettent pas, a priori, d'obtenir un pourcentage de vides préalablement choisi pour une plaque donnée.

S'il est souhaité obtenir des plaques à pourcentage de vide recherché, on peut modifier les modalités de compactage.

On choisit la modalité définie au paragraphe 7.2.1 conduisant au résultat le plus proche par excès de pourcentage de vide recherché, puis on augmente le nombre de passes en veillant à l'équilibrage du plan de balayage (croissance et décroissance, symétriques, du nombre de passes) pour éviter les hétérogénéités et les déformations superficielles.

Dans ce cas la procédure employée est décrite sur la feuille d'essai et sur les procès-verbaux des essais utilisant les plaques réalisées.

### 7.2.3 Utilisation d'un cylindre lisse

Le cylindre lisse dont la longueur de génératrice est proche de la largeur  $l$  de la plaque à compacter est monté sur la roue ou sur les roues jumelées.

#### 7.2.3.1 Cylindre lisse en finition de compactage

Les passes à axe bloqué en fin de procédures définies en 7.2.1 sont remplacées par quatre à six passes de cylindre lisse sans déplacement transversal.

#### 7.2.3.2 Compactage au cylindre lisse

Pour des mélanges hydrocarbonés inaptes au compactage par pneumatiques, on utilise le cylindre lisse pour l'ensemble du compactage sans déplacement transversal de la charge roulante.

Le mode de compactage est décrit sur la feuille d'essai et doit être mentionné sur les procès-verbaux des essais utilisant les plaques fabriquées selon ces procédures.

## 8 Procès-verbal d'essai

Le procès-verbal d'essai doit faire référence à la présente norme et indiquer :

- la masse  $M$  de l'éprouvette,
- l'identification de la formule employée,
- la température de référence de fabrication,
- le mode de fabrication,
- le mode de compactage utilisé,
- les conditions de l'essai et les détails opératoires non prévus dans la présente norme ainsi que les incidents éventuels susceptibles d'avoir agi sur le résultat.

NF P 98-253-1

Juillet 1991

# norme française

Essais relatifs aux chaussées

## Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés

### Partie 1 : Essai d'orniérage

E: Tests relating to pavements — Bituminous mixtures permanent deformation — Part 1: Wheel tracking test

D: Prüfungen für Fahrbahnen — Überelastische Durchbiegung von bituminösen Mischungen — Teil 1: Fahrspurversuch

Norme française homologuée par décision du Directeur Général de l'afnor le 28 juin 1991 pour prendre effet le 28 juillet 1991.

**correspondance** À la date de publication de la présente norme, il n'existe pas de norme ou de projet de norme européenne ou internationale sur le sujet.

**analyse** La présente norme définit les méthodes permettant d'étudier le comportement en déformation permanente des mélanges hydrocarbonés.  
La partie 1 spécifie une méthode pour déterminer la profondeur d'ornière par fluage au moyen de la simulation d'une charge roulante sur des matériaux hydrocarbonés.

**descripteurs** **Thésaurus International Technique** : chaussée, produit hydrocarboné, mélange, déformation sous contrainte, essai de fluage, essai, mesurage d'épaisseur.

**modifications**

**corrections**

TA  
368  
A77  
(P98-  
253-1  
1991

## SOMMAIRE

	Page
1	OBJET ..... 3
2	DOMAINE D'APPLICATION ..... 3
3	DÉFINITIONS — SYMBOLES ..... 4
4	PRINCIPE ..... 4
5	APPAREILLAGE ..... 4
6	PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES ..... 6
6.1	Confection des éprouvettes en laboratoire ..... 6
6.2	Éprouvettes issues de prélèvements sur chaussée ..... 6
6.3	Conservation des éprouvettes avant essai ..... 6
6.4	Contrôle des éprouvettes ..... 6
7	MODE OPÉRATOIRE ..... 6
7.1	Conditions d'essai ..... 6
7.2	Procédure d'essai ..... 6
7.2.1	Contrôle du pneumatique ..... 6
7.2.2	Mise en place des éprouvettes ..... 7
7.2.3	Déroulement de l'essai ..... 7
8	CALCUL ET EXPRESSION DES RÉSULTATS ..... 8
9	PROCÈS-VERBAL D'ESSAI ..... 8
10	BIBLIOGRAPHIE ..... 9
	ANNEXE A (informative) Exemple de présentation de résultat ..... 10

## 1 OBJET

La présente norme spécifie une méthode pour déterminer en laboratoire la profondeur d'ornièrre par fluage au moyen de la simulation d'une charge roulante sur des matériaux hydrocarbonés de compositions et de masses volumiques apparentes données.

## 2 DOMAINE D'APPLICATION

C'est un essai réalisé sur une éprouvette de matériaux hydrocarbonés. Cette éprouvette est soit confectionnée en laboratoire, soit...

### 3 DÉFINITIONS — SYMBOLES

**Pourcentage de profondeur d'ornière  $P_i$  % :** pourcentage de diminution d'épaisseur moyenne mesurée en 15 points prédéterminés.  $P_i$  % est appelé dans la présente norme «Profondeur d'ornière».

**Trace du pneu :** empreinte du pneu sur une surface plane, lorsqu'on applique une charge verticale.

**Cycle :** un aller et un retour de la charge roulante.

**E :** épaisseur de la couche déformable ou des couches déformables de l'éprouvette exprimée en millimètres.

**$m_{ij}$  :** distance exprimée en millimètres mesurée lors de la  $i$ ème séquence de mesure entre une surface de référence et un point spécifié de la face supérieure de l'éprouvette ( $j$  varie de 1 à 15).

### 4 PRINCIPE

Le passage répété d'une roue équipée d'un pneumatique, soumettant une éprouvette parallélépipédique de matériau hydrocarboné à une charge verticale, provoque une diminution relative de l'épaisseur appelée ornière.

L'éprouvette est placée dans un moule et est testée dans des conditions isothermes, la surface de l'éprouvette affleurant la partie supérieure du moule. La charge verticale est maintenue quasi-constante par un dispositif approprié. Le pneumatique est animé suivant le grand axe de l'éprouvette d'un mouvement sinusoïdal de fréquence et d'amplitude spécifiées.

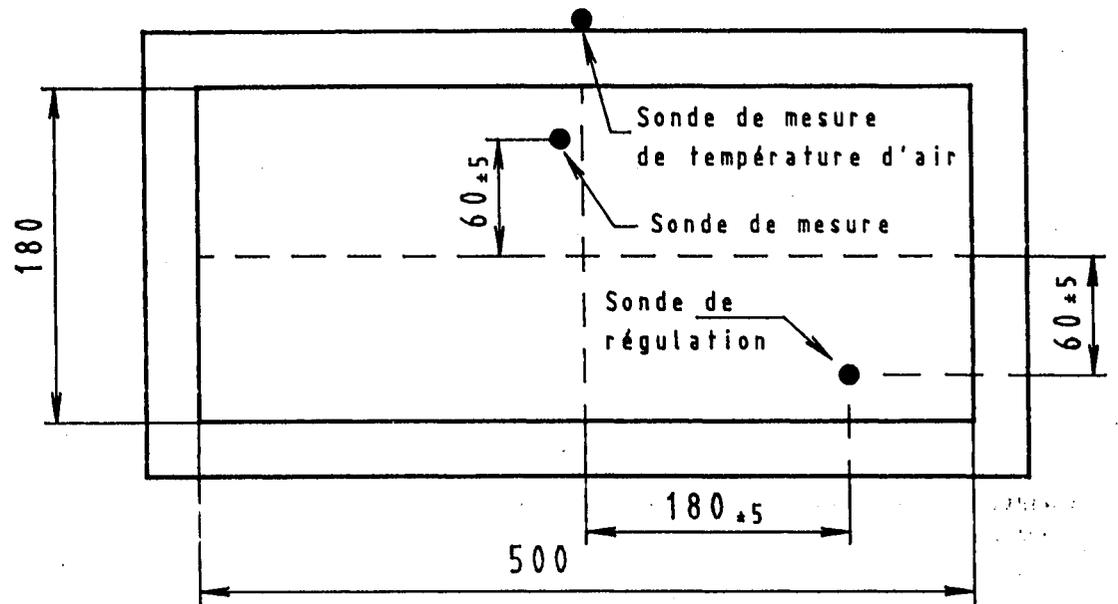
### 5 APPAREILLAGE

Un dispositif simulant une charge roulante comportant :

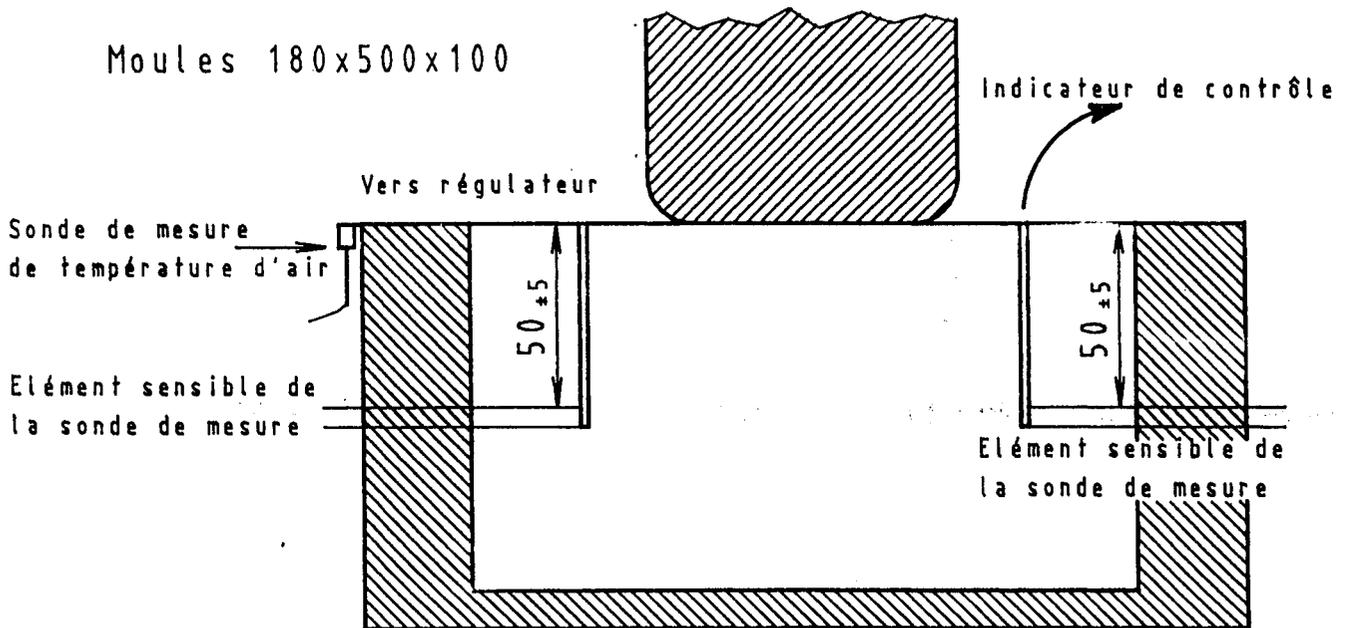
- une roue équipée d'un pneumatique sans sculpture  $400 \times 8$  de largeur de trace  $8 \text{ cm} \pm 0,5 \text{ cm}$ , (1)
- un ou plusieurs moules de dimensions intérieures  $180 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  ou  $180 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  non déformables dans les conditions d'essai,
- une jauge de profondeur pour mesurer  $m_{ij}$  à  $0,2 \text{ mm}$  près (2) dont la surface de touche carrée ou circulaire est comprise entre 5 et  $10 \text{ mm}^2$ . Un capteur sans contact peut être utilisé s'il conduit au même résultat,
- une enceinte ventilée à température de consigne variable, thermorégulée par une sonde placée dans l'éprouvette comme indiqué en figure 1, pour garantir la température spécifiée au cœur de l'éprouvette à  $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- un indicateur de contrôle de la température au cœur de l'éprouvette comme indiqué en figure 1,
- une plaque-support d'éprouvette en acier, dont le défaut de planéité contrôlé à la règle suivant les diagonales soit inférieur à  $1 \text{ mm}$  et d'épaisseur telle que la flèche n'excède pas  $0,5 \text{ mm}$  dans les conditions normales d'essai.

(1) Le pneumatique type Trelleborg T522 BV Extra ou Spécial, 6 plis convient à cet essai.

(2) Une jauge de profondeur...



Moules 180x500x100



Moules 180x500x50

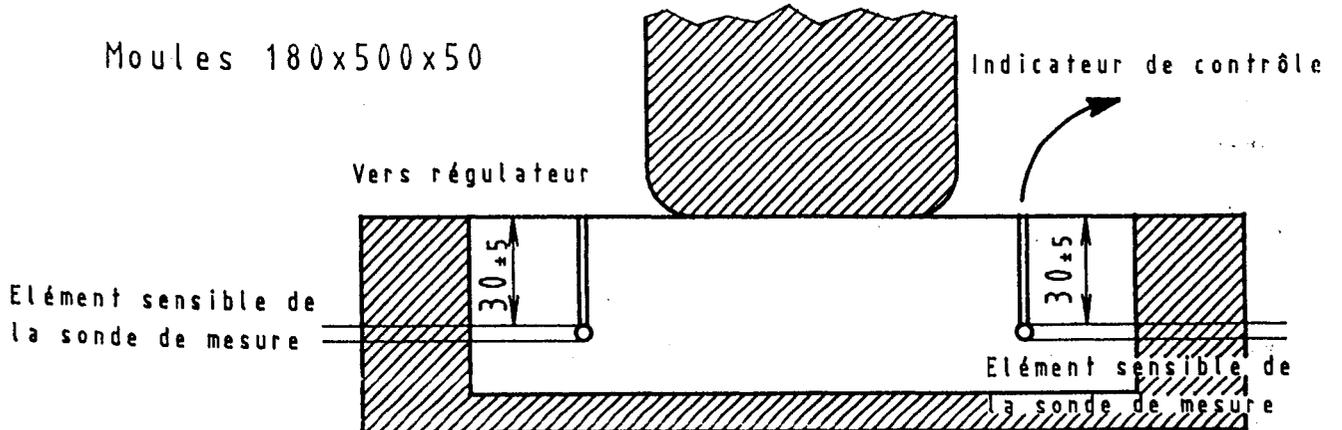


Figure 1 — Emplacement des sondes de température

## 6 PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES

### 6.1 Confection des éprouvettes en laboratoire

Les éprouvettes sont confectionnées dans les moules 180 mm × 500 mm × 100 mm ou 180 mm × 500 mm × 50 mm, le principe du mode de compactage étant précisé sur le procès-verbal d'essai.

### 6.2 Éprouvettes issues de prélèvements sur chaussée

Les prélèvements de couche de chaussée doivent être adaptés par sciage et éventuellement calage indéformable approprié aux dimensions du moule. Le bon contact du matériau avec le fond du moule et les parois latérales est assuré par scellement au plâtre.

### 6.3 Conservation des éprouvettes avant essai

Les éprouvettes soumises à l'essai doivent être confectionnées depuis plus de deux jours et dans des conditions telles que les caractéristiques dimensionnelles soient conservées. Le temps de conservation doit être du même ordre de grandeur pour les éprouvettes d'une même série. La durée réelle de conservation en jours doit être portée sur le procès-verbal.

### 6.4 Contrôle des éprouvettes

Épaisseur : on s'assure en tous points de la zone de mesurage que l'épaisseur de l'éprouvette ne s'écarte pas de plus de 5 % de l'épaisseur nominale, pour des épaisseurs nominales supérieures à 50 mm. Pour des épaisseurs nominales inférieures ou égales à 50 mm, on applique une tolérance de  $\pm 2,5$  mm.

Planéité : la planéité de la face inférieure de l'éprouvette est contrôlée à l'aide d'une règle ; une déformation supérieure à 5 mm entraîne le rebut de l'éprouvette.

## 7 MODE OPÉRATOIRE

### 7.1 Conditions d'essai

L'essai est réalisé suivant les conditions suivantes :

- course du pneumatique : 410 mm  $\pm$  5 mm,
- fréquence du mouvement relatif : 1 Hz  $\pm$  0,1 Hz,
- pression du pneumatique : 6 bar  $\pm$  0,1 bar en début d'essai,
- charge roulante appliquée : 5 000 N  $\pm$  50 N relevée statiquement au centre de l'éprouvette,
- écart entre l'axe de la trace et l'axe théorique de l'éprouvette inférieur à 5 mm,
- absence d'angle d'envirage.

### 7.2 Procédure d'essai

#### 7.2.1 Contrôle du pneumatique

La propreté du pneumatique doit être vérifiée, pour éviter un échauffement parasite en cours d'essai.

L'emploi de produit anticollage sur le pneumatique, tel que l'oléate de soude glycérolé, permet d'éviter des arrachements.

