



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Formulation et comportement des enrobés de surface macrorugueux

Rezeptierung und Verhalten von Rauasphalt

**Mix design and performance of macrorough surface
asphalt**

**École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
Laboratoire des voies de circulation (LAVOC)**

**Prof. A.-G. Dumont, professeur EPF
B. Schobinger, Ing. Civil EPF
M.-A. Fénart, Ing. Civil EPF
P. Rychen, Dr. ès sc EPF
N. Bueche, Dr. ès sc EPF
M. Pittet, chef de laboratoire**

**Mandat de recherche VSS 2009/502 sur demande de l'Association suisse
des professionnels de la route et des transports (VSS)**

Juin 2016

1565

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Formulation et comportement des enrobés de surface macrorugueux

Rezeptierung und Verhalten von Rauasphalt

**Mix design and performance of macrorough surface
asphalt**

**École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
Laboratoire des voies de circulation (LAVOC)**

**Prof. A.-G. Dumont, professeur EPF
B. Schobinger, Ing. Civil EPF
M.-A. Fénart, Ing. Civil EPF
P. Rychen, Dr. ès sc EPF
N. Bueche, Dr. ès sc EPF
M. Pittet, chef de laboratoire**

**Mandat de recherche VSS 2009/502 sur demande de l'Association suisse
des professionnels de la route et des transports (VSS)**

Impressum

Instance de recherche et équipe de projet

Direction du projet

André-Gilles Dumont, Laboratoire des Voies de Circulation (LAVOC), EPFL

Membres

B. Schobinger

M.-A. Féart

P. Rychen

N. Bueche

M. Pittet

Commission d'experts responsable

Commission d'experts EK 5.03 : Dimensionnement

Commission de suivi

Président

Thomas Arn

Membres

Erhard Kälin

Martin Horat

Auteur de la demande

Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

Source

Le présent document est téléchargeable gratuitement sur <http://www.mobilityplatform.ch>.

Table des matières

Impressum	4
Résumé	7
Zusammenfassung	9
Summary	11
1 Introduction	13
1.1 Contexte	13
1.2 Problématique	14
1.3 Objectifs	14
1.4 Déroulement de la recherche	14
2 Etat des connaissances	17
2.1 Situation et caractéristiques des enrobés macrorugueux (AC MR)	17
2.1.1 Les enrobés macrorugueux	17
2.1.2 Propriétés des macrorugueux	19
2.1.3 Caractéristiques des enrobés macrorugueux	19
2.2 Aspects normatifs des enrobés macrorugueux	21
2.2.1 Caractéristiques des composants	21
2.2.2 Granulométrie	23
2.2.3 Teneur en vides	24
2.3 Enrobés comparables aux macrorugueux	26
2.3.1 Enrobé semi-dense (SDA)	27
2.3.2 Splittmastixasphalt (SMA)	27
2.3.3 Enrobé drainant (PA)	28
2.3.4 Béton bitumineux mince (BBM) ou ultra mince (BBTM)	28
2.3.5 Béton bitumineux semi-grenu (BBSG)	28
3 Utilisation des enrobés macrorugueux	29
3.1 Analyse statistique du réseau des routes nationales suisses	29
3.1.1 Utilisation des enrobés macrorugueux sur le réseau des routes nationales suisses	30
3.1.2 Etat des chaussées des routes nationales en enrobé macrorugueux	31
3.1.3 Synthèses de l'analyse statistique	34
3.2 Stratégie de l'Office fédéral des routes	35
3.3 Retour de la consultation, Inventaire des tronçons et appréciation	35
3.4 Commentaires finaux	36
3.4.1 Enseignement relatif à l'emploi des enrobés macrorugueux	36
3.4.2 Questions ouvertes	37
4 Essais en vraie grandeur	39
4.1 Objectifs des essais en vraie grandeur	39
4.2 Choix des matériaux	39
4.2.1 Sélection et provenances des matériaux mis en place	39
4.2.2 Définition des champs d'essais	40
4.3 Dimensionnement des structures de chaussées	42
4.3.1 Caractéristiques du trafic, des matériaux et hypothèses de base	42
4.3.2 Calcul selon une méthode rationnelle (méthode française)	43
4.3.3 Synthèse des structures retenues	46
4.4 Instrumentation et déroulement des essais en vraie grandeur	46
4.4.1 Construction des structures	46
4.4.2 Instrumentation des structures de chaussées	47
4.4.3 Simulateur de trafic lourd	50
4.4.4 Contrôle de la température	51
4.4.5 Programme de chargement pour les essais en vraie grandeur	51

4.5	Portance de la fondation	52
4.6	Contrôle des épaisseurs de pose	53
4.7	Analyse des enrobés AC MR.....	53
4.7.1	Contrôle de fourniture	53
4.7.2	Essais étendus sur granulats et enrobés.....	57
5	Résultats des essais en vraie grandeur	63
5.1	Analyse du comportement fonctionnel.....	63
5.1.1	Qualité antidérapante.....	63
5.1.2	Uni transversal (orniérage)	63
5.2	Analyse du comportement structurel	65
5.2.1	Essai d'arrachement	65
5.2.2	Détection d'eau dans la chaussée.....	66
5.2.3	Backcalculation et FWD.....	66
5.2.4	Réponses des structures sous sollicitations	68
6	Détermination du coefficient d'équivalence "a"	79
6.1	Contexte et but de la démarche.....	79
6.2	Méthodologie et hypothèses pour la détermination du coefficient d'équivalence "a"	79
6.3	Résultats	80
6.4	Commentaires et recommandations	81
7	Formulation et optimisation des performances	83
7.1	Introduction	83
7.2	Résultats des études de formulation utilisées	84
7.2.1	Etude portant sur les enrobés semi-denses	84
7.2.2	Analyse portant sur l'AC MR 8 ₈	84
7.3	Comparaisons de ces deux enrobés	85
7.4	Commentaires.....	86
8	Conclusions et recommandations	87
8.1	Conclusions générales.....	87
8.2	Recommandations	87
8.2.1	Matériaux	87
8.2.2	Formulation	88
8.2.3	Coefficient d'équivalence	88
	Annexes	89
	Glossaire.....	147
	Bibliographie	149
	Clôture du projet	151
	Index des rapports de recherche en matière de route	155

