



A Simpson Strong-Tie® Company

A large, abstract geometric pattern composed of overlapping squares and rectangles in various shades of gray, blue, and black, creating a 3D effect. The pattern is positioned on the left side of the page, extending from the top left towards the bottom right.

Renforcement de chaussées  
**Grilles d'armature S&P**  
pré-enrobées de bitume

# Table des matières

<b>1.</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>2.</b>	<b>Diverses couches bitumineuses</b>	<b>4</b>
<b>3.</b>	<b>Types de fibres pour les renforcements bitumineux</b>	<b>6</b>
<b>4.</b>	<b>L'asphalte armé, un matériau de construction composite</b>	<b>7</b>
<b>5.</b>	<b>Liaison des couches des revêtements bitumineux armés</b>	<b>8</b>
<b>6.</b>	<b>Couche d'accrochage sous l'armature de chaussées</b>	<b>10</b>
<b>7.</b>	<b>Essais fondamentaux de l'EMPA Dübendorf CH</b>	<b>11</b>
	«Efficacité des diverses couches bitumineuses»	
7.1	Essais de sollicitation sur la poutre travaillant en flexion à 4 points	11
7.2	Sollicitation dynamique permanente sous la charge de roue effective	14
<b>8.</b>	<b>Mesures de déflexion sur les couches de revêtement armées en fibres de carbone</b>	<b>16</b>
<b>9.</b>	<b>Examens NPC (Netherland Pavement Consultants)</b>	<b>18</b>
	«Armatures asphaltiques contre les fissures de fatigue»	
<b>10.</b>	<b>Examens du CRR (Centre de recherches routières Belgique)</b>	<b>20</b>
	«Armatures asphaltiques contre la réflexion thermique des fissures»	
<b>11.</b>	<b>Résumé</b>	<b>21</b>
<b>12.</b>	<b>Indication sur les ouvrages publiés</b>	<b>22</b>

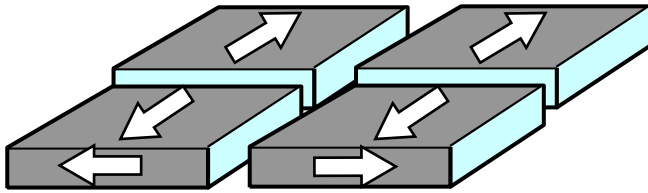
# 1. Introduction

Au cours des dernières décennies, l'intensité du trafic routier est en constant accroissement. De plus, les charges de trafics qui s'exercent sur la structure de la route ont augmentées. De ce fait, à l'heure actuelle, des travaux d'entretien intensifs sont nécessaires sur les routes. Les cycles de renouvellement ou d'assainissement se raccourcissent de plus en plus. Les travaux d'entretien et de renouvellement sur les routes entravent le flux du trafic. C'est la raison pour laquelle un revêtement de route durable devrait être élaboré dans le cadre de la remise en état afin que les futurs travaux d'entretien puissent être minimisés.

Les armatures de chaussées pré-enrobées de bitume S&P sont intégrées dans les revêtements bitumineux depuis 1996 avec succès pour augmenter leur durabilité. Les grilles S&P réduisent les fissures de fatigue ainsi que la formation de fissures thermiques. La grille S&P en fibres de carbone, *S&P Carbophalt G*, augmente en plus la valeur structurelle du revêtement bitumineux. La grille S&P en fibres de carbone correspond à la valeur structurelle d'une couche d'asphalte de 3 à 4 cm d'épaisseur. En agglomération, cela permet des variantes intéressantes d'assainissement. Un revêtement existant ancien peut, par exemple, être raboté sur une profondeur de 3 cm et être remis en état au moyen d'une armature en fibres de carbone ainsi que d'une couche de revêtement de 3 cm d'épaisseur. La valeur structurelle de la couche de revêtement armé équivaut à une couche d'asphalte non armé d'une épaisseur de 6 à 7 cm. Les bordures et les trottoirs ne sont pas affectés lors des travaux de fraisage sur une profondeur de 3 cm. Comme l'ancien niveau existant est conservé après la remise en état, il n'est pas nécessaire de rehausser les équipements routiers (grilles, écoulements,...). Les revêtements à couches minces armés en fibres de carbone sont ainsi des alternatives à la remise en état des revêtements bitumineux, et cela à un prix économique.

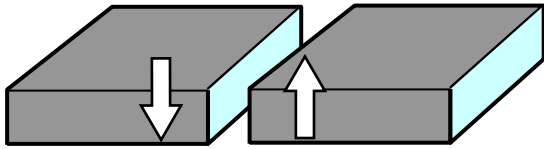
A titre de prévention contre des dégradations ultérieures, des mesures ciblées doivent être prises dans le cadre de la remise en état. Le bitume dans la nouvelle couche de revêtement peut être modifié afin de contrer les futures déformations plastiques. Le recours à un revêtement résistant à l'orniérage est sensé comme mesure de renforcement. Le recours à des éléments de traction (armatures de chaussées) permet de lutter contre les déformations structurelles, les fissures de fatigue ainsi que les réflexions des fissures provenant de l'ancienne couche de revêtement existante.

Lors du renouvellement d'une couche d'asphalte, il s'agit de tenir compte des mécanismes qui se produisent dans celle-ci (*graphique 1*) et d'appliquer un concept de remise en état correspondant.



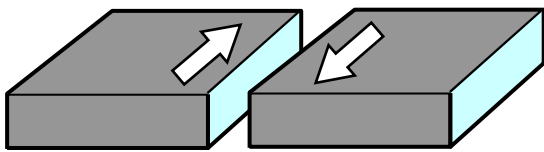
### Traction

⇒ Armature en direction longitudinale ou en direction transversale



### Forces de cisaillement verticales

⇒ Par exemple, avec des dalles en béton existantes assainies avec un revêtement bitumineux. La stabilisation locale des dalles en béton est exécutée par des injections en PU.



### Forces de cisaillement dans le sens transversal

⇒ Collage des anciennes fissures

Graphique 1 : Représentation des efforts mécaniques dans la couche d'asphalte ⇒ méthode de remise en état

Le graphique 1 montre que l'armature de chaussées doit être combinée avec d'autres méthodes de remise en état.

## 2. Diverses couches bitumineuses

Il convient en principe de différencier les couches **SAMI** (**S**tress **A**bsorbing **M**embran **I**nterlayer) et les armatures d'enrobé. Les deux systèmes sont souvent appliqués en combinaison.

**Couches SAMI** ⇒ Les fissures sont réduites grâce à la couche souple

Deux systèmes sont disponibles :

- non tissé SAMI
- enduit superficiel SAMI

**Armatures de chaussées** ⇒ Les contraintes sont absorbées par le renforcement

Les armatures de chaussées usuelles sont fabriquées à partir de différents type de fibre conditionnées en treillis ou en grilles. La structure grillagée est pré-enrobée de bitume ou enduite de caoutchouc au styrène butadiène (par exemple SBR) et est munie en partie d'une colle sur la face inférieure. Avec ce type usuel de treillis, on ne peut obtenir la liaison exigée des couches sur le chantier que si :

- l'ouverture des mailles du treillis atteint au minimum 15 – 20 mm
- un enduit superficiel SAMI supplémentaire est appliqué sur la couche de treillis.

