Utilisation et impact des géogrilles dans le renforcement des chaussées

Pierre Hornych – Mai Lan Nguyen – Maissa Gharbi

IFSTTAR - LAMES

UTILISATION ET IMPACT DES GÉOGRILLES DANS LE RENFORCEMENT DES CHAUSSÉES

Introduction

Caractéristiques et utilisation des grilles

Caractérisation en laboratoire

- Essais de fatigue
- Essais de résistance des interfaces

Exemples d'expérimentations

- Expérience en vraie grandeur de renforcement
- Expérience en vraie grandeur sur chaussée neuve
- Instrumentation des grilles
- Evaluation de l'endommagement des grilles à la mise en œuvre

INTRODUCTION

La fissuration par fatigue , ou la remontée de fissures sont parmi les principaux modes de dégradations des chaussées

Recherche de procédés permettant de renforcer les enrobés bitumineux, et de ralentir l'apparition de la fissuration

Les techniques de renforcement par grilles (notamment en fibre de verre) ont fait leur preuves - leur utilisation est en augmentation

Des questions subsistent, notamment sur :

- Les conditions d'utilisation les plus pertinentes
- Les méthodes de caractérisation en labo
- Le dimensionnement des chaussées renforcées

CARACTERISTIQUES ET UTILISATION DES GRILLES

IFSTTAR

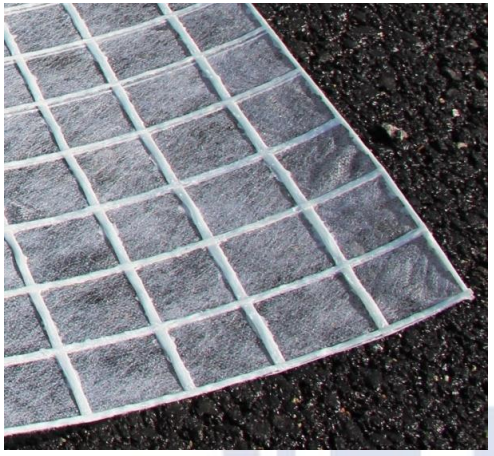
CARACTÉRISTIQUES ET UTILISATION DES GRILLES

Intérêt des grilles en fibre de verre :

- Module élevé (≈ 70 GPa) + résistance en traction élevée
- Bonne résistance à la température et aux agressions chimiques
- Propriétés stables dans le temps

Grilles pour renforcement des chaussées :

- Enrobage de résine , pour assurer une **meilleure adhésion** et une protection mécanique des fibres.
- Dimensions des mailles **:** généralement entre 12.5mm et 40 mm - doit être suffisante par rapport à la taille des grains pour assurer un bon ancrage
- **Importance du collage des couches :** utilisation d'une couche d'accrochage (émulsion de bitume)
- un film en non tissé est parfois ajouté pour faciliter la manipulation et la répartition de l'émulsion.



EXEMPLES D'UTILISATION DES GRILLES

Entretien de chaussées fissurées

Renforcement de joints de chaussées

UTILISATION DES GRILLES

Renforcement de plates-formes Industrielles

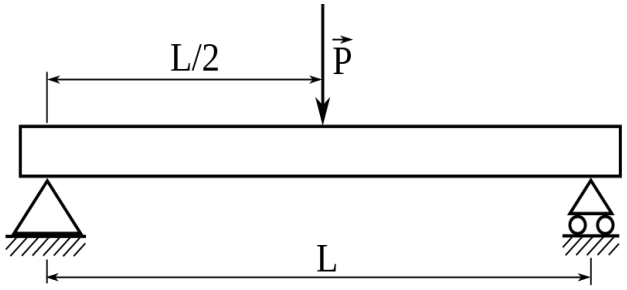
Système anti-remontée de fissures sur structure en matériaux traités aux liants hydrauliques

CARACTERISATION EN LABORATOIRE

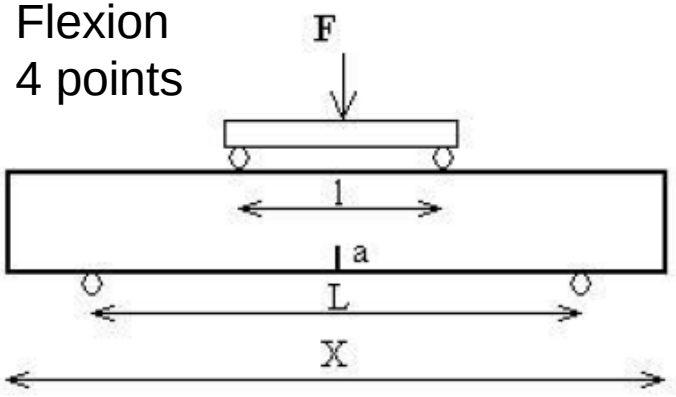
ESSAIS DE CARACTÉRISATION EN LABORATOIRE

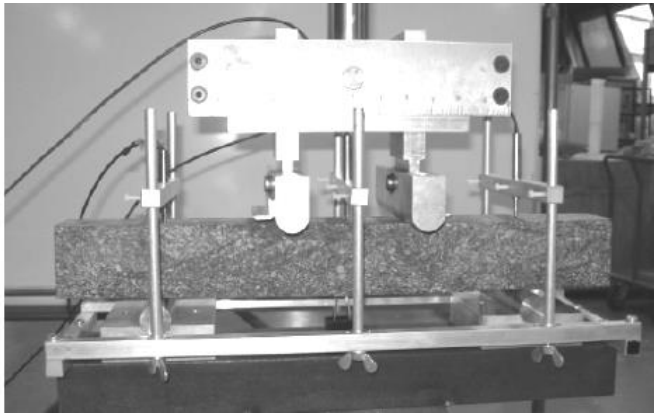
ESSAIS DE FLEXION

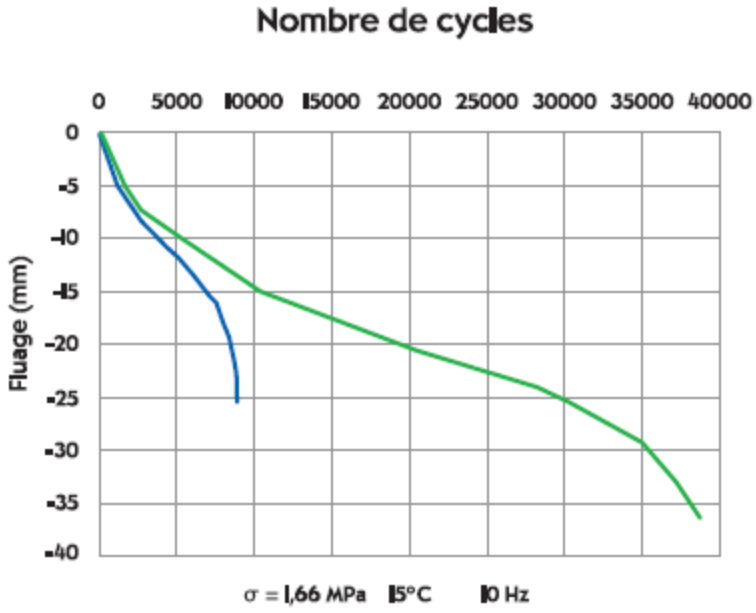
Flexion
3 points



Flexion
4 points







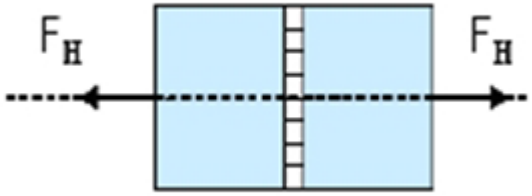
Essais utilisés pour caractériser la résistance à la fissuration / la fatigue
Chargement monotone ou cyclique – généralement unidirectionnel (génère du fluage)

ESSAIS DE CARACTÉRISATION EN LABORATOIRE

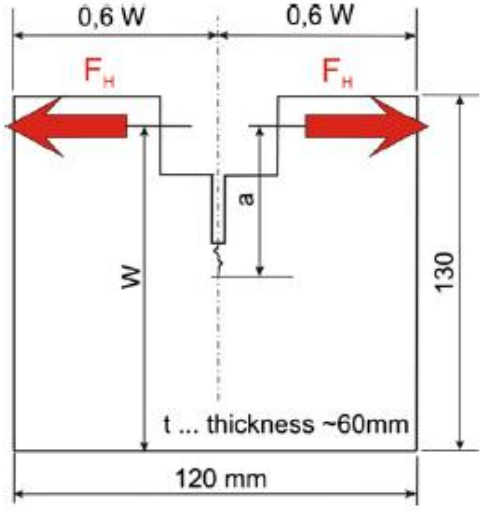
ESSAIS DE RESISTANCE DES INTERFACES

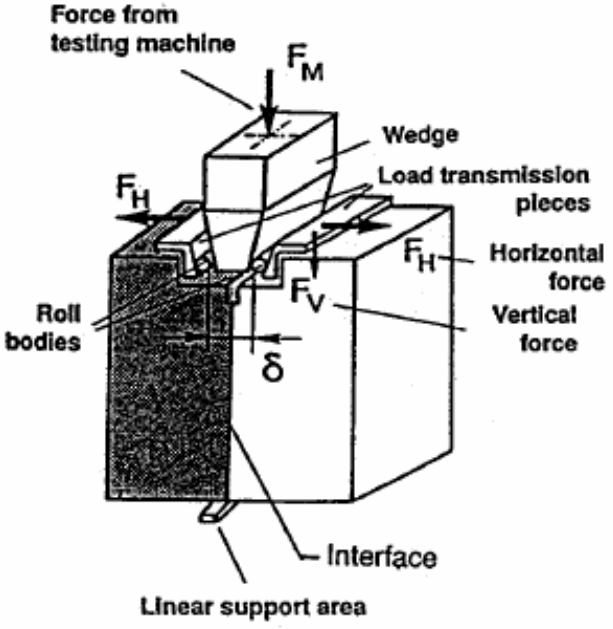
- Essais de traction directe (mode 1)

Caractérisation
du collage
de l'interface



- Wedge splitting test (mode 1)





ESSAIS DE CARACTÉRISATION EN LABORATOIRE

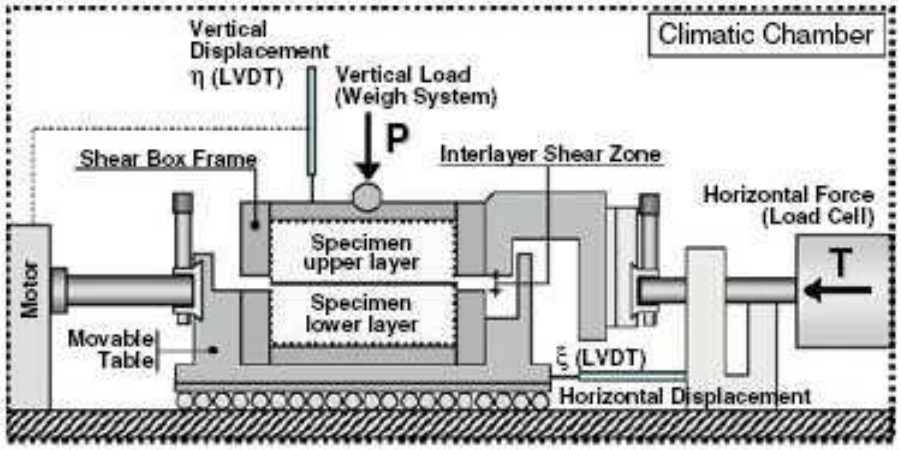
ESSAIS DE RESISTANCE DES INTERFACES

- Essais de cisaillement (mode 2)

