



**GIE**

**“ SITE D’EXPERIMENTATION DU  
TRANS-VAL-DE-MARNE ”**

**Expertise des revêtements de chaussées  
(Site FABAC)**



**RAPPORT DE RECHERCHE**



## **SOMMAIRE**

### **3 Préambule**

### **4 Objectif de la recherche avec la machine FABAC**

### **5 Rappel des essais d'orniérage effectués sur le manège du LCPC de Nantes**

### **6 Programme de l'expérimentation avec la machine FABAC**

### **7 Réalisation des essais**

#### 5.1 Dispositions générales

#### 5.2 Reproductibilité des essais d'orniérage

##### 5.2.1 Réalisation de la structure de référence

##### 5.2.2 Mise au point des essais

##### 5.2.3 Description du processus des essais

##### 5.2.4 Relevé de l'état de déformation

##### 5.2.5 Synthèse des essais de reproductibilité

##### 5.2.6 Conclusion

#### 5.3 Essais de fatigue de surface des revêtements de chaussées

##### 5.3.1 Réalisation des planches d'essais

##### 5.3.2 Déroulement des essais

##### 5.3.3 Essai complémentaire

##### 5.3.4 Synthèse des essais de fatigue et de hauteur au sable

#### 7.1.1 Conclusion

### **8 Conclusion générale**

### **- Annexes**



## **1. Préambule**

L'expérimentation des systèmes de transport intermédiaires guidés sur le site du Trans-Val-de-Marne (TVM), commencée fin 1997, devait permettre d'analyser, à partir d'un cahier des charges validé par l'ensemble des partenaires, un certain nombre d'essais techniques. Parmi ceux-ci figurait la tenue de l'infrastructure et en particulier celle du revêtement de chaussée.

Très vite il a été constaté que la circulation d'un seul véhicule guidé, intégré à la flotte des bus articulés, ne permettrait pas de recueillir des données pertinentes concernant l'orniérage et la fatigue de surface.

Il a alors été décidé de réaliser les essais d'orniérage à Nantes sur le manège circulaire à 4 bras du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (phase 1) et les essais de fatigue de surface sur le manège de fatigue linéaire du béton armé continu (projet FABAC) situé au point d'appui de Gevrey-Chambertin de l'autoroute A31 (phase 2). Ce sont ces derniers essais qui font l'objet du rapport de recherche.

## **2. Objectif de la recherche avec la machine FABAC**

Cette recherche devait permettre de déterminer si les revêtements de chaussées, proposés par les industriels, étaient aptes à supporter les contraintes d'un véhicule routier guidé.

Avec les résultats obtenus il serait alors possible de déterminer, en fonction du trafic prévu, l'échéancier des travaux de maintenance à réaliser sur les revêtements de chaussées.

## **3. Rappel des essais d'orniérage effectués sur le manège du LCPC de Nantes**

Les essais d'orniérage ont été réalisés sur la structure de référence du LCPC et sur 6 structures proposées par les entreprises GERLAND, Jean LEVEBVRE (EJL) et SCREG (2 structures par entreprise).

Sur les bras du manège avaient été montées, la roue simple de référence chargée à 4,25 t, la roue CIVIS chargée à 5,025 t, la roue TVR chargée à 4,05 t et la roue TRANSLOHR chargée à 3,5 t.

Les essais ont été réalisés durant l'été 1999 lorsque la température des revêtements, à 1cm de profondeur, était supérieure à 30°C.

Le nombre de chargements avait été arrêté à 100 000 à raison de 6 par minute.



## **4. Programme de l'expérimentation avec la machine FABAC**

Le programme s'est déroulé en 2 parties :

- vérification de la reproductibilité des essais d'orniérage (100 000 cycles), en assurant par un chauffage de surface une température de matériau de revêtement  $>$  à  $30^{\circ}\text{C}$  et en se rapprochant des conditions des essais réalisés sur le manège du LCPC de Nantes.
- si les résultats de l'essai précédent étaient concluants, réalisation d'essais de fatigue (1 500 000 cycles à température de surface  $<$   $30^{\circ}$ ), sur les revêtements proposés par les entreprises.

La mise au point, le suivi et l'évaluation des essais ont été confiés au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Autun.

## **5. Réalisation des essais**

### **5.1 Dispositions générales**

Pour chaque partie des essais de la phase 2, les principes retenus ont été les suivants :

- montage sur la machine FABAC de la roue TVR représentant la roue dont la pression de contact est la plus élevée des trois véhicules à expérimenter sur le site TVM (TVR - TRANSLOHR – CIVIS).

La charge de 4,05 t correspond à un véhicule guidé transportant 4 passagers par  $\text{m}^2$ , avec toutes les places assises occupées. La roue TVR est équipée d'un pneu de dimensions 365/80 R 20 gonflé à la pression de 9,5 bars.

- essais réalisés sans balayage.
- essais sur une structure identique à la référence du manège du LCPC pour les 2 couches supérieures constituées par 10 cm de BB 0/14 et 10 cm de GB 0/14 de classe 3.

La structure support FABAC est constituée par 12 cm de BAC sur 12 cm de béton maigre, plate-forme PF2/PF3 (au lieu de 30 cm de GB sur 40cm de GRH et 20 cm 80/100 pour le manège du LCPC).

Les essais ont été réalisés entre octobre 1999 et janvier 2001.

### **5.2 Reproductibilité des essais d'orniérage**

#### **5.2.1 Réalisation de la structure de référence**

Les épaisseurs mises en œuvre sur la structure support FABAC étaient les suivantes :

- 8 cm de BBSG 0/14
- 10 cm de GB classe 3.



## 5.2.2 Mise au point des essais

Compte tenu de la difficulté à reproduire des cycles de températures identiques à ceux ayant été relevés pendant les essais sur le manège du LCPC, l'expérimentation FABAC s'est déroulée, avec chauffage, à différentes températures constantes dans les matériaux. (37°- 40°- 46°- 59°C). La machine FABAC était déplacée à chaque température.

Le suivi en continu des températures dans le revêtement a été réalisé au moyen de sondes de températures implantées en bordure de la bande roulement (3 à 4 cm) à des profondeurs de 0,5 et 1,5 cm dans une saignée, de 5 et 10 cm dans des trous verticaux.

Le chauffage du revêtement était assuré par un dispositif comportant 2 panneaux radiants de 3,6 KW de puissance unitaire assurant un chauffage sur une longueur de 2 m et une largeur de 0,58 m centrée sur la bande de roulement de la roue TVR.

Le pilotage du chauffage était assuré par un thermocouple placé dans une saignée, en bordure de la bande de roulement et accolé à la sonde située à 1,5 cm de profondeur.

## 5.2.3 Description du processus des essais

Après préparation de l'emplacement des sondes et relevé de l'état initial du revêtement, la machine est mise en place sur cales, afin que les roues ne touchent pas le revêtement. La zone à tester est préchauffée en réglant le dispositif de régulation à la température d'essai (durée minimum de 2,3 jours pour 40°C et 3,3 jours pour 59°C, afin d'obtenir une stabilisation de la température à une profondeur de 10 cm).