**Le maintien de la structure des grilles S&P, pour le transport et la manutention, est assuré par un pré enrobage des fibres avec du bitume. Lors du déroulage et de la mise en place du treillis sur la couche d'asphalte, le maillage est dissout par la chaleur. Les faisceaux de fibres de carbone ou de fibres de verre sont désormais libres de se déplacer. Lors du compactage, la liberté de déplacement des faisceaux de fibres permettent aux gros grains du matériau d'apport de s'imbriquer avec l'ancien revêtement. Les faisceaux de fibres s'adaptent longitudinalement et transversalement aux inégalités du revêtement existant. Grâce à la technique S&P «Ouverture des nœuds sous l'influence de la chaleur», on obtient une liaison des couches selon Leutner > 12kN resp. > 15 kN (carotte de 150 mm) de la couche d'asphalte armée.**

### **Armature / Couches de non tissé**

Pour les systèmes combinés, un non tissé est mis en place en combinaison avec l'armature. Il est en principe possible de combiner la grille d'armature avec diverses variantes de non tissés :

- **non tissé « à fondre »** (grammage 20 - 80 g/m<sup>2</sup>)  
le non tissé à fondre est dissout, lors de la mise en place, sous l'effet de la chaleur. La fibre « à fondre » est utilisée comme aide lors de l'application de la grille.
- **non tissé de recouvrement** (grammage 20 - 80 g/m<sup>2</sup>)  
le non tissé de recouvrement sert d'aide pour la mise en place ; la capacité du non tissé à absorber le bitume est trop faible pour garantir une fonction de SAMI. Le non tissé est utilisé comme dispositif de distribution de la grille.
- **non tissé SAMI** (grammage 90 - 140 g/m<sup>2</sup>)  
la capacité à absorber le bitume d'un non tissé SAMI est de 0.8 à 1.3 kg/m<sup>2</sup> (quantité de bitume effective). Le non tissé imbibé de bitume agit comme couche intermédiaire qui absorbe les contraintes.

La pratique a montré qu'avec ces systèmes combinés, la liaison des couches exigée selon la méthode de test « Leutner » n'est souvent pas atteinte. On attire l'attention sur ce fait dans diverses publications. Une armature de chaussée ne pouvant développer son efficacité qu'avec une parfaite liaison, de tels produits ne sont plus utilisés dans de nombreux pays.

Lors de la mise en place de couches d'asphalte sur d'anciennes routes en béton, une étanchéité par SAMI ainsi qu'une armature sont exigés. Dans ces cas, il est recommandé de combiner une armature de chaussée pré-enrobée de bitume avec un enduit superficiel SAMI. Cette combinaison permet d'obtenir la liaison des couches exigée.

### 3. Types de fibres pour les renforcements bitumineux

Différents types de fibre sont disponibles pour renforcer des couches bitumineuses. Le tableau n° 1 donne une liste des fibres de renforcement possibles.

Fibre de renforcement	Module d'élasticité à la traction (N/mm <sup>2</sup> )	Allongement à la rupture (%)	Fraisage du revêtement placé au-dessus
Carbone (fibres C)	≥ 240'000	1.75	est possible
Aramide (fibres A)	~120'000	2.5	peut être problématique
Verre (fibres G)	≥ 73'000	≤ 4.5	est possible
Polyester (fibres PES)	~15'000	~ 12.0	peut être problématique
Acier (comparaison)	210'000	> 5.0	peut être problématique

Tableau 1

Le tableau n° 1 montre que les fibres de carbone et les fibres de verre conviennent pour la fabrication de renforcements de chaussées. Les deux fibres présentent un allongement important à la rupture et ont par conséquent un effet d'armature élevé. Lors du fraisage, les fibres se cassent en brins d'une longueur de 1cm à 8cm maximum. Le fonctionnement de la fraiseuse n'est donc pas altéré.

En ce qui concerne les armatures de chaussées pré-enrobées de bitume S&P, les fibres sont optimisées dans le profil selon les exigences (tableau n° 2).

Désignation des produits	Fibre de renforcement (sens longitudinal)	Fibre de renforcement (sens transversal)
S&P Carbophalt G	Fibres de verre (G)	Fibres de carbone (C)
S&P Glasphalt G	Fibres de verre (G)	Fibres de verre (G)

Tableau 2

Pour une comparaison réaliste des différents systèmes d'armature, il est impératif de comparer la force de traction pour un allongement identique dans tous les cas. Les forces de traction en fonction de l'allongement pour les armatures pré-bitumées S&P sont indiquées dans les fiches techniques.

Des contrôles de qualité périodiques sont effectués par l' EMPA à Dübendorf/CH, pour garantir les forces de traction données dans ces fiches techniques.

## 4. L'asphalte armé, un matériau de construction composite

Le matériau de construction composite le plus connu dans le génie civil est le béton armé. Dans le béton armé, l'élément de renforcement (l'acier) est noyé et ancré par une liaison rigide dans une matrice (le béton). Le tableau n° 3 compare les modules d'élasticité de ce matériau composite.

Module d'élasticité de la matrice	Module d'élasticité de l'élément de renforcement	Rapport Module d'élasticité Matrice ÷ Renforcement
Béton	Acier	Béton armé
25 – 30 kN/mm <sup>2</sup>	205 kN/mm <sup>2</sup>	~ 1 : 7

Tableau 3 : Rapport entre les modules d'élasticité de la matrice et de l'élément de renforcement dans le béton armé

Le module d'élasticité d'un treillis en fibres est dans tous les cas inférieur au module d'élasticité des fibres brutes (module théorique). Suite à la fabrication du treillis, les fibres ne sont pas disposées de manière optimale. En conséquence, le module d'élasticité théorique des fibres doit être diminué par un certain facteur de réduction (tableau n° 4) pour le dimensionnement dans le matériau composite «asphalte armé».

Facteur de réduction recommandé = 1.5

	Module d'élasticité	Module d'élasticité des treillis
Fibres de carbone (C)	240 kN/mm <sup>2</sup>	160 kN/mm <sup>2</sup>
Fibres de verre (G)	73 kN/mm <sup>2</sup>	49 kN/mm <sup>2</sup>
Fibres de polyester (PES)	15 kN/mm <sup>2</sup>	10 kN/mm <sup>2</sup>

Tableau 4 : Module d'élasticité réduit des fibres

Le tableau n° 5 fournit une comparaison d'un revêtement armé de différents types de fibres. Le module d'élasticité d'une couche d'asphalte est compris entre 3 et 15 kN/mm<sup>2</sup> selon la température ambiante.

Il est maintenant possible d'élaborer un tableau comparatif avec les modules d'élasticité à la traction réduits.

Module d'élasticité à la traction de la matrice	Module d'élasticité à la traction des treillis	Rapport Module d'élasticité Matrice ÷ Treillis de fibres
Revêtement bitumineux (6 kN/mm <sup>2</sup> )	Treillis de fibres de carbone (160 kN/mm <sup>2</sup> )	~ 1 : 26
	Treillis de fibres de verre (49 kN/mm <sup>2</sup> )	~ 1 : 8
	Treillis de fibres de polyester (10 kN/mm <sup>2</sup> )	~ 1 : 2

Tableau 5 : Rapport entre les modules d'élasticité à la traction de la matrice et du treillis de fibres dans l'asphalte armé

Le tableau ci-dessus montre clairement que le carbone et la fibre de verre sont efficaces pour le renforcement en traction. Le treillis de carbone augmente considérablement la résistance à la rupture de la couche d'asphalte. La condition

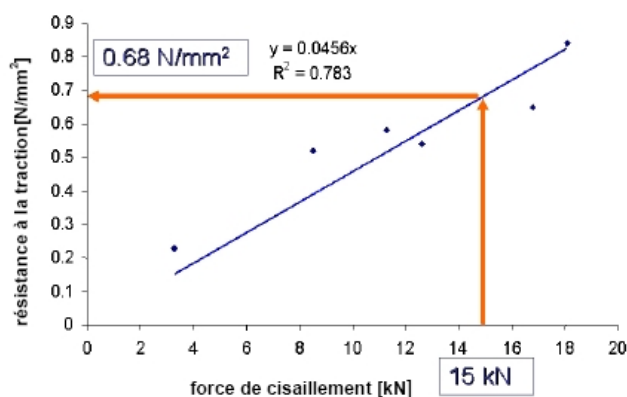
préalable est un composite et donc une liaison des couches irréprochable. La liaison doit être vérifiée par le forage et le test de carottes. Par contre, la fibre de polyester n'a qu'un faible effet de renforcement dans une chaussée en asphalte.