Essai ASTRA

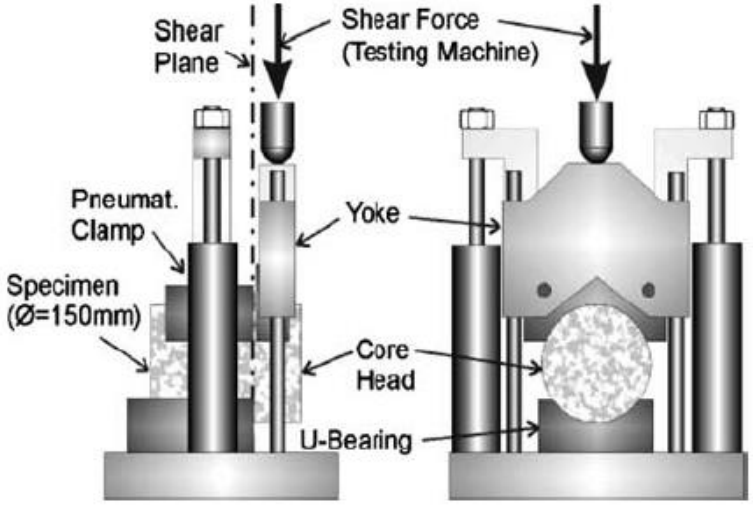
Boite de

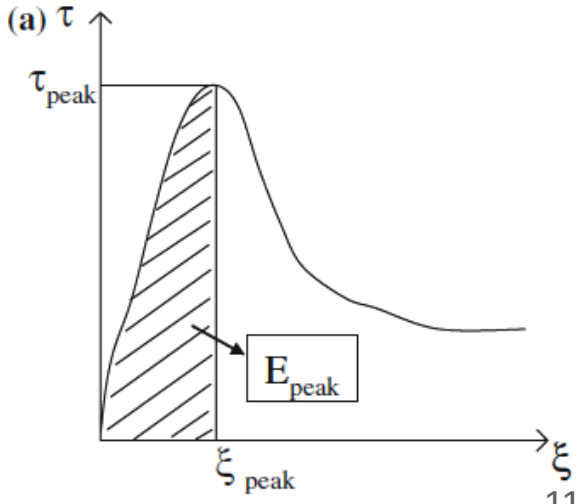
Cisaillement



Caractérisation de la **résistance au cisaillement** de l'interface
Critère : contrainte de cisaillement max ou énergie de rupture E_{peak}

Essai LPDS



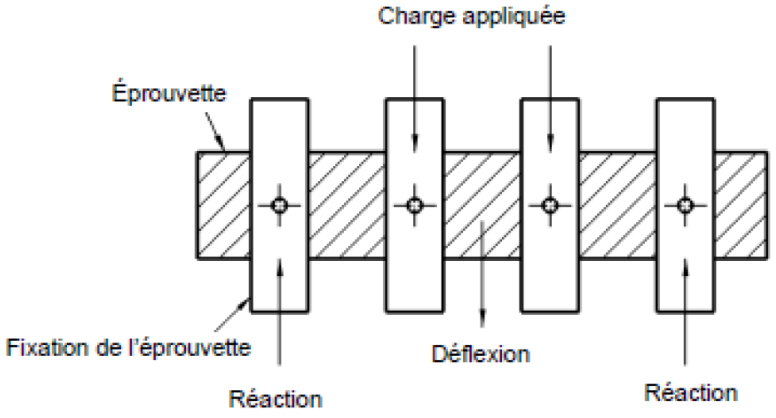


ESSAI DE FATIGUE SUR ENROBÉS RENFORCÉS

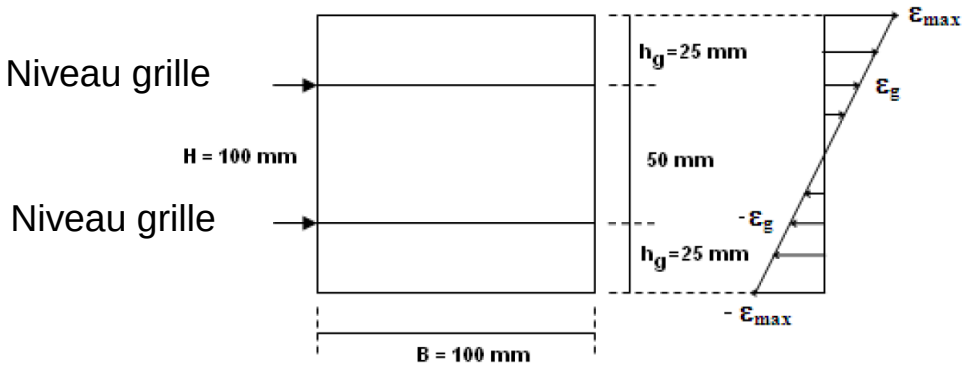
Essai de fatigue en flexion 4 points alternée *(Arsenie et al., 2016)*

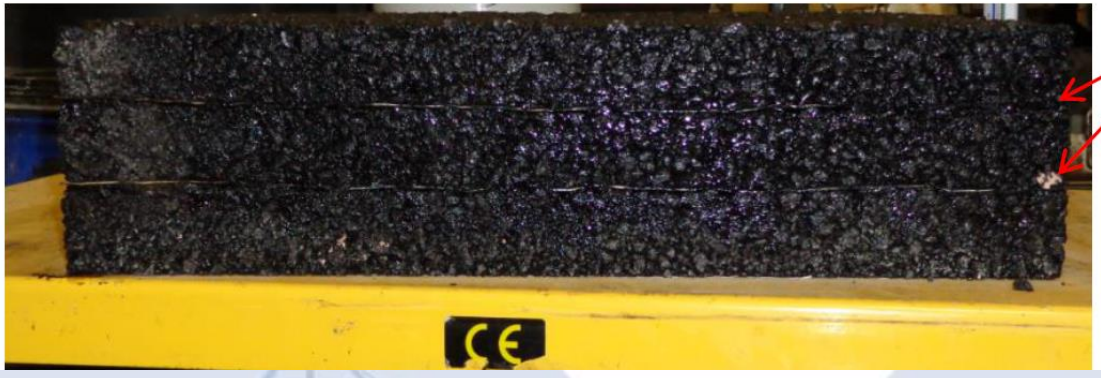
Eprouvettes de grandes dimensions : 600 x 100 x 100 mm

Renforcement par 2 grilles disposées symétriquement



Section de l'éprouvette





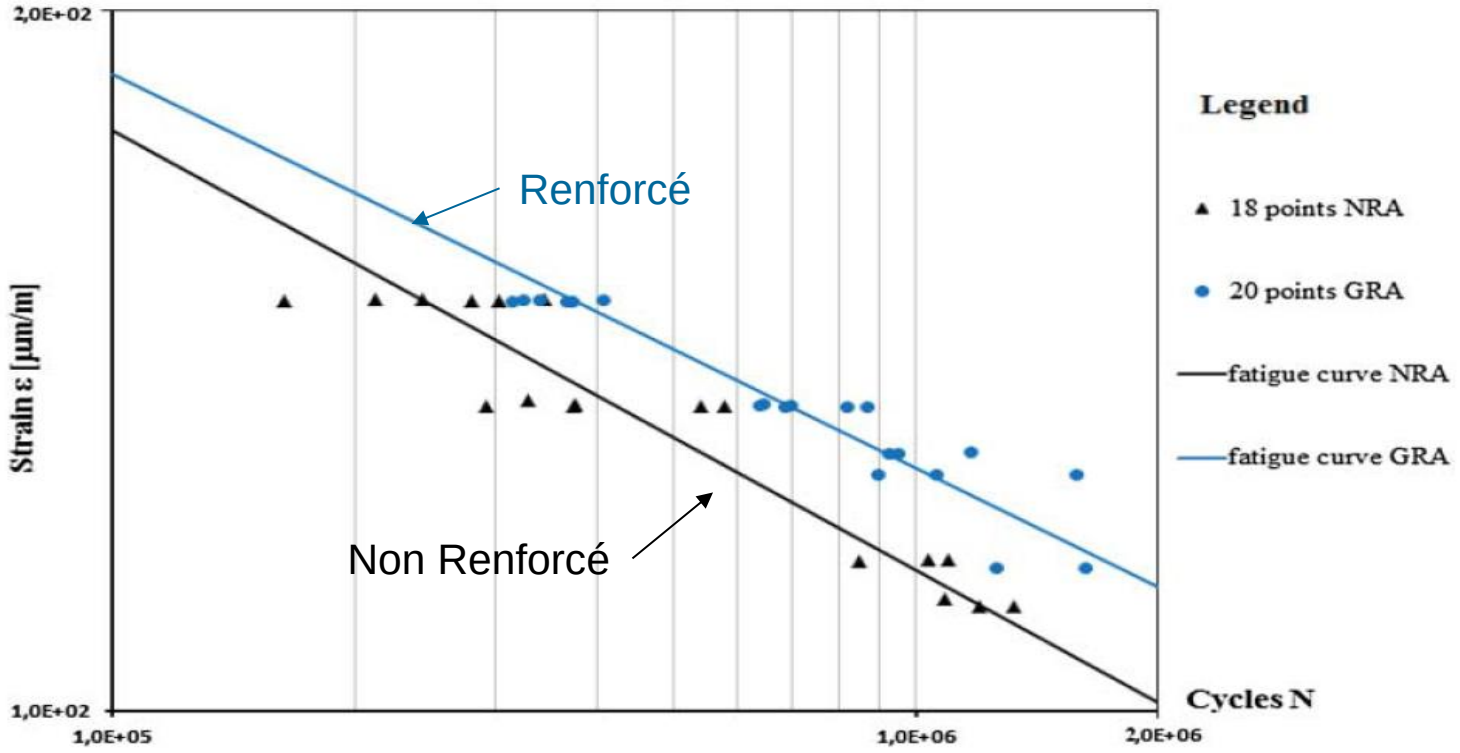
ESSAI DE FATIGUE SUR ENROBÉS RENFORCÉS

Machine de fatigue en flexion 4 points

Essais à 10^{O}C, 25 HZ

ESSAI DE FATIGUE SUR ENROBÉS RENFORCÉS

Droites de fatigue – enrobé renforcé et non renforcé



ε µdef	Nf renforcé	Nf non renforcé	NF_r / NF_{nr}
150	375 000	243 000	1,54
135	695 000	424 000	1,63
115	1808 000	1070 000	1,68

MODÉLISATION DU COMPORTEMENT EN FATIGUE

Loi d'endommagement par fatigue de Bodin (2002) :

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl} = (1 - D) \cdot C^{0}_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl},$$

D variable de dommage (scalaire), variant entre 0 et 1
Décrit la décroissance du module avec le nombre de cycles

