

# ENROBES TIEDES : COMPORTEMENT A L'ORNIERAGE SELON LES CONDITIONS D'ESSAIS

**A. Dony & J. Colin**

Ecole Spéciale des Travaux Publics, du Bâtiment et de l'Industrie, IRC- MO, Cachan, France.

[2ad-fc@wanadoo.fr](mailto:2ad-fc@wanadoo.fr) & [colin@profs.estp.fr](mailto:colin@profs.estp.fr)

**Liedi Bernucci, Claudio Del Priore, Rosângela Motta**

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Laboratório de Tecnologia de Pavimentação, São Paulo, Brazil.

[liedi@usp.br](mailto:liedi@usp.br), [cdpriore@gmail.com](mailto:cdpriore@gmail.com), [rosangela.motta@poli.usp.br](mailto:rosangela.motta@poli.usp.br)

**Y. Brosseaud**

Institut Français des Sciences et des Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux, IFSTTAR, ex LCPC, France, France

[yves.brosseaud@lcpc.fr](mailto:yves.brosseaud@lcpc.fr)

## RÉSUMÉ

L'application des enrobés tièdes (WMA) en technique routière est désormais largement pratiquée dans le monde entier en faisant appel à différentes technologies, dans le but de diminuer la température de fabrication et de mise en œuvre des enrobés à chaud (HMA) tout en maintenant leurs performances.

Dans le cadre d'une coopération franco-brésilienne entre l'Ecole Polytechnique de l'Université de São Paulo (LTP - Laboratorio de Tecnologia de Pavimentação), l'Ecole Spéciale de Travaux Publics ESTP (IRC-MO) et le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (désormais IFSTTAR), cet article présente des résultats d'une étude en laboratoire sur enrobé tiède avec additif. Les températures de fabrication et de mise en œuvre ont été réduites respectivement à 120°C-130°C et à 110-120°C. Les formulations d'enrobés testées ont été réalisées avec des matériaux couramment utilisés tant en France qu'au Brésil: Béton Bitumineux Semi-Grenu 0/10 et Faixa C DNIT – Béton Bitumineux Dense 0/10. Les formulations ont été menées avec les essais conventionnels de chaque pays, à savoir la PCG française (presse à cisaillement giratoire) et la méthode Marshall, montrant la pertinence ou non de ces deux essais vis-à-vis de l'abaissement de température. Par ailleurs, des essais d'orniérage ont été menés selon le référentiel européen, c'est-à-dire avec l'orniéreur type LCPC (matériel recommandé lorsque l'essieu légal est de 130 kN). Des variations sur les conditions normalisées d'essais (température, épaisseur de plaques, grade de bitume) ont permis de distinguer les enrobés tièdes des enrobés à chaud. Cette différence de comportement a été validée sur les liants extraits des enrobés et obtenus après récupération montrant ainsi un moindre vieillissement du liant lors de l'enrobage. Cette étude permet de mettre en évidence la limite de certains essais traditionnels dans leurs conditions normalisées pour l'étude du comportement des enrobés tièdes et la nécessité de les adapter à ces nouveaux procédés, voire de les modifier.

**MOTS CLES:** enrobés tièdes, orniérage, température, vieillissement

## 1. INTRODUCTION

Le développement durable est au cœur des préoccupations du 21<sup>ème</sup> siècle, et des efforts doivent être fournis par chacun, pour diminuer l'empreinte écologique sur la planète. Très développés dans de nombreux pays et notamment en France et au Brésil, les enrobés à chaud (notés HMA) ont vu leur température de fabrication et de mise en œuvre diminuer, grâce au développement des enrobés tièdes (notés WMA), au début des années 2000. Quelques années après, de nombreux chantiers ont été réalisés avec des technologies diverses permettant des économies énergétiques sur les installations industrielles, mais aussi, une réduction des gaz à effet de serre sur les chantiers. Ces expérimentations ont fait l'objet de synthèses techniques intéressantes, notamment en France [1]. Que ce soient l'ajout d'additif chimique dans le bitume, l'utilisation de procédés mécaniques avec sable humide, ou mousse de bitume, ou l'application de double enrobage, toutes ces techniques sont évaluées en laboratoire à partir des essais développés sur les enrobés à chaud, en fonction des référentiels de chaque pays. Mais quelle est la pertinence de ces essais traditionnels, vis-à-vis de ces nouvelles technologies, et notamment permettent-ils d'évaluer réellement les performances, vis à vis de l'abaissement de température? Ne nécessitent-ils pas parfois quelques aménagements? Il est important pour le formulateur, mais aussi pour le chercheur, d'en connaître le domaine de validité.

C'est dans cet objectif qu'a été lancé le partenariat franco-brésilien entre l'Ecole Spéciale des Travaux Publics de Cachan, le LCPC de Nantes (devenu IFSTTAR) et l'Ecole Polytechnique de l'Université de São Paulo. Afin d'étudier le comportement des enrobés tièdes en laboratoire, les trois laboratoires se sont associés dans une étude permettant la comparaison de méthodologies française et brésilienne, sur un procédé d'enrobé tiède avec additif chimique.

Initié par une étude sur la maniabilité des enrobés, caractéristique indispensable pour assurer la mise en œuvre, et donc en partie la performance de l'enrobé, le travail s'est ensuite principalement porté sur la tenue à l'orniérage. Un des avantages mis en avant dans les enrobés tièdes est le moindre vieillissement du liant hydrocarboné dû au chauffage moins important des matériaux de base. Mais en contre partie, on peut alors s'interroger sur son incidence vis à vis de la tenue à haute température de service de ces enrobés.

## 2 PROGRAMME EXPERIMENTAL ET PROCEDURES

### 2.1 Matériaux

#### 2.1.1 Additif pour enrobé tiède

Un composant tensio-actif a été testé, en ajout au bitume pur chauffé à 160°C ou 165°C, quelques minutes avant introduction dans l'enrobé. Le dosage en additif est fixe pour toute l'étude soit 0.3% en masse par rapport au bitume.

#### 2.1.2 Matériaux

Deux natures de granulats, classiquement utilisés dans chaque pays pour la fabrication d'enrobés, ont été choisies, à savoir diorite en France et granit au Brésil. Les liants bitumineux, tous des bitumes purs, ont également été sélectionnés en fonction de chaque pays à savoir 10/20, 35/50 et 50/70 en France, et 30/45 et 50/70 au Brésil.