## 5. Liaison des couches des revêtements bitumineux armés

Une armature fonctionne seulement si celle-ci se trouve dans une matrice garantissant une parfaite liaison des couches. Les forces de traction provenant de l'armature sont introduites dans les couches d'asphalte placées au-dessus et en dessous par l'intermédiaire de la liaison des couches. Les différentes directives européennes et les normes de construction de route exigent une force de cisaillement  $> 12$  kN resp.  $> 15$  kN (méthode Leutner, carotte de  $\varnothing 150$  mm) (*photo 1*) entre l'ancienne et la nouvelle couche de revêtement bitumineux. Dans quelques pays, ce n'est pas la force de cisaillement qui est contrôlée, mais la résistance à la traction par adhérence. Le graphique 2 montre la relation entre la force de cisaillement (Leutner) et la résistance à la traction.



Photo 1 : Système de test selon Leutner



Graphique 2 : Liaison des couches / Résistance à la traction par adhérence (EMPA CH)

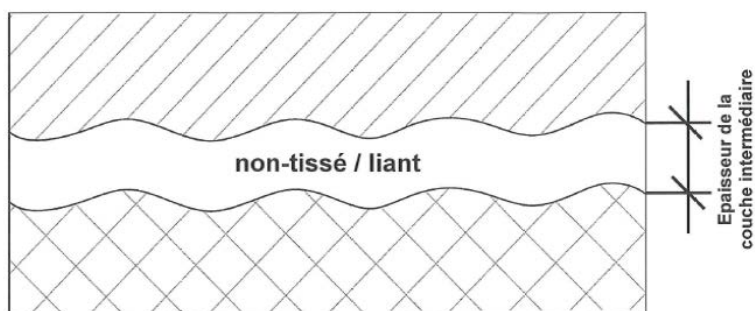
La liaison des couches est constituée en principe de deux composants:

1. Ancrage mécanique (par imbrication des grains)
2. Effet de collage

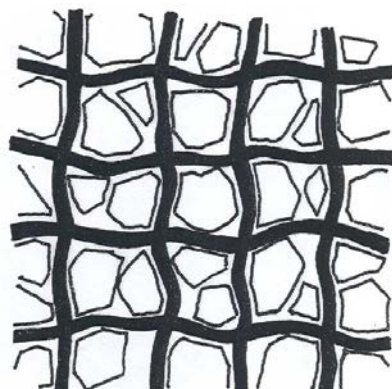
La couche de non tissé SAMI est une couche intermédiaire relativement épaisse entre les couches de revêtement. L'imbrication mécanique des grains du nouveau et de l'ancien revêtement est empêchée (*graphique 3*).



Par contre, avec les armatures de chaussées pré-bitumées S&P, il n'existe aucune couche intermédiaire. Les faisceaux de fibres s'ouvrent sous l'effet de la chaleur lors de la pose. Par conséquent, la pose dans les virages des routes est possible. La structure de la grille est à nouveau dissoute lors de la mise en place de la couche supérieure d'asphalte à une température aux alentours de 130 – 150 °C. Les faisceaux en fibres de carbone ou en fibres de verre sans possibilités de déplacement cèdent sous la pression des grains du revêtement supérieur. Pendant le compactage, les gros grains pénètrent entre les faisceaux mobiles des fibres des grilles S&P et s'imbriquent sans entrave dans la géométrie du support (*graphique 4*). Les faisceaux de fibres de l'armature S&P sont également mobiles dans le sens longitudinal. Ils s'adaptent au support en fonction des inégalités.



Graphique 3 : Couche de non tissé SAMI



Graphique 4 :  
Ouverture des faisceaux de fibres

Avec les treillis d'asphalte traditionnels, la structure fixe de la grille empêche la pénétration des gros grains du revêtement supérieur. En conséquence, les treillis traditionnels ont tendance à former des ondulations lors de la pose du revêtement. Avec les treillis traditionnels, la liaison des couches exigée est atteinte seulement si un enduit superficiel SAMI supplémentaire est appliqué sur le treillis. Les gravillons pré-enrobés (4 à 8 mm) du SAMI garantissent la liaison des composants et de ce fait la liaison mécanique des couches. Le tableau n° 6 montre que les treillis d'asphalte pré-enrobé de bitume S&P qui n'ont pas besoin d'être posés avec un SAMI sont très intéressants d'un point de vue économique.

Dans le cadre du projet de recherche ASTRA 2011/011\_OBF "utilisation d'intercalaires dans l'asphalte dans la gestion de la conservation des couches inférieure et supérieure", il a été démontrée par l'EMPA de Dübendorf-CH que les forces de cisaillement normalisées sont atteintes avec les produits pré-enrobés de bitume S&P Carbophalt G et Glasphalt G. Ces résultats sont également confirmés dans divers objets en cours d'exécution.

SAMI OB	Treillis traditionnel sans pré enrobage bitumineux	Non tissé SAMI
1.6 - 1.8 kg/m <sup>2</sup> polymère modifié Bitume épandu avec 12 - 15 l/m <sup>2</sup> gravillons 4/8 mm pré-enrobés	en PP, PES, verre	120 - 140 g/m <sup>2</sup> non-tissé polypropylène avec 1.5 - 1.7 kg émulsion de bitume 70%
Coûts y compris pose : 8.50 – 9.50 CHF / m <sup>2</sup>	Coûts y compris pose: 7.00 – 8.00 CHF / m <sup>2</sup>	Coûts y compris pose: 3.50 – 4.50 CHF / m <sup>2</sup>
<i>Liaison des couches: en ordre</i>	<i>Liaison des couches: réduite</i>	<i>Liaison des couches: réduite</i>

Combinaison SAMI OB + treillis traditionnel  
Coûts avec y compris pose: 15.50 – 17.50 CHF / m<sup>2</sup> ⇒ Liaison des couches: en ordre

Combinaison de non tissé SAMI + treillis traditionnel  
⇒ Liaison des couches: réduite

Treillis pré-enrobé de bitume S&P en fibres de verre  
Coûts y compris pose: 11.50 – 13.50 CHF / m<sup>2</sup>  
(Le prix est plus économique que celui d'un treillis traditionnel avec un SAMI OB)  
⇒ Liaison des couches: en ordre

Tableau 6 : Comparaison des coûts et des avantages des diverses armatures  
Indication : Envergure du projet : 10'000 m<sup>2</sup>

## 6. Couche d'accrochage sous l'armature de chaussées

Lors des **chaudes journées d'été**, il est nécessaire d'appliquer sous les armatures de chaussées pré-enrobées de bitume S&P une émulsion adhésive spéciale avec un point de ramollissement élevé. Le tableau n° 7 donne les valeurs caractéristiques techniques de cette émulsion.

Indice de pénétration (EN12591) > 0.2	Point de ramollissement (SN EN 1427) > 53 °C
---	--

Tableau 7 : caractéristiques techniques de l'émulsion

Une couche d'accrochage qui présente les caractéristiques prescrites (tableau n° 7) est appropriée lors de températures journalières élevées. Pour une application sur de grandes surfaces, l'émulsion sera idéalement chauffée et appliquée à une température de 50 à 60 °C.

**Les caractéristiques techniques de la couche d'accrochage seront obligatoirement indiquées dans la soumission.**

La quantité de la couche d'accrochage varie en fonction de la rugosité du fond et du type d'émulsion, 250 - 300 g/m<sup>2</sup> émulsion. La valeur maximale de 300 g/m<sup>2</sup> ne doit pas être dépassée pour une grille d'armature pré-enrobée de bitume. Le renfort ne peut être posé que sur une émulsion sèche (claquage). Si la grille est posée sur des endroits ombragés ou lors de **fraîches journées d'automne**, le problème du ramollissement de l'émulsion adhésive ne se pose pas.