La pression est maintenue en permanence à 6 bar  $\pm$  0,3 bar au cours de l'essai. Cette pression est soit régulée par un dispositif approprié, soit contrôlée et ajustée à chaque arrêt.

### 7.2.2 Mise en place des éprouvettes

Chaque éprouvette est testée dans le moule ayant servi à sa confection. Cependant, on peut utiliser un autre moule dont les dimensions sont identiques à celles de l'éprouvette à 0,5 mm près.

Le moule contenant l'éprouvette est fixé sur la plaque-support.

L'éprouvette subit 1 000 cycles de la charge roulante à une température comprise entre 15 et 25 °C.

Après cette phase préalable, les mesures initiales  $m_{0j}$  ( $j$  variant de 1 à 15) du profil de l'éprouvette sont relevées conformément à la figure 2.

L'enceinte est réglée à la température d'essai.

La température de l'air est contrôlée par une sonde placée sur la paroi du moule de l'éprouvette comme indiqué en figure 1.

La température relevée sur cette sonde ne doit pas dépasser de plus de 15 °C la température de consigne, si celle-ci est supérieure ou égale à 60 °C. Si la température de consigne est inférieure à 60 °C, la température relevée sur la sonde ne doit pas dépasser 75 °C.

L'éprouvette est conservée au moins 12 h dans ces conditions avant le début de l'essai.

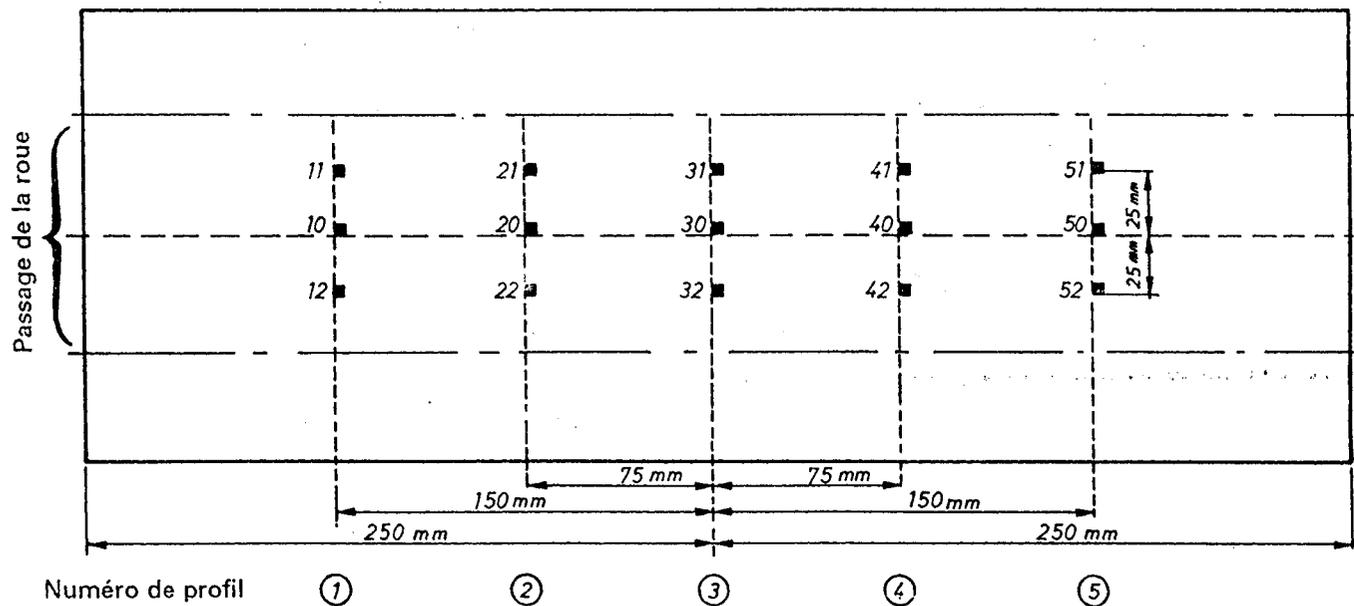


Figure 2 — Localisation des points de mesure

### 7.2.3 Déroulement de l'essai

La charge roulante est appliquée. Les profondeurs d'ornièrre sont mesurées à 1 000, 3 000, 10 000 et éventuellement à 30, 100, 300, 30 000, 100 000 cycles.

Avant chaque mesure, on relève la température de l'éprouvette : la moyenne des températures relevées à chaque arrêt est la température réelle moyenne de l'essai, qui doit figurer sur le procès-verbal d'essai.

À chacun des arrêts d'ordre  $i$ , les mesures  $m_{ij}$  ( $j$  variant de 1 à 15) sont faites, conformément à la figure 2. La profondeur d'ornièrre  $P_i$  est calculée suivant la formule suivante :

$$P_i \% = 100 \times \frac{\sum_j (m_{ij} - m_{0j})}{15 \times E}$$

pour  $j = 1$  à 15

où :

$E$  est l'épaisseur de la couche étudiée en millimètres,

$m_{ij}$  sont les mesurages exprimés en millimètres.

À chaque arrêt, après la fin des mesures, un délai d'une durée suffisante est observé pour que la température spécifiée au cœur de l'éprouvette soit atteinte.

L'essai doit être interrompu si la moyenne des valeurs de  $(m_{ij} - m_{0j})$  profondeur d'ornièrre est supérieure à 15 mm.

L'essai porte sur au minimum deux éprouvettes de même composition.

## 8 CALCUL ET EXPRESSION DES RÉSULTATS

On trace la courbe d'évolution de  $P_i$  % en fonction du nombre de cycles sur un graphique à coordonnées bilogarithmiques.

Une relation entre la profondeur d'ornièrre  $P_i$  % et le nombre de cycles à l'arrêt d'ordre  $i$  est recherchée, avec une équation de la forme :

$$Y = A (N/1\ 000)^b$$

où :

$Y$  est la profondeur d'ornièrre à  $N$  cycles,

$A$  est la profondeur d'ornièrre à 1 000 cycles,

$b$  est la pente de la droite en coordonnées logarithmiques.

Pour ce calcul, on élimine toutes les profondeurs d'ornièrre mesurées à  $N$  cycles si l'une des répétitions dépasse à  $N$  cycles la valeur de 15 %.

## 9 PROCÈS-VERBAL D'ESSAI

Le procès-verbal d'essai dont un exemple est donné en annexe doit faire référence à la présente norme et mentionner :

- l'identification des composants,
- l'identification de la formule,
- le mode de fabrication du mélange hydrocarboné avec le type de malaxeur utilisé,
- le principe du mode de compactage de l'éprouvette,
- l'épaisseur de la couche étudiée,
- la durée de conservation de l'éprouvette avant essai,
- la masse volumique apparente de l'éprouvette avant essai, préciser la méthode utilisée,
- la température moyenne d'essai,
- l'ensemble des résultats de profondeur d'ornièrre avec leur représentation graphique,
- les conditions d'essai et les détails opératoires non prévus dans la présente norme ainsi que les incidents éventuels susceptibles d'avoir agi sur les résultats.

*Annexe A*  
(informative)  
**EXEMPLE DE PRÉSENTATION DE RÉSULTAT**

**Procès-verbal d'essai : orniérage**

(norme NF P 98-253-1)

La reproduction de ce rapport d'essai n'est autorisée que sous la forme de fac-similé reprographique intégré. Il comporte ... page(s) et ... annexe(s)

Affaire : 1 7 0 78 78  
Couche de roulement RN  
Date de l'essai : 90-08-13

N° du PV : 011  
N° du registre d'essai : 027

Température de l'essai : 60 °C  
Épaisseur de la couche étudiée : 10 cm  
Pourcentage de vides prévisible sur chantier : 6,7 %

**Pourcentage de vides avant essai**

**identification des composants**

Méthode : Banc gamma. NF P 98-250-5 (\*)

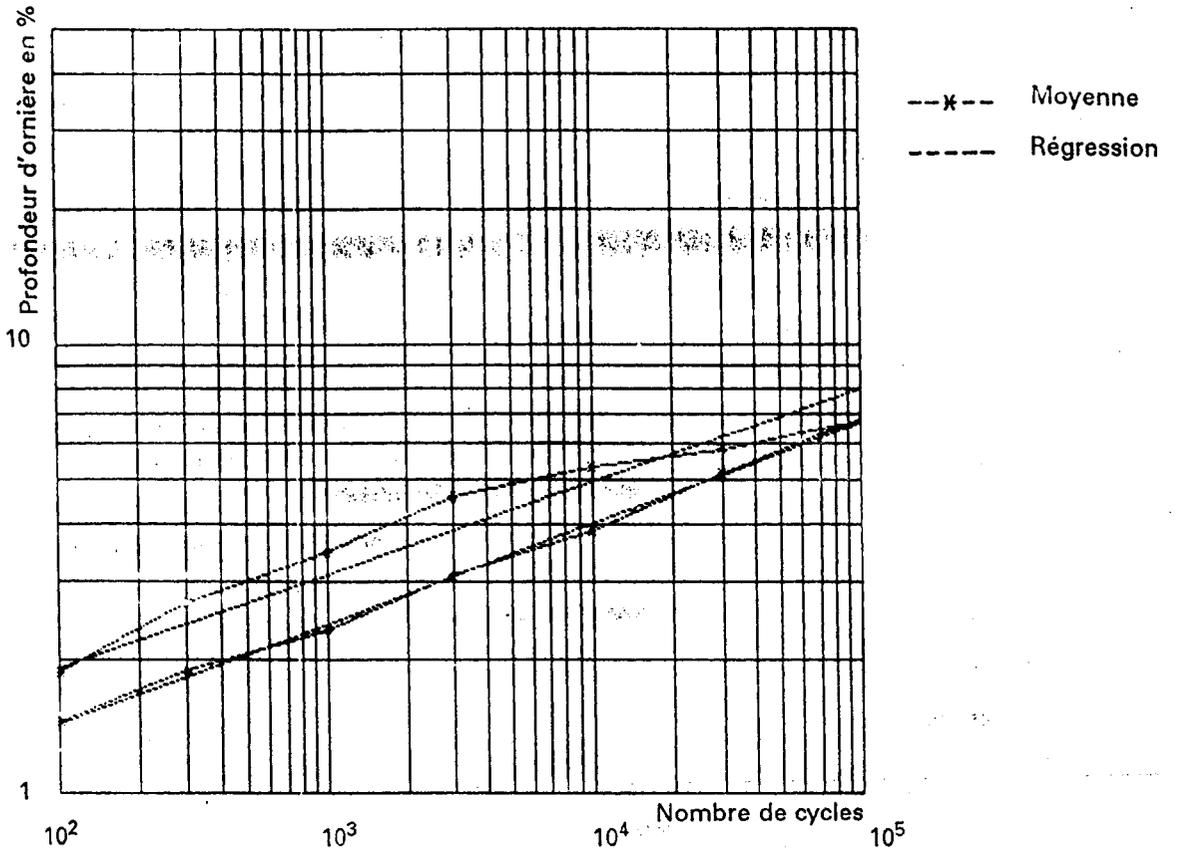
Granularité	Origine du matériau	%
10/14	Nouveau	24
6/10	Nouveau	20
2/6	Nouveau	17
0/2	Nouveau	38,5
Fines	Calcaires	0,5
60/70	ELF	5,45

		Niveau			Moyenne
		1	2	3	
Compactage faible Éprouvette	1	10,6	8,9	8,0	9,17
	2	10,2	8,8	7,9	8,97
	3				
	m	10,4	8,85	7,95	9,06
Compactage fort Éprouvette	1	6,2	5,1	4,4	5,23
	2	6,5	5,1	4,3	5,30
	3				
	m	6,25	5,10	4,35	5,27

**Profondeur de l'ornière**

		Nombre de cycles						
		10 <sup>2</sup>	3.10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	3.10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>	3.10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>
Compactage faible Méthode : norme NF P 98-250-2 Pourcentage de vides moyen : 9,1 %	1							
	2							
	3							
	m	1,88	2,69	3,46	4,61	5,36	5,85	6,75
Compactage fort Méthode : norme NF P 98-250-2 Pourcentage de vides moyen : 5,3 %	1							
	2							
	3							
	m	1,45	1,89	2,34	3,07	3,86	5,16	6,83

**Évolution de la profondeur d'ornièrè en fonction du nombre de cycles**



Forme de la régression appliquée :  $Y = A (N/1\ 000)^b$

avec :

A = profondeur d'ornièrè à 1 000 cycles

b = pente de la droite en coordonnées logarithmiques

	A %	B	% vides V %	Température moyenne d'essai °C	Durée de conservation de l'éprouvette avant essai
Compactage faible	3,10	0,206	9,1	60	3 jours
Compactage fort	2,40	0,223	5,3	60	4 jours

OBSERVATIONS	DESTINATAIRES
--------------	---------------

<p>L'attention est attirée sur le fait que les résultats donnés par le présent procès-verbal d'essai ont été obtenus avec les échantillons définis ci-dessus, mais que la portée et les conclusions à tirer de ces résultats :</p> <p><input type="checkbox"/> sont indiquées par le présent procès-verbal en application du texte de référence fixé par le donneur d'ordre.</p> <p><input type="checkbox"/> font l'objet d'un document ci-joint. Référence : .....</p> <p><input type="checkbox"/> n'ont pas été demandées par le donneur d'ordre.</p>	<p>A : ..... Date : .....</p> <p style="text-align: center;">Le Responsable d'essai</p> <p style="text-align: right;">Signature</p>
---	---

**ANNEXE 2**

**Méthode d'essai LC 26-400**

*Préparation des enrobés : Compactage de plaques d'enrobé*

## Préparation des enrobés : Compactage de plaques d'enrobé

### 1. Objet

La présente méthode d'essai consiste à définir un moyen permettant de compacter des plaques d'enrobés bitumineux à l'aide d'une charge roulante. Son domaine d'application comprend les enrobés à chaud ou à froid fabriqués en laboratoire ou prélevés en chantier.

Cette méthode d'essai est basée sur la méthode décrite dans la norme NF P 98-250-2 «Préparation des mélanges hydrocarbonés Partie 2 : Compactage des plaques»

### 2. Références

La présente méthode d'essai renvoie à l'édition la plus récente des documents suivants :

NORME :

ASSOCIATION FRANCAISE DE NORMALISATION (AFNOR)

NF P 98-250-2 Préparation des mélanges hydrocarbonés, Partie 2 : Compactage des plaques

AUTRE DOCUMENT :

MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC, LABORATOIRE DES CHAUSSÉES (LC)  
26-045 « Détermination de la densité maximale »

### 3. Définitions

Les définitions suivantes s'appliquent à la présente méthode d'essai:

**pas** : un aller ou un retour de la charge roulante.

**np** : nombre de passes.

**axe de la plaque** : axe de symétrie de la plaque parallèle à la plus grande dimension du moule.

**axe latéral** : axe d'une passe parallèle à la plus grande dimension du moule, situé à une distance 'a' de l'axe de la plaque.

**position centre** : axe de la plaque.

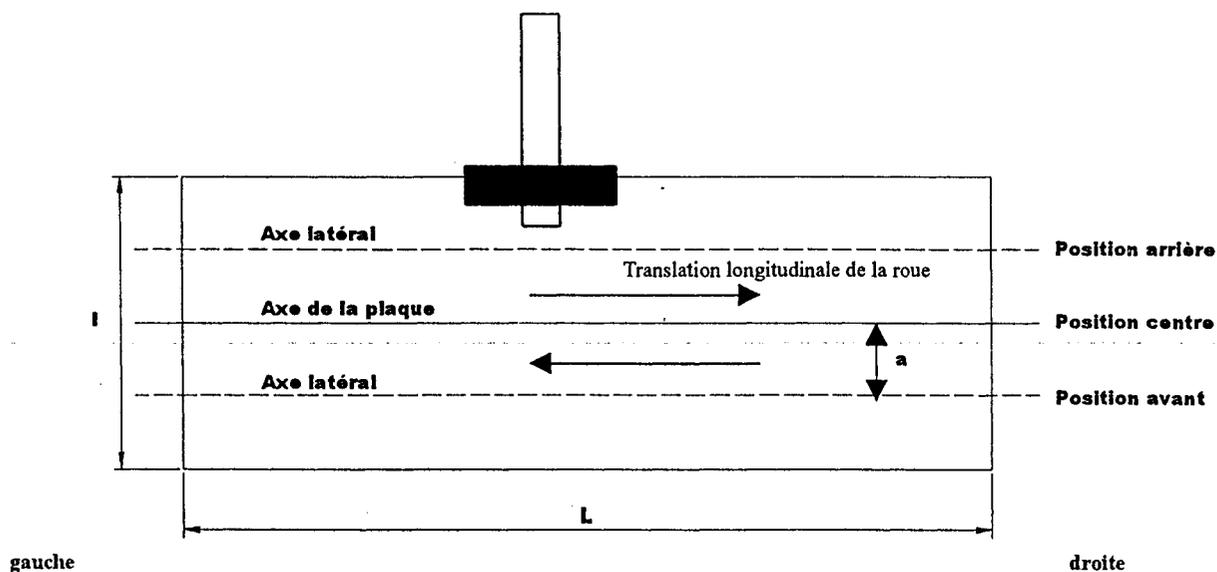
**position avant**: axe latéral le plus près de la face avant de l'appareil.