Loi d'évolution du dommage : $\dot{D} = f(D) \cdot \bar{\varepsilon}^{\beta} \cdot \langle \dot{\bar{\varepsilon}} \rangle,$

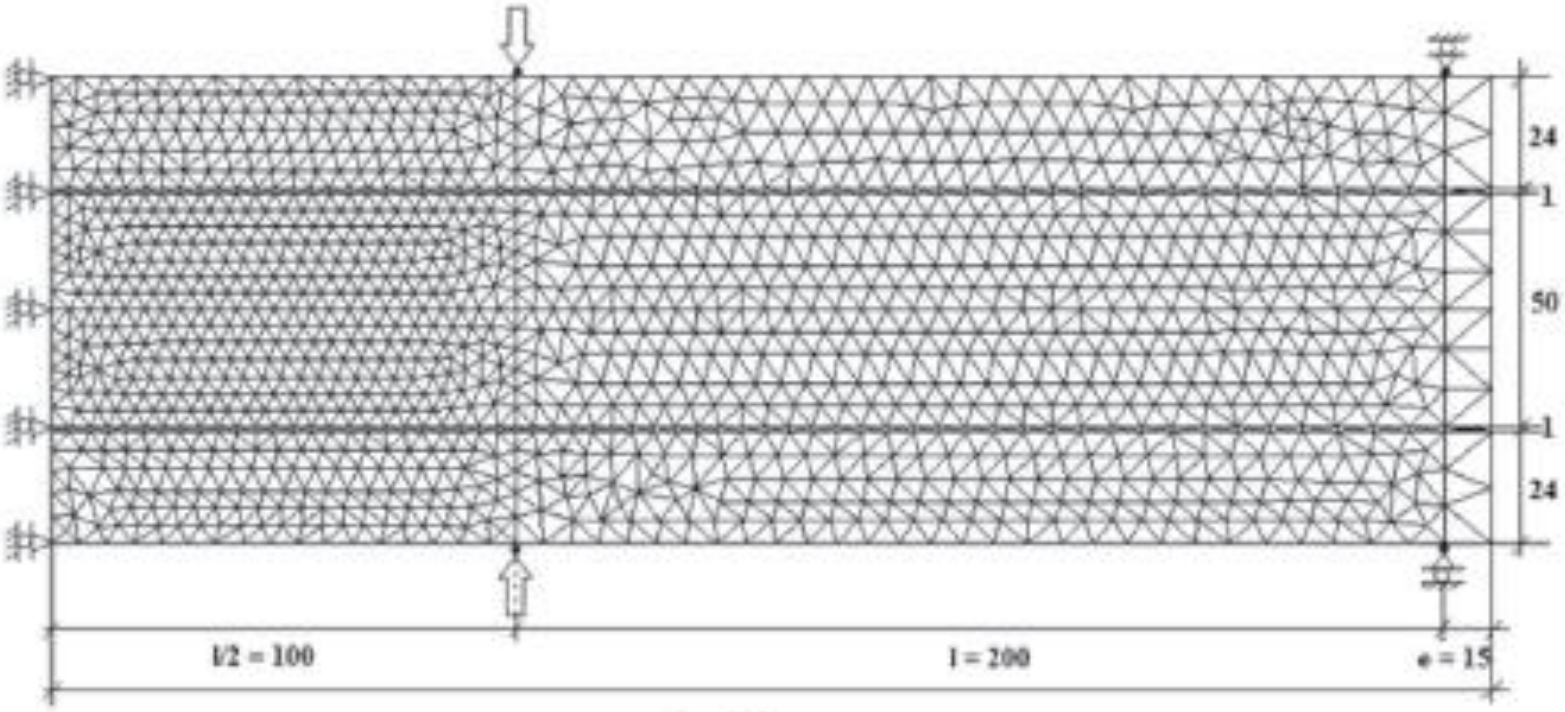
$$f(D) = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 \cdot \alpha_3} \cdot \left(\frac{D}{\alpha_2}\right)^{1-\alpha_3} \cdot \exp\left(\frac{D}{\alpha_2}\right)^{\alpha_3}.$$

Avec : $\bar{\varepsilon}$ déformation « équivalente »
$\alpha 1$, $\alpha 2$, $\alpha 3$, β paramètres du modèle

MODELISATION DU COMPORTEMENT EN FATIGUE

Modélisation par éléments finis de la réponse des éprouvettes, avec la loi de Bodin, sous chargement cyclique *(Arsénie et al., 2016)*

5 couches



1 : BBSG

2 : Grille

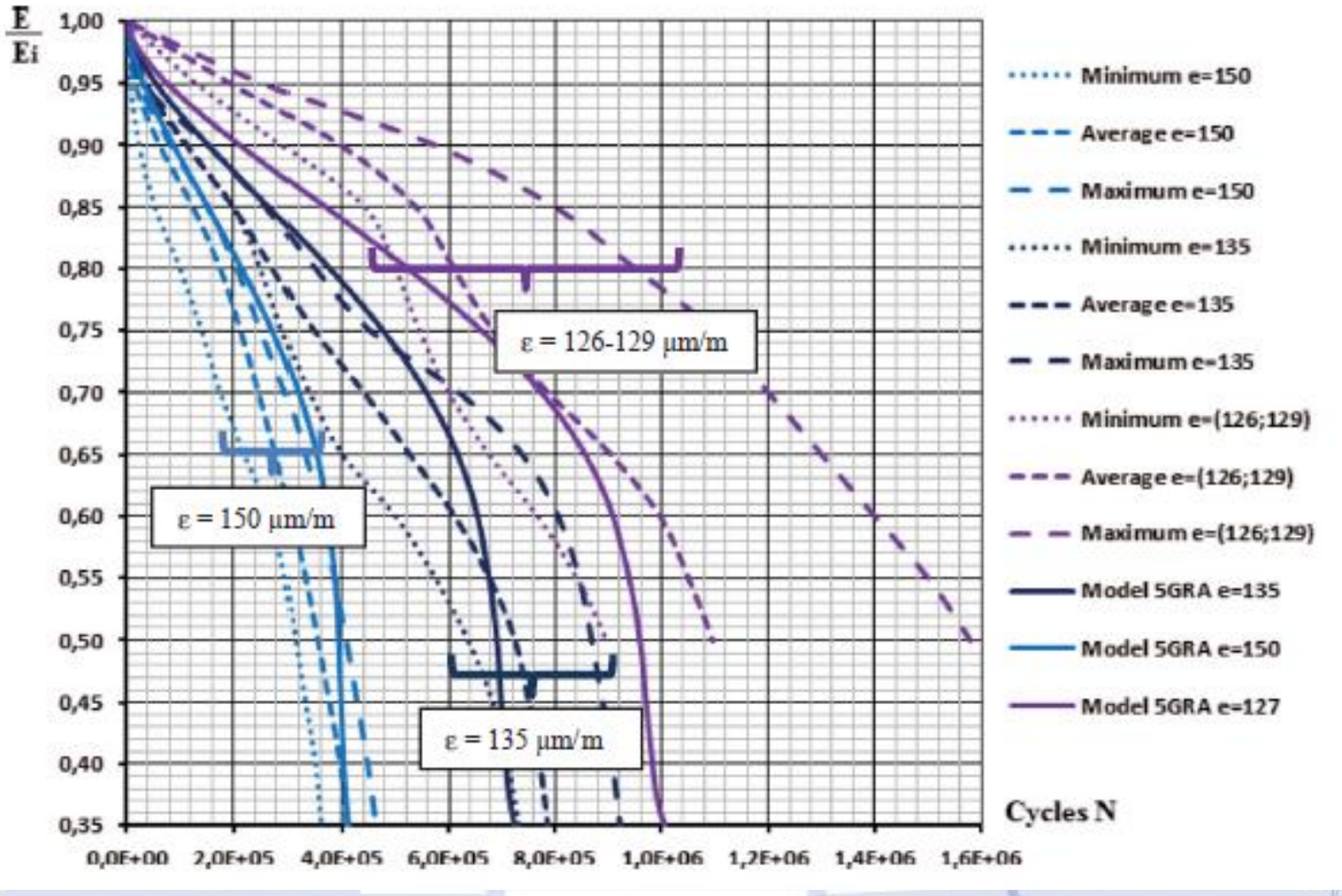
3 : BBSG

4 : Grille

5 : BBSG

MODELISATION DU COMPORTEMENT EN FATIGUE

Calage des courbes de fatigue de l'enrobé renforcé, pour 3 niveaux de déformation ⟶ identification des paramètres du modèle