Résumé

Depuis plus de 20 ans, les enrobés macrorugueux (AC MR) sont largement utilisés pour les couches de roulement des chaussées routières en raison notamment de leurs bonnes performances mécaniques, de la capacité d'évacuation des eaux de chaussée et de leur contribution à la diminution des nuisances liées au bruit.

L'évolution de la normalisation suisse relative aux enrobés macrorugueux a conduit, durant la période 2008-2013, à une augmentation sensible de la teneur en vides Marshall de ces enrobés (augmentation de 3-4% des valeurs limites). Cette augmentation de la teneur en vides n'est *a priori* pas sans conséquences sur les caractéristiques mécaniques et la durabilité de ces enrobés. Le présent projet a donc pour objectif d'analyser les impacts de cette modification de teneur en vides sur le comportement structurel et fonctionnel des enrobés ainsi que sur l'évolution des caractéristiques de surfaces des enrobés macrorugueux. Pour cela, une étude approfondie de l'expérience relative aux enrobés macrorugueux a tout d'abord été menée puis les aspects relatifs au comportement mécanique ont été évalués au moyen d'essais en vraie grandeur dans la halle fosse du LAVOC.

Une enquête auprès d'administrations routières a été réalisée par le LAVOC en 2011. Les différentes informations récoltées ont permis de mettre en évidence quelques problématiques spécifiques comme le fait que ces enrobés ne sont pas (peu) adaptés aux chaussées à forte déclivité ou sinuosité (résistance limitée aux efforts tangentiels) ainsi que le risque de perte d'absorption phonique dans le cas où le colmatage des pores augmente. Le peu de connaissances relatives aux propriétés mécaniques des enrobés macrorugueux sur le long terme a également pu être relevé.

Une analyse approfondie des informations issues de la base de donnée MISTRA TRASSEE montre que les enrobés macrorugueux représentent 24% des couches de roulement des routes nationales ; les proportions d'enrobés AC MR 11 et ACM MR 8 étant globalement comparables. Au niveau de l'évolution moyenne des indices d'état, la modification de normalisation n'a vraisemblablement pas engendré de changements significatifs que ce soit pour la planéité longitudinale, transversale ou la glissance. Un recul plus important et des analyses approfondies seraient cependant nécessaires afin de mieux évaluer les éventuelles conséquences de l'augmentation de la teneur en vides dans les enrobés AC MR.

Des essais en vraie grandeur ont finalement été réalisés dans la halle fosse du LAVOC où trois champs d'essais se distinguant par la teneur en vides de la couche de roulement (cible 8% ou 13% vides en place) ainsi que le type de matériaux pour la couche de fondation (AC T ou AC EME) ont été construits. Les formulations utilisées pour les enrobés des planches d'essais sont la recette standard de la centrale d'enrobage, à l'exception de la couche de roulement en enrobé macrorugueux comportant 13% de vides pour laquelle une étude de formulation analytique a été préalablement réalisée.

Différents essais de contrôle et évaluation des performances ont été menés en laboratoire. Les essais mettent notamment en évidence une teneur en vides Marshall sensiblement plus élevée que la recette cible ; tendances confirmées par la réalisation d'essais à la presse à cisaillement giratoire (PCG). Les matériaux finalement testés comportent donc une gamme de teneurs en vides plus proche de 15% environ, cette différence pouvant être expliquée notamment par une variation dans la courbe granulométrique. Les essais mécaniques de sensibilité à l'eau (ITSR), adhésion entre les couches (Leutner) et module de rigidité (module complexe) indiquent des résultats conformes à la normalisation ou aux recommandations techniques. Les enrobés testés présentent cependant une susceptibilité accrue à l'orniérage (non conforme à la normalisation SN).

Les différentes planches d'essais ont été munies de capteurs de déformations et de températures à diverses profondeurs de la chaussée. La susceptibilité à l'orniérage des

trois champs étudiés avec des chargements à températures élevées (+35°C) est là aussi apparue comme relativement élevée. Les analyses de qualité antidérapante des sections test fournissant des résultats conformes aux attentes. L'analyse structurelle des déformations enregistrées dans la chaussée faite en fonction de différents cas de charge, de vitesses de sollicitation ou de températures fournit des résultats cohérents. L'analyse des déformations verticales au sommet de la chaussée ne met pas en évidence de différence significative entre les enrobés macrorugueux testés.