**position arrière** : axe latérale le plus éloigné de la face avant de l'appareil.

**mode "vérin bloqué"** : mode de fonctionnement de l'appareil tel que la hauteur de l'axe de la roue reste constante par rapport au bord supérieur du moule pendant les passes.

**mode "vérin libre"** : mode de fonctionnement de l'appareil tel que la charge appliquée sur la plaque reste constante au cours de l'essai.

**plan de balayage** : ensemble des modalités de passage de la roue sur la plaque, définies par le nombre, l'ordre d'exécution et la position de la translation latérale.



L	longueur intérieure du moule, exprimée en millimètres
l	largeur intérieure du moule, exprimée en millimètres
h	hauteur intérieure du moule, exprimée en millimètres
M	masse de la plaque, exprimée en grammes
$D_{mm}$	densité maximale déterminée selon LC 26-045
$V_i(\%)$	pourcentage de vide de la plaque
F	charge sur le pneumatique, exprimée en kilonewtons
$V_t$	vitesse de translation longitudinale de la roue, exprimée en millimètres par seconde
a	valeur de la translation latérale, exprimée en millimètres
e (np)	épaisseur de la plaque en cours de compactage, exprimée en millimètres
e	épaisseur finale de la plaque, exprimée en millimètres

## 4. Principe de l'essai

Une masse donnée d'enrobé est compactée dans un moule parallélépipédique à l'aide d'une charge appliquée par une roue équipée d'un pneumatique. Celle-ci peut tourner librement autour de son axe. La roue exécute des passes à vitesse constante parallèlement à l'axe de la plaque selon un plan de balayage spécifié. Au cours du compactage, la surface de l'éprouvette est maintenue affleurante au bord supérieur du moule par un dispositif permettant de compenser la réduction du pourcentage de vides résultant.

## 5. Appareillage et matériaux

### 5.1 Appareil de compactage

Un dispositif de type LCPC permettant de compacter les plaques dans les moules suivant le principe décrit à l'article 4. Ce dispositif doit:

- permettre d'appliquer une charge  $F$  sur la roue, réglable entre 1 kN à  $\pm 10\%$  et 10 kN à  $\pm 5\%$ ;
- comporter une roue équipée d'un pneumatique sans sculpture de dimension 400 X 8<sup>1</sup>;
- comporter éventuellement un cylindre métallique lisse de diamètre compris entre 40 et 50 cm, de largeur égale à 17,5 cm  $\pm$  0,2 cm et d'épaisseur comprise entre 0,4 cm et 0,8 cm;
- permettre la translation de la charge roulante à la vitesse  $V_t$  constante à 10 % près;
- comporter un système de positionnement de la roue sur les différents axes de compactage selon les valeurs de 'a' prédéterminées à  $\pm 2$  cm près;
- permettre un mode de fonctionnement à vérin libre et un mode à vérin bloqué;
- comporter un dispositif de mesure de l'épaisseur  $e$  (np) en continu ayant une résolution inférieure ou égale à 1 mm;
- comporter un système permettant de ramener la surface de la plaque affleurante au bord supérieur du moule périodiquement en cours de compactage.

### 5.2 Moules et plaque support

Un ou plusieurs moules de dimensions intérieures à 1 mm près de:

$L = 500$  mm,  $l = 180$  mm,  $h = 100$  ou 50 mm;

Une ou plusieurs plaques supports d'acier permettant d'asseoir les moules utilisés dont le défaut de planéité contrôlé à la règle suivant les diagonales soit inférieur à 1 mm et d'épaisseur telle que la flèche n'exécède pas 0,5 mm dans les conditions normales d'essai.

---

<sup>1</sup> Le pneumatique type Trelleborg T522BV. Extra ou spécial, 6 plis, convient à cet usage.

## 5.3 Appareils de malaxage

Dans le cas d'enrobés fabriqués en laboratoire, on peut se servir de tout genre de malaxeur, à condition qu'il produise, dans les délais fixés (environ deux minutes), la quantité exigée d'un mélange homogène et bien enrobé, et que tout le lot puisse être essentiellement récupéré.

## 5.4 *Étuve*

L'étuve doit permettre de porter dans le cas d'enrobé fabriqués en laboratoire : les granulats, le bitume et le bol de malaxage et dans le cas d'un prélèvement en chantier : l'enrobé, ainsi que les récipients munis d'un bec verseur et les autres appareils à la température requise. Elle doit être munie de commandes thermostatiques afin de maintenir la température requise. Une courbe d'étalonnage ou un tableau regroupant les températures d'utilisation doit être établi annuellement.

## 5.5 *Appareils divers*

En plus des appareils décrits plus haut, on devra disposer notamment des équipements suivants : balance, spatule, gants de protection, craie de marquage et tout autre équipement nécessaire.

Note : Tout l'appareillage destiné à manipuler l'enrobé doit être préalablement sali avec un enrobé et chauffé.

# 6. Préparation des éprouvettes

## 6.1 *Masse d'enrobé à prélever*

La masse M nécessaire pour compacter une plaque est fonction de la densité maximale de l'enrobé, des dimensions du moule, du pourcentage de compacité escompté (% C).

$$M = L \cdot l \cdot h \cdot D_{mm} \cdot C \quad (\text{équation 1})$$

où :

M	masse d'enrobé à prélever (grammes),
L	longueur du moule (cm),
l	largeur du moule (cm),
h	hauteur du moule (cm),
$D_{mm}$	densité maximale de l'enrobé déterminée selon LC 26-045,
C	compacité escomptée (en %).

## 6.2 *Enrobés préparés en laboratoire*

6.2.1 La quantité d'enrobés à préparer est déterminée selon l'équation 1 de l'article 6.1. Préparer suffisamment de granulat et de bitume pour obtenir un échantillon de masse

légèrement supérieure à la masse requise. Normalement, les deux plaques de 50 mm sont préparés pour un même malaxage.

#### 6.2.2 Préparation des granulats et du bitume

- 6.2.2.1. Sécher les granulats à  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  jusqu'à ce que la masse soit constante \* et, si nécessaire, les séparer par tamisage à sec en fraction désirée.

Note :

Le temps de séchage pour atteindre la masse constante peut varier d'un laboratoire à l'autre à cause des différentes conditions propres à chacun. La masse constante à une température donnée est atteinte lorsque la perte de masse entre deux pesées exécutées à intervalles de 15 minutes est égale ou inférieure à la précision de la balance.

- 6.2.2.2. Dans des récipients différents, peser la quantité de chaque fraction granulaire nécessaire pour produire une fournée de masse requise (1 plaque de 100 mm d'épaisseur et 2 plaques de 50 mm d'épaisseur).

- 6.2.2.3. Placer les récipients contenant les granulats à l'étuve jusqu'à ce qu'ils atteignent une température de  $15^{\circ}\text{C}$  supérieure à la température de chauffage pour le malaxage indiquée à l'annexe A. Pour les enrobés additionnés de fibres d'amiante, placer les récipients contenant les granulats à l'étuve jusqu'à ce qu'ils atteignent une température de  $25^{\circ}\text{C}$  supérieure à la température de chauffage pour le malaxage indiquée à l'annexe A, sans toutefois dépasser une température de  $180 \pm 2^{\circ}\text{C}$ .

- 6.2.2.4. Chauffer le bitume à la température de malaxage indiquée à l'annexe A. Une fois la température atteinte, il ne faut pas maintenir le bitume à cette température plus de 4 heures.

- 6.2.2.5. Dans une étuve préalablement chauffée à une température de  $15^{\circ}\text{C}$  supérieure à la température de chauffage pour la malaxage (voir annexe A), placer le récipient verseur, le bol de malaxage et les accessoires pour une période d'au moins 30 minutes. Pour les enrobés additionnés de fibres d'amiante, l'étuve est préalablement chauffée à une température de  $25^{\circ}\text{C}$  supérieure à la température de chauffage pour le malaxage (voir l'annexe A), sans toutefois dépasser une température de  $180 \pm 2^{\circ}\text{C}$ .

#### 6.2.3 Préparation des enrobés

- 6.2.3.1. Mettre les granulats chauffés et secs dans le bol de malaxage préalablement chauffé et homogénéiser manuellement.

- 6.2.3.2. Former un cratère dans les granulats et y déposer la quantité nécessaire de bitume préchauffé. Mélanger le granulat et le bitume jusqu'à l'obtention d'un enrobage homogène. Des précautions doivent être prises en vue d'éviter la perte d'enrobé durant le malaxage et les manipulations.

6.2.3.3. Transvider la quantité d'enrobé déterminée à l'équation 1 dans un récipient verseur métallique et procéder au compactage selon les indications de la section 7.2.

### 6.3 *Enrobés prélevés en chantier*

6.3.1 Dans une étuve préalablement chauffée à la température de chauffage pour le compactage (voir annexe A), placer le récipient verseur et les accessoires pour une période d'au moins 30 minutes.

6.3.2 Placer à l'étuve la quantité d'enrobé destinée au compactage, jusqu'à ce qu'elle atteigne la température de chauffage pour le compactage prescrite à l'annexe A. Une fois la température atteinte, la durée de chauffage ne doit jamais excéder deux heures. Homogénéiser à la main l'ensemble de l'enrobé provenant du chantier destiné à la fabrication de plaques.

6.3.3 Transvider la quantité d'enrobé déterminée à l'équation 1 dans un récipient verseur métallique et procéder au compactage selon les indications de la section 7.2.

## 7. Mode opératoire

### 7.1 *Condition d'essai*

- une roue est utilisée pour compacter les plaques de 500 x 180 x h;
- la vitesse de translation  $V_t$  est comprise entre 20 cm/s et 50 cm/s;
- la pression de gonflage à l'arrêt : 6 bars à  $\pm 0,3$  bar;
- la charge  $F$  : suivant le plan de balayage à  $\pm 10\%$  si  $F \leq 2$  kN et à  $\pm 5\%$  si  $F > 2$  kN.

### 7.2 *Procédures de compactage*

Le mode de compactage utilisé pour la préparation des éprouvettes en vue de l'essai à l'orniéreur est le compactage fort.

7.2.1 Vérifier la position du tablier. Lors de la confection d'une plaque de 50 mm de hauteur, le tablier doit être installé dans la deuxième encoche à partir du haut alors que pour une plaque de 100 mm de hauteur, le tablier doit être inséré dans la troisième encoche à partir du haut.

7.2.2 Installer la plaque et le moule de 50 mm ou de 100 mm de hauteur.

7.2.3 Appliquer un antiadhésif sur le moule, la plaque et la roue du compacteur.

7.2.4 Abaisser la table afin de permettre de transvider l'enrobé :  
Plaque de 100 mm  $\Rightarrow$  hauteur de la table entre 155 et 160 mm;  
Plaque de 50 mm  $\Rightarrow$  hauteur de la table entre 90 et 95 mm.

- 7.2.5 Charger le moule avec la masse  $M$  à  $\pm 0,1 \%$  de l'enrobé déterminée à l'équation 1 à la température de chauffage pour le compactage, en répartissant uniformément le mélange dans le moule.
- 7.2.6 À l'aide d'une spatule, effectuer la mise en place de l'enrobé en enfonçant celle-ci tout autour du moule et au centre (environ 50 coups de spatule).
- 7.2.7 Remonter la table afin de débiter le plan de balayage de l'annexe B.
- 7.2.8 Suivre le plan de balayage de compactage fort présenté à l'annexe B. À chaque passage de roue, ramener le matériel vers le centre en râtelant les côtés avec une spatule afin d'égaliser la surface. Le plan de balayage se termine par six passes de cylindre lisse sans déplacement transversal de la charge roulante.
- 7.2.9 Fixer le moule sur la plaque support et retirer le tout du compacteur de plaque. Laisser refroidir à la température de la pièce.
- 7.2.10 Il faut attendre 48 heures (période de curage) avant d'effectuer l'essai à l'orniéreur sur des enrobés malaxés en laboratoire. Le temps de curage débute lorsque la confection de la plaque est terminée. Pour les plaques confectionnées à partir d'échantillons prélevés au chantier, on doit laisser aux plaques le temps de retrouver la température ambiante. Une période d'attente d'une vingtaine d'heures est habituellement suffisante.

Note :

Si un surplus de mélange est observé lors de la réalisation du plan de balayage, ce rejet est conservé et pesé afin de calculer la compacité réelle de la plaque réalisée.

## 8. Calculs et expression des résultats

### Pourcentage de compacité réelle

Lors de présence de rejet de matériel après le compactage, la compacité réelle est différente de la compacité escomptée. La compacité réelle est déterminée selon l'équation 2.

$$\%Cr = \left( \frac{m_r}{V \cdot D_{mm}} \right) \cdot 100 \quad (\text{équation 2})$$

où : %Cr            pourcentage de compacité réelle (%)  
m<sub>r</sub>                masse réelle d'enrobé dans le moule (grammes)  
V                  volume du moule (cm<sup>3</sup>)  
D<sub>mm</sub>             densité maximale de l'enrobé

## 9. Procès-verbal d'essai

Le procès verbal d'essai doit faire référence au présent document et indiquer :

- a) Le numéro d'identification de l'échantillon ;
- b) La masse  $M$  de l'éprouvette ;
- c) La densité maximale  $D_{mm}$ ;
- d) Pourcentage de compacité prévue (%);
- e) Dans le cas d'enrobé fabriqué en laboratoire : masse de granulats, température de chauffage des granulats, masse de bitume, température de chauffage pour le malaxage du bitume;
- f) Température de chauffage pour le compactage;
- g) L'information nécessaire au calcul du rejet et du pourcentage de compacité réelle des plaques;
- h) Date de l'essai;
- i) Nom (s) du personnel ayant effectué l'essai;
- j) Les conditions de l'essai et les détails opératoires non prévus dans le présent document ainsi que les incidents éventuels susceptibles d'avoir agi sur le résultat.

## 10. Approbation

La présente méthode d'essai a été approuvée par le responsable du secteur enrobés de la Direction du laboratoire des chaussées.

---

Michel Paradis, ing. M.Sc.

## ANNEXE A

## Température de chauffage pour le malaxage et le compactage en fonction des classes de bitume

Classe de bitume (PG)	Température de chauffage pour le malaxage (°C) <sup>(1)(2)</sup>	Température de chauffage pour le compactage (°C) <sup>(1)(3)</sup>
52-34	140 ± 2	128 ± 2
58-28	150 ± 2	138 ± 2
52-40	145 ± 2	133 ± 2
58-34	155 ± 2	143 ± 2
58-40	160 ± 2	148 ± 2
64-34	168 ± 2	160 ± 2
70-34	168 ± 2	160 ± 2

Note :

1. À partir des viscosités Brookfield à 135 °C et à 165 °C apparaissant sur l'attestation de conformité du bitume utilisé, l'entrepreneur est tenu de déterminer les températures du bitume associées aux viscosités de 0,17 Pa.s et 0,28 Pa.s, et ce, selon les méthodes d'essais LC 25-007 du Ministère.
2. Si la température (calculée selon la note 1) associée à la viscosité de 0,17 Pa.s diffère de plus de 5 °C de la température de chauffage pour le malaxage spécifiée pour la classe (PG) du bitume utilisé, cette température associée à la viscosité de 0,17 Pa.s doit être utilisée comme température de chauffage pour le malaxage. Dans l'éventualité où ce calcul conduit à une température de chauffage pour le malaxage supérieure à 173 °C, celle-ci est fixée à 168 °C. Une tolérance de ± 2 °C s'applique à cette température.
3. Si la température (calculée selon la note 1) associée à la viscosité de 0,28 Pa.s diffère de plus de 5 °C de la température de chauffage pour le compactage spécifiée pour la classe (PG) du bitume utilisé, cette température associée à la viscosité de 0,28 Pa.s doit être utilisée comme température de chauffage pour le compactage. Dans l'éventualité où ce calcul conduit à une température de chauffage pour le compactage supérieure à 165 °C, celle-ci est fixée à 168 °C. Une tolérance de ± 2 °C s'applique à cette température.

Pour les enrobés additionnés de fibre d'amiante seulement.