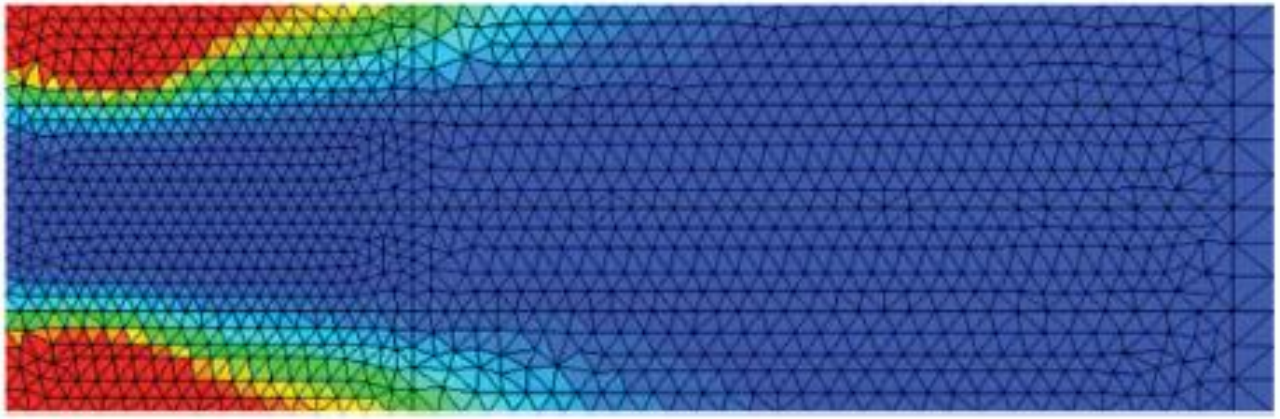


MODELISATION DU COMPORTEMENT EN FATIGUE

Niveaux de dommage calculés par éléments finis

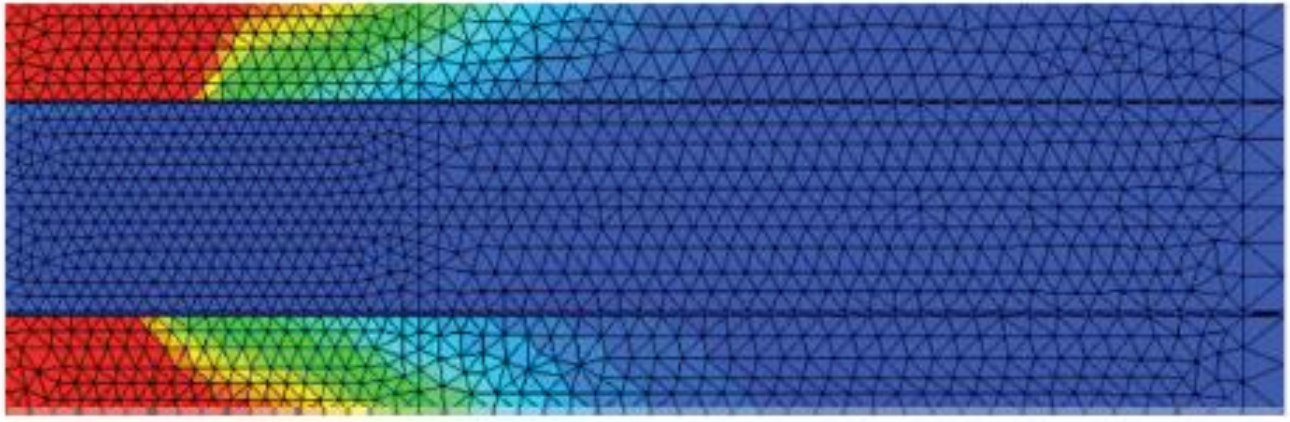
Eprouvette non renforcée

$E/E_i = 0.35$



Eprouvette renforcée

$E/E_i = 0.35$



EXPERIMENTATIONS EN VRAIE GRANDEUR

IFSTTAR

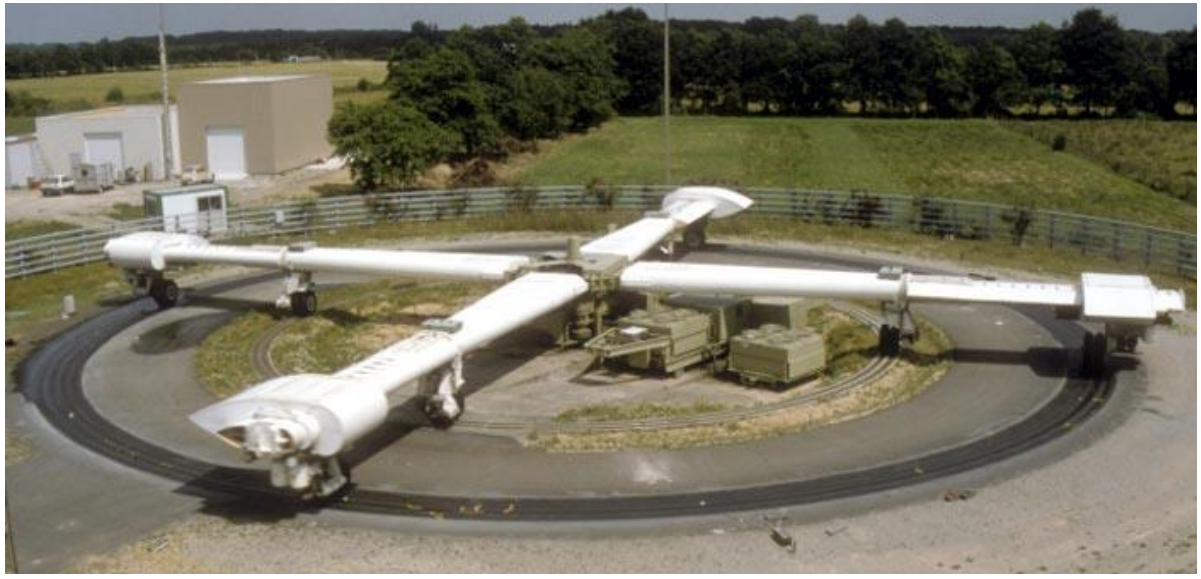
LE MANEGE DE FATIGUE DE L'IFSTTAR

Installation d'essais circulaire – longueur de la piste 120 m

4 bras de chargement – charges usuelles : roues jumelées chargées à 65 kN

Vitesse : jusqu'à 100 km/h (15 tours/min.)

Capacité de chargement maxi : 50 000 charges / jour



EXPERIENCE SUR CHAUSSÉES NEUVES

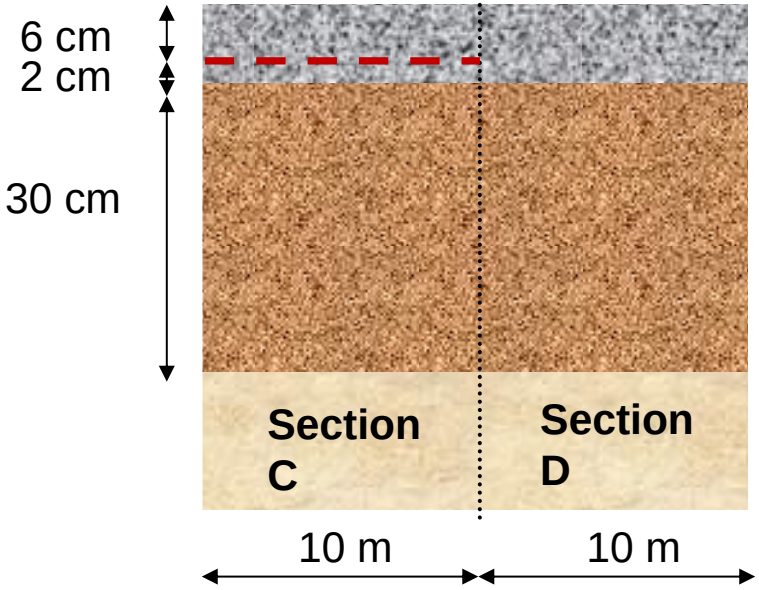
(Hornych et al. 2012)

Chaussée à faible trafic, renforcée par grille en fibre de verre maille 25 x 25 mm

C) Section renforcée

grille placée à 20 mm de la base

D) Section non renforcée



Structures de chaussée

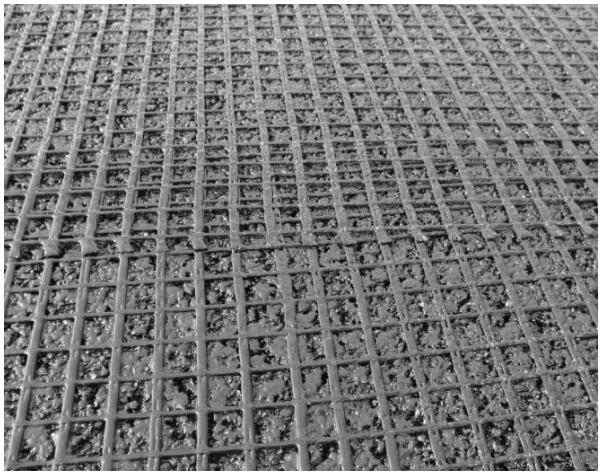
- 8 cm de béton bitumineux 0/10 mm, à 5.5% de bitume grade 35/50
- 30 cm assise en GNT 0/20 mm
- Sol support : sable argileux, de module ≈ 80 MPa

Chargements : 1 million de demi-essieux chargés à 65 kN
+ 200 000 chargements à 70 kN

CONSTRUCTION DES CHAUSSEES

Première couche bitumineuse

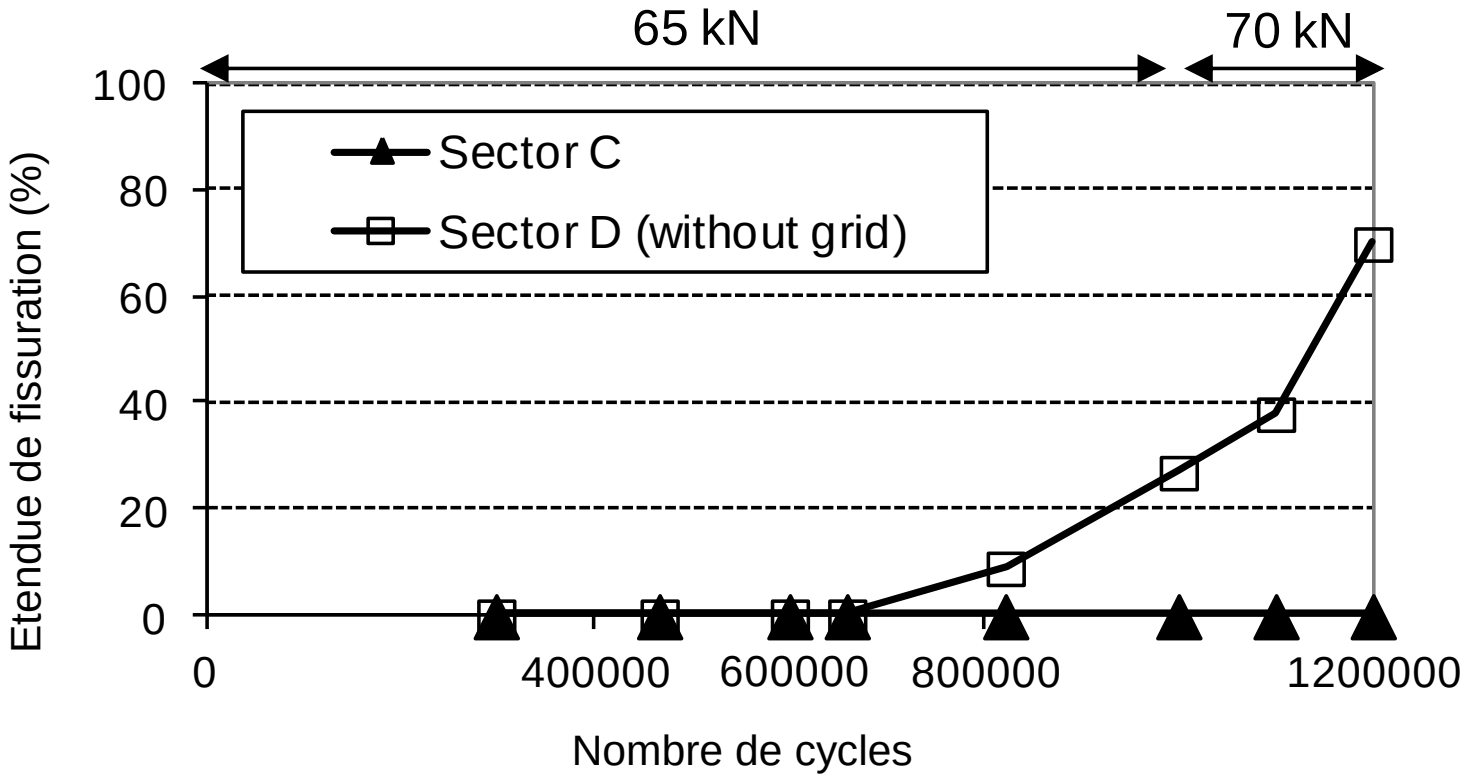
Mise en place de la grille



Application de la couche d’accrochage

Deuxième couche bitumineuse

COMPORTEMENT DES CHAUSSEES - FISSURATION



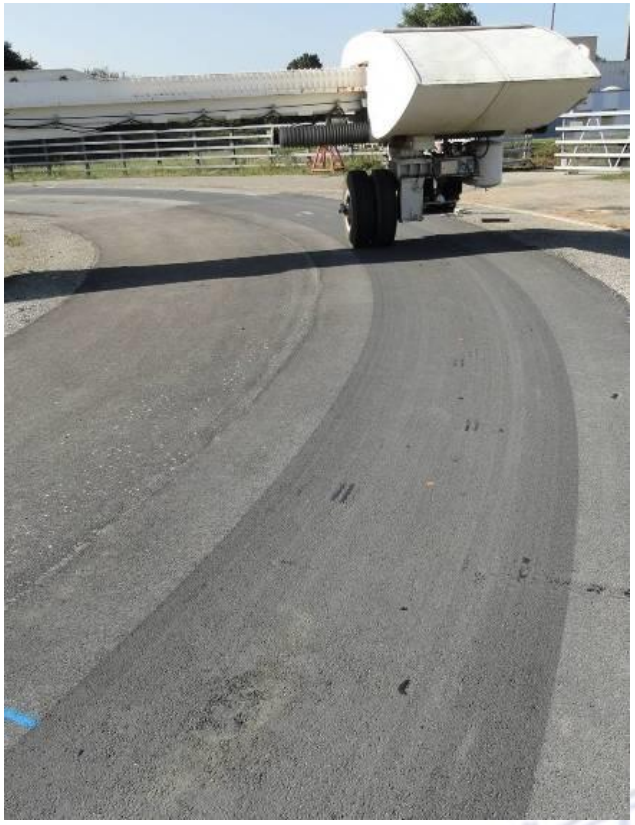
Section D (non renforcée) : Premières fissures après 800 000 cycles
Etendue de fissuration 70 % à la fin de l'expérience