Pour lancer la phase d'essai de 0 à 45 000 cycles, le chauffage est arrêté, les cales sont enlevées afin de pouvoir appliquer la charge de 4,05 t.

Lorsque le chauffage régulé à la température d'essai et la machine sont mis en marche, la température est descendue de 5 à 10°C suivant la température ambiante. Elle remonte rapidement de quelques degrés, au-dessus de la température d'essai, puis redescend pour se stabiliser autour de cette température après quelques dizaines de minutes.

Les essais ont été réalisés avec une température ambiante variant de -10 à +13°C.

Le nombre moyen de cycles d'application de la charge pendant l'essai a été de 1615/heure avec un écart type de 60, soit une vitesse moyenne de circulation de la roue TVR de l'ordre de 3,2 km/h.

## 5.2.4 Relevé de l'état de déformation

Avant chaque essai, un relevé de l'état initial du revêtement a été fait, avec une règle de 0,90 m et une cale d'épaisseur biseautée, sur 5 profils (précision de 0,5 mm par défaut). Il a été complété, pour un des profils, par un relevé au transversoprofilographe statique.



Le suivi de l'évolution de l'orniérage, avec la règle, a été fait à 45 000 et 100 000 cycles, le fonctionnement de la machine et du chauffage ayant été programmé pour s'arrêter automatiquement à chacune des valeurs.

### **5.2.5 Synthèse des essais de reproductibilité**

- Les contrôles de température de la surface du revêtement ont montré une répartition satisfaisante dans la zone d'application de l'essai d'orniérage.
- Pendant la durée de l'essai, la répétabilité des conditions de température dans le matériau testé peut être considérée comme bonne.
- Il est possible de chauffer la couche de roulement jusqu'à une température régulée de 60°C. Le gradient des températures dans l'épaisseur du matériau dépend de la température de régulation fixée à 1,5 cm de profondeur, en bordure de la bande de roulement.
- Les essais réalisés sont en nombre insuffisant pour parler de répétabilité au sens métrologique du terme. Ils ne donnent qu'une tendance sur la reproductibilité de l'essai. Lors de chaque essai, l'ornière est mesurée sur 5 profils de la trace de la roue et la moyenne des 5 ornières mesurées est retenue comme valeur significative. Il a été constaté sur les 5 mesures un écart entre le mini et le maxi de 1 à 3 mm à 45 000 cycles et de 1 à 5,5 mm à 100 000 cycles.
- Des différentes observations faites, on peut conclure que la répétabilité de l'essai est suffisante pour la comparaison en performance de tenue à l'orniérage des matériaux bitumineux, sous réserve de la qualité d'homogénéité de mise en œuvre des planches d'essais. Au vu du nombre limité d'essais, cette répétabilité peut-être estimée de l'ordre de 5% de l'épaisseur de la couche testée.
- Il a été constaté, comme sur le manège du LCPC que l'orniérage a atteint pratiquement sa valeur maximum à 45 000 cycles. L'évolution sur les 55 000 cycles suivants reste très faible. Dans le cadre de comparaison de différentes formules, la durée de l'essai pourrait être limitée à 45 000 cycles sans perdre en pouvoir de discrimination.
- Il est connu que la résistance à l'orniérage d'une formule baisse au-delà d'un seuil de température, ce seuil étant d'autant plus élevé que la formule est performante vis à vis de ce critère. Les essais réalisés à différentes températures mettent bien en évidence ce comportement,  $Orn = F(\text{Température du matériau})$ .

### **5.2.6 Conclusion**

Un essai comparatif de formules de matériaux anti-orniérants pourrait être réalisé dans les conditions suivantes :

- soit un seul essai à 60°C, soit 3 essais aux températures de chauffage de 40, 50 et 60°C pour avoir la sensibilité de la formule à la température.



- durée de chaque essai : 45 000 cycles
- évaluation de la relation exponentielle,  $Orn = F$  (Température du matériau à 1,5 cm)

### **5.3 Essais de fatigue de surface des revêtements de chaussées**

Ces essais ont été entrepris à la suite des essais de reproductibilité considérés comme concluants.

Lorsque le cahier des charges a été établi, seules 3 entreprises routières (GERLAND, EJL, SCREG) faisaient partie du comité de suivi du GIE “ Site d’expérimentation du Trans-Val-de-Marne ”. Par la suite l’entreprise COLAS a rejoint le comité.

Ces essais avaient comme objectif de vérifier le comportement des formules des entreprises à la fatigue (1 500 000 cycles) à une température du revêtement  $< 30^{\circ}\text{C}$  et sans chauffage. Le support des revêtements étant la structure FABAC, aucune fatigue par flexion du revêtement n’était attendue lors des essais. Les seules dégradations pouvant survenir étaient des départs de granulats ou matériaux (arrachement), des fissures de surface de cisaillement (circulation canalisée), le développement d’un léger orniérage (post-compaction ou fluage) créé par la circulation canalisée de la roue TVR.

Les températures dans les revêtements ont été suivies en continu avec des sondes implantées dans les matériaux, aux mêmes endroits que ceux mentionnés pour les essais de reproductibilité.

Les cycles ont été appliqués par séquence de 250 000 (1 semaine) et la machine était déplacée à chaque fin de séquence sur la planche suivante afin d’avoir des conditions de températures des revêtements les plus comparables possible tout au long de la durée des essais.

#### **5.3.1 Réalisation des planches d’essais**

La structure du support des planches des entreprises a été réalisée par l’entreprise GERLAND. Ce support en GB3 était identique à celui situé sous la couche de BBSG 0/14 (formule sensible à l’orniérage) testée dans le cadre de l’essai de reproductibilité d’orniérage. Il a été mis en place sur une longueur de 100 m environ.

Chaque entreprise a mis en œuvre son matériau sur une longueur de 20 m. Les caractéristiques techniques (formules et épaisseurs) pour les entreprises GERLAND, EJL et SCREG étaient normalement identiques à l’une de celles mises en œuvre sur le manège du LCPC pour les essais de la phase 1.

#### **5.3.2 Déroulement des essais**

Le nombre moyen de cycles d’application de la charge pendant la durée des essais a été réglé à 1800/heure avec un écart type de 60, soit une vitesse moyenne de circulation de la roue de l’ordre de 3,6 km/heure.



Un relevé de l'état initial et de l'état après chaque séquence de 250 000 cycles a été effectué:

- aspect de surface avec photos
- état de déformation transversale (sur 3 profils) de la surface des revêtements avec une règle de 0,90 m et une cale biseautée. Chaque profil comprenait 11 points de mesure répartis sur 0,50 m. ( $\pm 0,25$  m par rapport à l'axe de la trace de la roue).

La valeur de la profondeur des déformations prises en compte pour caractériser l'ornièrisme sur un profil est la valeur maximum sur les 11 points de mesure du profil.

Pour un point d'essai, les valeurs mini et maxi des profondeurs de déformation sur 3 profils sont relevées.