### 2.1.3 Formulation d'enrobé et paramètres de production

Les formulations sont des enrobés denses classiques: BBSG 0/10 Classe 2 (béton bitumineux semi grenu de taille 0 à 10 mm) en France (ou EB 0/10 roulement ou liaison selon l'appellation européenne NF EN 13-108-1) et CBUQ (taille 0 à 12.5 mm) au Brésil. Une étape importante dans la méthodologie est la détermination des températures de travail, c'est à dire les températures de chauffage des granulats, du bitume, mais aussi celles pour la fabrication des enrobés classiques (HMA) et tièdes (WMA). Ces températures sont indiquées dans les tableaux 1 et 2.

Tableau 1- Températures de l'étude française, en degrés Celsius et en Fahrenheit entre parenthèses

	France					
	BBSG 0/10 au 35/50		BBSG 0/10 au 10/20		BBSG 0/10 au 50/70	
	HMA	WMA*	HMA	WMA*	HMA	WMA**
Bitume	165 (329)	165 (329)	180 (356)	180 (356)	150 (302)	150 (302)
Granulats	165 (329)	110 (230)	180 (356)	110 (230)	150 (302)	110 (230)
Compactage	165 (329)	110 (230)	180 (356)	110 (230)	150 (302)	100 (230)

\* sans et avec additif \*\* avec additif

Notation: HMA Hot Mixed Asphalt ou Enrobé à chaud WMA Warm Mixed Asphalt ou Enrobé Tiède

Tableau 2- Températures de l'étude brésilienne, en degrés Celsius et en Fahrenheit entre parenthèses

	Brésil			
	CBUQ 12.5 mm au 30/45		CBUQ 12.5 mm au 50/70	
	HMA	WMA*	HMA	WMA**
Bitume	160 (320)	160 (320)	160 (320)	160 (320)
Granulats	170 (338)	135 (275)	160 (320)	110 (230)
Compactage	150 (302)	125 (257)	150-160 (302-320)	110-115 (230-239)

\* sans et avec additif \*\* avec additif

## 2.2 Evaluation de l'enrobé

### 2.2.1 Compacité

La méthodologie française de formulation est composée de différents niveaux de tests [2]. Le premier niveau inclut la Presse à Cisaillement Giratoire (PCG) et l'essai de tenue à l'eau ou de résistance au désenrobage par l'eau (appelé aussi essai Duriez) qui n'est pas présenté dans cet article.

La PCG est pratiquée sur un enrobé préparé dans un malaxeur de laboratoire, avec une température de bitume adaptée au grade du liant (130°C à 180°C) selon la norme NF EN 12-697-31 [3]. L'essai est sensible aux proportions de granulats et à la teneur en liant et

peut déceler des changements imperceptibles par des essais courants sur les granulats. Par ailleurs, la PCG sert à vérifier la constance des formulations dans le temps [2].

D'un autre côté, la méthode Marshall a été conçue durant la Seconde Guerre Mondiale et est toujours largement utilisée au Brésil, particulièrement grâce à sa simplicité et à son faible coût. Cet essai Marshall [4] est différent des nouvelles méthodes de formulation par des procédures de compaction, utilisant une méthode par impact. La teneur en bitume optimum est définie par deux caractéristiques principales: un critère volumétrique et un essai de stabilité. Dans certaines régions du Brésil, la teneur en liant optimum d'un enrobé dense classique est basée sur la teneur en vide, qui est classiquement de 4%, par analogie aux anciennes méthodes américaines.

### 2.2.2 Orniérage

Les essais d'orniérage ont été menés tant en France qu'au Brésil avec un matériel français type MLPC [2] décrit dans la norme européenne NF EN 12697-22 [5], comme grand matériel d'essai. La commission de normalisation européenne recommande l'usage de l'ornièreur MLPC pour les réseaux où les charges légales sont de 130 kN.

Il existe cependant différentes procédures d'orniérage, avec du matériel spécifique, développés par d'autres pays dont les conditions divergent de la procédure française. La taille des éprouvettes, les conditions d'essais (chargement, fréquence, température) et le type de roue peuvent varier selon les types d'orniéreurs. Le test d'orniérage d'Hambourg (HWRT) se réalise sur des échantillons d'enrobés parallélépipédiques (26 x 32 cm sur 4, 8 ou 12 cm d'épaisseur), compactés à 7% de vides en laboratoire ou sur des carottes de 15 cm de diamètre. Les échantillons sont immergés dans l'eau pour subir 20 000 cycles voire 100 000 cycles sous une charge de 710 N à une fréquence de 1.13 Hz. Ce test intéressant présente l'inconvénient cependant de tester deux phénomènes simultanément, la tenue à l'orniérage et le désenrobage à l'eau, avec la difficulté de dissocier la part de chacun. Les essais sont menés en Europe à 50°C mais des variantes selon les pays peuvent être appliquées.

Aux USA, a été développé depuis 1996 l'APA (Asphalt Pavement Analyzer) évaluant l'orniérage, mais aussi d'autres caractéristiques, telles que la tenue à l'eau ou la fatigue. Normalisé (AASHTO TP-63-03) ; cet essai peut se réaliser sur des barreaux d'enrobés, des éprouvettes cylindriques ou des carottes de chantiers compactés entre 3 et 7%, soumis aux passages répétés d'une roue en acier sous un caoutchouc gonflé à 700 kPa, sous une charge de 445 N pendant 8 000 cycles. Une étude comparative canadienne [6] a été menée sur ces différents appareillages et il ressort l'importance de caler les conditions d'essais pour être objectivement comparables (température d'essai, type de roue, la présence d'eau ou non). Il a été ainsi montré des différences mesurées sur un même enrobé selon la procédure appliquée et a été conclu à la nécessité d'un seul test performant et fiable.

Récemment Perraton and Co [7] ont publié une campagne d'essais comparatifs menés sur 3 types d'orniéreurs décrits dans la norme européenne et mettent en avant les différences observées sur les différents appareillages, tels que le type de chargement (charge appliquée, fréquence), de roue (taille, surface de contact, dureté du caoutchouc), de plaque testée (dimensions, fixations).