Section C (renforcée) : pas de fissuration après 1 200 000 cycles

COMPORTEMENT DES CHAUSSEES - FISSURATION

Aspect visuel après 1 200 000 Chargements

Section C (renforcée)

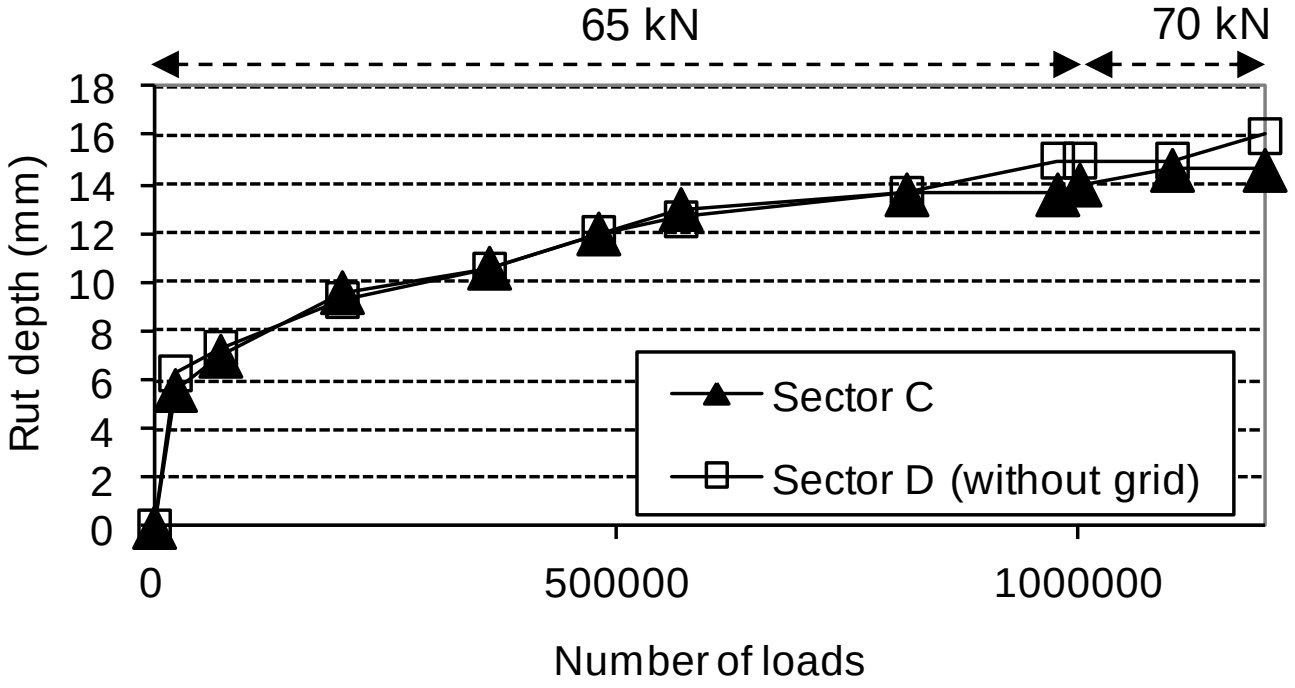


Section D (non renforcée)

Fissures principalement transversales, dans la bande de roulement

COMPORTEMENT DES CHAUSSEES - ORNIÉRAGE

Evolution de la profondeur d'ornière moyenne



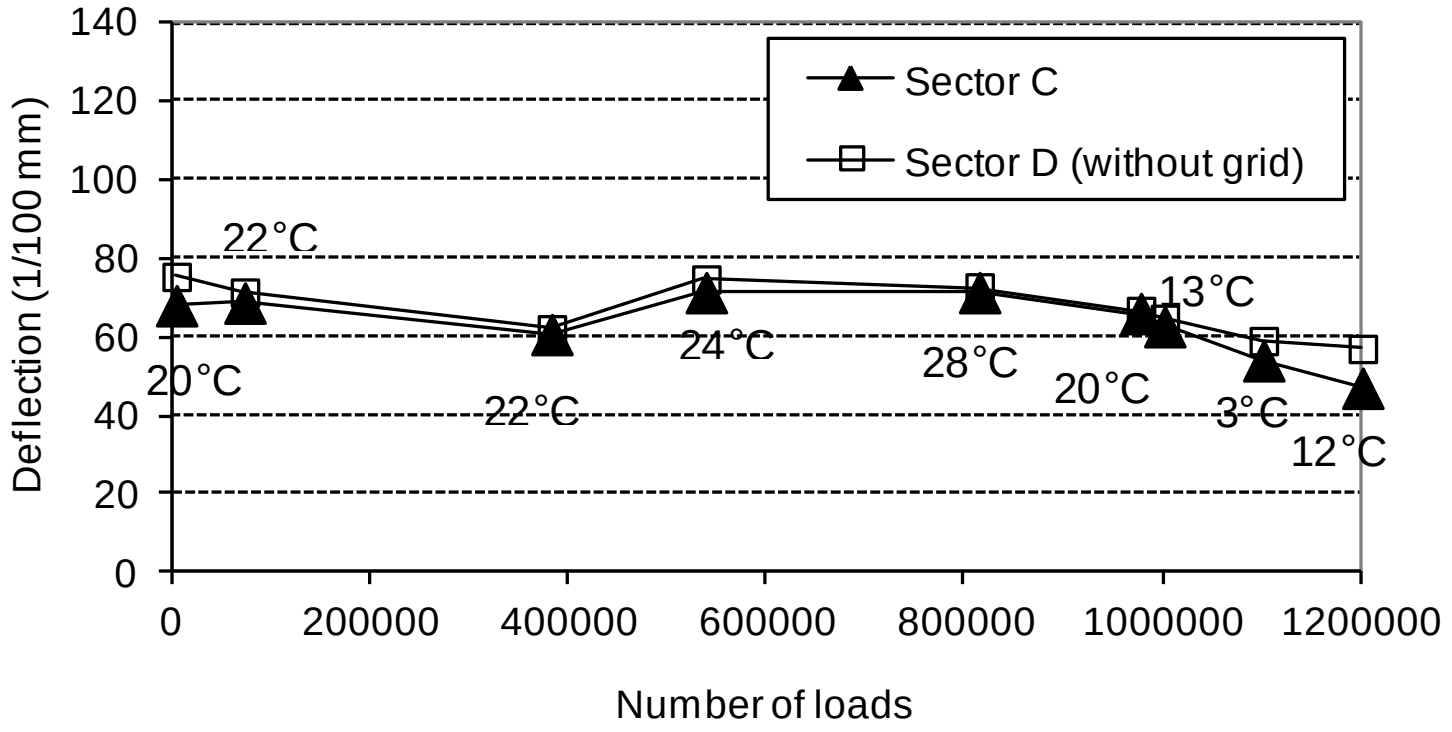
Profondeur d'ornière moyenne : 15 mm après 10^6 chargements

Orniérage dû aux déformations permanentes de l'assise en GNT

Niveaux d'orniérage très proches sur les sections avec et sans grille.

COMPORTEMENT DES CHAUSSEES - DEFLECTIONS

Evolution des deflections moyennes mesurées à la poutre Benkelmann, à 3 km/h



Niveaux de déflexion similaires sur les sections C and D

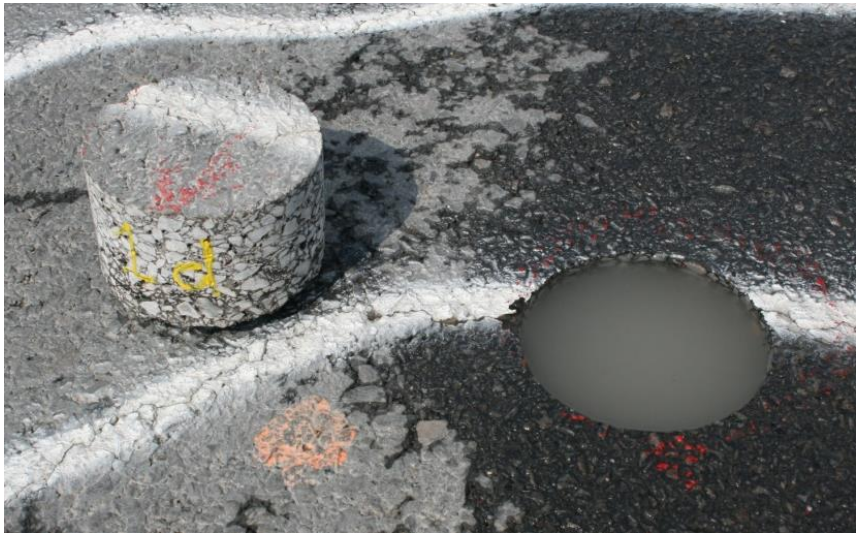
Pas d'effet apparent de la grille sur les déflections

INVESTIGATIONS EN FIN D'EXPERIENCE

Carottages

Section C : pas de fissuration ni de décollement des couches

Section D : Fissures fines sur toute l'épaisseur – pas de décollement



EXPÉRIENCE SUR CHAUSSÉES RENFORCÉES

(Kerzrého et al. 2010)

Comparaison de 3 solutions de renforcement

Section 5a: BB mince (0/10) 40 mm, sans grille

Section 5b: BBTM (0/10) 25 mm, avec grille en fibre de verre (mailles 40 x 30 mm)