“ L'ornièrisme caractéristique ” retenue est la valeur maximum de profondeur d'ornièrisme sur les 3 profils.

### **5.3.3 Essai complémentaire**

Après 1 500 000 cycles l'examen visuel de la surface du revêtement, au droit de la bande de roulement, a montré qu'il y avait une réduction de la macrorugosité (jugement qualitatif). Il a alors été décidé, pour quantifier l'évolution, d'entreprendre 3 essais de hauteur au sable :

- sur la bande de roulement
- sur la zone non circulée représentant l'état initial du revêtement.

### **5.3.4 Synthèse des essais de fatigue et de hauteur au sable**

#### *Evolution de la surface des revêtements*

- On n'observe pas de fissurations ni de départs de granulats.
- La perte de rugosité varie de 10 à 25% suivant les formules et le classement des formules après 1 500 000 cycles est le même qu'au départ.
- Les niveaux de hauteurs au sable mesurés après 1 500 000 cycles sont tous acceptables ; une formule (SCREG) se distingue nettement par sa rugosité élevée (elle l'était déjà au départ).

#### *Evolution de la déformation transversale*

- On constate une évolution de l'ornièrisme jusqu'à 750 000 cycles correspondant à une période où les températures dans les revêtements étaient les plus élevées.
- On constate une stabilisation de l'évolution de l'ornièrisme après 750 000 cycles correspondant à une période où il y a eu une diminution progressive des températures dans les revêtements.



- L'orniérage reste faible ( $< 4,5$  mm) pour 3 formules (COLAS, GERLAND, SCREG), la quatrième formule (EJL) se distinguant par une évolution plus importante sur les premiers 250 000 cycles et une valeur finale de 7,5mm qui n'a pas pu être expliquée sans investigations complémentaires. (1)

### 5.3.5 Conclusion

Après l'application de 1 500 000 chargements, sans balayage, de la roue TVR, roue la plus chargée des véhicules à expérimenter, les formules retenues par les entreprises routières ont montré leur aptitude à résister à la fatigue de surface.

## 6. Conclusion générale

Les essais sur le site FABAC ont été menés dans des conditions assez sévères – roue la plus agressive, fréquence de chargement de 2 Hz – représentant une durée d'exploitation d'environ 8 années d'une ligne exploitée avec des véhicules équipés de 4 essieux, circulant à la fréquence actuelle (4 mn aux heures de pointe) de la ligne du Trans-Val-de-Marne (TVM).

Ils ont montré :

- que la machine FABAC et son système de chauffage peuvent être utilisés pour faire des essais comparatifs d'orniérage, sous réserve de la qualité d'homogénéité de mise en œuvre des planches d'essais.
- que les modalités d'essais ont permis de retrouver l'ordre de grandeur des profondeurs d'orniérage obtenues sur le manège du LCPC.
- que la durée des essais d'orniérage à une température donnée pouvait être limitée à 45 000 cycles (28 heures) sans perdre en pouvoir de discrimination.
- qu'après les essais de fatigue à 1 500 000 cycles (6 semaines), la qualité des revêtements des entreprises a été mise en évidence puisqu'aucune anomalie n'a été constatée.

Ce n'est donc pas la fatigue qui sera prépondérante pour la remise en état des revêtements de chaussées du site propre, mais la tenue à l'orniérage (essais réalisés sur le manège circulaire du LCPC de Nantes). Cette dernière sera fonction des conditions climatiques (nombre de jours par an où la température du revêtement de chaussée sera supérieure à 30°C) de la région dans laquelle circuleront les véhicules guidés et du type de véhicule retenu. Toutefois avec les différents revêtements proposés à l'heure actuelle par les entreprises routières, on peut estimer que la couche de roulement ne devra pas être renouvelée avant 6-8 années, sous réserve que le support de cette couche soit aussi résistant à l'orniérage.

(1) NOTA : un complément d'étude menée par l'entreprise EJL après la fin des essais a montré que la moitié de l'orniérage constaté est imputable au support en grave bitume qui présente une teneur en bitume anormalement forte.



## **ANNEXES**

### **1. Phase 2.a : Essai d'orniérage TVM sous la machine FABAC**

- Mise au point de l'essai
- Essais de reproductibilité

### **2. Phase 2.b : Essai de fatigue TVM sous machine FABAC**

- Rapport de mars 2001
- Evolution de la rugosité du revêtement après 1 500 000 chargements de la roue TVR



**GIE**

**“ SITE D’EXPERIMENTATION DU  
TRANS-VAL-DE-MARNE ”**

**Expertise des revêtements de chaussées  
(Site FABAC)**



**RESULTATS DE LA RECHERCHE**



# SOMMAIRE

## **3 Introduction**

## **4 Essais d'orniérage**

2.1 Charge roulante retenue

2.2 Réalisation de la structure de référence du LCPC

2.3 Chauffage de la structure LCPC

2.4 Relevé de l'état de déformation de la structure LCPC

2.5 Résultats des essais

2.5.1 Répartition des points d'essais

2.5.2 Essais à 37°

2.5.3 Essais à 40°

2.5.4 Essais à 46°

2.5.5 Essai à 59°

2.5.6 Incidence de la température d'essai sur la profondeur d'ornière

2.6 Conclusions des essais d'orniérage

## **3. Essais de fatigue de surface**

3.1 Réalisation de la structure du support

3.2 Réalisation des planches des entreprises

3.3 Application de la charge roulante

3.4 Relevé de l'état de surface et de l'état de déformation

3.5 Résultats des essais

3.5.1 Evolution de la surface du revêtement

3.5.2 Evolution de la déformation transversale

3.6 Conclusion des essais de fatigue

## **4. Conclusion générale**



## 1. Introduction

Parallèlement à l'expérimentation, sous conditions réelles d'exploitation, des systèmes de transport intermédiaires TVR (Bombardier, ANF Industrie, SPIE Enertrans), TRANSLOHR (LOHR Industrie) et CIVIS (Siemens Transportation Systems, Irisbus) sur le site expérimental de la ligne du Trans-Val-de-Marne (TVM) exploitée par la RATP, le GIE "Site d'expérimentation du Trans-Val-de-Marne", regroupant des exploitants, des industriels, des collectivités locales, des autorités organisatrices et les pouvoirs publics, a décidé d'étudier sur d'autres sites le comportement mécanique sous trafic des revêtements de chaussées susceptibles d'être utilisés pour les voies de circulation de ces nouveaux systèmes.

A cet effet, le GIE a finalisé en mai 1999 un cahier des charges des essais à entreprendre. C'est ainsi qu'ont été réalisés depuis :

- des essais d'orniérage sur le manège circulaire à 4 bras du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Nantes (juillet à septembre 1999). Ils portaient sur des revêtements proposés par trois entreprises routières.
- des essais de fatigue de surface sur le manège linéaire du béton armé continu (projet FABAC) implanté au point d'appui de Gevrey-Chambertin de l'autoroute A31 (octobre 1999 à janvier 2001). Ils portaient sur des revêtements proposés par quatre entreprises routières.