Dans notre étude, les échantillons soumis aux essais d'orniérage MLPC, sont des éprouvettes parallélépipédiques de 50 cm de longueur, sur 18 cm de largeur et de 5 cm ou 10 cm d'épaisseur, selon l'enrobé testé, confectionné au compacteur de plaques. Testés par paire, ils sont soumis aux passages répétés d'une roue équipée d'un pneumatique, et animée d'un mouvement alternatif sinusoïdal, provoquant des déformations permanentes, à une fréquence de 1 Hz, sous une charge de 5 kN et une pression de 6 bars à haute

température (classiquement 60°C). La profondeur d'ornièrre mesurée, sur une moyenne de 15 points, est donnée en fonction du nombre de cycles. Les spécifications définissent un pourcentage d'ornièrre pour un nombre de cycles données (3 000, 10 000 et plus classiquement 30 000 cycles) qui dépend du type d'enrobé et de sa classe.

### 2.2.3 Extraction et récupération du liant bitumineux

Afin d'analyser le bitume présent dans l'enrobé après ornièrre, une opération de désenrobage est pratiquée à l'aide d'un extracteur de laboratoire appelé asphaltanalyzateur selon la norme européenne NF EN 12697-1 [8], complété par une procédure interne au laboratoire, précisant les nombres de lavages et séchage du matériau. Le solvant utilisé est le tetrachloréthylène.

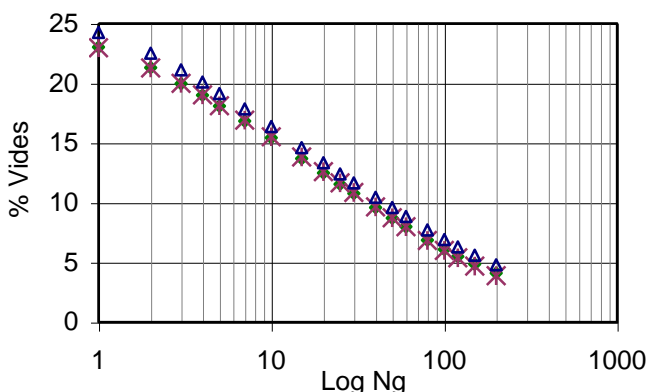
L'extraction est suivie d'une récupération du liant, par évaporation du solvant par rotavapor, avec contrôle de la température et pression, afin d'assurer une évaporation complète sans oxydation. La procédure suivie répond à la norme européenne NF EN 12697-3 [9].

Le liant récupéré est analysé par les essais classiques de caractérisation des liants bitumineux (détermination de la pénétrabilité à 25°C [10] et du point de ramollissement bille et anneau [11]).

## 3 ANALYSE DES RESULTATS

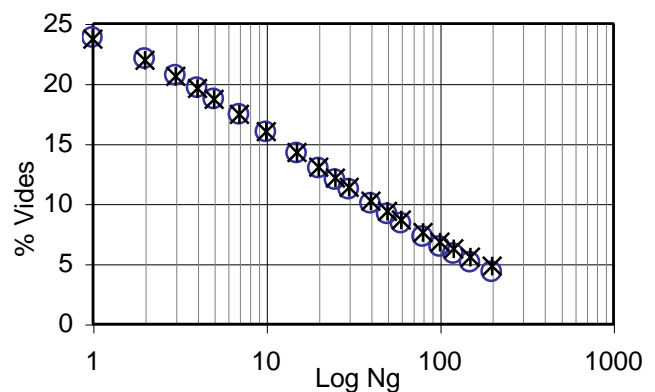
### 3.1 Compacité

#### 3.1.1 Résultats PCG



◆ Chaud    ✕ Tiède sans additif    ▲ Tiède + 0,3% additif

Figure 1- Résultats PCG du BBSG 0/10 (chaud, tiède sans et avec additif) au bitume 35/50



○ Tiède    ✕ Chaud

Figure 2 - Résultats PCG du BBSG 0/10 (chaud et tiède sans additif) au bitume 10/20

Les essais menés sur la même formulation de BBSG 0/10 avec deux bitumes de grade différents (10/20 et 35/50) montrent que les pourcentages de vides déterminés par PCG sont identiques entre un enrobé à chaud (165°C) et un enrobé tiède (110°C) avec additif, illustré sur les figures 1 et 2. Par ailleurs l'enrobé tiède sans additif présente la même compacité que l'enrobé à chaud.

La PGC ne se révèle donc pas un outil pertinent pour montrer des différences vis à vis de la température de compactage dans les enrobés. Pour toutes les formulations testées, les pourcentages de vides obtenus répondent aux spécifications françaises à savoir entre 5% et 10% à 60 girations. Cette optimisation de reconstitution granulaire et teneur en liant s'effectue par le compactage standardisé réalisé au moyen de la PCG, qui reste l'outil de base indispensable pour évaluer ce réarrangement granulaire, mais qui ne prend pas en compte les effets de température.

### 3.1.2 Résultats Marshall

Afin de comparer enrobés à chaud et enrobés tièdes, les pourcentages de vides ont été déterminés selon la procédure normalisée AASHTO T166, sur des éprouvettes Marshall. L'abaissement de température lors de la production d'enrobés tièdes peut empêcher le bon collage aux granulats et conduire à une compacité plus faible.

Les résultats montrent une différence mesurable entre enrobés à chaud et enrobés tièdes au niveau du pourcentage de vide (5.0% et 6.0% respectivement), plus prêt de la teneur en vides visée pour l'enrobé à chaud (qui doit être 4%). Ainsi, par les essais Marshall, la compacité des enrobés tièdes semble être légèrement plus faible que celle des enrobés à chaud, liée à une moindre maniabilité.