Sur la base des essais menés à la halle fosse, différentes modélisations ont été effectuées à l'aide d'une méthode de calcul multicouche (méthode rationnelle de dimensionnement des chaussées, France) dans le but de déterminer le coefficient d'équivalence "a" des enrobés macrorugueux testés. Les résultats indiquent que le coefficient d'équivalence des AC MR varie entre 3.65 et 4.00 selon les cas. Il est utile de relever qu'une différence de coefficient d'équivalence de 0.35 correspond approximativement à une variation de 5 mm de l'épaisseur de la chaussée. Compte tenu des différentes observations, il est finalement recommandé de conserver la valeur actuelle de coefficient d'équivalence pour matériau neuf soit une valeur de 4.

Zusammenfassung

Seit mehr als 20 Jahren kommt Rauasphalt (AC MR) insbesondere aufgrund seiner guten mechanischen Eigenschaften, seiner Wasserableitungsfähigkeit und seines Beitrags zur Verringerung der Lärmbelastung bevorzugt als Fahrbahnbelag zum Einsatz.

Die Entwicklung der Schweizer Norm in Bezug auf AC MR hat während der Jahre 2008-2013 zu einer deutlichen Erhöhung des Anteils der Marshall-Poren in diesem Belagstyp geführt (Anstieg der Schwellenwerte um 3-4%). Dieser Anstieg ist a priori nicht ohne Folgen für die mechanischen Eigenschaften und die Haltbarkeit der Beläge. Ziel des vorliegenden Projekts ist es daher, die Auswirkungen dieser Änderung des Porengehalts auf das Struktur- und das funktionale Verhalten sowie auf die Entwicklung der Oberflächenmerkmale des Rauasphalts zu analysieren. Zu diesem Zweck wurden zunächst die bisherigen Erfahrungen mit diesem Belagstyp eingehend studiert und anschliessend das mechanische Verhalten in der sogenannten „Halle fosse“ des EPFL-Labors LAVOC durch Versuche in Originalgrösse untersucht.

Im Jahr 2011 führte das LAVOC zuerst eine breite Umfrage bei den Strassenverwaltungen durch. Anhand der verschiedenen gesammelten Informationen konnten einige Probleme identifiziert werden, beispielsweise die schlechte Eignung dieses Belagstyps für Strassen mit grosser Hangneigung oder Schlängelung (geringer Widerstand gegen tangentielle Belastung) oder der mit zunehmendem Versiegelungsgrad der Poren einhergehende Verlust der Schallabsorption. Ausserdem wurde deutlich, dass die vorhandenen Kenntnisse über die langfristigen mechanischen Eigenschaften der Rauasphalte lückenhaft sind.

Eine detaillierte Untersuchung der in der Datenbank MISTRA TRASSEE gespeicherten Informationen zeigte, dass 24% der Nationalstrassen eine Deckschicht aus Rauasphalt aufweisen, wobei die Anteile an AC MR 11 und AC MR 8 im Grossen und Ganzen vergleichbar sind. Die Normänderung hat voraussichtlich zu keiner nennenswerten Veränderung in der durchschnittlichen Entwicklung der Zustandsindizes geführt, weder bei der Griffigkeit noch bei der Längs- und Querebenheit. Eine breiter angelegte und ausführlichere Studie wäre jedoch notwendig, um die eventuellen Konsequenzen der Erhöhung des Porengehaltes in Rauasphalten besser beurteilen zu können.

Schliesslich wurde in der „Halle fosse“ des LAVOC ein Versuch im Massstab 1:1 durchgeführt. Für das Experiment wurden drei Testfelder erstellt, die sich im jeweiligen Porengehalt des Belags (Zielwert 8% bzw. 13% Poren) sowie in den für die Tragschicht eingesetzten Materialien (AC T oder AC EME) unterschieden. Die für die Testfelder verwendeten Zusammensetzungen entsprechen dem Standardrezept der Mischanlage, mit Ausnahme des Belags mit 13% Porengehalt, dessen Zusammensetzung in einer vorhergehenden analytischen Studie bestimmt worden war.

Im Labor wurden verschiedene Prüfversuche und Auswertungen der Leistungen durchgeführt. Die Versuche zeigten insbesondere, dass der Marshall-Porengehalt deutlich höher war als der Zielwert, was auch im Rahmen eines Gyrator-Tests bestätigt wurde. Der Porengehalt der getesteten Materialien lag bei ca. 15%, was sich unter anderem durch eine veränderte Sieblinie erklären lässt. Die Ergebnisse der mechanischen Prüfungen der Wasserempfindlichkeit (ITSR), der Haftung zwischen Schichten (Leutner) und des Elastizitätsmoduls (komplexes Modul) waren konform mit den Normen und technische Empfehlungen. Die getesteten Beläge wiesen allerdings eine erhöhte Empfindlichkeit gegenüber Spurrinnenentwicklung auf (entspricht nicht den SN-Normen).

Die Testfelder waren mit Temperatur- und Verformungssensoren auf verschiedenen Ebenen des Oberbaus ausgerüstet. Die Spurrinnenempfindlichkeit der drei untersuchten Testfelder mit Belastungen bei hohen Temperaturen (+35°C) erwies sich ebenfalls als relativ hoch. Die Griffigkeitswerte entsprachen den Erwartungen. Die strukturelle Untersuchung der im Belag unter verschiedenen Belastungen, Ladegeschwindigkeiten

und Temperaturen gemessenen Deformationen ergab schlüssige Resultate. Bei der Analyse der vertikalen Verformungen an der Belagsoberfläche waren keine nennenswerten Unterschiede zwischen den Testfeldern erkennbar.