On doit ajouter 5 °C à la température déterminée à la note 2 et 10 °C à la température déterminée à la note 3 de l'annexe A. Dans l'éventualité où ce calcul conduit à une température de chauffage pour le malaxage supérieur à 173 °C, celle-ci est fixée à 168 °C. Dans l'éventualité où ce calcul conduit à une température de chauffage pour le compactage supérieure à 165 °C, celle-ci est fixée à 168 °C. Une tolérance de ± 2 °C s'applique à ces températures

# PRÉLIMINAIRE

MÉTHODE D'ESSAI

LC 26-400

Décembre 2001

## ANNEXE B

Compactage fort (plaques de 500mm × 180 mm × h mm)

Arrière				Console													
Centre																	
Avant																	
NOMBRE DE PASSES																	
POSITION ROUE																	
		Avant 1 <sup>er</sup>		Arrière 2 <sup>e</sup>		Centre 3 <sup>e</sup>		Pression pneu (bars)	Force vérin (kN)		Départ	Position de la roue		Vérin	Hauteur plaque 100 (mm)	Hauteur Plaque e (np) 50 (mm)	
		Cumulé		Cumulé		Cumulé			(bars)			a					
1	1							6	1	0,4(*)	droite	1	7,5	bloqué	130	65	
2				1											127		
3						1											
4	1														125	62	
5				1											123		
6						1											
7	2	4	2	4	1	3		6	5	2,5(*)	droite	3	4,5	libre	120	60	
8	2	6	2	6	1	4									118	59	
9	4	10	4	10	2	6									113	56	
10	8	18	8	18	4	10									107	53	
11	8	26	8	26	4	14									103	51	
12	4	30	4	30	2	16									100	50	
13	2	32	2	32	1	17						2	9				
14	2	34	2	34	1	18											
15		34		34	6	24		Roue d'acier				2	9	bloqué			

(\*) : valeur spécifique à chaque appareil

**ANNEXE 3**

**Méthode d'essai LC 26-410**

*Vérification de la résistance au fluage des enrobés au moyen de l'essai d'orniérage*

## Vérification de la résistance au fluage des enrobés au moyen de l'essai d'orniérage

### 1. Objet

La présente méthode d'essai consiste en la détermination en laboratoire de la profondeur d'ornière par fluage au moyen d'un simulateur de trafic sur des enrobés de composition et de densité maximale connues. Les éprouvettes utilisées peuvent être confectionnées en laboratoire à partir de granulats et de bitume, d'enrobé prélevé en chantier ou issues de prélèvement de chaussée. Cette méthode d'essai est basée sur la méthode décrite dans la norme NF P 98-253-1 « Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés, Partie 1 : Essai d'orniérage ».

### 2. Références

La présente méthode d'essai renvoie à l'édition la plus récente des documents suivants:

NORMES :

ASSOCIATION FRANCAISE DE NORMALISATION (AFNOR)

NF P 98-253-1 Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés (partie 1 : essai d'orniérage)

NF P 98-250-2 Préparation des mélanges hydrocarbonés ( partie 2: compactage des plaques)

AUTRE DOCUMENT :

MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC, LABORATOIRE DES CHAUSSÉES (LC)  
26-400 «Préparation des enrobés : Compactage de plaques d'enrobé»

### 3. Définitions

Les définitions suivantes s'appliquent à la présente méthode d'essai :

**Profondeur d'ornière  $P_i$  % :** Diminution d'épaisseur moyenne mesurée en 15 points prédéterminés.  $P_i$  % est exprimée en pourcentage de la hauteur initiale.

**Trace du pneu:** Empreinte du pneu sur une surface plane lorsqu'on applique une charge verticale.

**Cycle:** Un aller et un retour de la charge roulante.

**E:** Épaisseur de la couche déformable ou des couches déformables de l'éprouvette exprimée en millimètres.

$m_{ij}$ : distance exprimée en millimètres mesurée lors de la  $i$ ème séquence de mesure entre une surface de référence et un point spécifié de la face supérieure de l'éprouvette ( $j$  varie de 1 à 15).

#### 4. Principe de l'essai

Le passage répété d'une roue équipée d'un pneumatique et permettant d'appliquer une charge verticale sur une éprouvette parallélépipédique d'enrobé, provoque une diminution relative de l'épaisseur appelée ornière.

L'enrobé est placé dans un moule et est testé dans des conditions isothermes. La surface de l'éprouvette affleurant la partie supérieure du moule est soumise à une charge verticale maintenue quasi-constante par un dispositif approprié. Le pneumatique est animé suivant le grand axe de l'éprouvette d'un mouvement sinusoïdal de fréquence et d'amplitude spécifiées.

#### 5. Appareillage et matériaux

##### 5.1 Appareil d'orniérage

Un dispositif simulant une charge roulante comportant:

- une roue équipée d'un pneumatique sans sculpture 400 x 8 de largeur de trace 8 cm  $\pm$  0.5 cm <sup>(1)</sup> ;
- un ou plusieurs moules de dimensions intérieures 180 mm x 500 mm x 100 mm ou 180 mm x 500 mm x 50 mm ;
- une jauge de profondeur pour mesurer  $m_{ij}$  à 0,2 mm près, dont la surface de touche carrée ou circulaire est comprise entre 5 et 10 mm<sup>2</sup>. Un capteur sans contact peut être utilisé s'il conduit au même résultat ;
- une enceinte ventilée à température de consigne variable, thermorégulée par une sonde placée dans l'éprouvette tel qu'indiqué à la figure 1 pour garantir la température spécifiée au cœur de l'éprouvette à  $\pm 2^\circ\text{C}$  ;
- une plaque-support d'éprouvette en acier.

##### 5.2 Appareils et matériaux divers

- Deux plaques d'enrobé préparées selon la méthode LC 26-400 «Préparation des enrobés : Compactage de plaques d'enrobé» ou des prélèvements de chaussée;
- Une perceuse;
- Du plâtre dans le cas des prélèvements de chaussée;
- Gants de protection, craie de marquage, pâte à modeler et autre matériel nécessaire.

---

(1) : Le pneumatique de type Trelleborg T522 BV Extra ou Special, 6 plis convient à cet essai.

## 6. Préparation des éprouvettes

### 6.1 Confection des éprouvettes en laboratoire

Les éprouvettes sont confectionnées dans les moules 180 mm x 500 mm x 100 mm ou 180 mm x 500 mm x 50 mm selon la méthode d'essai LC 26-400 «Préparation des enrobés : Compactage de plaques d'enrobé».

### 6.2 Conservation des éprouvettes avant essai

Le temps de conservation doit être du même ordre de grandeur pour les éprouvettes d'une même série. La durée réelle de conservation en jours doit être portée sur le procès-verbal.

### 6.3 Contrôle des éprouvettes

S'assurer en tous points de la zone de mesurage que l'épaisseur de l'éprouvette ne s'écarte pas de plus de 5% de l'épaisseur nominale, pour des épaisseurs nominales supérieures à 50 mm. Pour des épaisseurs nominales inférieures ou égales à 50 mm, une tolérance de  $\pm 2,5$  mm est appliquée.

## 7. Mode opératoire

### 7.1 Condition d'essai

L'essai est réalisé suivant les conditions suivantes:

- course du pneumatique: 410 mm  $\pm$  5 mm,
- fréquence du mouvement relatif: 1 Hz  $\pm$  0,1 Hz,
- pression du pneumatique : 6 bars  $\pm$  0,3 bar en début d'essai,
- charge roulante appliquée : 5 000 N  $\pm$  50 N,
- écart entre l'axe de la trace et l'axe théorique de l'éprouvette inférieur à 5 mm,
- absence d'angle d'envirage;
- température à l'intérieure de la plaque : 60°C  $\pm$  2 °C;
- température à l'intérieure de l'enceinte de l'ornièreur : maximum 75°C.

### 7.2 Procédure d'essai

- 7.2.1 Percer un trou d'environ 50-55 mm de profondeur pour une plaque de 100 mm d'épaisseur et d'environ 40 mm pour une plaque de 50 mm d'épaisseur dans un des coins de chaque plaque d'enrobé afin de pouvoir y insérer une sonde de température (figure 1). Le trou doit être percé au coin du moule et légèrement incliné vers l'intérieur de la plaque.

- 7.2.2 Mettre en place le moule, la plaque et le mélange dans l'orniéreur de façon à ce qu'ils soient solidement fixés sur la plaque de support. Bien identifier (sur les feuilles de rapport et sur les plaques elles-mêmes) de quel côté de l'appareil est installée chacune des plaques (A ou B).
- 7.2.3 L'essai doit idéalement porter sur deux éprouvettes de même composition. Dans le cas où on ne dispose que d'une plaque d'enrobé, substituer la plaque manquante par une plaque en béton de ciment.
- 7.2.4 Vérifier la pression du pneu qui doit se situer à  $6 \text{ bars} \pm 0.3 \text{ bar}$ . Vérifier la propreté du pneumatique pour éviter un échauffement parasite en cours d'essai.
- 7.2.5 Vérifier la charge roulante appliquée. Elle doit être de  $5 \text{ kN} \pm 0,5 \text{ kN}$  de chaque côté.
- 7.2.6 Placer les sondes de température aux endroits prévus et fixer la sonde avec de la pâte à modeler.
- 7.2.7 Vérifier l'interrupteur de sécurité si l'appareil en est muni. L'interrupteur supérieur doit être activé pour les plaques de 100 mm et désactivé pour les plaques de 50 mm.
- 7.3 Essai en mode manuel**
- 7.3.1 Régler le cadran à 1 000 cycles.
- 7.3.2 Monter les tables.
- 7.3.3 Effectuer 1000 cycles à la température de la pièce (entre 15 et 25 °C), communément appelé les 1000 cycles à froid.
- 7.3.4 Baisser les tables
- 7.3.5 Relever les mesures initiales du profil de l'éprouvette  $m_{0j}$  (j variant de 1 à 15) conformément à la figure 2.
- 7.3.6 Ajuster la température d'essai (normalement 60°C).
- 7.3.7 Vérifier que l'indicateur du contrôleur de température est en fonction lorsque l'orniéreur est sous tension.
- 7.3.8 Ajuster le compteur de cycle pour effectuer des lectures à tous les 100, 300, 1 000, 3 000, 10 000 cycles et 30 000 cycles pour les plaques de 100 mm d'épaisseur.
- 7.3.9 Inscire toutes les lectures au procès-verbal de l'essai.

- 7.3.10 Mettre sous tension la température à 60 °C pour une période de 14 heures ± 1 heure avant le début du lancement du 100 cycles.

#### 7.4 *Prise des mesures*

- 7.4.1 Avant chaque lancement et avant chaque mesure de profondeur d'ornièrre, relever la température de chaque éprouvette : la moyenne des températures relevées à chaque arrêt est la température réelle moyenne de l'essai, qui doit figurer sur le procès-verbal d'essai. Identifier l'heure de départ du chauffage de chaque lancement et l'heure d'arrêt du lancement.
- 7.4.2 La température de l'air est contrôlée par une sonde placée sous la partie supérieure de l'ornièrre. La température relevée par cette sonde ne doit pas dépasser 75 °C.
- 7.4.3 À chacun des arrêts d'ordre  $i$ , les mesures  $m_{ij}$  ( $j$  variant de 1 à 15) sont prises. La profondeur d'ornièrre  $P_i$  est calculée selon l'équation 1 :

$$P_i\% = 100 \times \frac{\sum_{j=1}^{15} (m_{ij} - m_{0j})}{15 \times E} \quad (\text{équation 1})$$

où:  $E$  épaisseur de la couche étudiée en millimètres,  
 $m_{ij}$  mesures de l'épaisseur exprimées en millimètres.

- 7.4.4 L'essai doit être interrompu si la moyenne des valeurs de profondeur d'ornièrre ( $m_{ij} - m_{0j}$ ) est supérieure à 15 mm.
- 7.4.5 À chaque arrêt, après avoir pris les mesures, un délai suffisant doit être observé pour que la température d'essai spécifiée au cœur de l'éprouvette soit de nouveau atteinte. Elle doit être au minimum de 59 °C.

## 8. Calculs et expression des résultats

Tracer la courbe d'évolution de  $P_i\%$  en fonction du nombre de cycles sur un graphique à coordonnées bi logarithmiques. Une relation entre la profondeur d'ornièrre  $P_i\%$  et le nombre de cycles à l'arrêt d'ordre  $i$  est recherchée, avec une équation de la forme de l'équation 2:

$$Y = A \times \left( \frac{N}{1000} \right)^b \quad (\text{équation 2})$$

où :

- Y profondeur d'ornièrre à N cycles,
- A profondeur d'ornièrre à 1 000 cycles,
- b pente de la droite en coordonnées logarithmiques.

Pour ce calcul, toutes les profondeurs d'ornièrre mesurées à N cycle supérieures à 15 % à N cycles sont éliminées.

## 9. Procès-verbal d'essai

Le procès-verbal d'essai doit contenir les informations suivantes :

- a) Le numéro d'identification de l'échantillon,
- b) Type d'enrobé,
- c) le numéro de moule,
- d) le numéro de la porte,
- e) la hauteur de l'éprouvette,
- f) la durée de conservation de l'éprouvette avant essai,
- g) la température moyenne d'essai,
- h) l'ensemble des résultats de profondeur d'ornièrre,
- i) les conditions d'essai et les détails opératoires non prévus dans la présente méthode d'essai ainsi que les incidents éventuels susceptibles d'avoir agi sur les résultats,
- j) nom (s) du personnel ayant effectué l'essai et la date de l'essai,
- k) procès verbal de la méthode d'essai LC 26-400.

## 10. Rapport d'essai

Le rapport de l'essai à l'ornièrre doit contenir les informations suivantes :

- a) Le numéro d'identification de l'échantillon;
- b) les détails de l'essai;
- c) les températures des plaques avant la prise des lectures;
- d) l'heure de la fin des cycles et l'heure du début du lancement des cycles;
- e) les ornièrres observées aux nombres de cycles requis, la représentation graphique;
- f) toute remarque pertinente concernant l'essai

## 11. Approbation

La présente méthode a été approuvée par un ingénieur du secteur enrobés de la Direction du laboratoire des chaussées.

---

Marina Beaudoin, ing.

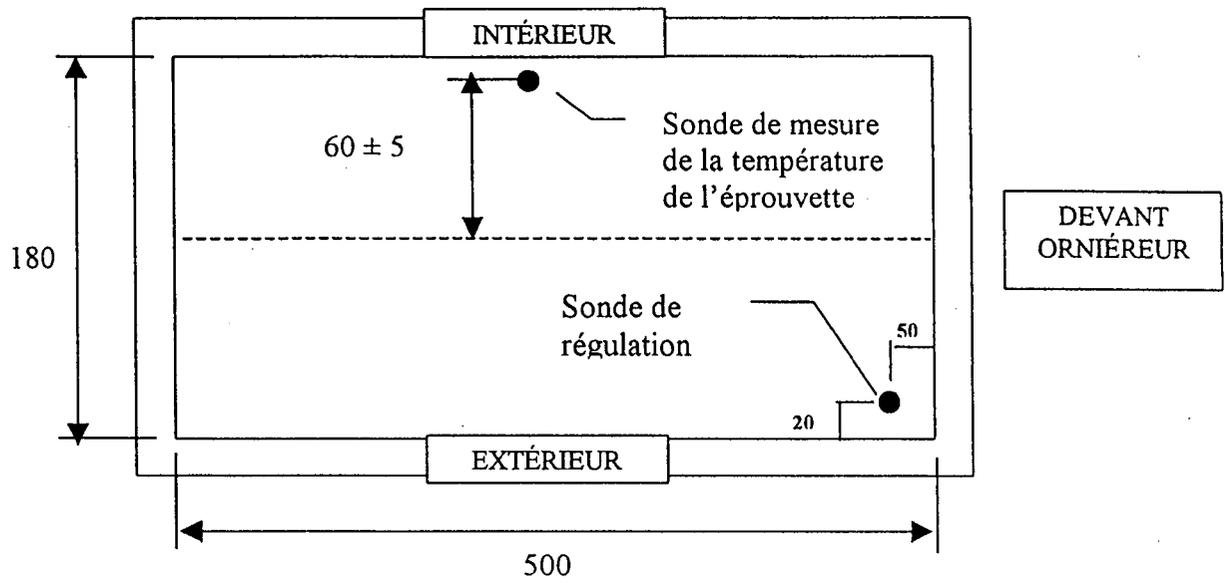


Figure 1.1 – Emplacement des sondes de température (plaque gauche)