Tableau 3 - Résumé de la formulation brésilienne des enrobés CBUQ 12.5 mm au 30/45

Caractéristiques	Unité	Résultats	Méthode
Teneur en bitume optimum	%	5.0	DNER ME 043
Masse volumique du bitume	g/cm <sup>3</sup>	1,050	AASHTO T228
Masse volumique apparente de l'enrobé	g/cm <sup>3</sup>	2,385	AASHTO T166
Masse volumique théorique de l'enrobé	g/cm <sup>3</sup>	2,491	Asphalt Institute
Teneur en vides	%	4.2	Asphalt Institute
Teneur en vides dans squelette minéral	%	15,1	Asphalt Institute
Teneur en vides rempli par le bitume	%	71,8%	Asphalt Institute
Contrainte de traction indirecte	MPa	2,10	DNER ME 138

Tableau 4 - Résumé de la formulation brésilienne des enrobés BUQ 12.5 mm au 50/70

Caractéristiques	Unité	Résultats	Méthode
Teneur en bitume optimum	%	4,4	DNER ME 043
Masse volumique du bitume	g/cm <sup>3</sup>	1,010	AASHTO T228
Masse volumique apparente de l'enrobé	g/cm <sup>3</sup>	2,484	AASHTO T166
Masse volumique théorique de l'enrobé	g/cm <sup>3</sup>	2,588	Asphalt Institute
Teneur en vides	%	4,0	Asphalt Institute
Teneur en vides dans squelette minéral	%	13,9	Asphalt Institute
Teneur en vides rempli par le bitume	%	71,1%	Asphalt Institute
Contrainte de traction indirecte	MPa	1,91	DNER ME 138

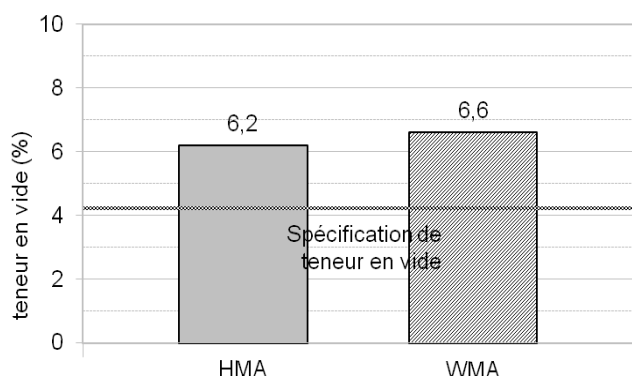


Figure 3 – Teneurs en vide des HMA et WMA brésiliens sur CBUQ 12.5 mm au 30/45

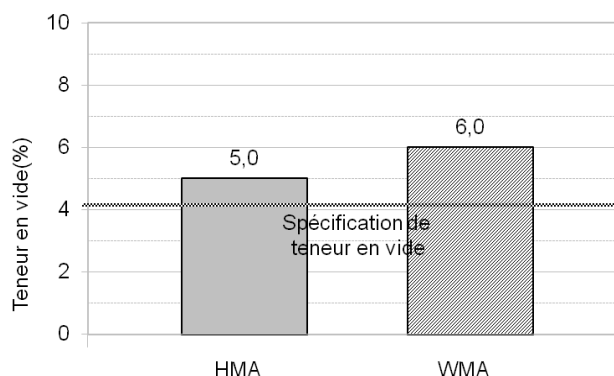


Figure 4 - Teneurs en vide des HMA et WMA brésiliens sur CBUQ 12.5 mm au 50/70

### 3.1.3 Discussion

La compacité d'un enrobé est une donnée importante pour lui assurer ses performances notamment mécaniques. Elle est obtenue grâce à une formulation optimisée mais aussi à une mise en oeuvre correcte (respect des températures et calage de l'atelier de compactage).

L'essai PCG donne l'évolution du compactage de l'enrobé en fonction du nombre de girations et permet sur les enrobés à chaud de valider une formulation. On constate cependant que l'effet température est totalement occulté lors de l'essai: les compacités obtenues sur une même formulation sont identiques avec une fabrication à chaud (165°C), une fabrication tiède (110°C) sans additif ou avec additif et ce, avec deux bitumes de grades différents 35/50 et 10/20. Or sur chantier, un enrobé au 10/20 sans additif à 110°C serait difficilement compactable. L'essai PCG ne peut donc pas suffire pour évaluer, en laboratoire, la maniabilité et la compacité d'un enrobé tiède, en rapport avec les réductions de température.

Nos résultats, déjà publiés à l'IRF [12], sont confirmés par l'étude de Bennert and Co [13] de 2010 qui ont montré lui aussi les limites de la PCG sur les enrobés tièdes, notamment par rapport au Marshall et au AWD (Asphalt Workability Device: mesure de couple à vitesse constante dans un échantillon d'enrobé à différentes températures) qui selon eux se révéleraient plus pertinent. Bennert complète par ailleurs son étude par des essais classiques sur liants tels que la viscosité qui, elle aussi, se montre insuffisante sur certains procédés pour traduire le gain de maniabilité de certains additifs pour enrobés tièdes. Des mesures de viscosité en cours confirment ces aspects.

## 3.2 Résultats d'orniérage

L'étude a été menée sur l'orniéreur français MLPC (grand modèle d'orniéreur) en faisant varier la température d'essai, l'épaisseur de plaque et le grade du bitume, tant avec des matériaux français que brésiliens. Le tableau 5 résume ces différents paramètres.

Tableau 5 - Paramètres variables testés lors des essais d'orniérage

Variation étudiée	Choix des paramètres
Température de fabrication des enrobés	tiède (110°C) ou chaud (165°C)
Nature des matériaux	français ou brésilien
Grade du bitume	35/50, 30/45 ou 50/70
Épaisseur de plaques	5 cm ou 10 cm
Température d'orniérage	60°C ou 70°C

### 3.2.1 Influence de l'épaisseur de plaque

La norme européenne préconise les essais d'orniérage sur plaque de 10 cm pour les BBSG 0/10, appliqué sur chantier sur une épaisseur supérieure à 5 cm, alors que les formulations brésiliennes ont été testées sur des épaisseurs de 5 cm.

Il est à noter que les granulats et les liants utilisés ne sont pas identiques dans les formulations brésiliennes et françaises.