## 7. Essais fondamentaux de l'EMPA Dübendorf CH «Efficacité des diverses couches bitumineuses»

### 7.1 Essais de sollicitation sur la poutre travaillant en flexion à 4 points

L'EMPA/CH a testé des poutres travaillant en flexion sur 4 points composées de couches d'enrobé armées différemment. Deux schémas de rupture typiques sont montrés ci-dessous.

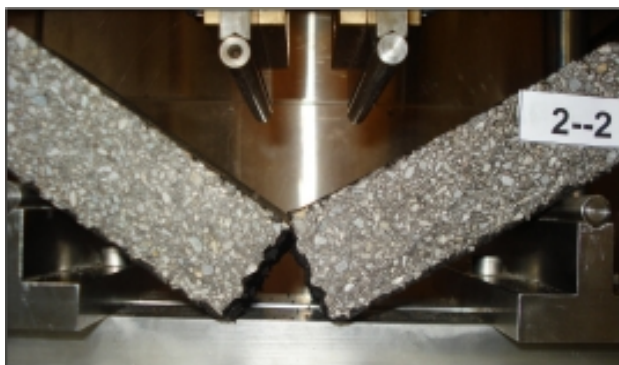


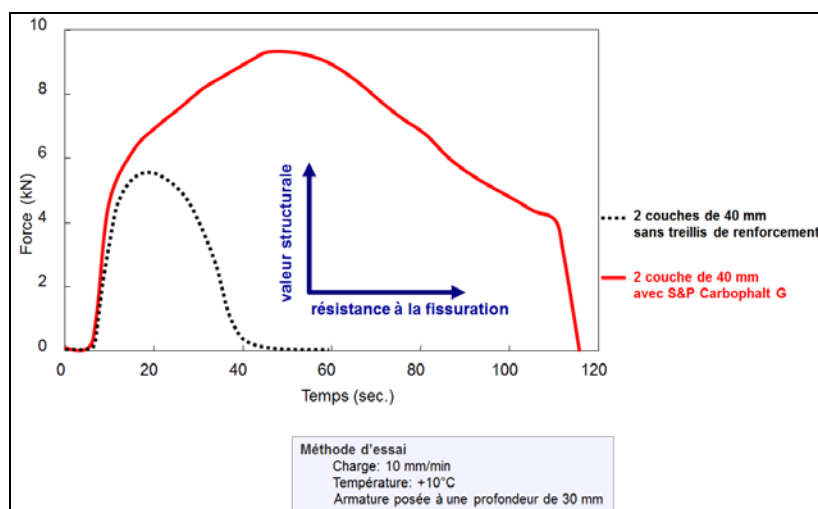
Photo 2 : Essai de référence sans couche



Photo 3 : Essai avec couche  
S&P Carbophalt G 200 kN

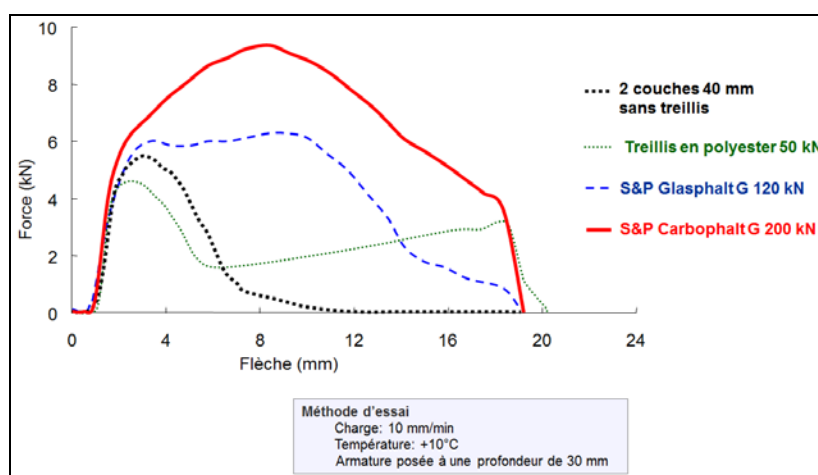
Alors que la couche d'enrobé non renforcée (*photo 2*) présente au milieu de l'éprouvette de référence une fissure qui mène à une rupture, la couche d'enrobé armée en fibres de carbone (*photo 3*) présente une répartition optimale des fissures due à une répartition optimale contraintes.

Le graphique n° 5 montre que la résistance à la rupture (valeur structurale) ainsi que la résistance aux fissures de la couche de revêtement armée sont augmentées considérablement par l'armature en fibres de carbone.



Graphique 5 : Influence de l'armature en fibres de carbone

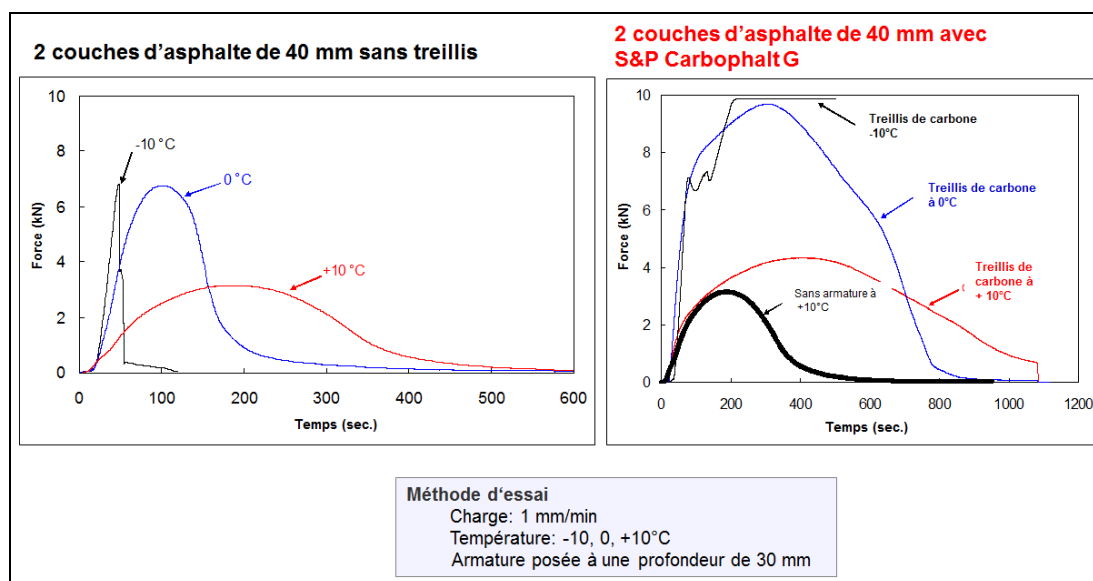
Dans le graphique n° 6, un treillis en polyester traditionnel a été comparé aux treillis en fibres de verre ou de carbone S&P pré-enrobé de bitume. Le treillis en polyester avec un module d'élasticité de  $\sim 10$  kN/mm<sup>2</sup> s'allonge pendant l'essai sous l'action de la force et n'est ainsi pas en mesure de reprendre les forces de traction agissant sur l'asphalte. La grille en fibre de verre pré-enrobée de bitume S&P Glasphalt G avec un module d'élasticité de  $\sim 49$  kN/mm<sup>2</sup> reprend les forces de traction qui s'exercent dans la couche d'asphalte et parvient ainsi à réduire les fissures dans la couche d'asphalte. L'armature en fibres de carbone S&P Carbophalt G permet en outre d'augmenter la charge à la rupture. La grille en fibres de carbone avec un module d'élasticité de  $\sim 160$  kN/mm<sup>2</sup> augmente la valeur structurale de la couche d'asphalte renforcée et contribue à une amélioration considérable de la résistance à la fissuration.