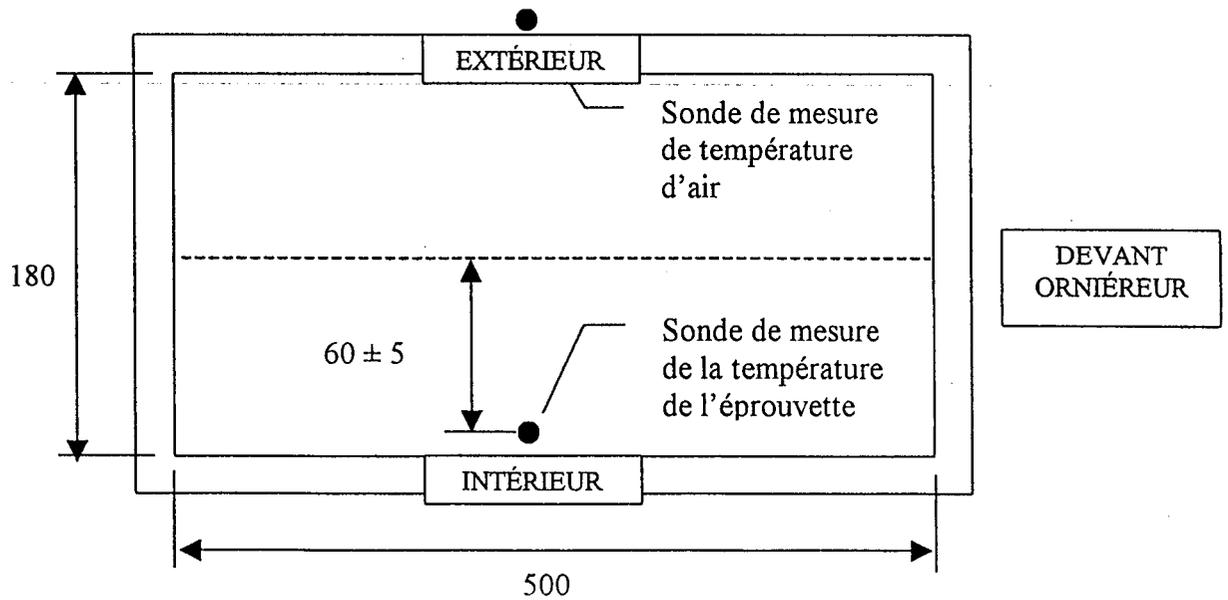


Figure 1.2 – Emplacement des sondes de température (plaque droite)

## **ANNEXE 4**

### **Tableaux des densités des plaques par la méthode volumétrique**

CALCULE DE DENSITÉS DES PLAQUES D'ENROBÉ	TYPE D'ENROBÉ																	
	ESG-10 Plaque de 50 mm																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Masse dans l'air de la plaque (A)	11980	11713	10805	11412	11235	11180	11394	11171	11063	11273	11470	11599	11414	11494	11293	11244	11345	11216
Masse de la plaque à l'état sss (B)	12037	11765	10892	11492	11329	11275	11467	11267	11159	11350	11562	11663	11494	11567	11368	11324	11451	11306
Masse dans l'eau du granulat ©	7180	6990	6440	6800	6680	6640	6770	6640	6590	6700	6830	6930	6780	6850	6720	6700	6710	6620
Température de l'eau	24,5	24,5	25	25	25	25	25	25	24	24	25	25	25	25	25		25	25
Db densité de la plaque A/(B-C)	2,467	2,453	2,427	2,432	2,417	2,412	2,426	2,414	2,421	2,424	2,424	2,451	2,421	2,437	2,430	2,432	2,393	2,394
Température de compactage de plaques	129	144	153	153	150	150	148	148	143	143	132,5	138	136	136	133	133	143	138

CALCULE DE DENSITÉS DES PLAQUES D'ENROBÉ	TYPE D'ENROBÉ															
	GB -20 Plaque de 100 mm															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Masse dans l'air de la plaque (A)	22457	23213	23096	21918	22117	22265	22867	22678	23019	22932	21745	22827	23056	22225	23101	21627
Masse de la plaque à l'état sss (B)	22698	23401	23334	22136	22357	22494	23106	22928	23260	23138	21961	23026	23297	22469	23339	21901
Masse dans l'eau du granulat ©	13530	14080	13980	13270	13410	13510	13820	13740	13910	13900	13180	13840	13990	13530	13990	13140
Température de l'eau	24,5	24,5	25	25	25	25	24,5	24,5	24	24	25	25	25	25	25	25
Db densité de la plaque A/(B-C)	2,449	2,490	2,469	2,472	2,472	2,478	2,463	2,468	2,462	2,482	2,476	2,485	2,477	2,486	2,471	2,469
Température de compactage de plaques	160	160	170	170	167	167	165	165	160	160	157	157	155	155	150	150

**ANNEXE 5**

**Rapports des essais à l'orniéreur. Enrobé ESG-10**



## RÉSULTATS À L'ORNIÈREUR (Rapport d'essai)

Numéro de projet :	Plaques 3 et 4	Type de mélange :	ESG - 10
Client:		Numéro formule client:	

### Caractéristiques de l'enrobé

Densité maximale :	2,607	Note :	La Dmax est fournie par l'entrepreneur
--------------------	-------	--------	--

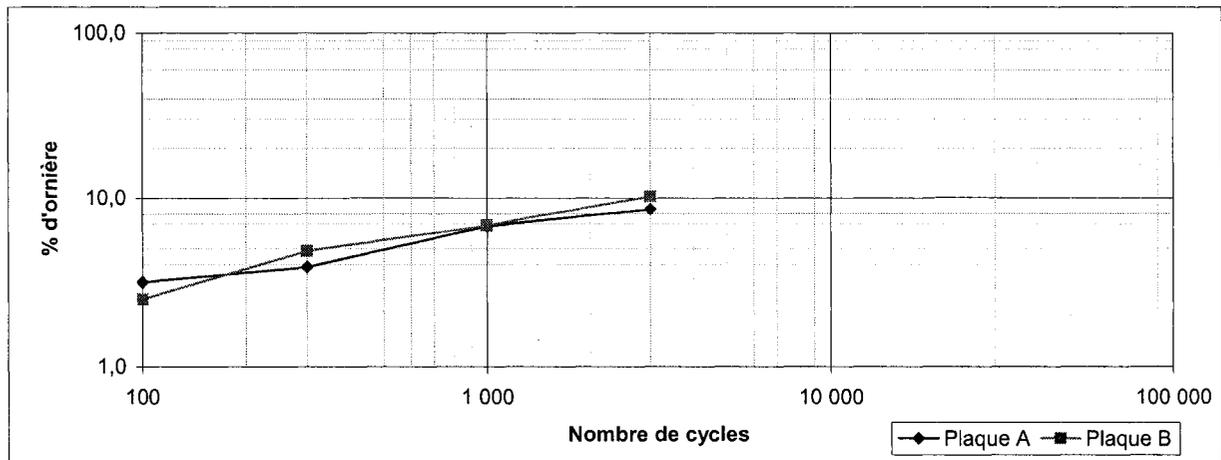
### Conditions d'essai

Plaque	<b>DROITE</b>	<b>GAUCHE</b>	Température moyenne lors de l'essai :	60,2 °C
Épaisseur	50	50	Essai effectué selon la norme :	LC 26-400
Masse utilisée	10805	11412	Température de compactage:	153°C
Densité brute ou apparente	2,427	2,432	Température de malaxage :	155°C
Vides (%)	6,9	6,7	Bitume:	58 -34

2

### Pourcentage d'ornièrre (PI %)

	Nombre de cycles					
	100	300	1 000	3 000	10 000	30 000
Plaque A	3,17	3,88	6,77	8,56		
Plaque B	2,52	4,82	6,84	10,20		



### Remarques:

Essai effectué par :	0	Date :	12-janv-06	Approuvé par :
Analysé par :	=D98	Date :	00-janv-00	
Vérifié par:		Date :		



Université du Québec  
 École de technologie supérieure  
 Département de génie de la construction  
 1100 rue Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec,  
 H3C 1K3

## RÉSULTATS À L'ORNIÉREUR (Rapport d'essai)

Numéro de projet :	Plaques 5 et 6	Type de mélange :	ESG -10
Client:		Numéro formule client:	

### Caractéristiques de l'enrobé

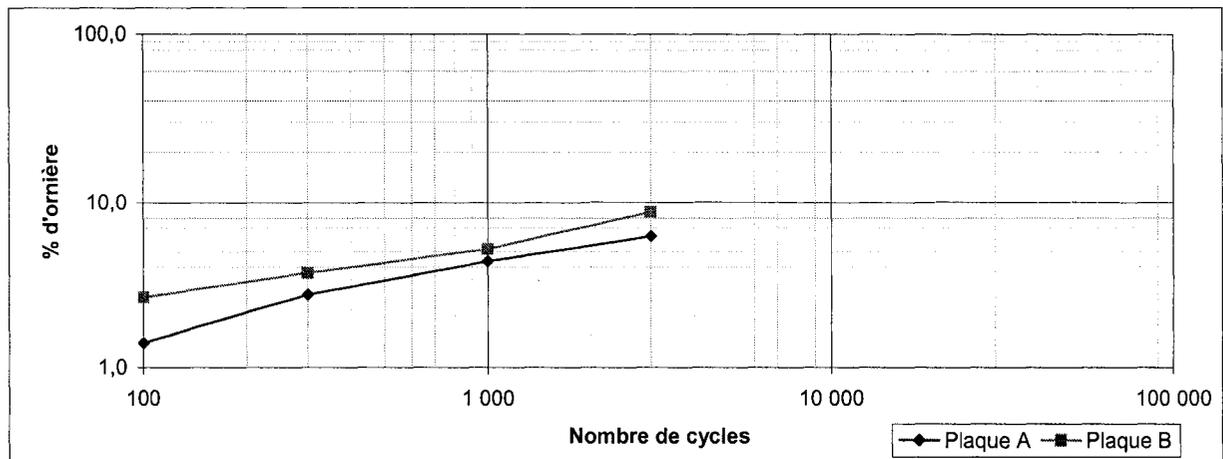
Densité maximale :	2,607	Note :	La Dmax est fournie par l'entrepreneur
--------------------	-------	--------	--

### Conditions d'essai

Plaque	DROITE	GAUCHE	Température moyenne lors de l'essai :	59,2 °C
Épaisseur	50	50	Essai effectué selon la norme :	LC 26-400
Masse utilisée	11235	11180	Température de compactage:	150°C
Densité brute ou apparente	2,417	2,412	Température de malaxage :	155°C
Vides (%)	7,3	7,5	Bitume:	58 - 34

### Pourcentage d'ornièrre (PI %)

	Nombre de cycles					
	100	300	1 000	3 000	10 000	30 000
Plaque A	1,39	2,74	4,38	6,24		
Plaque B	2,63	3,70	5,21	8,74		



### Remarques:

Essai effectué par :	Date :	06-janv-13	Approuvé par :
Analysé par : =D98	Date :	00-janv-00	
Vérifié par:	Date :		Date :



## RÉSULTATS À L'ORNIÉREUR (Rapport d'essai)

Numéro de projet :	Plaques 7 et 8	Type de mélange :	ESG -10
Client:		Numéro formule client:	

### Caractéristiques de l'enrobé

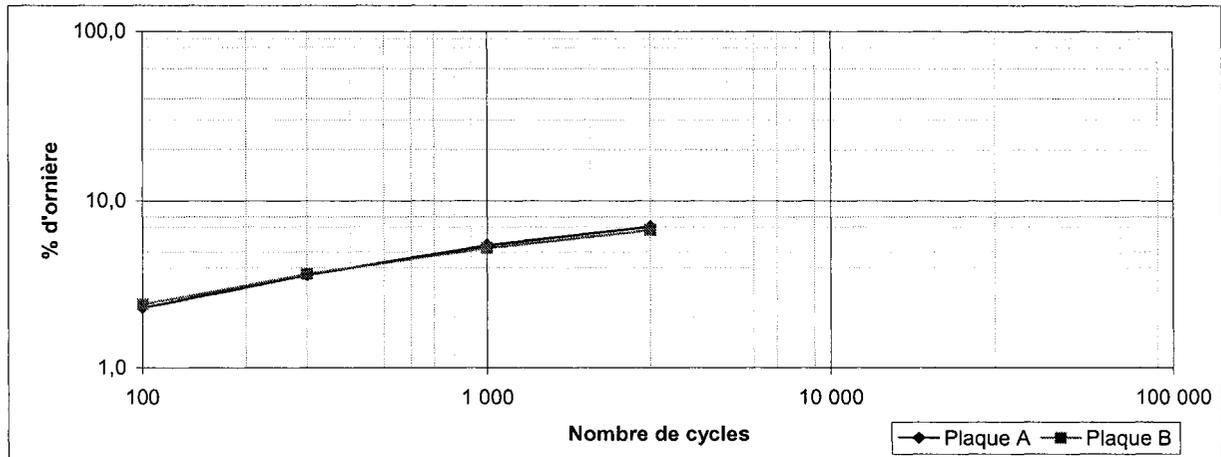
Densité maximale :	2,607	Note :	La Dmax est fournie par l'entrepreneur
--------------------	-------	--------	--

### Conditions d'essai

Plaque	DROITE	GAUCHE	Température moyenne lors de l'essai :	58,7 °C
Épaisseur	50	50	Essai effectué selon la norme :	LC 26-400
Masse utilisée	11394	11171	Température de compactage:	148°C
Densité brute ou apparente	2,426	2,414	Température de malaxage :	155°C
Vides (%)	7,0	7,4	Bitume:	58 - 34

### Pourcentage d'ornièrre (PI %)

	Nombre de cycles					
	100	300	1 000	3 000	10 000	30 000
Plaque A	2,32	3,65	5,48	7,03	0,00	0,00
Plaque B	2,45	3,70	5,27	6,69	0,00	0,00



### Remarques:

Essai effectué par :	0	Date :	14-janv-06	Approuvé par :
Analysé par :	=D98	Date :	00-janv-00	
Vérifié par:		Date :		



Université du Québec  
**École de technologie supérieure**  
 Département de génie de la construction  
 1100 rue Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec,  
 H3C 1K3

## RÉSULTATS À L'ORNIÉREUR (Rapport d'essai)

Número de projet :	Plaques 9 et 10	Type de mélange :	ESG -10
Client:		Numéro formule client:	

### Caractéristiques de l'enrobé

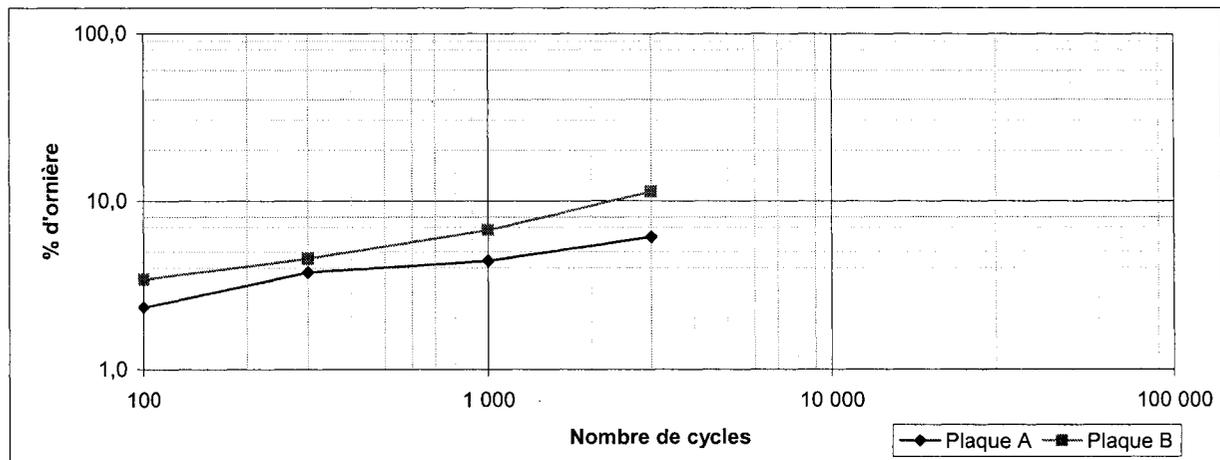
Densité maximale :	2,607	Note :	La Dmax est fournie par l'entrepreneur
--------------------	-------	--------	--

### Conditions d'essai

Plaque	DROITE	GAUCHE	Température moyenne lors de l'essai :	58,9 °C
Épaisseur	50	50	Essai effectué selon la norme :	LC 26-400
Masse utilisée	11063	11273	Température de compactage:	143°C
Densité brute ou apparente	2,421	2,424	Température de malaxage :	155°C
Vides (%)	7,1	7,0	Bitume:	58 - 34

### Pourcentage d'ornièrè (PI %)

	Nombre de cycles					
	100	300	1 000	3 000	10 000	30 000
Plaque A	2,33	3,77	4,41	6,13	0,00	0,00
Plaque B	3,44	4,56	6,71	11,30	0,00	0,00



### Remarques:

Essai effectué par :		Date :	18-janv-06	Approuvé par :	
Analysé par :	=D98	Date :	00-janv-00	Date :	
Vérifié par:		Date :		Date :	



## RÉSULTATS À L'ORNIÈREUR (Rapport d'essai)

Número de projet :	Plaques 11 et 12	Type de mélange :	ESG -10
Client:		Numéro formule client:	