Auf der Grundlage der Versuche in der „Halle fosse“ wurden mithilfe der Mehrschichtberechnungsmethode (Rationelle Strassenbemessungsmethode, Frankreich) verschiedene Modellierungen vorgenommen mit dem Ziel, den Äquivalenzkoeffizient „a“ der getesteten Rauasphalte zu bestimmen. Die Resultate zeigen, dass der Äquivalenzkoeffizient der AC MR je nach Fall zwischen 3.65 und 4.00 variiert. Es ist zu beachten, dass eine Änderung des Äquivalenzkoeffizienten um 0.35 ungefähr einer Variation der Belagsdicke um 5 mm entspricht. Angesichts der verschiedenen Beobachtungen wird daher empfohlen, den aktuellen Wert des Äquivalenzkoeffizienten für Neumaterialien, d.h. einen Wert von 4, beizubehalten.

Summary

Since 20 years ago, the AC MR-open-graded (macrorugueux) mixtures has been widely used in the asphalt surface course due to their high mechanical performance, high permeability as well as their contribution to the noise pollution reduction.

The evolution of the Swiss standards in relation with open-graded asphalt mixtures during the period of 2008-2013 has led to a significant increase of Marshal void contents of these mixtures (i.e. an increase of 3-4% of limit values). This increase of the value of void content has not been without impact on mechanical characteristics and durability of these mixtures. Therefore, the objective of the current project is to analyse the impact of this modification of the void content on functional and structural behaviour of the mixtures as well as on evolution of the surface characteristics of AC MR-open graded mixtures. In order to investigate the causes, an in-depth review of the relative experiences of utilization of the open-graded mixtures has been initially performed and the relative aspects of mechanical behaviour has been evaluated by full-scale testing in LAVOC testing facilities.

A broad survey of the road authorities has been conducted by LAVOC in 2011. The various collected information allowed showing different specific problems such as the fact that these mixtures are (can) not be used in the road section with high level of gradient or bendiness (The resistance to tangential forces is limited) as well as the risk of losing the sound absorption properties when the silting up the voids increases. The lack of knowledge on long term behaviour of open-graded mixtures has also been pointed out.

A thorough analysis of the database information of MISTRA TRASSEE shows that the open-graded mixtures represent 24% of the surface course of the national roads with generally comparable ratio between AC MR 11 and AC MR 8. Concerning the average evolution of the road condition index, the modification of the standard is unlikely to cause significant changes for longitudinal and transversal unevenness, nor the road skid resistance. A larger perspective and in-depth analysis will however be necessary to further evaluate the potential consequences of the increase in void content of the open-graded mixtures.

The full-scale tests have been finally conducted in LAVOC testing facility where three different test sections with different void-content in the surface course (design value of 8% or 13% of in place void content) and different types of materials for the foundation layer (AC T or AC EME) has been constructed. The mix formula used for the test sections have the standard recipe of the asphalt plant except the surface course with open-graded asphalt with 13% of void content for which an analytical formulation study has been performed in advance.

Different control tests and evaluation of the performance has been conducted in the laboratory. The test results highlight especially that the Marshal void content is significantly higher than the target recipe. The sensitivity has been confirmed by the results of the gyratory shear compactor. Finally the tested materials manifested a void content of approximately 15% for which the difference can be explained by the variations in the grading curve. The mechanical tests for water sensitivity (ITSR), bonding between asphalt layers (Leutner) and the stiffness modulus (complex modulus) indicates that the results comply with the standardized or recommended techniques. However the tested mixtures show a susceptibility to permanent deformation (Do not comply with SN standards).

The different test sections have been instrumented with strain and temperature gauges at different depth of the structure. The susceptibility to permanent deformation of the three studied cases with high magnitude of loading and high temperature (35°C) has shown to be relatively high. The analyses regarding the quality of the skid-resistance of the test sections are in line with the expectations. The structure analysis of the recorded strains, when different load velocity and surface temperature has been applied, provide

consistent results. The analysis of the vertical deformation on the surface of the structures does not show a significant difference between the different tested open-graded mixtures.

On the basis of the tests conducted in the testing facility, different modelling methods has been carried out with the use of multi-layer calculations (Rational method of pavement design in France) in order to determine the coefficient of equivalence "a" for the tested open-graded mixtures. The results indicated that the coefficient of equivalence for AC MR varies between 3.65 and 4.00 depending on the cases. It has to be mentioned that a difference of 0.35 in coefficient of equivalence corresponds approximately to 5 mm difference in the thickness of the pavement. Taking to account the different observations, it is finally recommended to keep the current value of the factor of equivalence for the new materials or consider a value of 4.

1 Introduction

1.1 Contexte

Les enrobés macrorugueux (AC MR) sont une sorte d'enrobé bitumineux utilisé pour les couches de roulement des chaussées routières depuis 1996. Leur gamme de teneur en vides les classe dans la famille des enrobés denses (AC). L'enrobé macrorugueux présente des propriétés phoniques intéressantes (environ -3 dB (A)) ainsi que des performances élevées en terme d'évacuation des eaux de surfaces, d'adhérence et de résistance à l'orniérage.

La teneur en vides relativement élevée des enrobés macrorugueux permet d'atteindre de bonnes performances phoniques. Cependant, une augmentation de la teneur en vides n'est *a priori* pas sans conséquences sur les caractéristiques mécaniques et la durabilité de ces enrobés.