Graphique 6 : Armature aux fibres de carbone comparée avec d'autres couches

Au cours d'un autre essai, on a comparé l'influence de la température à  $-10$  °C,  $0$  °C et  $+10$  °C sur une couche d'asphalte non armée et sur une couche d'asphalte armée en fibres de carbone.

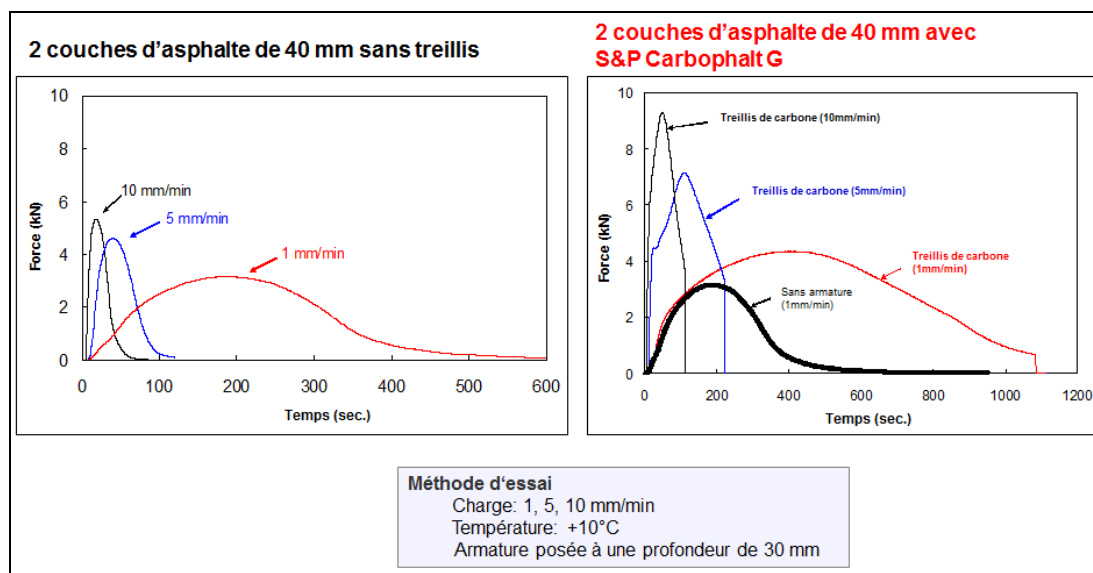
Les graphiques 7/8 montrent que l'armature en fibres de carbone S&P *Carbophalt G* augmente considérablement la résistance à la fissuration ainsi que la charge à la rupture dans toutes les plages de température (graphiques 7/8).



Graphiques 7/8 : Influence de la température

Lors d'un autre essai, on a comparé l'influence de la vitesse de chargement à 1 mm/min, 5 mm/min et 10 mm/min sur une couche d'asphalte non armée et sur une couche d'asphalte armée en fibres de carbone.

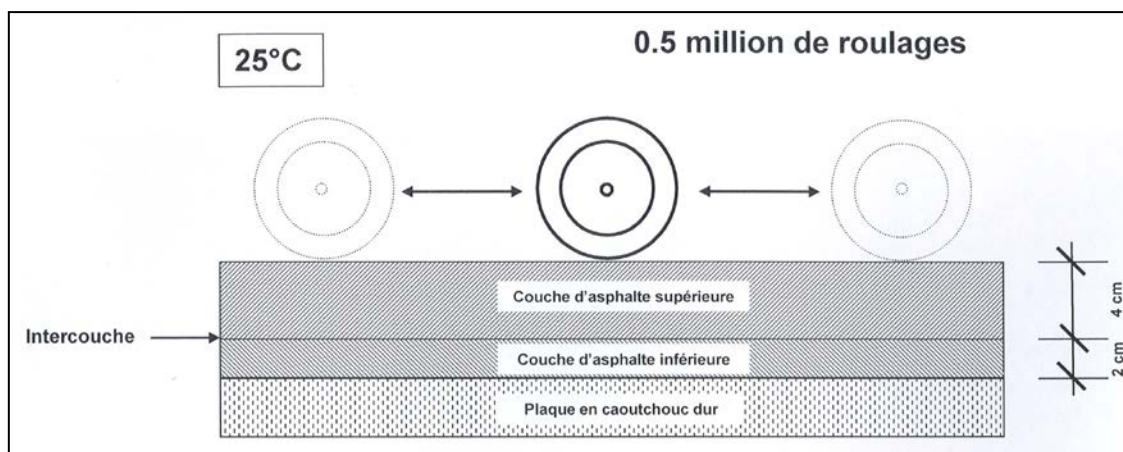
Les graphiques 9/10 montrent que l'armature en fibres de carbone S&P *Carbophalt G* augmente considérablement la résistance à la rupture et la résistance à la fissuration dans toutes les plages de vitesse de chargement.



Graphiques 9/10 : Influence de la vitesse de chargement

## 7.2 Sollicitation dynamique permanente sous la charge de roue effective

L'EMPA/CH a comparé des corps de revêtement bicouches sans et avec armature en fibres de carbone sous une sollicitation cyclique (*graphique n° 11 / tableau n° 10*). Pour simuler la souplesse du sol de fondation, les éprouvettes ont été posées sur un appui en caoutchouc et soumises à un 0.5 million de cycles (tours de roues) à une température de 25°C dans l'appareil d'orniérage.



Graphique 11 : Système de test pour les sollicitations cycliques

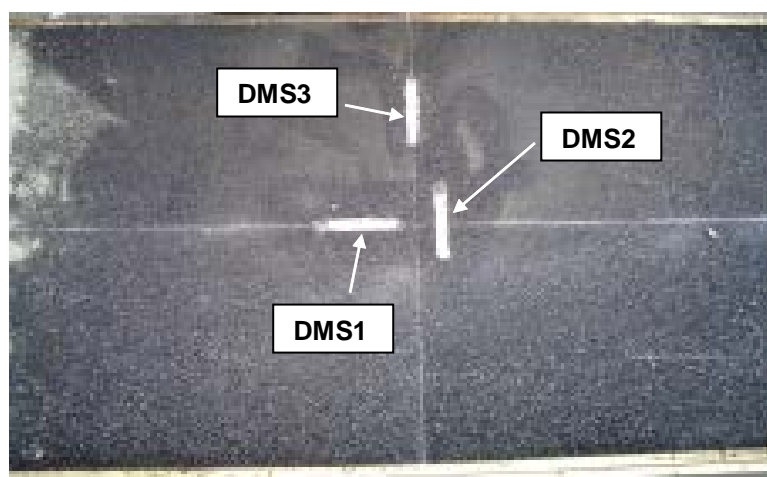


Photo 4 : Disposition des extensomètres à résistance

Echantillon K1 :	Revêtement bicouche sans armature
Echantillon K5 :	Revêtement bicouche S&P Carbophalt G posé à 4 cm de profondeur (couche de fond fraisée)

Tableau 8 : Vue d'ensemble des échantillons

Les échantillons (*tableau n° 8*) ont été pourvus sur leur face inférieure d'extensomètres à résistance en sens longitudinal et en sens transversal (*photo 4*). Les résultats des examens expérimentaux ont été modélisés par un calcul selon la méthode des éléments finis à l'EMPA/CH. La modélisation et les examens expérimentaux fournissent des résultats comparables.

Avec le renforcement en fibres de carbone **S&P Carbophalt G**, les contraintes perpendiculaires à la charge de la roue sur la face inférieure de la couche d'enrobé ont été réduites de 25 à 40 % selon les conditions.