Les résultats qui sont donnés ci-après sont relatifs aux essais effectués avec la machine FABAC. Ils ont été menés par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Autun.

## 2. Essais d'orniérage

Le cahier des charges des essais prévoyait qu'avant d'entreprendre les essais de fatigue de surface, il fallait réaliser des essais d'orniérage avec chauffage sur la structure de référence du LCPC, afin de vérifier leur bonne reproductibilité.

### 2.1 Charge roulante retenue

La roue TVR a été choisie car elle représente celle dont la pression de contact est la plus élevée des trois véhicules à expérimenter.

La charge de cette roue est de 4,05t correspondant à un véhicule guidé transportant 4 personnes par m<sup>2</sup>, avec toutes les places assises occupées. Elle est équipée d'un pneu de dimensions 365/80 R20 gonflé à la pression de 9,5 bars.

Sur la machine FABAC, 4 roues TVR ont été montées et la charge a été appliquée 100 000 fois. Le nombre moyen de cycles d'application, pendant les essais, a été de 1615/heure avec un écart type de 60, soit une vitesse moyenne de circulation de la roue de l'ordre de 3,2 km/heure.

## 2.2 Réalisation de la structure de référence du LCPC

La structure de référence dont les épaisseurs sont mentionnées dans le tableau ci-dessous, a été mise en œuvre sur la structure FABAC constituée par 12cm de béton armé continu sur 12cm de béton maigre, plate-forme PF2/PF3 (voir photo ci-dessous).

Couche	Epaisseurs	
	Théorique	Sur 5 carottes
BBSG 0/14	8cm	9cm (8 à 10 cm)
GB classe 3	10cm	9cm



## 2.2 Chauffage de la structure LCPC.



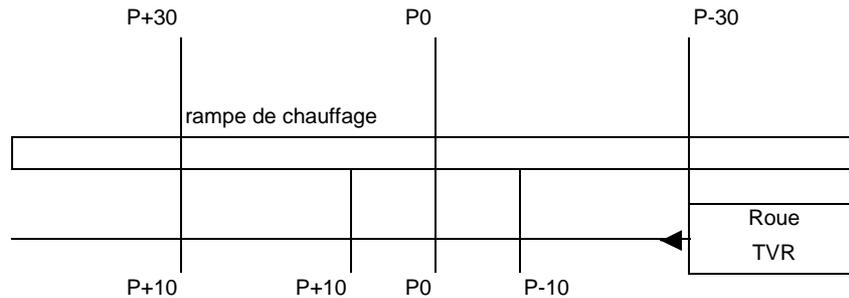
Rampes de chauffage

La machine FABAC a été équipée d'un chauffage de surface piloté permettant d'obtenir une température du matériau de revêtement  $> 30^{\circ}$ . Les conditions des essais devaient se rapprocher de celles obtenues sur le manège de Nantes. Compte tenu de la difficulté à reproduire des cycles de températures identiques à ceux obtenus pendant l'essai sur le manège, l'expérimentation a été réalisée avec un chauffage à température constante dans les matériaux ( $37^{\circ}$ -  $40^{\circ}$ -  $46^{\circ}$ -  $59^{\circ}\text{C}$ ).

Pour pouvoir contrôler et suivre en continu la température, des sondes ont été implantées en bordure de la bande de roulement à 0,5 - 1,5 - 5 et 10 cm de profondeur.

## 2.4 Relevé de l'état de déformation de la structure LCPC.

Le relevé initial de la surface du revêtement et le suivi de l'évolution de l'orniérage ont été réalisés avec une règle de 0,90 m et une cale d'épaisseur sur 5 profils suivant l'implantation ci-dessous (PO  $\pm$  30 cm). Il a été complété par un relevé au transversoprofilographe statique sur le profil « PO ».



La mesure de la déformation sous la règle est effectuée avec une précision de 0,5 mm par défaut.

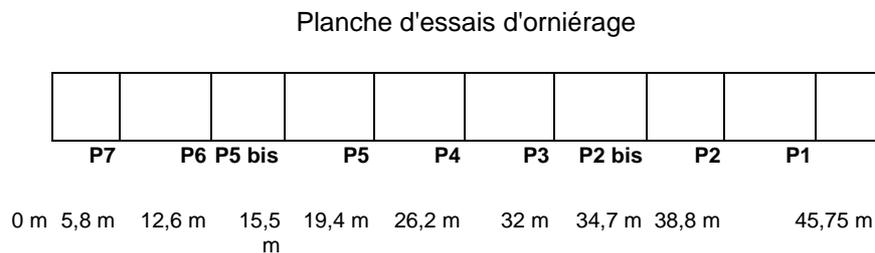
La profondeur d'ornière prise en compte est la moyenne des valeurs maximum sous la règle de 0,90 m relevées sur les 5 profils.

Le suivi de l'évolution de l'orniérage a été fait à 45 000 et 100 000 cycles.

## 2.5 Résultats des essais

### 2.5.1 Répartition des points d'essais

La répartition des points d'essais et de mise au point est représentée ci-dessous.



Point 7 : mise au point du chauffage



## 2.5.2 Essais à 37° (point 6)

- *Conditions de températures ambiantes.*

Phase 0 à 45 000 cycles	Phase 45 000 à 100 000 cycles
-2° à +5°	0° à 6°

- *Conditions de températures dans la couche bitumineuse en bordure de la bande de roulement.*

Localisation sonde température	Phase 0 à 45 000 cycles	Phase 45 000 à 100 000 cycles
T° à 0,5 cm bord bande de roulement	40,2°	41,3°
T° à 1,5 cm bord bande de roulement	<b>37,1°</b>	<b>37,5°</b>
T° à 5 cm bord bande de roulement	33,8°	33,4°
T° à 10 cm à 35 cm axe bande de roulement	26,5°	25,9°

- *Evolution de l'orniérage*

Compte tenu de l'orniérage initial, la valeur prise en compte est la différence (Orn à n cycles – Orn initial.)

	Profondeurs d'ornières en mm sous règle de 0,90 m		
	Etat initial	Etat à 45 000 cycles	Etat à 100 000 cycles
<b>Orn mini-maxi sur 5 profils</b>	4,5 à 7		
<b>Orn moyenne sur 5 profils</b>	6,5	18,3	18,3

	Evolution de l'ornière en mm	
	De 0 à 45 000 cycles	De 0 à 100 000 cycles
<b>Mini-maxi sur 5 profils</b>	11 à 12,5	10 à 12,5
<b>Moyenne sur 5 profils</b>	11,8	11,8

On constate qu'il n'y a pas d'évolution entre 45 000 et 100 000 cycles.