### Caractéristiques de l'enrobé

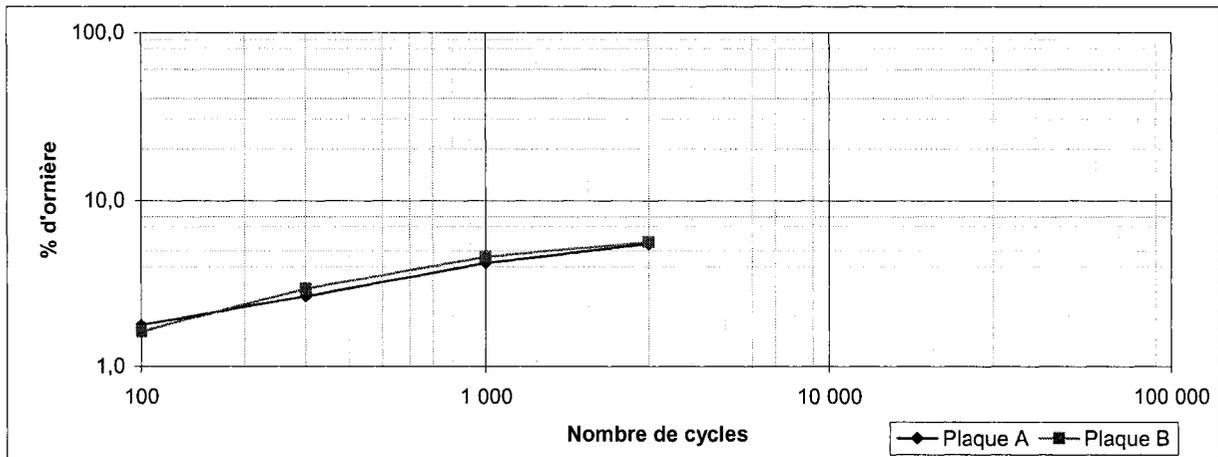
Densité maximale :	2,607	Note :	La Dmax est fournie par l'entrepreneur
--------------------	-------	--------	--

### Conditions d'essai

Plaque	DROITE	GAUCHE	Température moyenne lors de l'essai :	58,8 °C
Épaisseur	50	50	Essai effectué selon la norme :	LC 26-400
Masse utilisée	11470	11599	Température de compactage:	132,5 °c 138°c
Densité brute ou apparente	2,424	2,451	Température de malaxage :	155°c
Vides (%)	7,0	6,0	Bitume:	58 - 34

### Pourcentage d'ornièrè (PI %)

	Nombre de cycles					
	100	300	1 000	3 000	10 000	30 000
Plaque A	1,77	2,67	4,24	5,52	0,00	0,00
Plaque B	1,62	2,97	4,61	5,65	0,00	0,00



### Remarques:

Essai effectué par :		Date :	19-janv-06	Approuvé par :	
Analysé par :	=D98	Date :	00-janv-00	Date :	
Vérifié par:		Date :		Date :	



## RÉSULTATS À L'ORNIÉREUR (Rapport d'essai)

Numéro de projet :	Plaques 13 et 14	Type de mélange :	ESG -10
Client:		Numéro formule client:	

### Caractéristiques de l'enrobé

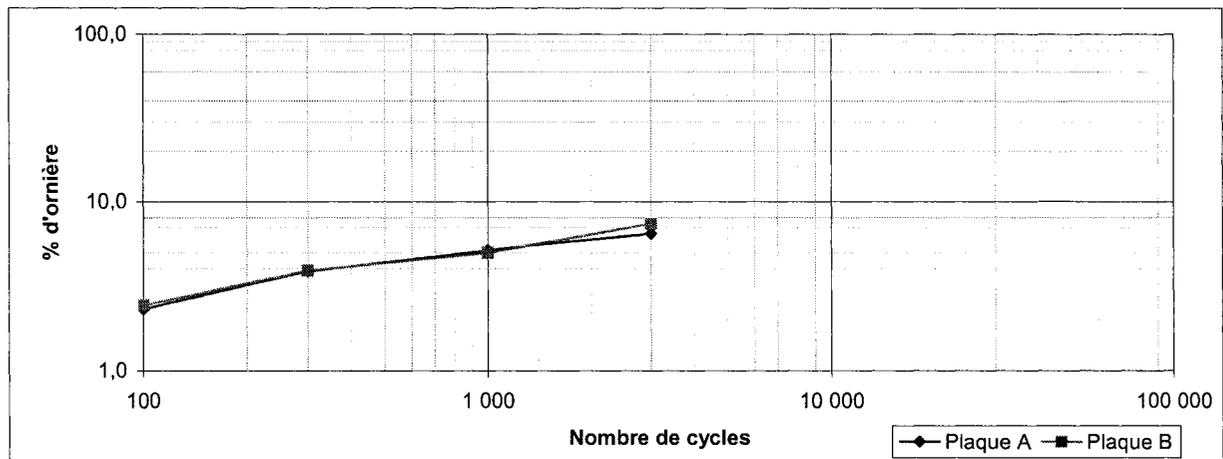
Densité maximale :	2,607	Note :	La Dmax est fournie par l'entrepreneur
--------------------	-------	--------	--

### Conditions d'essai

Plaque	<b>DROITE</b>	<b>GAUCHE</b>	Température moyenne lors de l'essai :	59,0 °C
Épaisseur	50	50	Essai effectué selon la norme :	LC 26-400
Masse utilisée	11414	11494	Température de compactage: 136 °c	136°c
Densité brute ou apparente	2,421	2,437	Température de malaxage :	155°c
Vides (%)	7,1	6,5	Bitume:	58 - 34

### Pourcentage d'ornièrre (PI %)

	Nombre de cycles					
	100	300	1 000	3 000	10 000	30 000
Plaque A	2,31	3,87	5,15	6,48	0,00	0,00
Plaque B	2,43	3,91	4,96	7,36	0,00	0,00



### Remarques:

Essai effectué par :		Date :	20-janv-06	Approuvé par :	
Analysé par :	=D98	Date :	00-janv-00	Date :	
Vérifié par:		Date :		Date :	



## RÉSULTATS À L'ORNIÉREUR (Rapport d'essai)

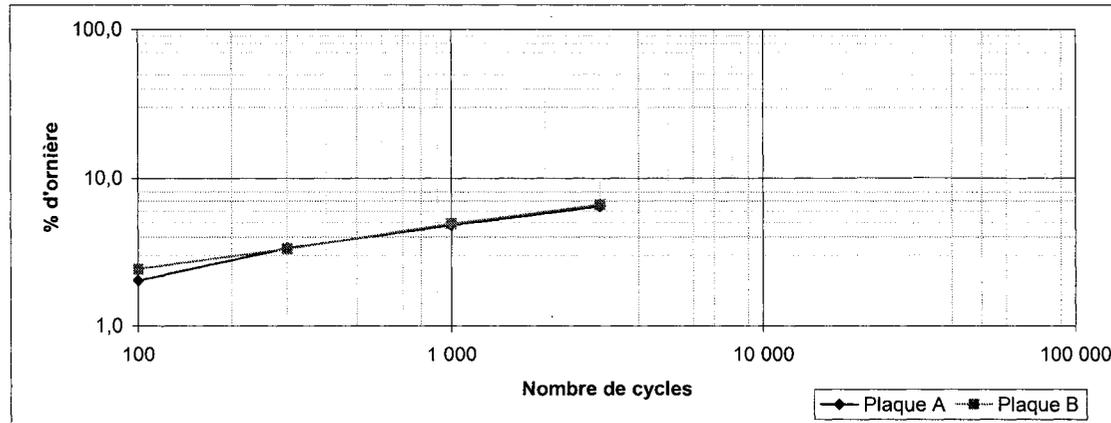
Numéro de projet :	Plaques 15 et 16	Type de mélange :	ESG -10
Client:		Numéro formule client:	
<b>Caractéristiques de l'enrobé</b>			
Densité maximale :	2,607	Note :	La Dmax est fournie par l'entrepreneur

### Conditions d'essai

Plaque	DROITE	GAUCHE	Température moyenne lors de l'essai :	59,1 °C
Épaisseur	50	50	Essai effectué selon la norme :	LC 26-400
Masse utilisée	11293	11244	Température de compactage:	133°C
Densité brute ou apparente	2,430	2,432	Température de malaxage :	155°C
Vides (%)	6,8	6,7	Bitume:	58 - 34

### Pourcentage d'ornièrè (PI %)

	Nombre de cycles					
	100	300	1 000	3 000	10 000	30 000
Plaque A	2,04	3,37	4,80	6,45		
Plaque B	2,44	3,33	4,94	6,63		



### Remarques:

Essai effectué par :		Date :	21-janv-06	Approuvé par :	
Analysé par :	=D98	Date :	00-janv-00	Date :	
Vérifié par :		Date :		Date :	



## RÉSULTATS À L'ORNIÈREUR (Rapport d'essai)

Numéro de projet :	Plaques 17 et 18	Type de mélange :	ESG -10
Client:		Numéro formule client:	

### Caractéristiques de l'enrobé

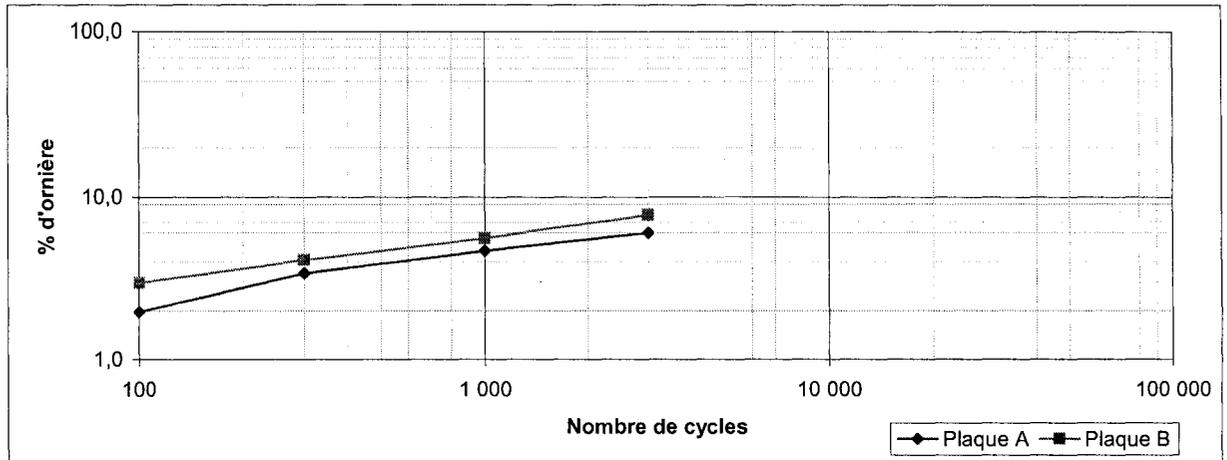
Densité maximale :	2,607	Note :	La Dmax est fournie par l'entrepreneur
--------------------	-------	--------	--

### Conditions d'essai

Plaque	<b>DROITE</b>	<b>GAUCHE</b>	Température moyenne lors de l'essai :	59,2 °C
Épaisseur	50	50	Essai effectué selon la norme :	LC 26-400
Masse utilisée	11345	11216	Température de compactage:	138°C
Densité brute ou apparente	2,393	2,394	Température de malaxage :	155°C
Vides (%)	8,2	8,2	Bitume:	58 - 34

### Pourcentage d'ornièrre (PI %)

	Nombre de cycles					
	100	300	1 000	3 000	10 000	30 000
Plaque A	1,97	3,39	4,66	6,02		
Plaque B	2,96	4,08	5,55	7,75		



### Remarques:

Essai effectué par :		Date :	25-janv-06	Approuvé par :	
Analysé par :	=D98	Date :	00-janv-00	Date :	
Vérifié par:		Date :		Date :	

**ANNEXE 6**

**Rapports des essais à l'orniéreur. Enrobé GB-20**



## RÉSULTATS À L'ORNIÉREUR (Rapport d'essai)

Número de projet :	Plaques 3 et 4	Type de mélange :	GB - 20
Client:		Numéro formule client:	

### Caractéristiques de l'enrobé

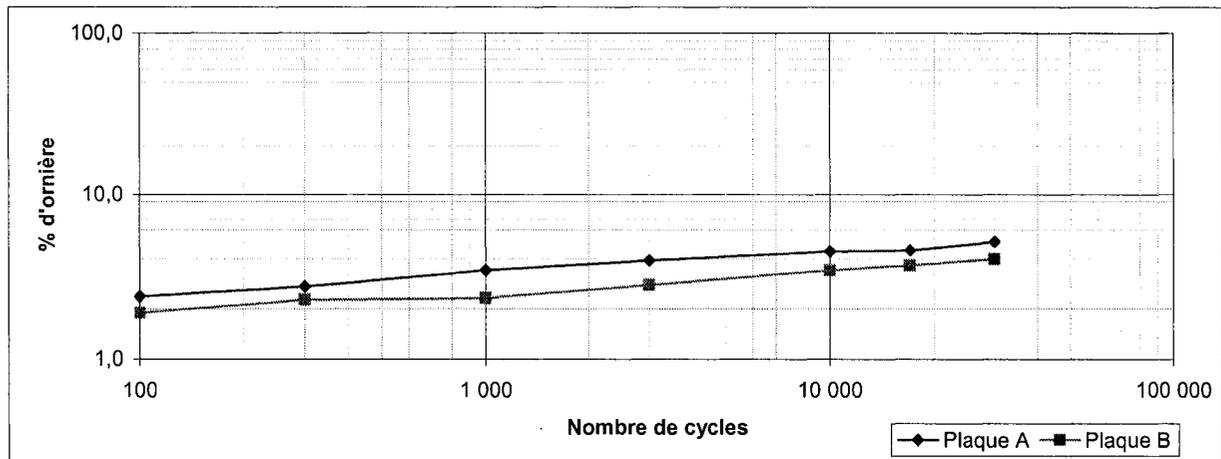
Densité maximale :	2,658	Note :	La Dmax est fournie par l'entrepreneur .
--------------------	-------	--------	--

### Conditions d'essai

Plaque	<b>DROITE</b>	<b>GAUCHE</b>	Température moyenne lors de l'essai :	59,5 °C
Épaisseur	100	100	Essai effectué selon la norme :	LC 26-400
Masse utilisée	23096	21918	Température de compactage:	170°C
Densité brute ou apparente	2,469	2,472	Température de malaxage :	168°C
Vides (%)	7,1	7,0	Bitume:	64 - 34P

### Pourcentage d'ornièrre (PI %)

	Nombre de cycles						
	100	300	1 000	3 000	10 000	17 000	30 000
Plaque A	2,38	2,72	3,40	3,90	4,44	4,49	5,07
Plaque B	1,89	2,27	2,33	2,78	3,42	3,65	3,98



### Remarques:

Essai effectué par :		Date :	28-janv-06	Approuvé par :	
Analysé par :	=D98	Date :	00-janv-00	Date :	
Vérifié par:		Date :		Date :	



## RÉSULTATS À L'ORNIÈREUR (Rapport d'essai)

Numéro de projet :	Plaques 5 et 6	Type de mélange :	GB - 20
Client:		Numéro formule client:	

### Caractéristiques de l'enrobé

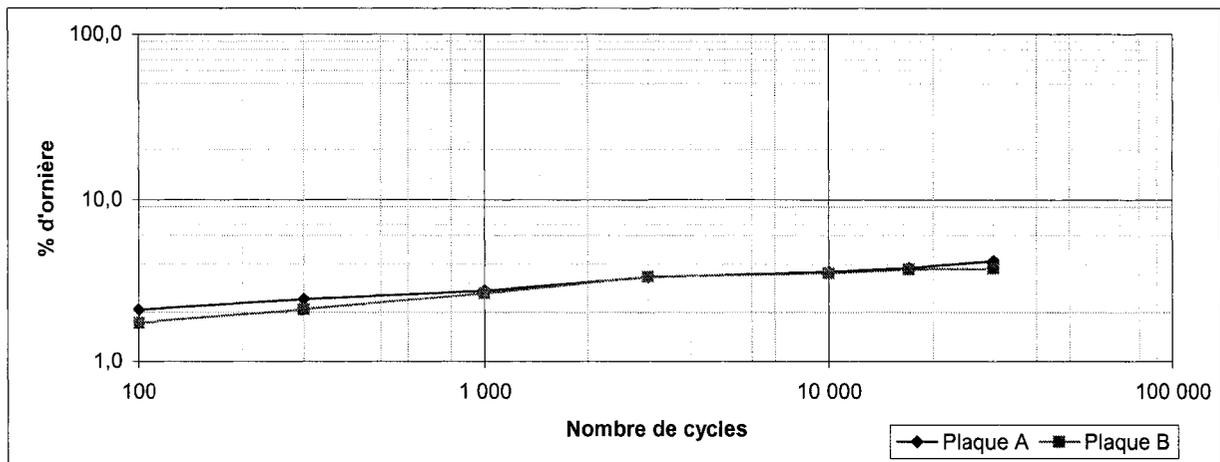
Densité maximale :	2,658	Note :	La Dmax est fournie par l'entrepreneur
--------------------	-------	--------	--