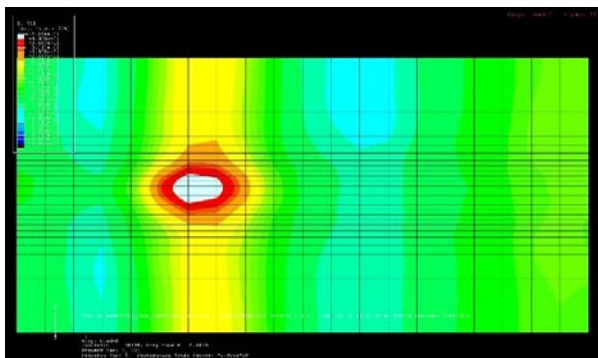


Image 5 : sans armature en fibres de carbone

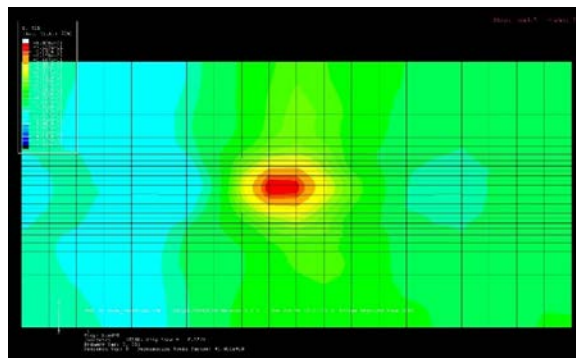
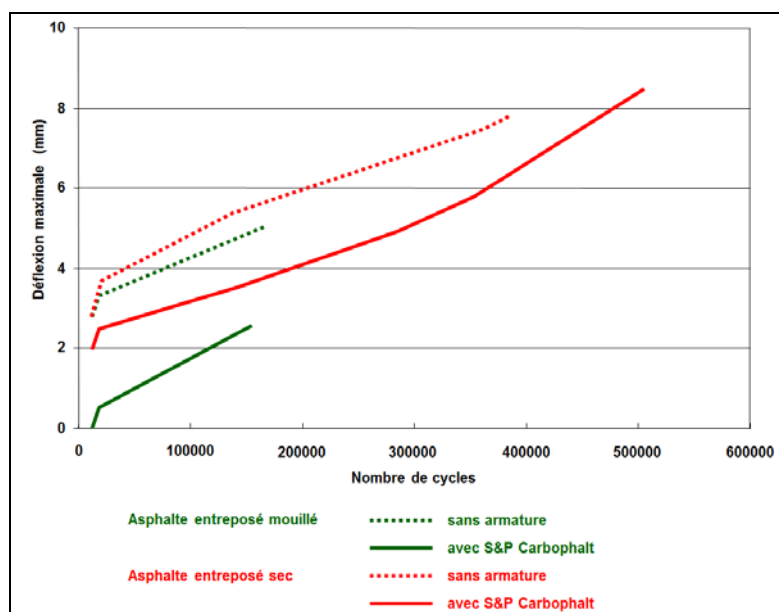


Image 6 : avec armature en fibres de carbone

Les images 5 et 6 montrent les contraintes de compression devant et derrière la charge exercée par la roue lors du franchissement ainsi que les contraintes de traction sous la charge exercée par la roue. Dans l'éprouvette de revêtement avec armature en fibres de carbone, les contraintes sont introduites dans l'armature qui les reprend. Les contraintes dans la couche d'asphalte sont ainsi réduites.



Graphique 12: Déflections

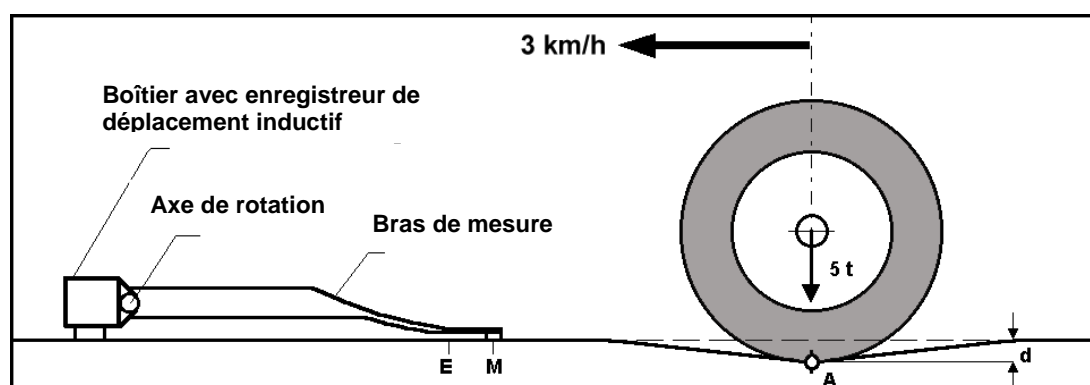
La figure 12 montre la courbe maximale pour les différentes éprouvettes testées, en fonction des cycles de charge. Cela montre que les déformations sont nettement inférieures avec S&P Carbophalt, aussi bien sur support sec que celui humide.

## 8. Mesures de déflexion sur les couches de revêtement armées en fibres de carbone

En automne 2003, la capacité portante de la route principale entre Andermatt et Hospental (en Suisse) a été testée avant et après la mise en place d'une couche d'asphalte de 4 cm d'AB16 armée avec de la fibre de carbone. La mesure a été effectuée à l'aide d'un déflectographe Lacroix avec une charge de 10 tonnes sur l'essieu arrière.



Photos 7/8 : Véhicule de mesures Lacroix avec poutre de mesure en position d'enregistrement



Graphique 13 : Principe de mesure du relevé dynamique de l'enfoncement

Des mesures de l'enfoncement ont été effectuées tous les 5,5 mètres sur toute la longueur du trajet, à savoir  $2 \times 1,9 = 3,8$  km. Le principe des mesures est représenté dans le graphique n° 13. Pour l'évaluation des résultats, la distance mesurée a été subdivisée en tronçons homogènes qui ont été reportés sur un graphique avec les indications de la déflexion caractéristique correspondante  $d_v$  (1/100 mm) (graphique n° 14).

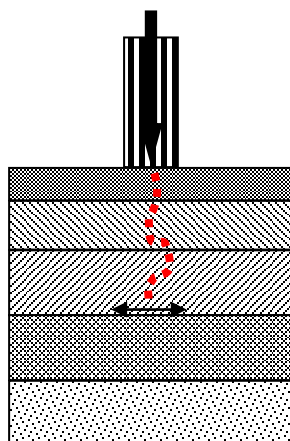




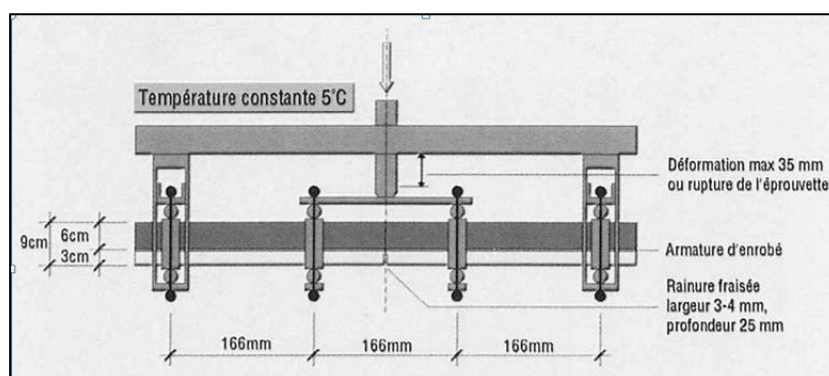
## 9. Examens NPC (Netherlands Pavement Consultants)

«Armatures pré-enrobées de bitume contre les fissures de fatigue»

Des fissures de fatigue se produisent dans un revêtement bitumineux sous l'effet des charges (charge de roue).