## 2.5.3 Essais à 40° (points 3-4-5 bis)

- *conditions de températures ambiantes*

Essai	Phase 0 à 45 000 cycles	Phase 45 000 à 100 000 cycles
<b>Point 4</b>	- 1° à +5°	- 4° à +2,5°
<b>Point 5bis</b>	3° à 5°	2° à 5°
<b>Point 3</b>	2° à 7°	2° à 7°



- *conditions de températures dans la couche bitumineuse en bordure de la bande de roulement*

Localisation sonde de température	Phase 0 à 45 000 cycles			Phase 45 000 à 100 000 cycles		
	4	5bis	3	4	5bis	3
Points de mesures						
T° à 0,5 cm bord bande de roulement	43,2°	43,6°	45,0°	43,9°	43,3°	45,2
T° à 1,5 cm bord bande de roulement	39,7°	40,1°	39,4°	40,4°	40,3°	39,5°
T° à 5 cm bord bande de roulement	34,0°	34,0°	36,3°	34,5°	34,5°	36,3°
T° à 10 cm à 35cm axe bande de roulement	28,4°	29,3°	30,2°	28,9°	28,7°	29,8°

- *Evolution de l'orniérage*

Points de mesures	Evolution de l'ornière en mm					
	De 0 à 45 000 cycles			De 0 à 100 000 cycles		
	4	5bis	3	4	5bis	3
Mini-maxi sur 5 profils	6,5 à 9,5	11,5 à 14	13,5 à 14,5	7,5 à 10,5	12,5 à 14	14,5 à 15,5
Moyenne sur 5 profils	8,3	12,7	14	9,1	13,3	15,2

L'évolution entre 45 000 et 100 000 cycles est en moyenne de 0,6 à 1,2 mm suivant les points.

## 2.5.4 Essais à 46° (points 2 et 2bis)

- *Conditions de températures ambiantes*

Essai	Phase 0 à 45 000 cycles	Phase 45 000 à 100 000 cycles
Point 2 bis	9° à 12°	- 4° à + 2,5°
Point 2	- 10° à + 1°	1° à 10°

- *Conditions de températures dans la couche bitumineuse en bordure de la bande de roulement.*

Localisation sonde de température	Phase 0 à 45 000 cycles		Phase 45 000 à 100 000 cycles	
	2bis	2	2bis	2
Points de mesures				
T° à 0,5cm bord bande de roulement	49,5°	50,1°	48,2°	50,2°
T° à 1,5cm bord bande de roulement	45,7°	47,0°	45,8°	46,9°
T° à 5cm bord bande de roulement	38,6°	40,4°	37,8°	40,3°
T° à 10cm bord bande de roulement	32,3°	34,3°	31,1°	34,1°



- *Evolution de l'orniérage*

Points de mesures	Evolution de l'ornière en mm			
	De 0 à 45 000 cycles		De 0 à 100 000 cycles	
	2bis	2	2bis	2
Mini-maxi sur 5 profils	13,5 à 16	13 à 16	13,5 à 16	13 à 17,5
Moyenne sur 5 profils	14,9	15	14,9	14,8

Il n'y a pas d'évolution entre 45 000 et 100 000 cycles.

### 2.5.5 Essai à 59° (point 1)

- *Conditions de températures ambiantes*

Phase 0 à 45 000 cycles	Phase 45 000 à 100 000 cycles
4° à 13°	- 3° à 13°

- *Conditions de températures dans la couche bitumineuse en bordure de la bande de roulement*

Localisation sonde de température	Phase 0 à 45 000 cycles	Phase 45 000 à 100 000 cycles
T° à 0,5 cm bord bande de roulement	62,3°	63,6°
T° à 1,5 cm bord bande de roulement	58,1°	58,9°
T° à 5 cm bord bande de roulement	49,8°	40,6°
T° à 10 cm bord bande de roulement	41,9°	40,6°

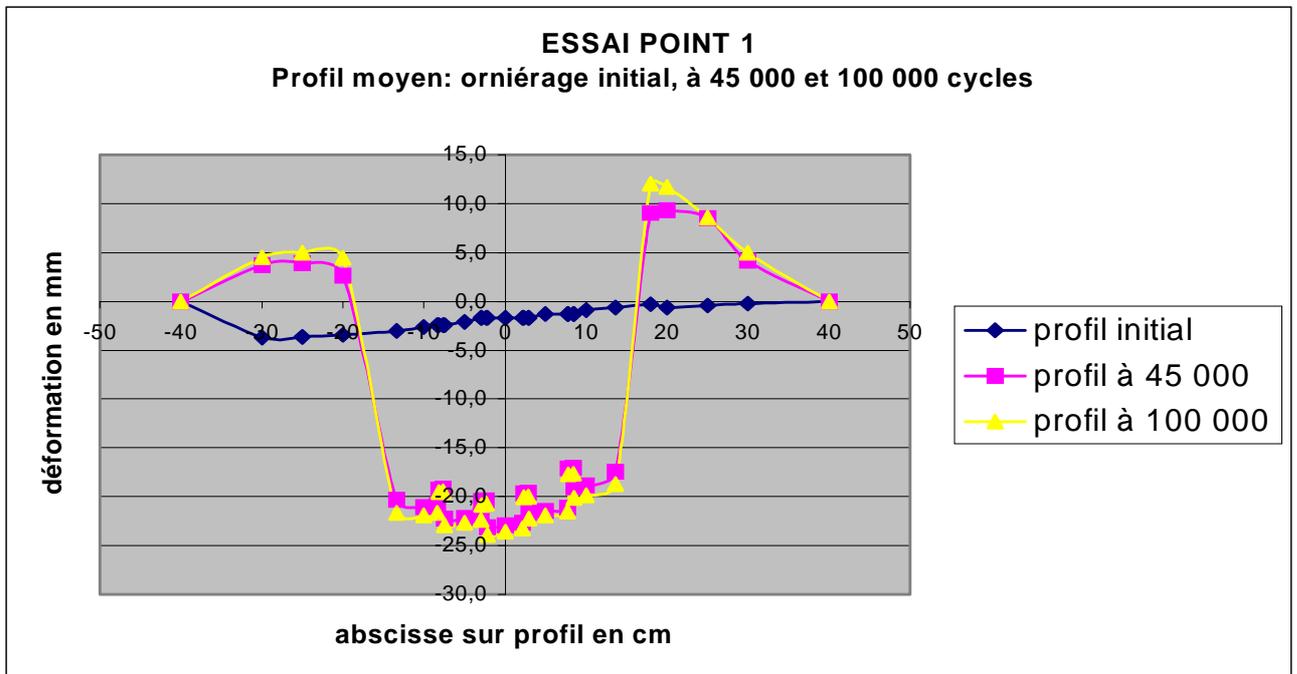
- *Evolution de l'orniérage*

	Evolution de l'ornière en mm	
	De 0 à 45 000 cycles	De 0 à 100 000 cycles
Mini-maxi sur 5 profils	27,5 à 31	30 à 33,5
Moyenne sur 5 profils	29,5	32,2

L'évolution entre 45 000 et 100 000 cycles est relativement faible (2,7mm) compte tenu de la température d'essai.