L'évolution de la normalisation suisse relative aux enrobés macrorugueux a conduit, durant la période 2008-2013, à une augmentation sensible de la teneur en vides cible. Cela est illustré par le tableau 1 qui contient les valeurs normatives de 2003, 2008 ainsi que celles issu de la dernière révision de 2013. Les références normatives sont les suivantes :

- Vides des couches (2003) : SN 640 430a [2]
- Vides des couches (2008) : SN 640 430b [3]
- Vides des couches (2013) : SN 640 430 [4]
- Vides Marshall (2003) : SN 640 431-1a-NA [5]
- Vides Marshall (2008) : SN 640-431-1b-NA [6]
- Vides Marshall (2013) : SN 640 431-1-NA [7]

Il est possible d'observer que la différence de vides entre les valeurs normatives de 2008 et de 2013 est de l'ordre de 4-5% pour les valeurs maximales (vides Marshall et vides des couches en place). Il est également à relever que les enrobés AC MR 4 ne sont actuellement plus normalisés.

La baisse des teneurs en vides (vides Marshall et vides des couches en place) constatée dans la révision des normes de 2013 vient de l'ajout dans celles-ci des enrobés semi-denses (SDA). Ces enrobés ont été développés afin d'offrir une gamme d'enrobé avec des performances phoniques optimisées. Comme la teneur en vides des enrobés macrorugueux a été adaptée en 2008 également dans ce but, l'arrivée des enrobés semi-denses en 2013 a donc permis de "presque" revenir aux valeurs de 2003 pour la teneur en vides des macrorugueux.

Tab. 1 Historique des exigences normatives SN relatives aux vides des enrobés AC MR

	AC MR 4 (2008)	AC MR 8 (2003)	AC MR 8 (2008)	AC MR 8 (2013)	AC MR 11 (2003)	AC MR 11 (2008)	AC MR 11 (2013)
Vides Marshall, valeurs limites [%-Vol]	6.0...10.0	3.0...7.0	6.0...10.0	3.0...6.0	3.0...7.0	6.0...10.0	3.0...6.0
Vides des couches, valeurs isolées [%-Vol]	6.0...16.0	2.5...9.0	5.5...13.0	2.5...8.0	2.5...9.0	5.5...13.0	2.5...8.0
Vides des couches, valeurs moyennes [%-Vol]	6.0...14.0	3.0...8.0	6.0...12.0	3.0...7.0	3.0...8.0	6.0...12.0	3.0...7.0

Des considérations relatives aux méthodes de mesure des vides seront proposées au chapitre 2.2.3.

1.2 Problématique

Suite à la modification de la normalisation en 2008, entrée en force par l'introduction des normes SN 640 430b [3] et SN 640 431-1b-NA [6], une éventuelle perte de performances mécaniques et de durabilité a été mise en évidence par certains acteurs du domaine en raison de teneurs en vides plus élevées. En effet, l'augmentation de la teneur en vides permet une atténuation plus importante des nuisances sonores, mais cela peut également avoir pour éventuelle conséquence une diminution des performances mécaniques et de la durée de vie de la chaussée. L'impact de l'augmentation de la teneur en vides des couches en place pour les enrobés AC MR doit donc être investigué.

1.3 Objectifs

L'objectif principal du projet de recherche est d'analyser le comportement mécanique ainsi que l'évolution des caractéristiques de surfaces des enrobés macrorugueux, ceci en fonction de la teneur en vides de ces enrobés. Une évaluation exhaustive de l'impact de l'augmentation de la teneur en vides sur le comportement mécanique de la chaussée est réalisée.

Pour cela, deux teneurs en vides cibles ont été définies :

- AC MR 8 avec teneur en vides des couches en place de 8% (référence)
- AC MR 8 avec teneur en vides des couches en place de 13% (limite maximale de la valeur isolée selon SN 640 430b)

La méthodologie de la recherche comporte principalement la réalisation d'essais en vraie grandeur dans des conditions contrôlées. Pour cela, la halle fosse du LAVOC a été utilisée. Ces essais en vraie grandeur ont été complétés par des essais en laboratoire afin de mieux identifier l'impact potentiel d'une augmentation de la teneur en vides d'un enrobé macrorugueux.

Sur la base de ces différents essais, une réévaluation du coefficient d'équivalence « a » est ensuite proposée.

Egalement sur la base d'une autre étude menée en parallèle par le LAVOC [41] et sur la base des produits utilisés pour l'essai en vraie grandeur, une optimisation de la formulation de ce type d'enrobé est faite avec comme critère principal, la teneur en vides. Il s'agit d'étudier l'intervalle compris entre 8 et 13% de vides.

Avec les différents enseignements obtenus dans le cadre de cette recherche, des propositions et recommandations relatives à la formulation et aux exigences de teneur en vides des enrobés macrorugueux sont formulées. Ces éléments pourront être utilisés en vue d'une mise à jour de la normalisation et de la définition d'une typologie d'utilisation de ces matériaux.

1.4 Déroulement de la recherche

Le plan de travail associé à cette recherche, se structure de la façon suivante :

Chapitre 2 : Il est consacré à l'état des connaissances. C'est dans ce chapitre que les enrobés macrorugueux sont détaillés tant du point de vue de leurs compositions que de leurs propriétés. C'est également dans ce chapitre que la normalisation et l'évolution de celle-ci sont données ainsi qu'une brève description d'enrobés comparables aux macrorugueux.