Graphique 16 : Formation classique de fissures de bas en haut



Graphique 17 : Système de test et dispositif de test NPC

La nature des fissures de fatigue dépend du type de pneu ainsi que de la pression de gonflage. La propagation classique des fissures a lieu du bas vers le haut (*graphique n° 16*). Les nouveaux types de pneu et les cycles de charges élevés ont cependant inversé le sens de pénétration des fissures. Chez NPC, on a comparé à l'occasion d'une série de tests l'effet des diverses couches bitumineuses à l'encontre des fissures de fatigue sur la poutre travaillant en flexion à 4 points.

Une éprouvette d'asphalte bicouche d'une épaisseur totale de 9 cm (3 cm + 6 cm) est sollicitée cycliquement sur une poutre travaillant en flexion à quatre points d'une longueur de 500 mm (*graphique n° 17*). Pendant le test, la température ambiante est maintenue constante à 5° C. La charge de roue des véhicules est simulée par une sollicitation cyclique sous une fréquence de 29.3 Hz dans la plage de force de 50 à 4'500 N. La plage de charge choisie simule les charges de roue typiquement rencontrées dans la construction des routes. La flèche de la poutre de test jusqu'à la rupture de l'éprouvette d'asphalte ou jusqu'à une déformation irréversible de 35 mm. Les flèches sont enregistrées en fonction du nombre de cycles.

La formation d'une fissure de fatigue suite à la sollicitation permanente est protocolée. Il est prescrit comme point de départ de la fissure de fatigue une coupe fraisée dans la couche de revêtement se trouvant en dessous.

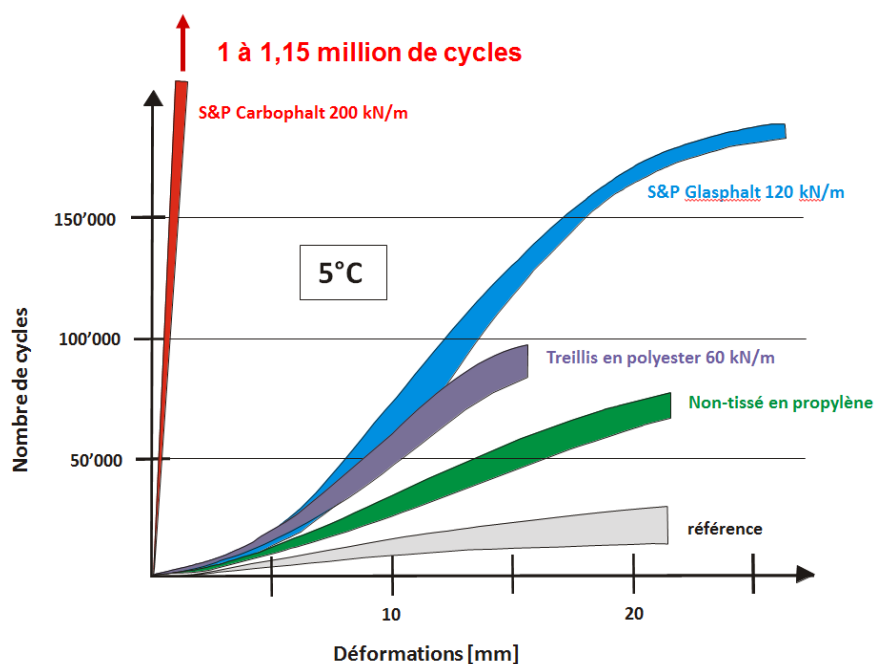
Pendant l'essai, on a comparé l'éprouvette d'asphalte bicouche non armée à des éprouvettes d'asphalte d'une épaisseur identique mais armées différemment (*tableau n°12*). Les armatures de chaussée ainsi que les couches de non tissé ont été posées entre les deux couches de revêtement conformément aux instructions des fabricants.

1	Echantillon de référence	Sans armature de revêtement
2	Non tissé de revêtement	Non tissé en polypropylène 140 g/m <sup>2</sup>
3	Treillis PES	Treillis de polyester 60 kN/m (en sens longitudinal et en sens transversal)
4	Treillis en fibres de verre pré-enrobé de bitume S&P Glasphalt G	Treillis en fibres de verre 120/120 kN/m (en sens longitudinal et en sens transversal)
5	Treillis en fibres de verre et de carbone pré-enrobé de bitume S&P Carbophalt G	Fibres de verre 120 kN/m (en sens longitudinal) Fibres de carbone 200 kN/m (en sens transversal)

Tableau 12 : Vue d'ensemble des éprouvettes de test

### Résultats des essais:

L'essai démontre l'effet retardateur de l'armature de chaussée sur la propagation de la fissure (*graphique n° 18*). La propagation de la fissure à travers la nouvelle couche d'asphalte aboutit finalement soit à des déformations irréversibles soit à la rupture de l'éprouvette d'asphalte. Le résultat fournit ainsi des renseignements sur la résistance à la fatigue d'un revêtement d'asphalte soumis à une charge cyclique.



Graphique 18 : Vue d'ensemble des résultats des essais

Les éprouvettes d'asphalte armées de S&P Carbophalt G ont fait la preuve d'excellentes propriétés contre une éventuelle propagation des fissures sous une charge cyclique.

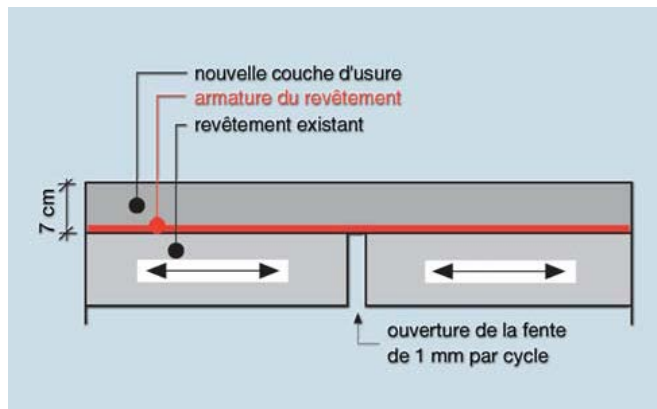
## 10. Examens du CRR (Centre de recherches routières, Belgique)

«Armatures pour asphalte contre la réflexion thermique des fissures»

En raison des variations quotidiennes de température, les fissures existantes dans d'anciennes couches de revêtement se transmettent à travers la nouvelle couche d'asphalte pendant les mois d'hiver. Avec le renforcement S&P les contraintes sont reprises par la grille, minimisant ainsi les fissures (*photo 9*).