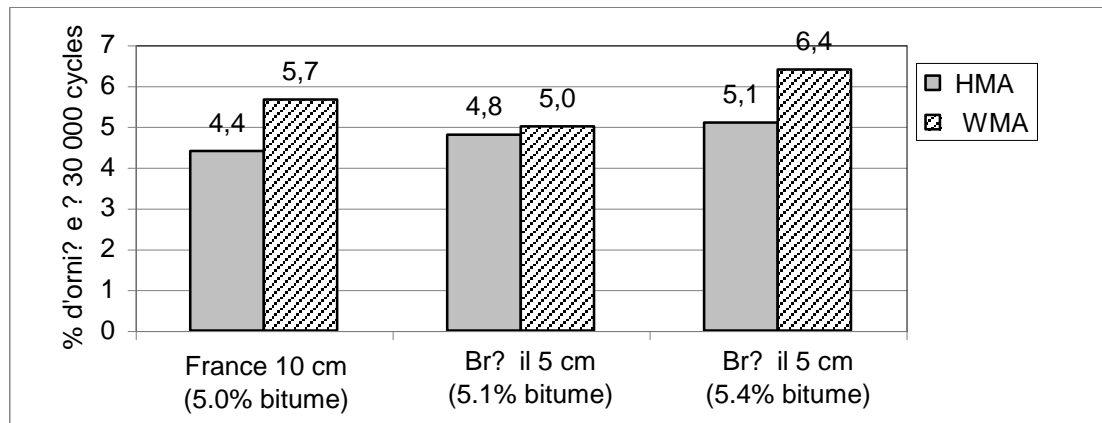


Figure 5 - Comparaison des % d'orni?re à 30 000 cycles en fonction de l'épaisseur de plaque

On constate des résultats comparables entre les plaques de 5 et de 10 cm, avec systématiquement un orniérage légèrement plus élevé pour les tièdes que pour les enrobés à chaud.

### 3.2.2 Influence de la température

Les essais d'orniérage ont été menés à deux températures différentes (60 et 70°C) sur le BBSG 0/10 au 35/50 (formulation française) avec et sans additif, sur des plaques de 10 cm. Il est important de noter que chaque résultat est la moyenne de deux plaques minimum (6 plaques pour les essais à 60°C réparties entre deux laboratoires tant en compactage qu'orniérage et 2 plaques pour chaque essai à 70°C). Les résultats sont présentés sur la figure 6.

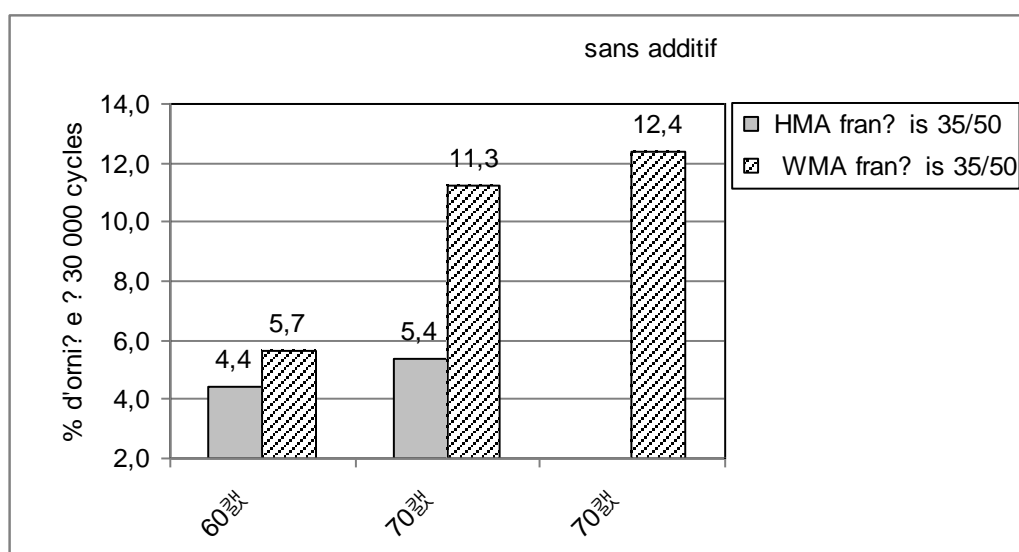


Figure 6 - Influence de la température d'essai sur la profondeur d'orni?re



Nos résultats d'essais réalisés à la température conventionnelle de 60°C confirment ceux publiés par les entreprises françaises et synthétisés par Y. Brosseaud en 2007 [1]: le comportement des enrobés tièdes, testés selon la norme NF EN 12697-22, conduit à un comportement comparable dans les conditions de spécifications à celui des enrobés à chaud, et ce avec différents types de procédés.

La synthèse sur les enrobés tièdes de Button and Co [14] conduisait à une conclusion plus mitigée. Cette étude présentait des résultats sur enrobés tièdes en faisant appel à différents types d'essais d'orniérage (notamment APA et HWRT). Le test d'Hambourg semblait montrer une sensibilité plus importante des enrobés tièdes avec certains procédés en fonction des granulats et d'additifs éventuels mais, comme nous l'avons précisé précédemment, il teste à la fois la tenue à l'orniérage et la sensibilité à l'eau avec la difficulté de définir l'influence de chaque paramètre. Par ailleurs, les auteurs précisait que le potentiel d'orniérage augmente avec la diminution des températures d'enrobage et de compactage lié à un vieillissement moindre du liant bitumineux.

En modifiant les conditions d'essais, et les rendant plus sévères, nous constatons aussi des résultats différents avec l'orniéreur français: en augmentant la température d'essai d'orniérage, les comportements des enrobés à chaud et tièdes ne sont plus identiques; la profondeur d'ornière est légèrement supérieure entre 60 et 70°C pour un enrobé à chaud ( $\Delta = 1\%$ ) alors qu'elle double entre 60 et 70°C pour un enrobé tiède et ce indépendamment de l'additif tensio-actif ajouté. Ces résultats confirment que le vieillissement du liant doit être moindre.

Les essais inter laboratoires du comité technique 206 ATB de la RILEM montrent également cette influence entre 50 et 60°C, influence variable selon le type d'enrobé [7]. Nous avons complété nos essais par des caractérisations de liants, d'une part pour évaluer l'effet de la préparation du liant avant enrobage et d'autre part l'effet sur l'enrobage et l'orniérage et notamment l'abaissement de la température. Les résultats sont présentés sur les figures 7, 8 et 9.