### Conditions d'essai

Plaque	DROITE	GAUCHE	Température moyenne lors de l'essai :	60,0 °C
Épaisseur	100	100	Essai effectué selon la norme :	LC 26-400
Masse utilisée	22117	22265	Température de compactage:	167°C
Densité brute ou apparente	2,472	2,478	Température de malaxage :	168°C
Vides (%)	7,0	6,8	Bitume:	64 - 34P

### Pourcentage d'ornièrre (PI %)

	Nombre de cycles						
	100	300	1 000	3 000	10 000	17 000	30 000
Plaque A	2,08	2,43	2,75	3,32	3,59	3,80	4,20
Plaque B	1,73	2,09	2,64	3,34	3,53	3,72	3,78



### Remarques:

Essai effectué par :		Date :	02-févr-06	Approuvé par :	
Analysé par :	=D98	Date :	00-janv-00	Date :	
Vérifié par:		Date :		Date :	



## RÉSULTATS À L'ORNIÈREUR (Rapport d'essai)

Número de projet :	Plaques 7 et 8	Type de mélange :	GB - 20
Client:		Numéro formule client:	

### Caractéristiques de l'enrobé

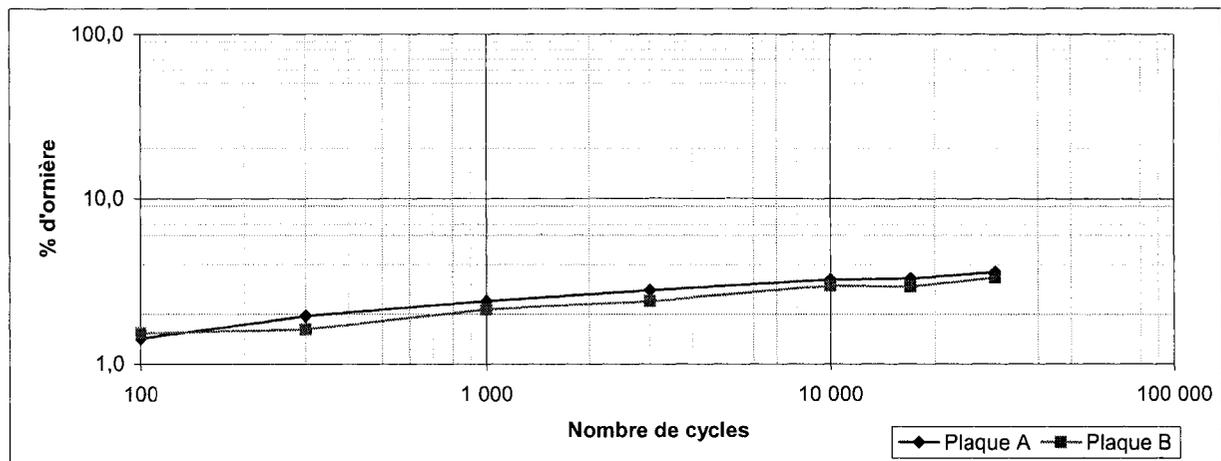
Densité maximale :	2,658	Note :	La Dmax est fournie par l'entrepreneur
--------------------	-------	--------	--

### Conditions d'essai

Plaque	<b>DROITE</b>	<b>GAUCHE</b>	Température moyenne lors de l'essai :	60,1 °C
Épaisseur	100	100	Essai effectué selon la norme :	LC 26-400
Masse utilisée	22867	22678	Température de compactage:	165°C
Densité brute ou apparente	2,463	2,468	Température de malaxage :	168°C
Vides (%)	7,4	7,1	Bitume:	64 - 34P

### Pourcentage d'ornièrre (PI %)

	Nombre de cycles						
	100	300	1 000	3 000	10 000	17 000	30 000
Plaque A	1,43	1,95	2,42	2,81	3,26	3,31	3,61
Plaque B	1,54	1,62	2,14	2,41	2,99	2,95	3,35



### Remarques:

Essai effectué par :		Date :	03-févr-06	Approuvé par :	
Analysé par :	=D98	Date :	00-janv-00	Date :	
Vérifié par:		Date :		Date :	



## RÉSULTATS À L'ORNIÈREUR (Rapport d'essai)

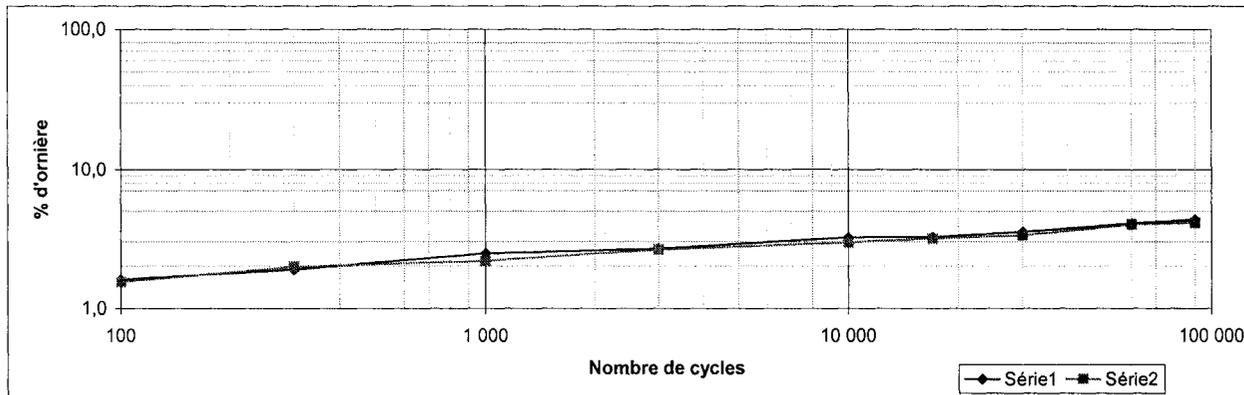
Numéro de projet :	Plaques 9 et 10	Type de mélange :	GB - 20
Client:		Numéro formule client:	
<b>Caractéristiques de l'enrobé</b>			
Densité maximale :	2,658	Note :	La Dmax est fournie par l'entrepreneur

### Conditions d'essai

Plaque	<b>DROITE</b>	<b>GAUCHE</b>	Température moyenne lors de l'essai :	60,0 °C
Épaisseur	100	100	Essai effectué selon la norme :	LC 26-400
Masse utilisée	23019	22932	Température de compactage:	167°C
Densité brute ou apparente	2,462	2,482	Température de malaxage :	160°C
Vides (%)	7,4	6,6	Bitume:	64 - 34P

### Pourcentage d'ornièr (PI %)

	Nombre de cycles								
	100	300	1 000	3 000	10 000	17 000	30 000	60 000	90 000
Plaque A	1,61	1,89	2,49	2,69	3,24	3,25	3,56	4,08	4,34
Plaque B	1,54	1,99	2,18	2,66	2,96	3,16	3,35	4,02	4,12



### Remarques:

Essai effectué par :		Date :	09-févr-06	Approuvé par :	
Analysé par :	=D98	Date :	00-janv-00	Date :	
Vérifié par :		Date :		Date :	



## RÉSULTATS À L'ORNIÈREUR (Rapport d'essai)

Numéro de projet :	Plaques 11 et 12	Type de mélange :	ESG -10
Client:		Numéro formule client:	

### Caractéristiques de l'enrobé

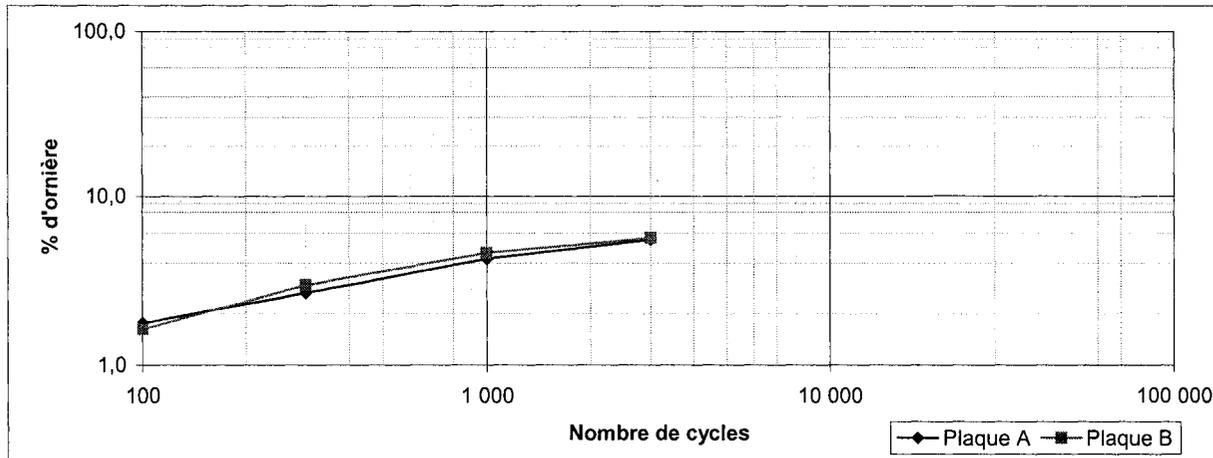
Densité maximale :	2,607	Note :	La Dmax est fournie par l'entrepreneur
--------------------	-------	--------	--

### Conditions d'essai

Plaque	DROITE	GAUCHE	Température moyenne lors de l'essai :	58,8 °C
Épaisseur	50	50	Essai effectué selon la norme :	LC 26-400
Masse utilisée	11470	11599	Température de compactage:	132,5 °c 138°c
Densité brute ou apparente	2,424	2,451	Température de malaxage :	155°c
Vides (%)	7,0	6,0	Bitume:	58 - 34

### Pourcentage d'ornièrre (PI %)

	Nombre de cycles					
	100	300	1 000	3 000	10 000	30 000
Plaque A	1,77	2,67	4,24	5,52	0,00	0,00
Plaque B	1,62	2,97	4,61	5,65	0,00	0,00



### Remarques:

Essai effectué par :	0	Date :	19-janv-06	Approuvé par :
Analysé par :	=D98	Date :	00-janv-00	Date :
Vérifié par:		Date :		Date :



## RÉSULTATS À L'ORNIÈREUR (Rapport d'essai)

Numéro de projet :	Plaques 13 et 14	Type de mélange :	GB - 20
Client:		Numéro formule client:	

### Caractéristiques de l'enrobé

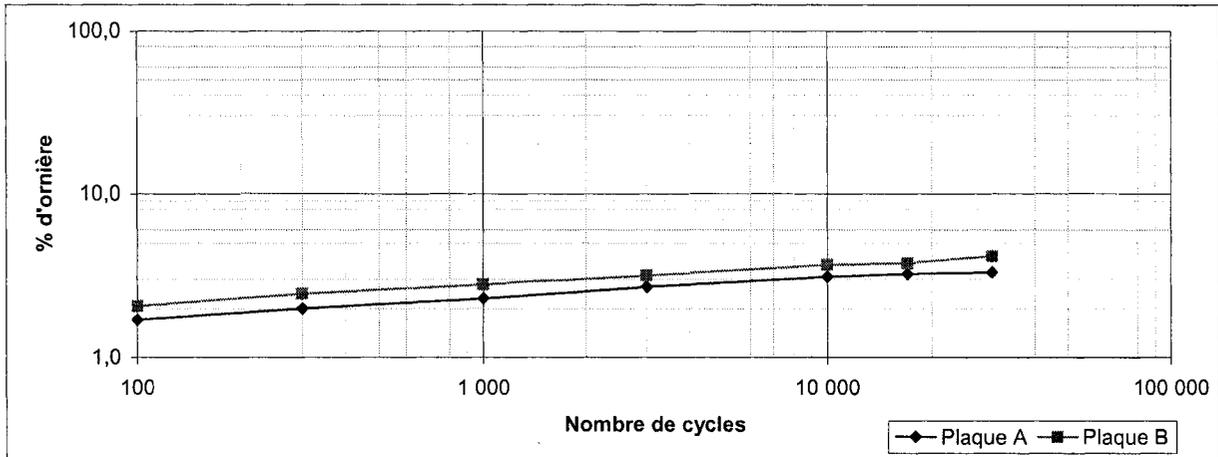
Densité maximale :	2,658	Note :	La Dmax est fournie par l'entrepreneur
--------------------	-------	--------	--

### Conditions d'essai

Plaque	DROITE	GAUCHE	Température moyenne lors de l'essai :	55,8 °C
Épaisseur	100	100	Essai effectué selon la norme :	LC 26-400
Masse utilisée	23056	22225	Température de compactage:	167,0 °C
Densité brute ou apparente	2,477	2,486	Température de malaxage :	155,0 °C
Vides (%)	6,8	6,5	Bitume:	64 - 34P

### Pourcentage d'ornièr (PI %)

	Nombre de cycles						
	100	300	1 000	3 000	10 000	17 000	30 000
Plaque A	1,71	2,01	2,31	2,72	3,14	3,26	3,33
Plaque B	2,07	2,47	2,81	3,19	3,70	3,78	4,17



**Remarques:**

Essai effectué par :	0 Date :	17-févr-06	Approuvé par :
Analysé par :	=D98	Date :	00-janv-00
Vérifié par :		Date :	



## RÉSULTATS À L'ORNIÉREUR (Rapport d'essai)

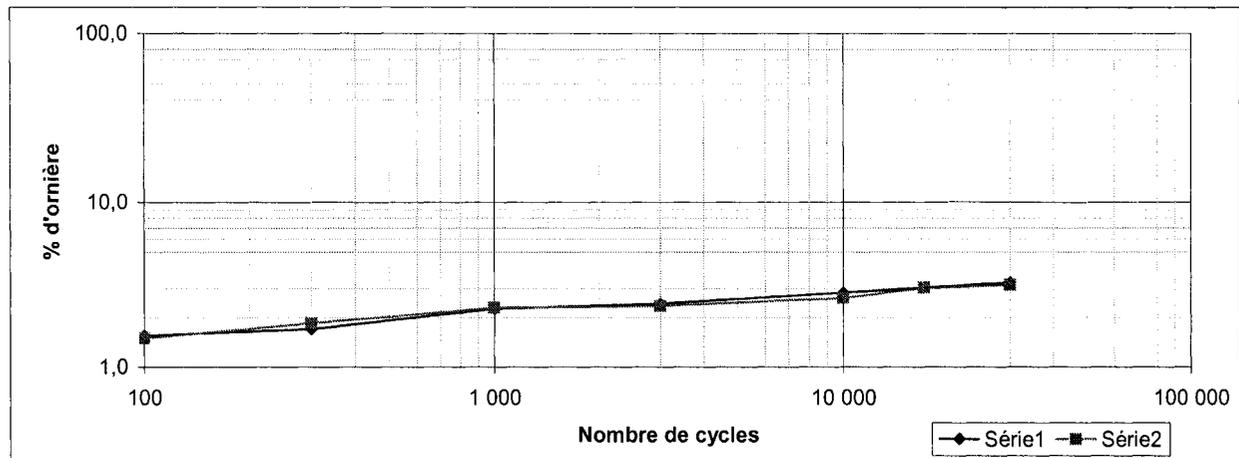
Número de projet :	Pâques 15 et 16	Type de mélange :	GB-20
Client:		Numéro formule client:	
<b>Caractéristiques de l'enrobé</b>			
Densité maximale :	2,658	Note :	La Dmax est fournie par l'entrepreneur

### Conditions d'essai

Plaque	DROITE	GAUCHE	Température moyenne lors de l'essai :	59,3 °C
Épaisseur	100	100	Essai effectué selon la norme :	LC 26-400
Masse utilisée	23101	21627	Température de compactage:	150,0 °C
Densité brute ou apparente	2,471	2,469	Température de malaxage :	168,0 °C
Vides (%)	7,0	7,1	Bitume:	64-34P

### Pourcentage d'ornièrre (PI %)

	Nombre de cycles						
	100	300	1 000	3 000	10 000	17 000	30 000
Plaque A	1,55	1,70	2,26	2,42	2,84	3,05	3,26
Plaque B	1,49	1,85	2,30	2,34	2,62	3,03	3,15



### Remarques:

Essai effectué par :	César Barco	Date :	04-mars-06	Approuvé par :	
Analysé par :	=D98	Date :	04-mars-06	Date :	
Vérifié par :		Date :		Date :	

## BIBLIOGRAPHIE

- Anderson, R.M., Bukowski, J.R. and Turner, P.A.. (1999) *Using Superpave Performance Test to Evaluate Asphalt Mixtures*. Transportation Research Record. (n° 1681): pp.106-112.
- Aschenbrener, T. (1995) *Evaluation of Hamburg Wheel-Tracking Device to Predict Moisture Damage in Hot-Mix Asphalt*. Transportation Research Record 1492, TBR, National Research Council, Washington, D.C. pp.193 – 201.
- Asphalt Institute (1983). *Principles of Construction of Hot-mix Asphalt Pavement*. Manual series No. 22.
- Berthelot, C., Crockfort, B. and Lyton, R. (1999). *Comparison of Alternative Test Methods for Predicting Asphalt Concrete Rut Performance*. In 44<sup>th</sup> Annual Conference of the Canadian Technical Asphalt Association.
- Bonnot, J. (1984). *Essais mécaniques pratiques de formulation et de contrôle des enrobés bitumineux. Rapport général*. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées. n°132, pp.79-90.
- Bonnot, J. (1994) *La méthode SHRP de formulation des enrobés bitumineux*. Association Mondiale de la Route (AIPCR).
- Brown, E.R. and Cross, S.A. (1989) *A Study of In-Place Rutting of Asphalt Pavement*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. V.58-59.
- Brown, S. and J.M. Gibb. (1996) *Validation of Experiments for Permanent Deformation Testing of Bituminous Mixtures*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. V.65-96: p. 255.
- Bukowski, J.R. and Harman, T.P. (1997) *Minutes of the Superpave Report Task Group*. Asphalt Institute.
- Cochet, F., Strategic Highway (SHRP). (1993). *Le vieillissement du bitume*. International conference. The Hague. 20-24 sept.
- Cody, R. et Smith, J. (1997). *Applied Statistics and the SAS Programming Language 4<sup>th</sup> Edition*. Prentice – Hall, Inc. New Jersey.
- Corté, J.F. et al. (1998) *Étude de l'orniérage des couches de roulement au manège d'essai du LCPC*. Bulletin des Laboratoires des ponts et chaussées. (n° 217) : pp.13-30.