Section 5c: BBTM (0/10) 25 mm, sans grille

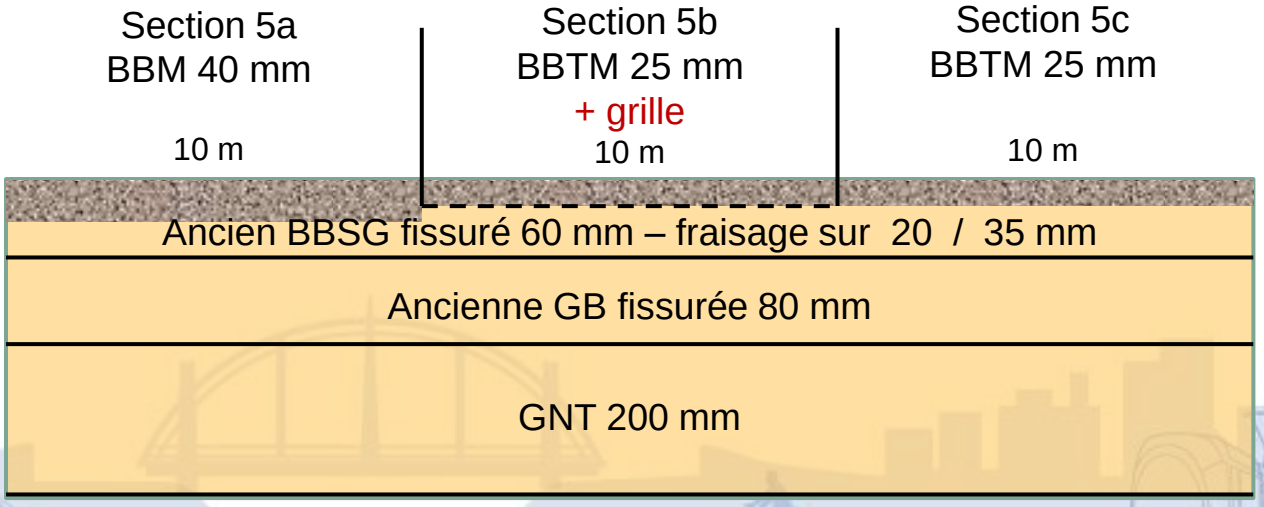
Application sur une chaussée existante fissurée:

- 6 cm de béton bitumineux 0/14 fissuré
- 8 cm de grave bitume 0/14 fissurée
- 20 cm de couche de fondation en GNT - Sol support : sable argileux

Chargements :

Année 1 : 1 million de charges 65 kN à roues jumelées

+ **Année 2** : 2.3 million de charges 65 kN



REALISATION DES RENFORCEMENTS

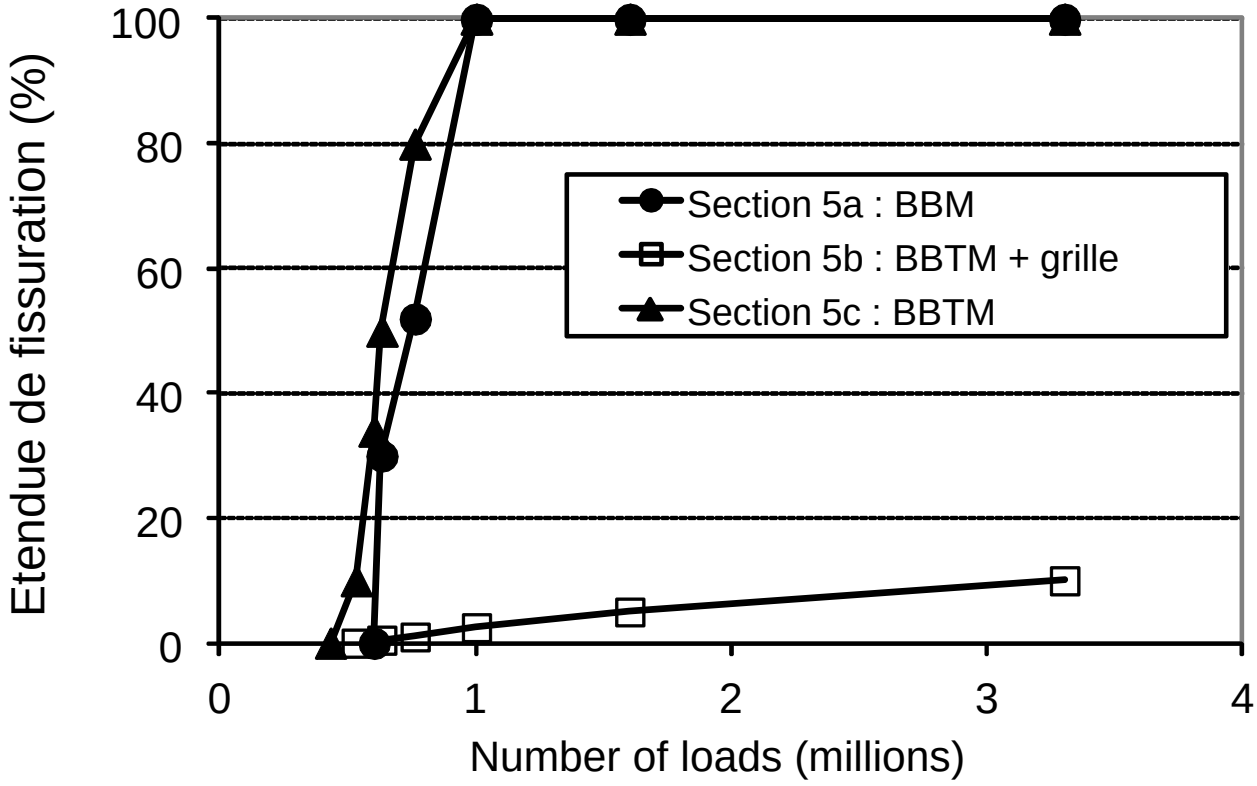
Chaussée existante fissurée

Décollement des interfaces

Mise en place des grilles

Application des enrobés minces

COMPORTEMENT DES CHAUSSEES - FISSURATION



Comportement nettement meilleur de la section 5b renforcée par grille

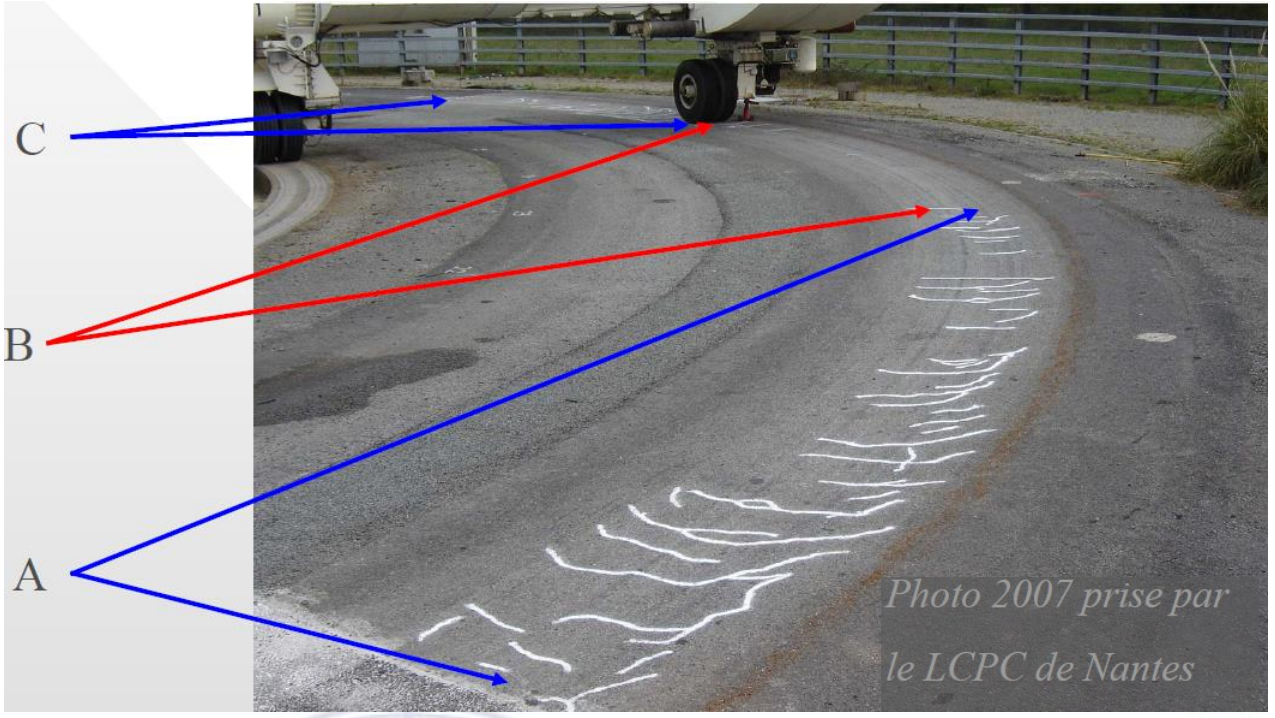
COMPORTEMENT DES CHAUSSEES - FISSURATION

Aspect visuel après 3.3 millions de chargements

Section 5c: BBTM 25 mm
Sans grille

Section 5b: BBTM 25 mm
Avec grille

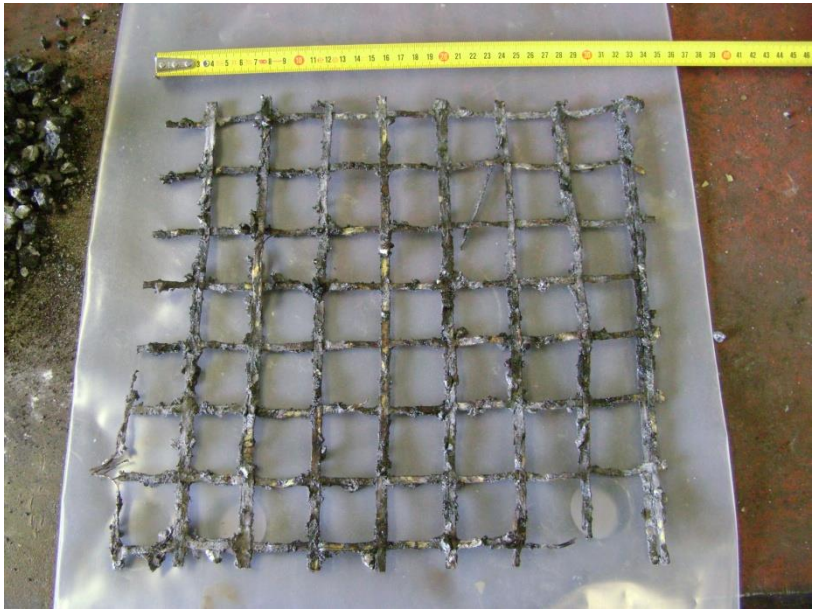
Section 5a: BBM 40 mm



INVESTIGATIONS EN FIN D'EXPERIENCE

Très bonne adhérence de la grille

Grille en bon état

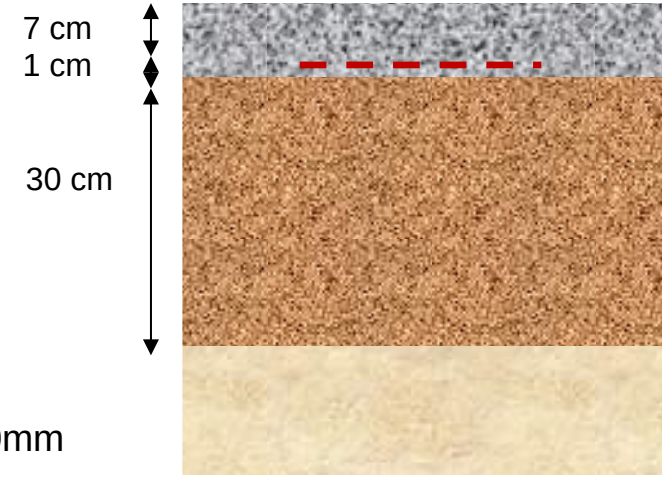


INSTRUMENTATION D'UNE GRILLE EN FIBRE DE VERRE

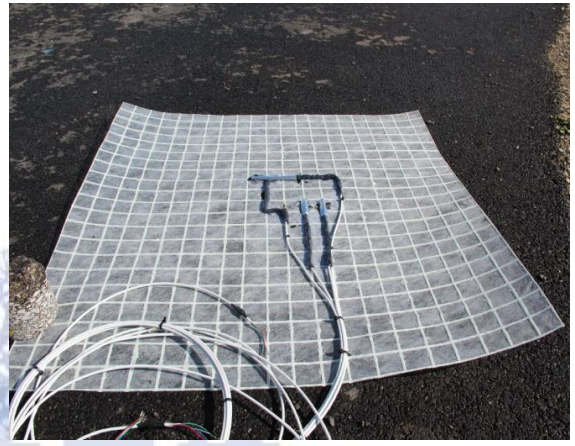
Objectif : instrumentation de la grille à l'aide de jauges, pour suivre ses déformations dans la chaussée, au cours d'un essai manège