Chapitre 3 : Il contient une analyse de l'emploi et de l'état des enrobés macrorugueux au niveau national en utilisant la base de données de l'OFROU (MISTRA TRASSE) que la synthèse de discussions avec M. Hans-Peter Beyeler, membre de la division infrastructure routière de l'OFROU. De plus, il

contient les résultats d'une consultation réalisée par le LAVOC sur l'emploi des enrobés macrorugueux.

- Chapitre 4 : Il présente l'essai en vraie grandeur ainsi que le choix des matériaux et le dimensionnement des structures d'essai. Il détaille le programme des essais en vraie grandeur et donne les résultats des essais faits en laboratoire sur la conformité des matériaux posés.
- Chapitre 5 : Il donne l'évaluation des réponses des structures lors de l'essai en vraie grandeur soit tout ce qui traite de l'évaluation du comportement fonctionnel et structurel.
- Chapitre 6 : Il présente la méthodologie et les calculs nécessaires à la détermination du coefficient d'équivalence « a ».
- Chapitre 7 : Il présente la démarche utilisée pour mener à bien l'étude de formulation qui se base sur des autres études ainsi que sur des vérifications de formulation faites dans le cadre de cette étude.
- Chapitre 8 : C'est dans ce chapitre que figurent les conclusions et les recommandations.

2 Etat des connaissances

Comme les enrobés macrorugueux (AC MR) sont une spécificité suisse de par leur dénomination ainsi que par leurs granulométries et leurs exigences, l'état des connaissances se base sur une littérature relativement réduite. Des considérations sont effectuées pour d'autres mélanges que l'on pourra globalement considérer comme comparables aux enrobés macrorugueux.

Ce chapitre a pour but de présenter les enrobés macrorugueux, d'aborder les questions relatives à la formulation, aux propriétés structurelles et fonctionnelles ainsi que la normalisation en vigueur pour ce type de produit. De plus, une recherche de produits comparables appliqués à l'étranger est proposée en fin de chapitre.

2.1 Situation et caractéristiques des enrobés macrorugueux (AC MR)

La route doit répondre à de plus en plus d'exigences notamment au niveau de l'adhérence et de la sécurité des usagers ainsi que des émissions sonores. C'est pourquoi des enrobés bitumineux comme les macrorugueux (Rauhasphalt en allemand) ont été développés et constituent aujourd'hui un matériau de référence utilisé pour les couches de roulement du réseau national notamment.

Pour répondre aux exigences mécaniques (par ex. résistance à l'orniérage), sécuritaires (adhérence, diminution de projections d'eau) et environnementales (réduction du bruit), les enrobés macrorugueux nécessitent une teneur en vides élevée. Cet important pourcentage de vides risque cependant de péjorer les performances mécaniques. C'est pourquoi, il est nécessaire d'investiguer davantage le lien entre les performances mécaniques et la teneur en vides.

2.1.1 Les enrobés macrorugueux

Les enrobés macrorugueux sont classés dans la normalisation avec les enrobés denses (AC). Deux différentes granularités pour les classes d'enrobé AC MR sont normalisées en Suisse [7], à savoir :

- AC MR 8
- AC MR 11

Entre 2008 et 2013, il existait un enrobé macrorugueux AC MR 4 [6], mais il a été retiré des normes suisses en 2013 du fait de l'arrivée des enrobés semi-denses (SDA) et notamment du SDA 4 [10].

Les enrobés macrorugueux ont la particularité d'avoir une forte discontinuité granulométrique entre la fraction des sables et celle des gravillons (limite inférieure de la courbe granulométrique à 100%). Cet arrangement granulométrique confère à l'enrobé une teneur en vides plus élevée que les enrobés denses classiques. L'évolution des teneurs en vides (Marshall et en places), au cours des dernières années, est représentée sur la figure ci-après.