Corté, J.F. et Di Benedetto, H. (2004). *Matériaux routiers bitumineux 1 : Description et propriétés des constituants (Traité MIM, série Géomatériaux)*. Lavoisier. France.

Di Benedetto, H. (1990). *Nouvelle approche du comportement des enrobes bitumineux : résultats expérimentaux et formulation rhéologique*. Proceedings of the Fourth International RILEM Symposium. Budapest.

Di Benedetto, H. et De La Roche, C. (1998). State of Art on Stiffness Modulus and Fatigue of Bituminous Mixtures. *Bituminous binders and mixtures: State of Art and interlaboratory test on mechanical behavior and mix design*. E&FN Spon, Ed. L. Francken.

Di Benedetto, H. et Corté, J.F. (2004). *Matériaux routiers bitumineux 2: Constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges (Traité MIM, série Géomatériaux)*. Lavoisier. France.

Droesbeke, J. (1988) *Éléments de statistique*. Editions de l'Université de Bruxelles. Belgique.

Dongmo, B.J. (2005) *Caractérisation des déformations d'orniérage des chaussées bitumineuses*. Thèse doctorale. Institut national des sciences appliquées de Lyon.

EUROBITUME. (1999) *In Eurobitume Workshop 99 on Performance Related Properties for Bituminous Binders*. Luxembourg: European Bitumen Association.

Ferry, J.D. (1980). *Viscoelastic Properties of Polymers, 3<sup>rd</sup>*. Edn, John Wiley & Sons.

Hosfra, A. and Klomp, A.J. (1972). *Permanent Deformation of Flexible Pavement under Simulated Road Traffic Condition*. In proceeding of the 3<sup>rd</sup> International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. London.

Huet, C. (1963). *Étude par une méthode d'indépendance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés*. Thèse de Docteur Ingénieur. Faculté des Sciences de l'Université de Paris.

Hunter, R. N. (2000). *Asphalt in Road Construction*. Dr. Robert N. Hunter and Thomas Telford Limited. London.

Jacobs, J.A. and Kilduff, T.F. (2005). *Engineering Materials Technology: Structures, Processing and Selection*. Pearson / Prentice Hall.

Kandhal, P.S. (2002) *Coarse Versus Fine-Graded Superpave Mixtures Comparative Evaluation of Resistance to Rutting*. National Center for Asphalt Technology NCAT.

Khosla N. P. (2005) *Tensile Strength – A Design and Evaluation Tool for Superpave Mixtures*. Strategic Highway (SHRP).

Krebs, Robert and Walker R. (1971). *Highway Materials*. McGraw – Hill Inc. U.S.A.

Lesueur, D., Little, D.N., Shaschidhar, N., Shenoy, A. (1999). *Effect of hydrated lime on rheology, fracture, and aging of bitumen*. Transportation Research Record. Vol. 1661. pp 93 – 105.

Lesueur, D. (2002). *La rhéologie des bitumes: Principes et modification*. Eurovia Management – Polo de Emulsiones. Madrid.

Odeon, H. (1995) *Prévision de l'orniérage des couches de surface bitumineuses*. LCPC : Nantes p.33.

Olard, F. (2000) *Étude et modélisation du comportement thermo-mécanique des enrobés bitumineux*. Mémoire de recherche pour l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies de Génie Civil de l'Ecole Doctorale MEGA de Lyon.

Olard, F. (2003) *Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à basses températures : Relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé*. Thèse doctorale. Institut national des sciences appliquées de Lyon.

Pan, C. and T. White. (1999) *Condition for Stripping Using Accelerated Testing*. Joint Transportation Research Program. Purdue University, West Lafayette. Indiana.

Roberts, F.L., Kandhal, P.S., Brown, E.R., Lee, D. and Kennedy, T.W. (1991). *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction*. Second Edition 1996. NAPA Education Foundation. Lanham, Maryland.

Seber, George Arthur. (1989). *Nonlinear Regression*. J. Wiley and sons. New York.

Service des chaussées du ministère des Transports du Québec. (2005) *Enrobés : Formulation selon la méthode LC*. Gouvernement du Québec.

St-Jacques, M. et Brosseau, Y. (2004). *Étude de la résistance à l'orniérage d'un enrobé québécois : Essais croisés à l'orniéreur LPC*. Rapport final.  
SHELL. (1991) *Techniques et Utilisation*. Shell Bitumes. Ed. Société des Pétroles Shell.

Skok, E. et al. (2002) *Asphalt Pavement analyzer (APA) Evaluation*. Minnesota Department of Transportation Office of Research Service.

Stuart, K.D. and Mogawer, W. (2001) *Permanent Deformation Using a Mixture with Diabase Aggregate*. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). Project 90-07.

Thiessen, M., A. Shalaby, and K.L. (2000) *Strength Testing of in-service asphalt pavement in Manitoba and correlation to rutting*. 45<sup>th</sup> Annual Conference of the Canadian Technical Asphalt Association.

Verstraeten, J. (1995) *Enrobés bitumineux à haute résistance à l'orniérage par fluage*. Association Mondiale de la Route (AICPR). p. 148.

Young F., Mindess S., Gray R., Bentur A. (1998). *The Science and technology of Civil Engineering Materials*, Prentice Hall.

#### **Autre bibliographie consultée**

Asphalt Institute (1982). *Principles of Construction of Hot-Mix Asphalt pavements*. Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation. Lexington.

Azibert, C. et al. (1976) *Machine d'essai de fluage dynamique pour enrobés bitumineux*. Revue générale des routes et aérodromes. (n° 522) : pp. 42-50.

Bérubé, M.A., Paradis, M. (1997). *Influence de la fraction de sable (80 $\mu$ m – 2.5mm) des granulats et du filler minéral (<80 $\mu$ m) sur la résistance à l'orniérage des chaussées routières*. Ministère des transports. Gouvernement du Québec.

Di Benedetto, H. (1987). *Modélisation du comportement des géomatériaux : Application aux enrobés bitumineux et aux bitumes*. Thèse de Doctorat d'État : Institut National Polytechnique de Grenoble.

Johnston, K. Jeung et D. Tannahill. (2005) *Use of Asphalt Pavement Analyzer Testing for Evaluating Premium Surfacing Asphalt mixtures for Urban Roadways*. Annual Conference of the Transportation Association of Canada. Calgary.

Kaloush, K.E. and M.W. Witczak. (2002) *Simple Performance Test for Permanent Deformation of Asphalt Mixtures*. TBR abstract 2002.

Lesueur, D. (1999). *Letter to the editor: On the thermorheological complexity and relaxation modes of asphalt cements*. J. Rheol.,43, 1701-1704.

Ministère des Transports du Québec, Laboratoire des chaussées (1997). *Caractérisation et guide de sélection des bitumes*. Gouvernement du Québec.

Mallouk, J.G. (1982). *Les enrobés bitumineux Tome 1 : théorie*. Module éditeur

Mallouk, J.G. (1982). *Les enrobés bitumineux Tome 1 : Laboratoire*. Module éditeur

National Center for Asphalt Technology (NCAT). *Rapport 02-12, NCAT Test Track Design, Construction and Performance*, Alabama.

National Center for Asphalt Technology (NCAT). (2000) Rapport 00-04, Loaded wheel Testers in the United States: State of the Practice.

Olard, F., Di Benedetto, H., Dony, A., Vaniscote, J.C. (2003) *Properties of bituminous mixtures at low temperatures and relations with binder characteristics*. 6th International RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials. Zurich.

Vernon Morgan Moore. (2004) *Evaluation of a Laboratory Accelerated Stripping Simulator for Asphalt Mixes*. Mississippi.

Yildirim, Y. and Kennedy, T.W. (2001) *Correlation of Field Performance to Hamburg Wheel Tracking Device Results*. Texas Department of Transportation Research and Technology Implementation Office.

#### **Normes consultées**

AASHTO TP3-93 *Test Method for Determining the Fracture Properties of Asphalt Binder in Direct Tension (DT)*

AASHTO TP10 *Test Method for Thermal Stress Restrained Specimen Test (TSRST)*

ASTM: D 3496 – 99 (Reapproved 2005) *Standard Practice for Preparation of Bituminous Mixture Specimens for Dynamic Modulus Testing*

ASTM: D 3967 *Standard Test Methode for Tensile Strength Test*

ASTM: D 5581 – 96 (Reapproved 2001) *Standard Test Method for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus (6 inch-Diameter Specimen)*

ASTM: D 6925 – 03 *Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyrotory Compactor*

ASTM: D 6926 – 04 (Reapproved 2001) *Standard Practice for Preparation of Bituminous Specimens Using Marshall Apparatus*

LC 21-010 *Échantillonnage*. Ministère des Transports du Québec.

LC 21-015 *Réduction des échantillons pour essais en laboratoire*. Ministère des Transports du Québec.

LC 21-040 *Analyse granulométrique par tamisage*. Ministère des Transports du Québec.

LC 21-065 *Détermination de la densité et de l'absorption du granulat fin*. Ministère des Transports du Québec.

LC 21-067 *Détermination de la densité et de l'absorption du gros granulat*. Ministère des Transports du Québec.

LC 26-003 *Détermination de l'aptitude au compactage des enrobés à chaud à la presse à cisaillement giratoire*. Décembre 2004. Ministère des Transports du Québec.

LC 26-004 *Formulation des enrobés à l'aide de la presse à cisaillement giratoire selon la méthode du laboratoire des chaussées*. Décembre 2004. Ministère des Transports du Québec.

LC 26-020 *Préparation d'éprouvettes pour la méthode Marshall*. Ministère des Transports du Québec. Décembre 2003.

LC 26-040 *Détermination de la densité brute et de la masse volumique des enrobés à chaud compactés*. Ministère des Transports du Québec. Décembre 2003.

LC 26-045 *Détermination de la densité maximale*. Ministère des Transports du Québec. 2003

LC 26-060 *Méthode Marshall de détermination de la résistance à la déformation d'éprouvettes*. Décembre 2003. Ministère des Transports du Québec.

LC 26-400 *Préparation des enrobes : Compactage de plaque d'enrobe*. Ministère des Transports du Québec. 2002

LC 26-410 *Vérification de la résistance au fluage des enrobes au moyen de l'essai à l'ornièreur*. Ministère des Transports du Québec. 2002

LC 26-700 *Détermination du module complexe des enrobés*. Décembre 2005. Ministère des Transports du Québec.

NF P 98-252. (1991). *Détermination du comportement au compactage des mélanges hydrocarbonés. Essai de compactage à la presse de cisaillement giratoire (PCG)*. Normes AFNOR.

NF P 98-253-1 (1991). *Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés Partie 1 : Essai d'orniérage*. Normes AFNOR.

NF P 98-260-1, juin 1992. *Mesure de caractéristique rhéologique des mélanges hydrocarbonés – Partie 1 : Détermination du module et de la perte de linéarité en traction directe*. Normes AFNOR.

NF P 98-260-2, septembre 1992. *Partie 2 : Détermination du module complexe par flexion sinusoïdale*. Normes AFNOR

NF P 98-261-1, septembre 1992. *Détermination de la résistance en fatigue des mélanges hydrocarbonés – Essai par flexion deux points à amplitude de flèche constante sur des éprouvettes trapézoïdales isocèles*. Normes AFNOR

Norme 4101 *Liants bitumineux* (2005) Ministère des Transports du Québec

Norme 4201 *Enrobés à chaud formulés selon le principe de la méthode Marshall*. Décembre 2005. Ministère des Transports du Québec

Norme 4202 *Enrobés à chaud formulés selon la méthode de formulation du Laboratoire des chaussées*. Décembre 2005. Ministère des Transports du Québec.

P 98-250-2, novembre 1991. *Préparation des mélanges hydrocarbonés; Partie 2 : Compactage de plaques*. Normes AFNOR

P 98-253-1 *Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés; Partie 1 : Essai d'orniérage*. Normes AFNOR

prEN12697-9 *Mélanges bitumineux. Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie 9 : masse volumique de référence et compacteur giratoire*. Norme Européenne.

prEN12697-26 *Mélanges bitumineux. Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie 26 : Rigidité*. Norme Européenne.

prEN 12697-31 *Mélanges bitumineux. Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie 31 : Préparation d'éprouvette et compacteur giratoire*. Norme Européenne.

prEN12697-33 *Mélanges bitumineux. Méthodes d'essai pour mélanges hydrocarbonés à chaud – Partie 33 : Préparation d'éprouvette et compacteur de plaques*. Norme Européenne.

### Sites internet consultés

Asphalt Pavement Technology. (2006). [en ligne]. <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/asphalt/labs/mixtures/sgc.cfm> (Consulté en mars 2006)

Autoroutes et routes de Wallonie, [en ligne]. <http://www.routes.wallonie.be/struct.jsp?chap=5&page=3>. (Consulté en mai, 2006)

Gruet, M-A., Huet, S., et Jolivet, E. *La régression non linéaire et le modèle linéaire généralisé*. [en ligne]. <http://www.inra.fr/mia/T/FPstat/node25.html>. (Consulté en août 2006)

LCPC (Laboratoire central des ponts et chaussées). [en ligne]. [http://www.lcpc.fr/fr/produits/materiels\\_mlpc](http://www.lcpc.fr/fr/produits/materiels_mlpc) (Consulté en mars 2006)

Maine DOT. [en ligne]. [http://www.maine.gov/mdot/systems\\_management/aran.php](http://www.maine.gov/mdot/systems_management/aran.php) (Consulté en mai 2006).

MTQ (Ministère des Transports du Québec). (2006). *Recueil des méthodes d'essai LC*. [en ligne]. [http://www.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/produits/ouvrage\\_routier/guides/guide2.fr.html](http://www.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/produits/ouvrage_routier/guides/guide2.fr.html) (Consulté en avril 2006).

MTQ (Ministère des Transports du Québec). (2006). *Routes : Classes de routes au Québec*. [en ligne] <http://www.mtq.gouv.qc.ca/fr/reseau/routes/classes.asp> (Consulté en avril 2006)

Mountain-Plains Consortium (2006). [en ligne]. <http://www.mountain-plains.org/pubs/html/mpc-04-159/pg4.php> (Consulté en mars 2006)

NCAT test track (National Center for Asphalt Technology). [en ligne]. <http://www.eng.auburn.edu/.../about/aboutmission.html>. (Consulté en avril 2006).

SACR S.A, Bureau d'ingénieurs et laboratoires routiers. [en ligne].  
<http://www.sacr.ch/cgi-local/creator.pl?lang=fr&menu> (Consulté en mars 2006)

SCREG Procédés et Produits. [en ligne].  
[http://www.produits.screg.fr/repo\\_type\\_gloss\\_orni.asp](http://www.produits.screg.fr/repo_type_gloss_orni.asp). (Consulté en avril 2006).

Vectra, (Road engineering Environment Measurement devices). [en ligne].  
<http://www.vectra.fr/> (Consulté en mars 2006)