Structure de chaussée :

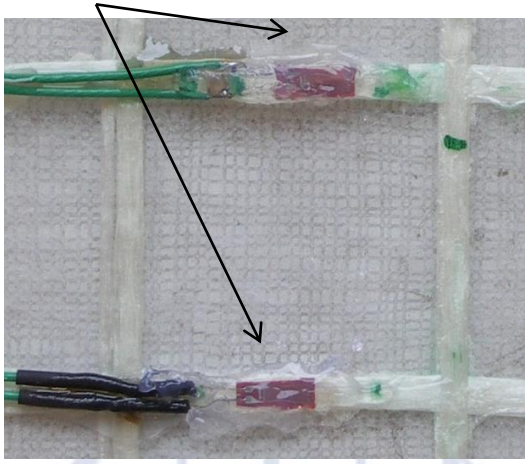
- 8 cm béton bitumineux 0/10
- 30 cm assise en GNT
- Sol support : sable argileux module ≈ 80 MPa



Grille de maille 40 x 40 mm: dimension 1*1 m²



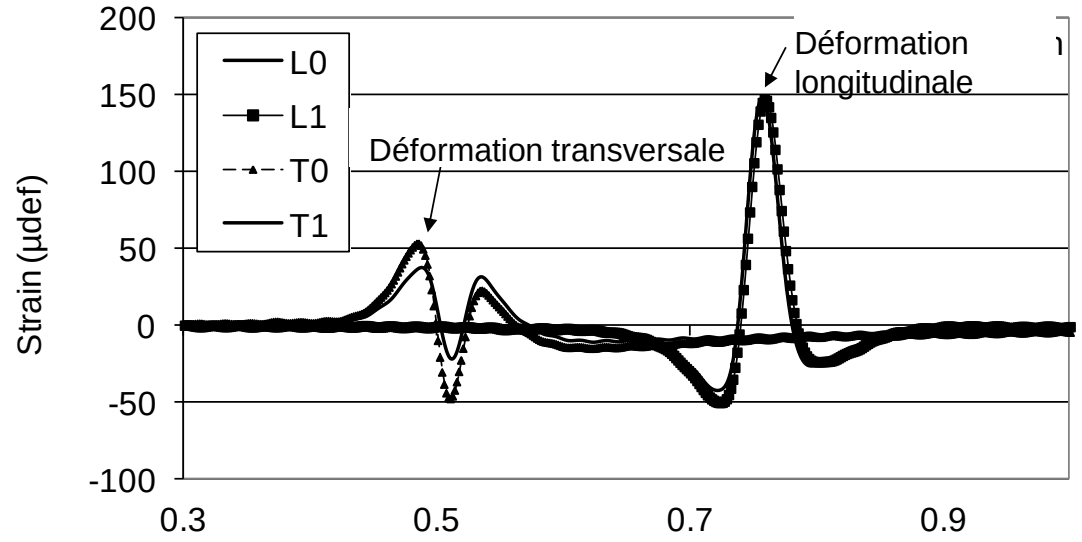
Collage de 2 jauges de 10mm



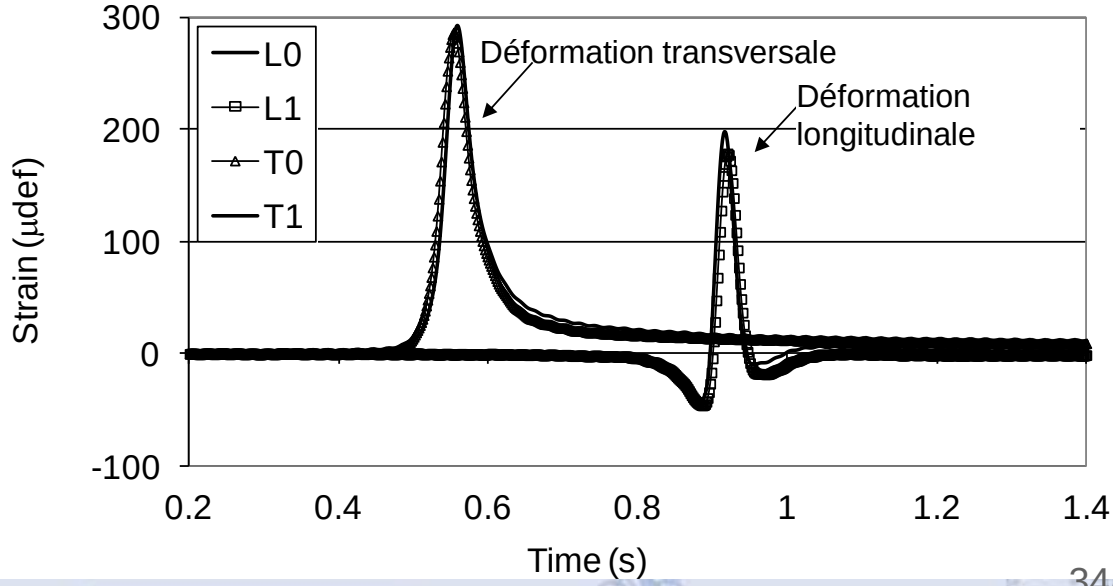
Mise en oeuvre

MESURES DE DÉFORMATIONS SUR LA GRILLE

Déformations mesurées sous le centre du jumelage
charge 65 kN, T = 21° C
v = 43 km/h

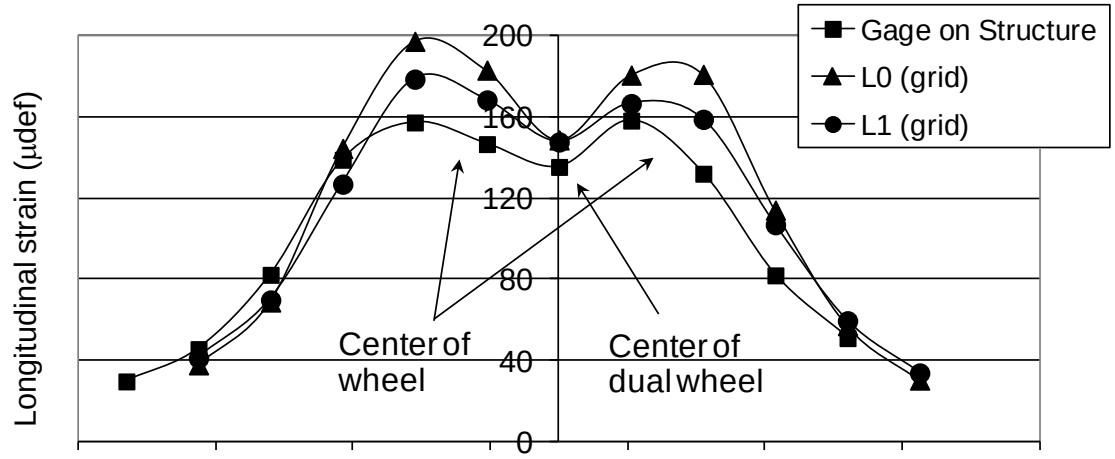


Déformations mesurées sous le centre d'une roue
charge 65 kN, T = 21° C
v = 43 km/h

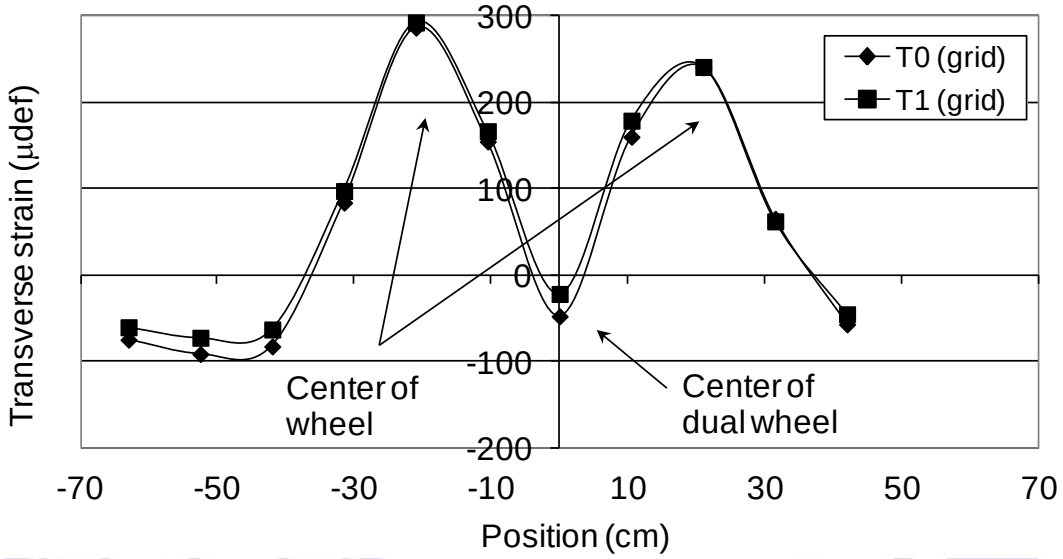


MESURES DE DÉFORMATIONS SUR LA GRILLE

Déformations longitudinales mesurées pour différentes positions transversales
charge 65 kN, T = 21° C
v = 43 km/h



Déformations transversales mesurées pour différentes positions transversales
charge 65 kN, T = 21° C
v = 43 km/h