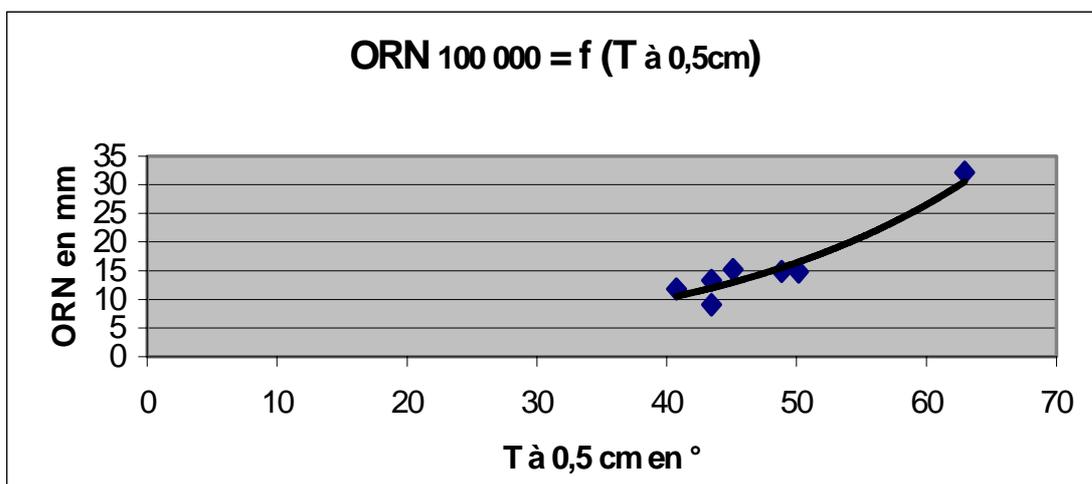
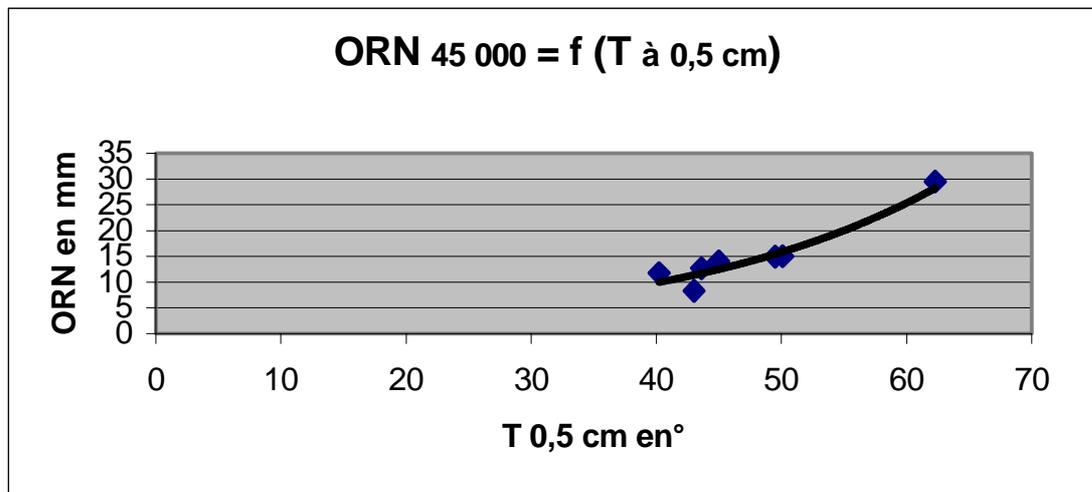
**Point 1**  
**Etat après 100 000 cycles.**



### 2.5.6 Incidence de la température d'essai sur la profondeur d'ornière

Il est connu que la résistance à l'orniérage d'une formule baisse au-delà d'un seuil de température, ce seuil étant d'autant plus élevé que la formule est performante vis à vis de ce critère.

Les essais réalisés à différentes températures mettent bien en évidence ce comportement. Les graphes ci-après illustrent la relation  $Orn = F(T^\circ \text{ du matériau})$  pour 45 000 et 100 000 cycles.



## 2.6 Conclusions des essais d'orniérage (reproductibilité)

Des différents résultats obtenus et des observations faites ont peut conclure :

- que les contrôles de température de la surface du revêtement ont montré une répartition satisfaisante dans la zone d'application de l'essai d'orniérage,
- que la répétabilité des conditions de température dans le matériau testé peut être considérée comme bonne,
- que la répétabilité de l'essai est suffisante pour la comparaison en performance de tenue à l'orniérage des matériaux bitumineux, sous réserve de la qualité d'homogénéité de mise en œuvre des planches d'essais. Au vu du nombre limité d'essais, cette répétabilité peut être estimée de l'ordre de 5% de l'épaisseur de la couche testée,



- qu'il est possible de chauffer la couche de roulement jusqu'à une température régulée de 60°C. Le gradient des températures dans l'épaisseur du matériau dépend de la température de régulation fixée à 1,5 cm de profondeur, en bordure de la bande de roulement.
- que, comme sur le manège du LCPC, l'orniérage a atteint pratiquement sa valeur maximum à 45 000 cycles. De ce fait, pour pouvoir comparer différentes formules, la durée pourrait être limitée à cette valeur sans perdre en pouvoir de discrimination,
- qu'un essai comparatif de formules de matériaux anti-orniérants pourrait être réalisé dans les conditions suivantes :
  - soit un seul essai à 60°C, soit 3 essais à : 40°, 50°, 60°C pour avoir la sensibilité de la formule à la température,
  - évaluation de la relation exponentielle  $Orn = F(T^\circ \text{ à } 1,5 \text{ cm})$

### 3. Essais de fatigue de surface

Ces essais ont été entrepris à la suite des essais de reproductibilité considérés comme concluants.

Quatre entreprises routières ont proposé des revêtements de chaussées. GERLAND, EJL, SCREG, déjà présentes sur le manège du LCPC de Nantes et COLAS.

Ces essais avaient comme objectif de vérifier le comportement des formules des entreprises à la fatigue (1 500 000 cycles) à une température ambiante des revêtements < 30°C. Le support des revêtements étant la structure FABAC, aucune fatigue par flexion des revêtements n'était attendue lors des essais. Les seules dégradations pouvant survenir étaient des départs de granulats ou matériaux (arrachement), des fissures de surface de cisaillement (circulation canalisée), le développement d'un léger orniérage (post-compactage ou fluage) créé par la circulation canalisée de la roue TVR.

Les températures dans les revêtements ont été suivies en continu avec des sondes implantées dans les matériaux, aux mêmes endroits que ceux mentionnés pour les essais de reproductibilité.

Les cycles ont été appliqués par séquences de 250 000 (durée 1 semaine) et la machine était déplacée à chaque fin de séquence sur la planche suivante afin d'avoir des conditions de températures des revêtements les plus comparables possibles tout au long de la durée des essais.



### 3.1 Réalisation de la structure du support

Le support, reposant sur la dalle en béton armé continu, est identique à celui mis en œuvre sous la structure de référence du LCPC retenue pour la reproductibilité des essais d'orniérage.