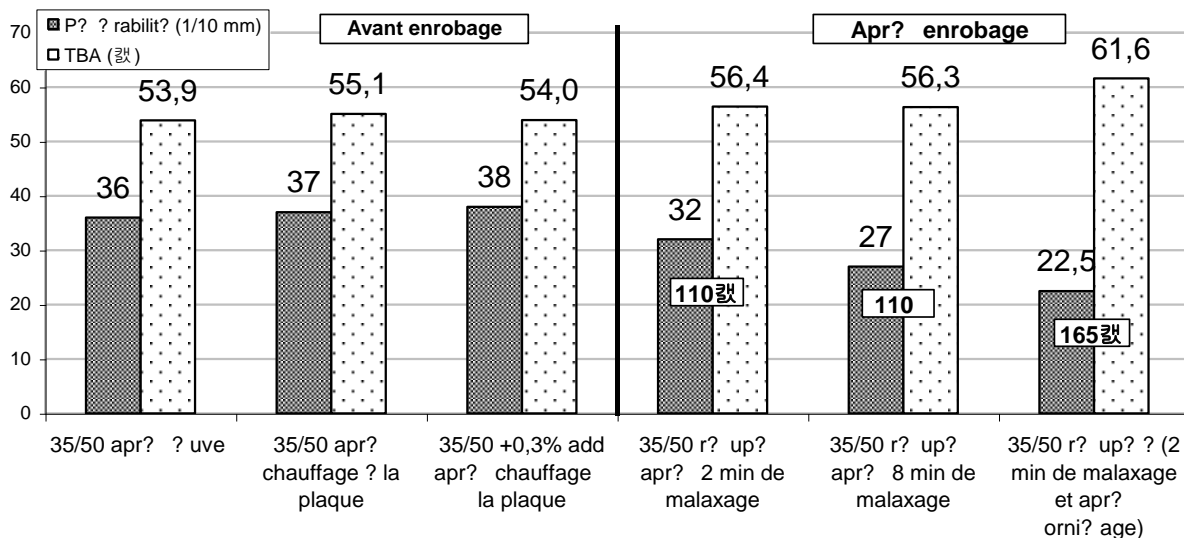


Figure 7- Pénétrabilité et point de ramollissement des liants avant et après enrobage

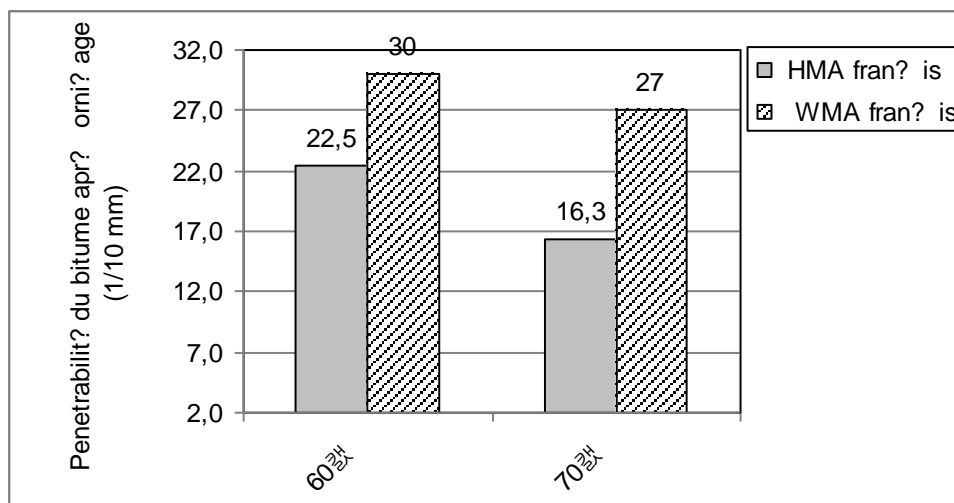


Figure 8 - Influence de la température d'essai d'orniérage sur la pénétrabilité du liant récupéré

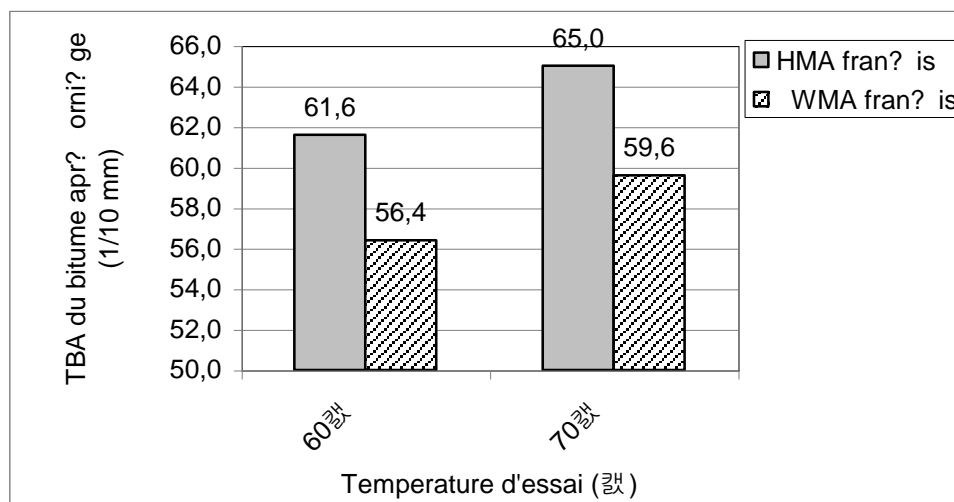


Figure 9 - Influence de la température d'essai d'orniérage sur le point de ramollissement du liant récupéré

L'ajout de l'additif dans le liant avant enrobage n'influe pratiquement pas sur les caractéristiques du liant (pénétrabilité de 37+/- 1 1/10 mm et TBA de 54.5°C +/-1°C, viscosités comparables). Ceci s'explique aisément par l'effet recherché par l'additif tensio-actif: celui-ci doit jouer sur les interfaces avec les granulats, mais sans changer le comportement rhéologique du bitume. La température d'enrobage a, par contre, une incidence non négligeable: un enrobage à 110°C conduit à des liants 35/50 de pénétrabilité d'environ 30 1/10mm et une TBA inférieure à 60°C tandis qu'un enrobage à 165°C conduit à un liant plus dur (< 25 1/10 mm et TBA > 60°C°). Pour l'enrobage classique à 165°C, on retrouve la perte connue d'une classe de pénétrabilité pour les enrobés à chaud, alors que la perte est moindre sur les enrobés tièdes.