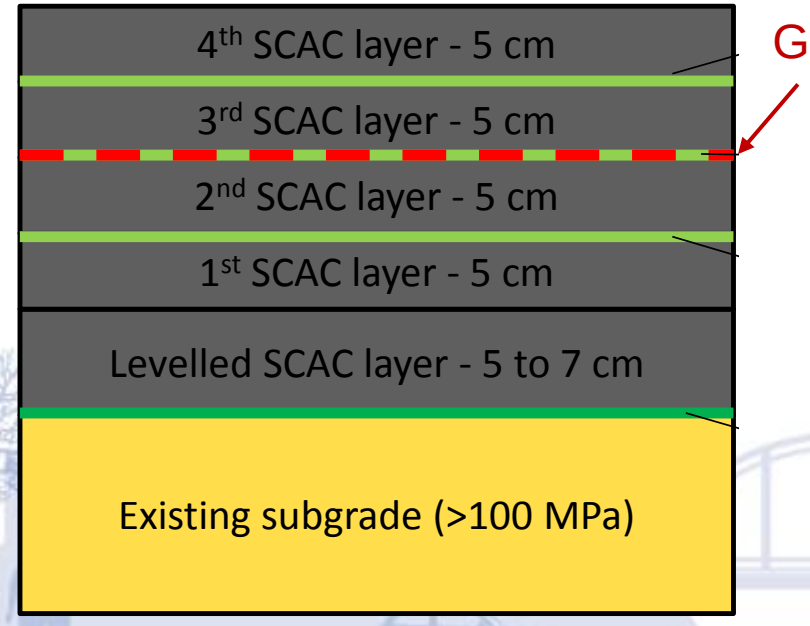
Bonne répétabilité des mesures des jauges
Mesures proches de celles obtenues dans l'enrobé, juste au dessus de la grille

EVALUATION DE L'ENDOMMAGEMENT DES GRILLES A LA MISE EN ŒUVRE

Réalisation de planches expérimentales avec 4 types de grilles dans le projet Soldugri

- Construction des planches : protection partielle des grilles
- Récupération des grilles après mise en œuvre
- Caractérisation des grilles par des essais de traction

Structure de chaussées



Mise en œuvre des grilles partiellement protégées

EVALUATION DE L'ENDOMMAGEMENT DES GRILLES A LA MISE EN ŒUVRE

Trafic de chantier sur les grilles

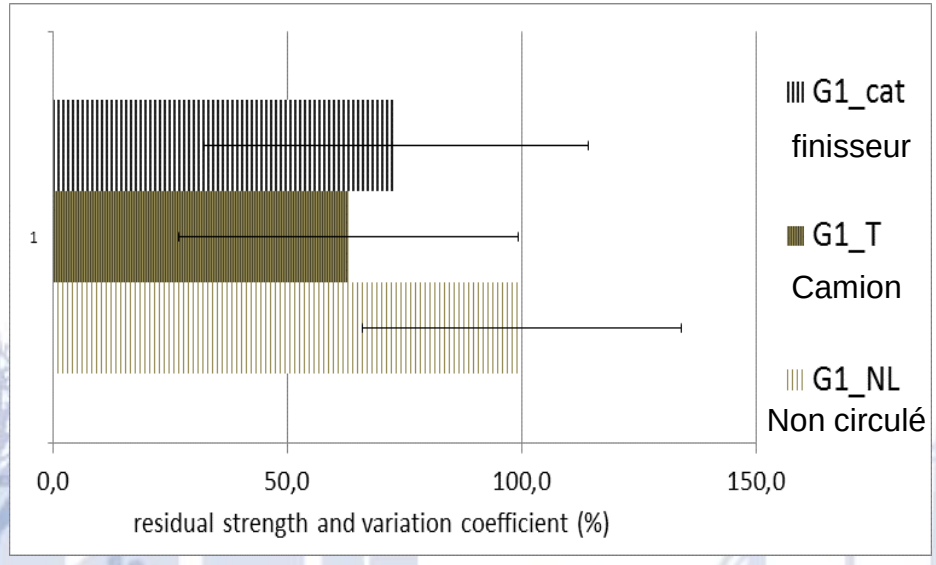
Récupération des grilles
après mise en œuvre (chauffage)

RÉSULTATS DES ESSAIS DE TRACTION SUR LES FILS, APRÈS MISE EN ŒUVRE

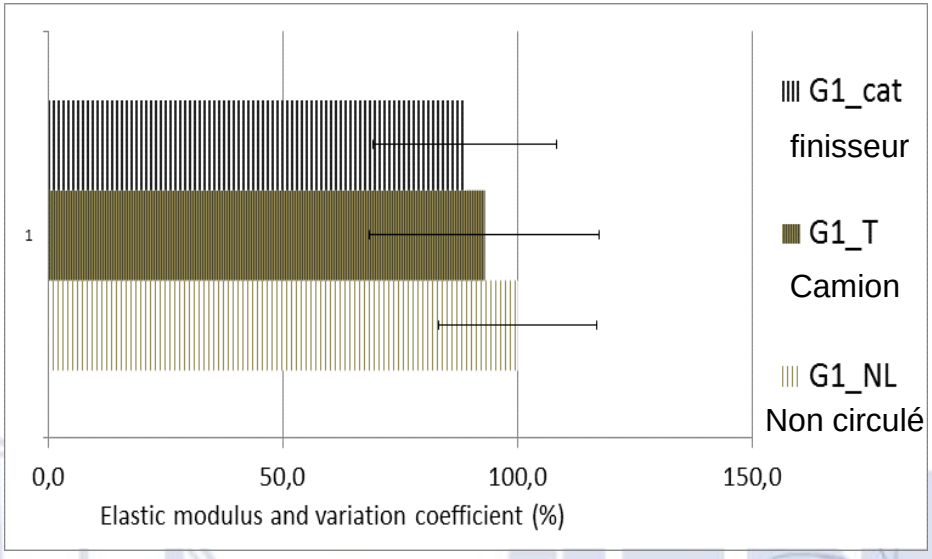
Essais avec 4 types de grilles : G1 , G2 résistance 20 kN pour 1% de déformation
G3, G4 : résistance 40 kN pour 1 % de déformation
Grilles prélevées dans 3 zones : non circulée, circulée par camion / finisseur

Exemple de résultats

Résistance en traction des fils – grille G1



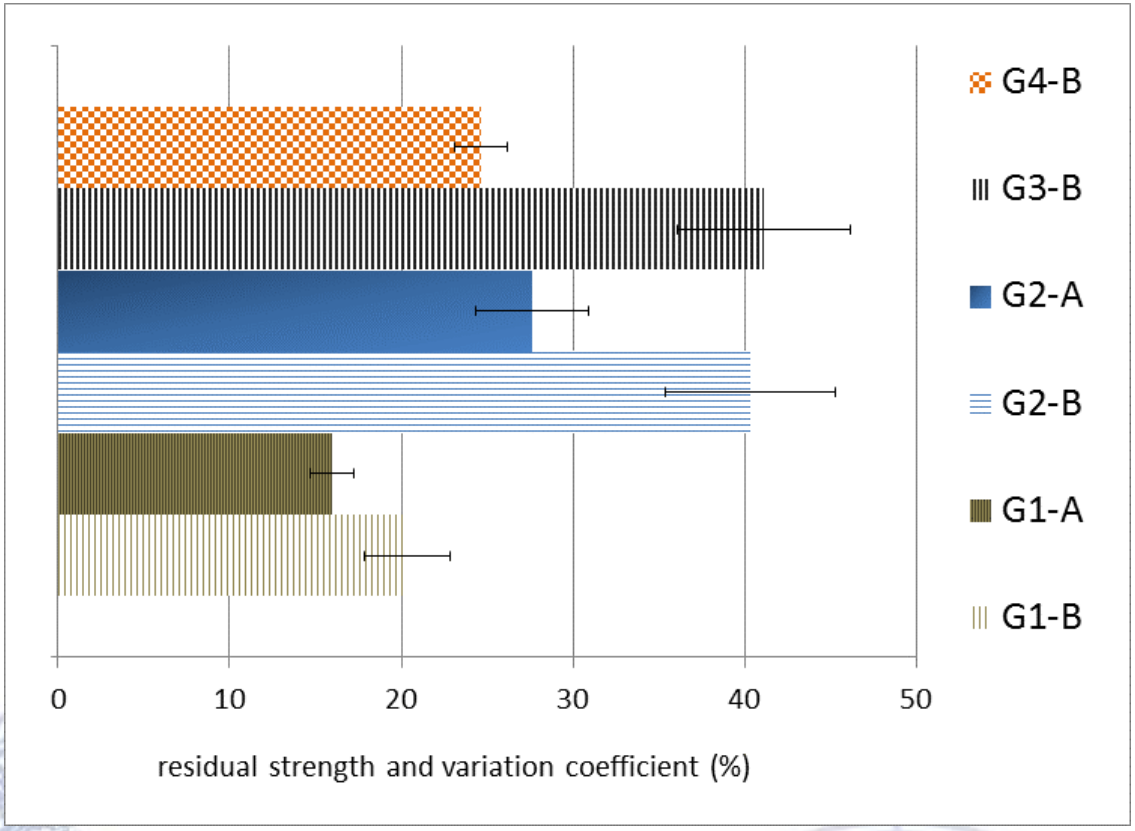
Module des fils – grille G1



Plus grand endommagement des grilles dans les zones circulées

RÉSULTATS DES ESSAIS DE TRACTION SUR LES FILS, APRÈS MISE EN ŒUVRE

Perte de résistance en traction des fils des différentes grilles



Perte de résistance différente suivant le type de grille

Perte plus forte pour la grille G1 (plus mince)

Perte plus forte sur support neuf que sur support fraisé !

Rôle de la résine de protection (différence G3 / G4)

A : mise en œuvre sur support neuf
B : mise en œuvre sur support fraisé

CONCLUSIONS

ESSAIS EN VRAIE GRANDEUR :

Amélioration significative des durées de vies des sections renforcées par grilles en fibre de verre

Chaussée neuve, avec grille en partie basse :

- Amélioration de la durée de vie en fatigue
- Pas d'effet significatif sur le niveau de déflection et l'orniérage

Renforcement de chaussée fissurée par couche mince :

- Retarde la remontée des fissures

La faisabilité d'une mesure des déformations de la grille dans une chaussée a été démontrée.

CONCLUSIONS

ETUDES EN LABORATOIRE

- Développement de méthodes d'essai et de modélisation du comportement en fatigue ⇨ perspectives pour le dimensionnement des chaussées renforcées
- Etude de l'endommagement des grilles à la mise en œuvre : mise en évidence d'un endommagement significatif, dû au compactage et au trafic de chantier

PERSPECTIVES

PROJET ANR SOLDUGRI (2015 – 2018)

Partenaires : INSA Strasbourg, IFSTTAR, Colas, 6D Solutions, Epsilon

Principales actions de recherche :

- **Endommagement des grilles à la mise en œuvre** – compréhension des facteurs influents : type de grille et résine d'enrobage, niveau de compactage, température, état du support. Simulation de l'endommagement en labo (essais d'indentation)
- **Etude du collage grilles / enrobés** par différents essais : wedge splitting, traction directe, cisaillement ..Evaluation de l'influence du type de grille, de la couche d'accrochage, de la température, de l'eau
- **Plan d'expérience d'essais de fatigue**
- **Expérimentation sur le manège de fatigue** (6 sections : 5 avec grilles, une section de référence non renforcée)
  Validation de la modélisation du comportement en fatigue.

Merci pour votre attention