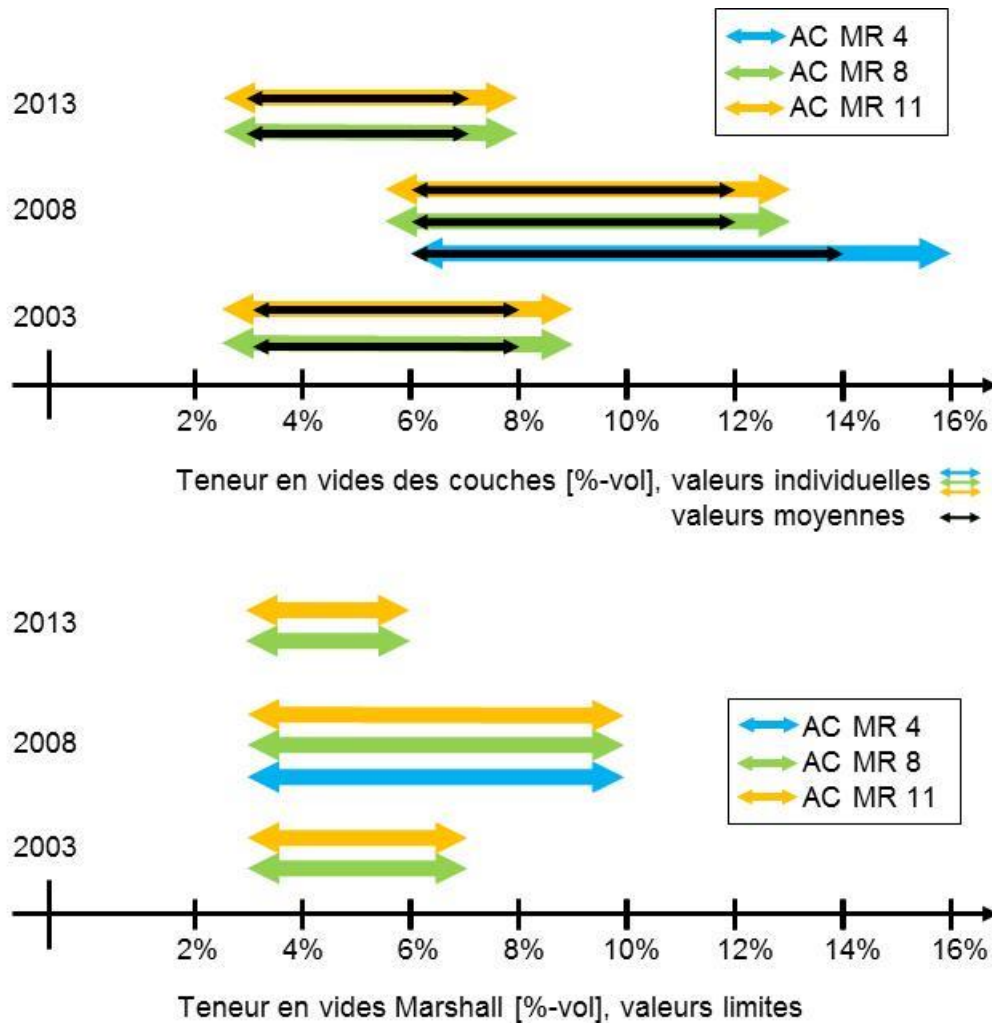


Fig. 1 Historiques des exigences normatives SN relatives aux vides des enrobés AC MR

Il est possible de constater que les teneurs en vides (Marshall et en place) permises ont fortement augmentées en 2008 dans le but de réduire les émissions sonores. Ces teneurs en vides sont revenues à des valeurs usuelles avec l'arrivée, dans la normalisation en 2013, des enrobés semi-denses. Les valeurs numériques de ces teneurs en vides sont données au chapitre 2.2.3

Les enrobés macrorugueux sont appliqués comme couche de roulement de 2.5 à 5.0 centimètres d'épaisseur [4]. Ils sont posés généralement à chaud sur des chaussées à fort trafic, hors localité ou en localité. Ce type d'enrobé est également utilisé en couche mince d'usure lors de réfection ou de maintenance des chaussées. Dans le cadre de réfection de chaussées en béton, les enrobés macrorugueux peuvent être utilisés comme couche de roulement, pour autant que la couche de support soit dans un état satisfaisant.

Les matériaux composant le squelette granulaire et le bitume utilisé doivent répondre à des exigences élevées qui donnent à l'enrobé de bonnes performances notamment en termes d'adhérence, de résistance à la fatigue et d'orniérage. Les exigences pour les matériaux sont décrites dans le chapitre 2.2.1

Les enrobés macrorugueux sont des produits couramment fabriqués en Suisse. L'enrobé ne doit pas être fabriqué à une température de malaxage trop élevée (<180°C) pour éviter un phénomène d'égouttage qui réduit les principales propriétés de ce type d'enrobé. La teneur en liant est certes la même que pour un enrobé dense mais la proportion de fines dans le mélange est sensiblement plus faible pour les enrobés macrorugueux. Cette situation donne donc un module de richesse plus élevé d'environ 1 point.

La mise en place du matériau doit être faite sur une base stable et imperméable avec un compactage sans vibrations. Le compactage du matériau doit se faire si possible à la machine.

2.1.2 Propriétés des macrorugueux

Du fait de leur teneur en vides élevée et de leur squelette granulaire spécifique, les enrobés macrorugueux développent certaines propriétés comme :

- Macrotexture élevée de la surface de roulement permettant d'améliorer l'adhérence surtout en temps de pluie
- diminution des projections d'eau lors du passage de véhicule
- diminution des émissions sonores lors du passage de véhicule
- susceptibilité à l'orniérage diminuée.

2.1.3 Caractéristiques des enrobés macrorugueux

Caractéristiques mécaniques

Pour les enrobés macrorugueux, la courbe granulométrique discontinue et la teneur en vides font que la surface de contact entre les granulats, solidarisée par le liant, est plus faible que pour les enrobés denses classiques. Cette principale caractéristique avec le type de liant vont donc fortement influencer sur la résistance à l'orniérage et de la résistance aux efforts.

L'orniérage des couches bitumineuses est la déformation permanente des couches d'enrobés provoquée par les sollicitations de trafic combinées aux sollicitations climatiques. Il se caractérise par un enfoncement de la surface sous la charge de trafic et parfois par l'apparition de bourrelets aux abords de celle-ci. Ces déformations sont engendrées par le glissement et le réarrangement progressif du squelette granulaire sous l'effet des charges de trafic. Ces déformations dépendent du type de trafic, des propriétés des granulats et du type de liant employé [35]. Pour les enrobés macrorugueux, c'est le squelette de granulats constitué principalement de gravillons qui va reprendre et transmettre les efforts issus des charges de trafic. De ce fait et compte tenu de leur grande taille, ceux-ci sont moins susceptibles de se réarranger et donc pour l'enrobé, d'orniérer.