Selon NGUYEN [15], cette influence de la température d'essai d'orniérage est bien connue et est liée à la susceptibilité thermique du liant bitumineux. Plus la température est élevée, plus le liant perd de sa rigidité et de sa viscosité, la rigidité du mélange diminue et la résistance aux déformations permanentes, qui est assurée par la cohésion, diminue également. Le mélange est alors plus sensible aux déformations permanentes. La température de l'essai d'orniérage s'avère ainsi déterminante vis à vis du comportement de l'enrobé, notamment entre 60°C et 70°C.

### 3.2.3 Influence du grade du bitume

Afin de vérifier l'influence des caractéristiques du liant sur la tenue à l'orniérage de l'enrobé, nous avons substitué un bitume 35/50 par un 50/70, dans nos formulations d'enrobé, afin de pouvoir reproduire les phénomènes observés à 70°C, dans des conditions normalisées de l'essai d'orniérage français, à savoir 60°C.

Ces essais ont été menés avec des formulations françaises (figure 10) et avec des formulations brésiliennes (figure 11).

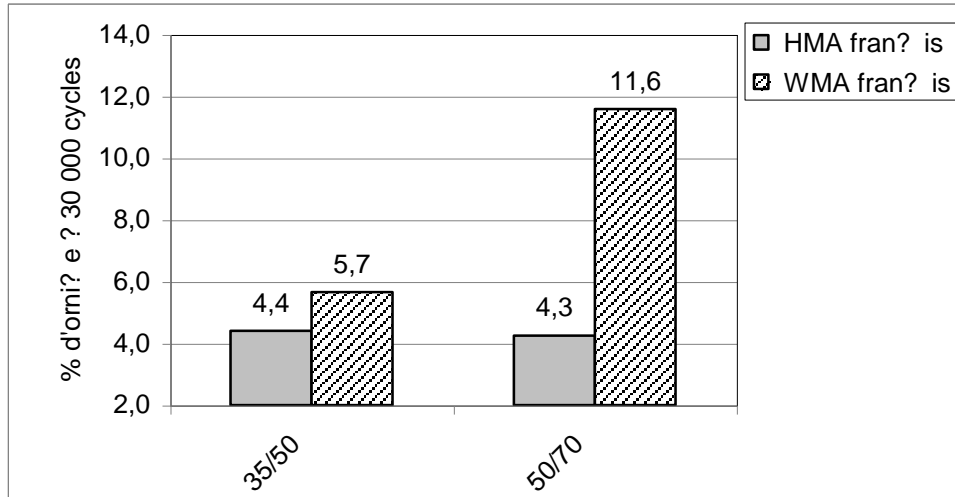


Figure 10 - Influence du grade de bitume sur la tenue à l'orniérage des enrobés sur des formulations françaises

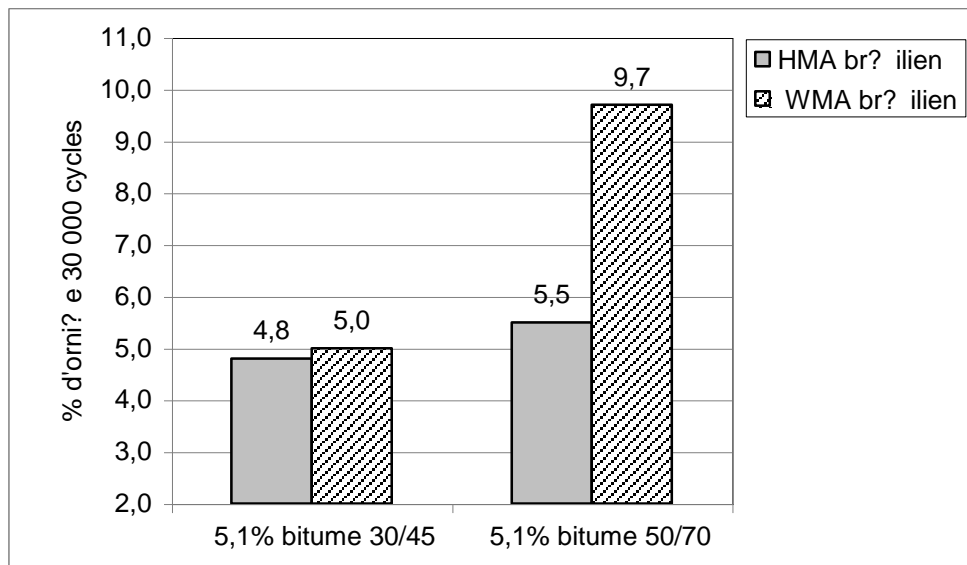


Figure 11- Influence du grade de bitume sur la tenue à l'orniérage des enrobés sur des formulations brésiliennes

Les résultats obtenus sur deux formulations différentes, avec des granulats différents et des liants bitumineux différents sont concordants: les enrobés tièdes au 35/50 testés à 60°C ont un comportement identique ou légèrement plus orniérant ( $\Delta$  max de 0.7%) que les enrobés à chaud au 35/50 alors que les enrobés tièdes au 50/70 présentent un orniérage significativement plus important que les enrobés à chaud au 50/70 ( $\Delta$  de 4,9 à 5,9%).

Les analyses effectuées sur les liants récupérés et extraits des enrobés après orniéage permettent d'expliquer ces comportements; leurs résultats sont présentés dans le tableau 4. On constate tout d'abord des durcissements moindres des liants extraits d'enrobés tièdes comparativement aux liants extraits d'enrobés à chaud.

Le bitume 50/70 étant initialement le grade le plus élevé ; extrait de l'enrobé tiède, il reste beaucoup plus mou que les autres liants (pénétrabilité > 35 1/10 mm) et présente surtout un point de ramollissement bille et anneau plus faible et largement plus bas que la température d'essai d'orniéage (60°C comparé à une TBA de 54,9°C), expliquant le comportement à l'orniéage, par un ramollissement plus important du liant.