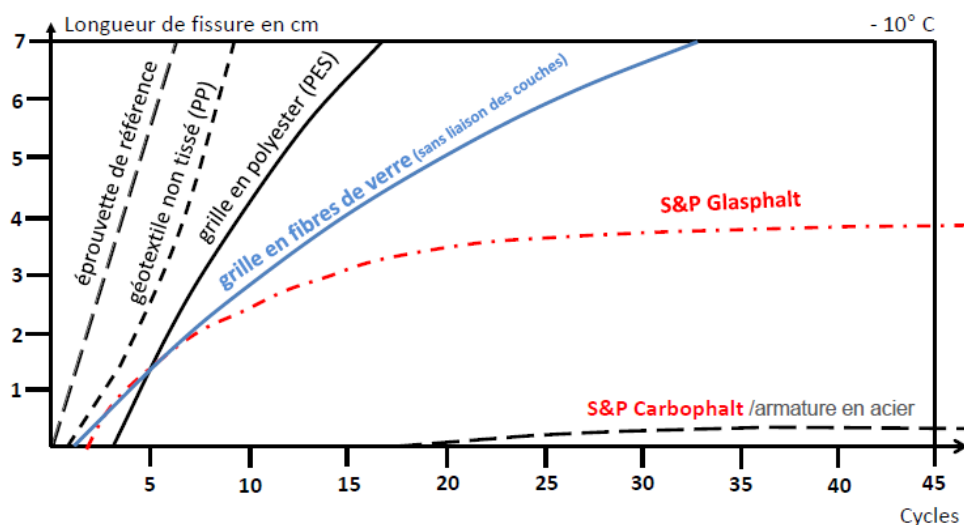


Photo 9 : Mise en place de S&P Carbophalt G



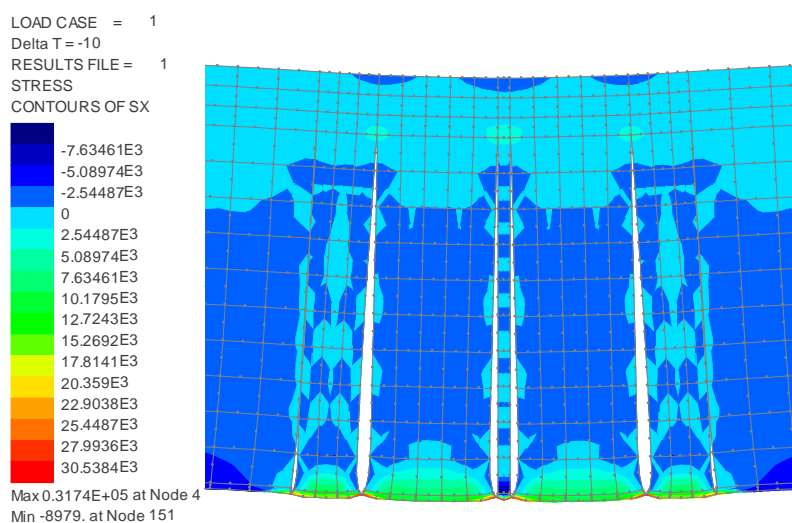
Graphique 19 : Système d'essai avec le dispositif de test du Centre de recherches routières CRR, Belgique

En Belgique, le Centre de recherches routières CRR a testé différentes armatures pour asphalte. Le graphique n° 19 montre le dispositif d'essai. Une nouvelle couche de 7 cm d'épaisseur est posée sur une ancienne couche de revêtement fissurée (la fissure est simulée par fraisage). Différentes armatures de chaussées ont été incorporées entre l'ancienne et la nouvelle couche d'asphalte. L'ouverture de la fissure sous l'action des fluctuations de température a été simulée par un liquide alternativement congelé et décongelé. Les résultats (graphique n°20) montrent qu'il est possible d'éviter une réflexion des fissures avec les grilles S&P S&P Glasphalt G et S&P Carbophalt G incorporés à la liaison des couches.



Graphique 20 : Résultats des essais au Centre de recherches routières CRR, Belgique

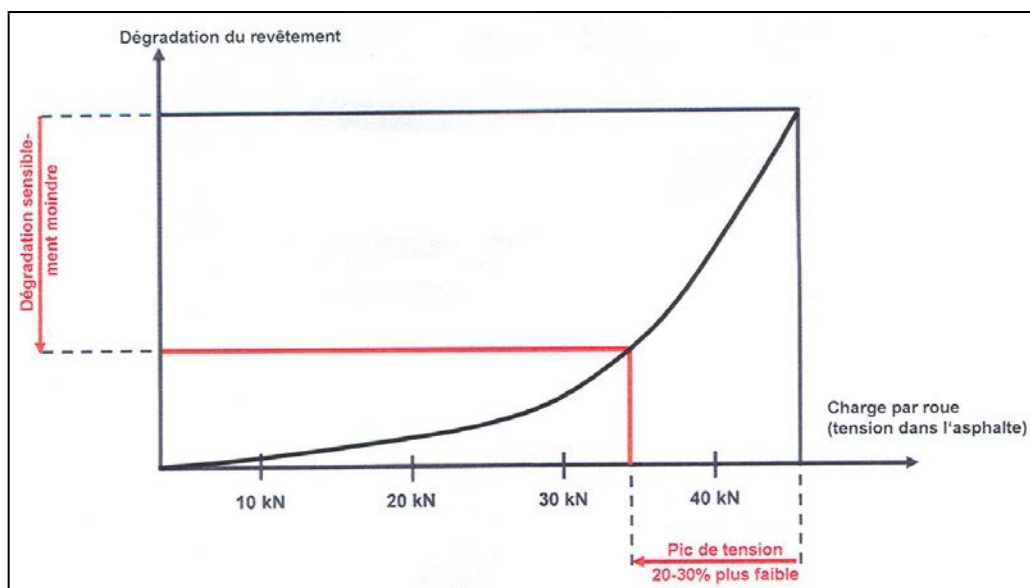
Le système d'essai a été modélisé selon la méthode des éléments finis à l'aide du programme Lusas. La modélisation sur le système non armé confirme que les contraintes dans la couche d'asphalte peuvent monter jusqu'à 46.8 N/mm<sup>2</sup>. L'asphalte ne peut toutefois absorber qu'une contrainte maximale de 3.5 N/mm<sup>2</sup>. Par conséquent, dans la couche de revêtement non armée la fissure se réfléchit jusqu'à la surface. La modélisation sur le système armé (graphique n° 21) révèle qu'un léger décollement se produit sur le bord de la fissure. Il est ainsi possible d'introduire les forces dans l'armature. Dans le modèle armé, les contraintes dans l'asphalte de recouvrement étaient inférieures à 3.5 N/mm<sup>2</sup>. Il est par conséquent possible de bloquer la réflexion des fissures. La modélisation montre que la réduction des contraintes dans la nouvelle couche d'asphalte a pu être réduite de **25 à 40 %** à une température d'essai de - 10 °C grâce à l'armature en fibres de carbone.



*Graphique 21 : Contraintes résultantes dans l'enrobé de recouvrement du modèle à six fissures verticales (longueur des fissures 0.06 m) en raison de la dilatation de l'eau incluse dans la fissure.*

## 11. Résumé

L'armature pré-enrobée de bitume en fibres de carbone induit dans toutes les plages de température et de vitesse de charge testées une réduction de l'allongement et de ce fait des contraintes dans la couche d'asphalte d'environ 30%. Les armatures en fibres de carbone, tout comme les armatures en fibres de verre, sont utilisées dans la couche d'asphalte pour réduire la fissuration. Les deux types d'armature accroissent la longévité. La couche de fibres de carbone sert également à améliorer la qualité de la structure.



Graphique 22 : Influence de la charge de la roue sur la dégradation du revêtement

Le graphique n° 22 montre que la destruction du revêtement bitumineux augmente exponentiellement avec la sollicitation provenant des roues. L'armature en fibres de carbone réduit les pics de contraintes provoqués par les charges élevées des roues qui s'exercent sur la couche d'asphalte. La destruction du revêtement est ainsi considérablement réduite. Cela se traduit par une plus grande longévité, par des cycles de renouvellement plus longs ainsi que par des travaux d'entretien moins fréquents. La réduction des embouteillages dans le trafic représente en outre des avantages pour l'économie nationale. Compte tenu de tous ces aspects, les couches d'asphalte armées présentent donc des avantages considérables au niveau du coût.

## 12. Indications sur les ouvrages publiés

- Divers rapports de test EMPA, Dübendorf, Suisse
- Rapport d'examens Netherlands Pavement Consultants bv, NPC N° 018463
- Rapport de test Centre de recherches routières Bruxelles Belgique, EP 61530
- Rapport de test Consultest, Ohringen Suisse, 1119-02
- Rapport de test SACR, Automne 2003
- Modélisation Dr. Andrew Faeh, Bureau d'études, Heierli AG, Zurich, Suisse