Les caractéristiques du support sont les suivantes :

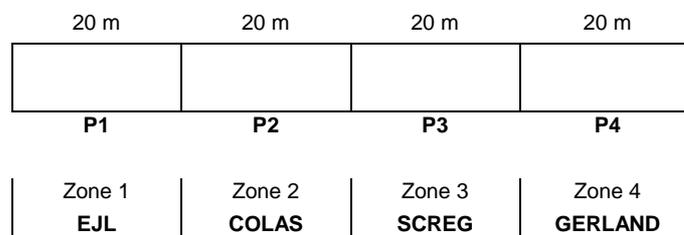
Couche	Epaisseurs	
	Théorique	Sur 5 carottes
GB classe 3	10 cm	9 cm

Il a été mis en œuvre par l'entreprise GERLAND pour l'ensemble des entreprises.

### 3.2 Réalisation des planches des entreprises

Chaque entreprise a réalisé sa planche d'essai sur une longueur de 20 m. Les caractéristiques techniques (formules et épaisseurs) des zones d'essais des entreprises EJM, GERLAND et SCREG étaient normalement identiques à celles mises en œuvre sur le manège du LCPC de Nantes pour les essais d'orniérage :

- EJM :
  - couche de liaison = 7 cm
  - couche de roulement = 7 cm
- GERLAND :
  - couche de liaison = 7 cm
  - couche de roulement = 6 cm
- SCREG :
  - couche de liaison compomodule G = 8 cm
  - couche de roulement en enrobé microlostic dans armature métalflex = 4 cm
- COLAS:
  - couche de liaison colbase S = 7 cm
  - couche de roulement Multicol = 7 cm



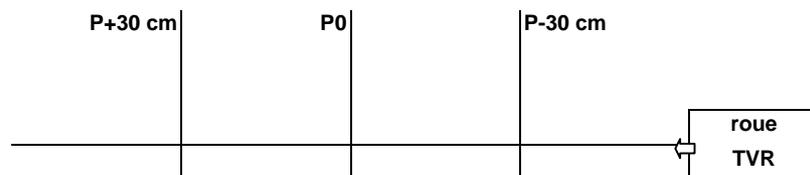
### 3.3 Application de la charge roulante

Le nombre moyen de cycles d'application de la charge pendant la durée des essais a été réglé à 1800/heure avec un écart type de 60, soit une vitesse moyenne de circulation de la roue de l'ordre de 3,6 km/h.

### 3.4 Relevé de l'état de surface et de l'état de déformation

Le relevé initial de la surface du revêtement a été réalisé :

- par photos (vues de détail) pour l'aspect de surface
- avec une règle de 0,90 m et une cale d'épaisseur (précision de 0,5mm par défaut) sur 3 profils pour la déformation transversale (voir schéma ci-après).



Chaque profil a été relevé sur 11 points de mesures répartis suivant le tableau ci-après. Pour chaque point les valeurs mini et maxi des profondeurs de déformation ont été notées tous les 250 000 cycles.

La valeur de la profondeur d'ornière retenue est la valeur maximum mesurée sur les 3 profils.

	gauche										droite
Position Transversale	- 25 cm	- 20 cm	- 13 cm	- 8 cm	- 4 cm	Centre trace	+ 4 cm	+ 8 cm	+ 13 cm	+ 20 cm	+ 25 cm
+ 30 cm											
Axe zone sollicitée											
- 30 cm											

Les mesures de (- 13 cm) à (+ 13 cm) sont positionnées à l'intérieur de la bande de roulement de la roue TVR.

Les mesures à 20 et 25 cm du centre de la bande de roulement sont à l'extérieur.

Les traits « en gras » sur le tableau situent les rainures du pneumatique TVR (365/80 R20).

## 3.5 Résultats des essais

### 3.5.1 Evolution de la surface du revêtement

- On n'observe pas de fissurations ni de départs de granulats sur les zones d'essais après 1 500 000 cycles. Le nombre de cycles représente une durée d'exploitation d'environ 8 années d'une ligne exploitée avec des véhicules équipés de 4 essieux, circulant à la fréquence (4mm aux heures de pointe) de la ligne du Trans-Val-de-Marne (TVM) de la Régie Autonome des Transports Parisiens (RATP).



Etat de surface du point 4 après 1 500 000 cycles.

- L'évolution de la rugosité des revêtements a été quantifiée par des essais de hauteur au sable (HSV) à raison de 3 mesures sur la bande de roulement de la roue TVR et de 3 mesures sur la zone non circulée représentant l'état initial du revêtement. Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau ci-après. Ils sont tous acceptables, mais la formule SCREG se distingue nettement par sa rugosité élevée.

		Point 1 EJL	Point 2 COLAS	Point 3 SCREG	Point 4 GERLAND
<b>HSV initiale</b>	<b>Moyenne</b>	<b>0,82</b>	<b>0,86</b>	<b>2,17</b>	<b>0,60</b>
<b>HSV à 1 500 000 cycles</b>	<b>Mini</b>	0,65	0,66	1,50	0,52
	<b>Maxi</b>	0,69	0,73	1,70	0,58
	<b>Moyenne</b>	<b>0,67</b>	<b>0,68</b>	<b>1,63</b>	<b>0,54</b>
<b>Evolution</b>	<b>Sur moyenne</b>	- 0,15	- 0,18	- 0,54	- 0,06
	<b>En %</b>	-18%	- 21%	- 25%	- 10%

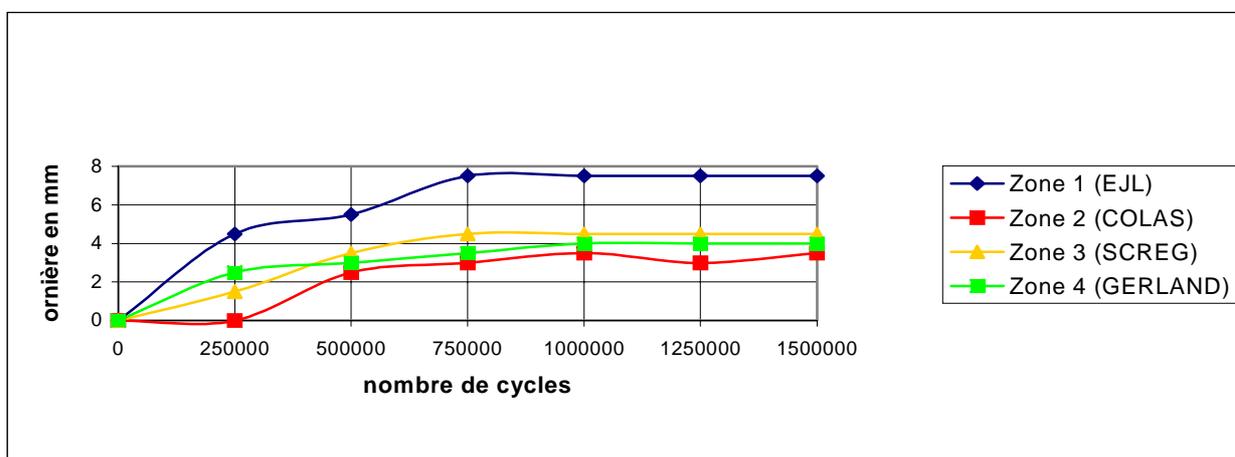


Le classement en rugosité par ordre décroissant est le suivant :

Rugosité initiale	Rugosité 1 500 000 cycles
Formule SCREG	Formule SCREG
Formule COLAS	Formule COLAS
Formule EJM	Formule EJM
Formule GERLAND	Formule GERLAND

### 3.5.2 Evolution de la déformation transversale

Le graphe ci-après illustre l'évolution comparative de l'orniérage ( $T < 30^\circ$ ) de chaque formule de matériaux en fonction du nombre de cycles de chargement.