Tableau 6 - Caractéristiques des liants extraits des plaques d'orniéage

	BBSG 0/10 au 35/50		BBSG 0/10 au 50/70	
	HMA	WMA	HMA	WMA
Pénétration (1/10 mm)	22,5	30	32	38,1
$\Delta$ Pénétration (1/10 mm)	6,5		6,1	
TBA (°C)	61,6	56,4	58,2	54,9
$\Delta$ TBA (°C)	5,2		3,3	

De nombreux auteurs, tels que Vanelstraete [16] ont déjà étudié, depuis longtemps, l'influence du grade du bitume sur le comportement à l'orniéage, montrant ainsi l'intérêt d'un liant plus rigide ou modifié pour certains enrobés à chaud pour garantir la tenue à l'orniéage.

Il convient donc d'optimiser le choix du liant dans les enrobés tièdes pour tenir compte de son moindre vieillissement lors de l'enrobage. Celui-ci peut avoir des effets positifs sur la durabilité et également présenter des avantages en fatigue, à condition que cela n'interfère pas sur sa résistance à l'orniéage.

#### 4 CONCLUSION

Cette étude avait pour objectif d'évaluer la pertinence des essais de formulations en laboratoire des enrobés à chaud pour les procédés tièdes. Elle a été menée sur une technique d'additivation de tensio-actif dans le bitume, donc un procédé simple ne nécessitant pas d'aménagement mécanique spécifique.

Elle conduit à des conclusions intéressantes sur la détermination de la maniabilité et compacité par l'essai PCG, montrant que ce test permet de valider une formulation dans le choix des répartitions granulaires et de la teneur en liant mais ne s'avère pas discriminant pour évaluer l'effet de l'abaissement de la température sur les compacités mesurées. Les résultats de l'Université de Sao Paulo semblent montrer par ailleurs que l'essai Marshall conduit, lui, à des différences minimes (augmentation de 1% de la teneur en vide) entre enrobés tièdes et à chaud. Ces conclusions déjà publiées par d'autres chercheurs [18] peuvent s'expliquer par la différence des deux essais, notamment l'application de la charge entre l'essai PCG (compactage par pétrissage) et l'essai Marshall (compactage par impact). Il est cependant important de rappeler que l'essai Marshall présente des limites pour la formulation des enrobés à chaud notamment sa pertinence par rapport au chantier. Une réflexion doit donc être menée pour évaluer l'effet « abaissement de la température »

vis-à-vis de la maniabilité de l'enrobé tout en conservant l'essai PCG pour la validation des formulations. L'étude d'orniérage n'avait pas pour objectif de remettre en cause cet essai bien connu et jugé, comme pertinent et sévère, par rapport aux comportements sur chaussées des enrobés. Elle nous a cependant permis de mettre en évidence les différences de comportements des enrobés à chaud et tièdes aux températures élevées de service en jouant sur les températures d'essais et le grade du bitume, validant le moindre durcissement du liant dans un enrobé tiède, point déjà souvent mis en avant par de nombreux auteurs. Le choix du bitume dans certains de ces procédés doit donc être fait judicieusement pour éviter d'éventuelles déformations permanentes de l'enrobé au jeune âge, sur chaussées fortement sollicitées. Des essais rhéologiques complémentaires sur les liants récupérés de réalisations industrielles permettraient par ailleurs de compléter cette étude. Le vieillissement d'un liant dans un enrobé tiède, lors de l'enrobage, est certainement différent de celui du même liant dans un enrobé à chaud et des recherches dans ce domaine semblent désormais indispensables pour appréhender le comportement des liants dans ces nouveaux enrobés car il conditionne les performances à long terme du matériau.

## REFERENCES

1. Bosseaud.Y, St Jacques.M, (2008), Les enrobés de demain se feront-ils autrement : état du développement des enrobés tièdes en France, AIPCR.
2. Groupe de travail RST (2007), Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés, LCPC.
3. NF EN 12697-31(août 2007) , Mélanges bitumineux- Méthode d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud-Partie 31 : confection d'éprouvettes à la presse à cisaillement giratoire.
4. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM.DNER ME043/95: Misturas betuminosas a quente: Ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995.
5. ABNT NBR 12891:1993
6. NF EN 12697-22 (septembre 2007), Mélanges bitumineux- Méthode d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud- Partie 22 : essai d'orniérage.
7. Uzarowski.L, Paradis.M, Lum.P, (2004), Accelerated performance testing of canadian asphalt mixes using three different wheel rut testers, Annual Conference of the Transportation Association of Canada.
8. Perraton.D, Di Benedetto.H,Sauzeat.C, De La Roche.C,Bankowski.W, Partl.M, Grenfell.J (2010), Rutting of bituminous mixtures: wheel tracking tests campaign analysis, Rilem, Materials and Structure.
9. NF EN 12697-1(Avril 2006), Mélanges bitumineux- Méthode d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud- Partie 1 : teneur en liant soluble.
10. NF EN 12697-3 Mélanges bitumineux- Méthode d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie 3 : récupération des bitumes : évaporateur rotatif.
11. NF EN 1426 (Juin 2007), Bitumes et liants bitumineux- Détermination de la pénétrabilité à l'aiguille.
12. NF EN 1427 (Juin 2007), Bitumes et liants bitumineux- Détermination du point de ramollissement – Méthode bille et anneau.
13. Dony, A; Maillard-Nunes, P; Klinevicius, M; Motta; R; Bernucci,L;Del Priore, C; Brosseaud; Y; Gaudefroy. V ( 2010) LABORATORY ASSESSMENT OF WARM MIXES ASPHALT BY MEANS OF TWO MIX DESIGN METHODS. 16th World Meeting IRF.
14. Bennert.T, Reinke.G, Mogawer.W, Mooney.K,(2010),Washington, D.C.,Assessment of Workability/Compactability of Warm Mix Asphalt, 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board.
15. Button.J, Estakhri.C, Wimsatt.A, (2007), A SYNTHESIS OF WARM-MIX ASPHALT, Report 0-5597-1, 94 pages.
16. NGUYEN.D, (2006) , Prédiction des déformations permanentes des couches de surface des chaussées bitumineuses, Thèse de doctorat ENPC
17. Vanelstraete A. et Francken L., (1994), Orniérage : Synthèse des principaux constats et résultats, Bulletin CRR. Numéro 25, pp. 9–16.
18. Huner, L. M. H.; Brown, E. R. (2001). Effects of re-heating and compaction temperature on hot mix asphalt volumetrics. NCAT – Auburn University.