On constate :

- une évolution de l'orniérage jusqu'à 750 000 cycles pendant la phase (mai à août 2000) correspondant aux températures les plus élevées dans les revêtements (26 à 31°C).
- une stabilité de l'orniérage après 750 000 cycles, pendant la phase (septembre 2000 à janvier 2001) correspondant à une diminution progressive des températures dans les revêtements.
- que l'orniérage reste faible. Il est du même ordre sur les zones 2, 3 et 4. La zone 1 (EJM) se distingue par une évolution plus importante sur les premières 250 000 cycles et une valeur finale (7,5mm) qui n'a pas pu être expliquée sans investigations complémentaires. (1)

(1) NOTA : un complément d'étude menée par l'entreprise EJM après la fin des essais, a montré que la moitié de l'orniérage constaté est imputable au support en grave bitume qui, dans cette zone, présente une teneur en bitume anormalement forte.



Pour chaque zone d'essais, le tableau ci-après donne les valeurs (en mm) des relevés de profondeurs de déformations en chacune des 11 positions transversales sous la règle de 0,90 m posée sur le revêtement. Les valeurs reportées dans le tableau sont :

- soit la valeur relevée en une position transversale, identique pour les 3 profils en travers,
- soit la fourchette (mini et maxi) des valeurs relevées en une position transversale, sur les 3 profils.

planche d'essai	nombre cycles	Positions points de mesure de l'ornièrè sous la règle par rapport à l'axe en cm										
		-25	-20	-13	-8	-4	0	4	8	13	20	25
P1 (EJL)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	250000	0	0	2,5à4	3,5à4,5	3,5à4,5	3à4	3à3,5	2,5à3	0,5à1,5	0	0
	500000	0	0à1	4à4,5	5à5,5	5,5	5à5,5	4à5	4	2	0à1	0
	750000	0	0à1	4à4,5	6,5	6,5à7,5	7à7,5	6à7	5à5,5	3à4	0	0
	1000000	0	0	2,5à3	6à6,5	6,5à7,5	7	7à7,5	5,5à6	4à5	2	0
	1250000	0	0	4à4,5	6à6,5	7	7à7,5	6à6,5	6à6,5	5à5,5	0	0
	1500000	0	0	4à5	6à6,5	7	7à7,5	6,5	5à5,5	4à4,5	0à1	0

P2 (COLAS)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	250000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	500000	0	0	1à1,5	1,5à2	2	1,5à2,5	1,5à2	1à1,5	0à1	0	0
	750000	0	0	1,5	2à2,5	2,5à3	2,5à3	2,5à3	2	0à1	0	0
	1000000	0	0	1,5à2	2à2,5	2,5à3	2,5à3,5	2,5à3	2	0,5à1,5	0	0
	1250000	0	0	1à2	1,5à2	2,5	2,5à3	2,5à3	1,5à2	0,5à1,5	0	0
	1500000	0	0	1,5	2	2,5à3	2,5à3,5	2,5à3	2	1à1,5	0	0

P3 (SCREG)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	250000	0	0	0,5à1	1à1,5	1à1,5	1	1	0,5à1	0	0	0
	500000	0	0	2à2,5	2,5à3	3à3,5	2à3	2à3	1,5à2,5	0	0	0
	750000	0	0	2à3	2,5à3	3,5à4,5	3,5à4,5	3à4	2à3	2à3	0	0
	1000000	0	0	2,5à3	2,5à3	3à3,5	4à4,5	2,5à4	2à3	1,5à3	0	0
	1250000	0	0	2à2,5	2,5à3	3à3,5	4à4,5	3à3,5	2à3	2à2,5	0	0
	1500000	0	0	2à3	2,5à3	3,5à4	4à4,5	3à4	2à2,5	2à2,5	0	0

P4 (GERLAND)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	250000	0	0	1à1,5	1,5à2	1,5à2,5	1,5à2,5	1,5à2	1à2	0à1	0	0
	500000	0	0	1,5à2	2,5à3	2,5à3	2,5à3	2,5à3	1,5à2,5	0,5à1,5	0	0
	750000	0	0	2	3	3à3,5	3à3,5	3	2à2,5	1à1,5	0	0
	1000000	0	0	1,5à2	2,5à3	3à4	3à4	2,5à3,5	2à3	1à1,5	0	0
	1250000	0	0	2	2,5à3	3à4	3,5à4	3à3,5	2,5à3	1à1,5	0	0
	1500000	0	0	1,5à2,5	2,5à3	3à4	3,5à4	3à3,5	2,5	1à1,5	0	0

### 3.6 Conclusion des essais de fatigue

Après l'application de 1 500 000 chargements, sans balayage, de la roue TVR, roue la plus chargée des véhicules à expérimènter, les formules retenues par les entreprises routièrès ont montré leur aptitude à résister à la fatigue de surface.



## 4. Conclusion générale

Les essais sur le site FABAC ont été menés dans des conditions assez sévères – roue la plus agressive, fréquence de chargement de 2 Hz – représentant une durée d'exploitation d'environ 8 années d'une ligne exploitée avec des véhicules équipés de 4 essieux, circulant à la fréquence actuelle (4 mn aux heures de pointe) de la ligne du Trans-Val-de-Marne (TVM).

Ils ont montré :

- que la machine FABAC et son système de chauffage peuvent être utilisés pour faire des essais comparatifs d'orniérage, sous réserve de la qualité d'homogénéité de mise en œuvre des planches d'essais.
- que les modalités d'essais ont permis de retrouver l'ordre de grandeur des profondeurs d'orniérage obtenues sur le manège du LCPC.
- que la durée des essais d'orniérage à une température donnée pouvait être limitée à 45 000 cycles (28 heures) sans perdre en pouvoir de discrimination.
- qu'après les essais de fatigue à 1 500 000 cycles (6 semaines), la qualité des revêtements des entreprises a été mise en évidence puisqu'aucune anomalie n'a été constatée.

Ce n'est donc pas la fatigue qui sera prépondérante pour la remise en état des revêtements de chaussées du site propre, mais la tenue à l'orniérage (essais réalisés sur le manège circulaire du LCPC de Nantes). Cette dernière sera fonction des conditions climatiques (nombre de jours par an où la température du revêtement de chaussée sera supérieure à 30°C) de la région dans laquelle circuleront les véhicules guidés et du type de véhicule retenu. Toutefois avec les différents revêtements proposés à l'heure actuelle par les entreprises routières, on peut estimer que la couche de roulement ne devra pas être renouvelée avant 6-8 années, sous réserve que le support de cette couche soit aussi résistant à l'orniérage.