Les efforts longitudinaux sont issus des forces de freinage et d'accélération tandis que les efforts tangentiels sont issus des forces occasionnées par des changements de direction des véhicules. Ces efforts horizontaux sont transférés aux couches inférieures via le squelette granulaire de l'enrobé. Comme les efforts sont transmis entre les granulats par la surface de contact granulat-bitume-granulat et que celle-ci est plus faible dans les enrobés macrorugueux, ces enrobés ont donc des sollicitations internes sur ces interfaces plus grandes. Le bitume utilisé doit donc être modifié aux polymères afin de combler ce défaut par un liant ayant une cohésivité élevée. Malgré cela, l'emploi d'enrobé macrorugueux n'est pas conseillé sur des chaussées à forte déclivité ou à forte sinuosité car la stabilité aux efforts n'est pas toujours suffisante. Du fait des vides, la couche d'encollage n'est pas continue et concentre donc les efforts sur des points bien précis. Cette situation peut donc entraîner une rupture de cette couche en divers points. C'est pourquoi, elle nécessite une attention particulière lors de la pose [28].

Adhérence

Deux phénomènes d'adhérence sont en jeu dans le contact pneumatique-chaussée. Le premier, est l'adhésion qui est liée à la surface de contact direct entre le pneumatique et la chaussée (plus la surface de contact est grande plus l'adhésion est grande). L'autre phénomène en jeu est l'indentation. Il est lié au fait que le pneumatique en mouvement va "buter" contre la macro et microtexture. Plus celles-ci sont développées, plus l'indentation entre en jeu et plus l'adhérence est élevée [23] [42].

Comme la macrotexture des enrobés macrorugueux est bien développée, l'indentation va jouer un grand rôle, ce qui confère à ce type d'enrobé une adhérence accrue par rapport

à un enrobé classique. L'indentation liée à la microtexture est également importante et dépend surtout des propriétés des granulats et de leur capacité à résister au polissage. En revanche, comme la surface de l'enrobé est irrégulière, la surface de contact direct entre les pneumatiques et la chaussée est plus faible que celle d'un enrobé traditionnel ce qui fait que l'adhésion est plus faible. Cette baisse d'adhérence, liée à une adhésion plus faible, est néanmoins largement compensée par le phénomène d'indentation [23] [42].

Effet phono-absorbant

Le bruit routier est essentiellement issu du contact entre les pneumatiques du véhicule et la surface de la chaussée. Il se forme par la compression puis la détente de l'air (phénomène d'Air-Pumping) engendrant le bourdonnement habituellement entendu aux abords des chaussées [21] [36].

Une des principales propriétés des enrobés macrorugueux est sa capacité à limiter cet effet de compression, détente de l'air, en offrant un passage à l'air via la macrotexture de surface de l'enrobé. Comme le montre la figure ci-dessous, la macrotexture bien développée de l'enrobé va drainer l'air sous les pneumatiques et ainsi apaiser le bruit issu du phénomène d'Air-Pumping. Cette propriété est valable seulement si la macrotexture n'est pas bouchée par de la saleté ou des particules fines.

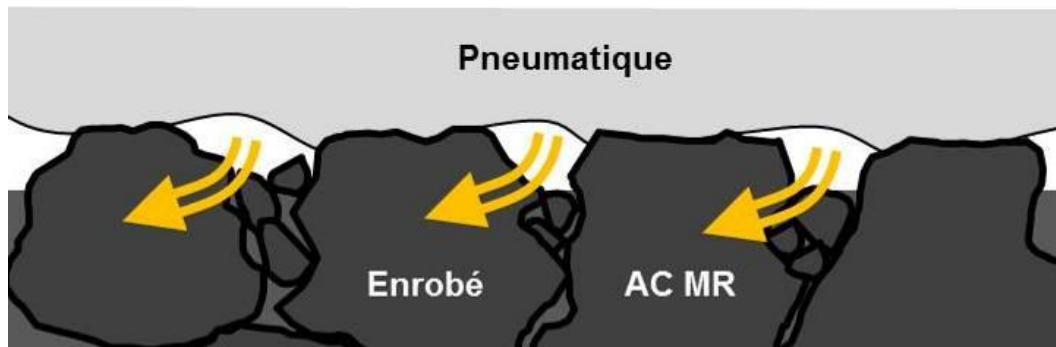


Fig. 2 Schéma de l'évacuation de l'air (flèches jaunes) sur une surface de macrorugueux.

L'enrobés macrorugueux permettent d'obtenir une réduction d'environ -3 dB (A) à la pose. C'est cette réduction des émissions sonores, tout en garantissant une durée de vie théorique supérieure à celle des SDA, qui a fait que les enrobés macrorugueux sont largement utilisés sur les autoroutes et sur certaines routes principales.

Effet drainant

En cas de pluie, l'eau à la surface de l'enrobé limite fortement le contact direct entre les pneumatiques et la chaussée ce qui réduit fortement l'adhésion du véhicule à la chaussée. De plus, comme la microtexture est recouverte d'eau le phénomène d'indentation va également être réduit. La conjugaison de ces deux éléments fait que la chaussée est plus glissante en temps de pluie [32].

Comme les enrobés macrorugueux ont une macrotexture bien développée, celle-ci va jouer le rôle de drain pour évacuer l'eau sous les pneumatiques, comme le montre la figure ci-après. Cette propriété fait que le phénomène d'indentation lié à la macrotexture fonctionne pleinement. Elle diminue également les effets de l'eau sur l'indentation liée à la microtexture par l'évacuation facilitée de l'eau. En conclusion, l'enrobé macrorugueux conserve une adhérence accrue par rapport à un enrobé dense classique en cas de chaussée humide.

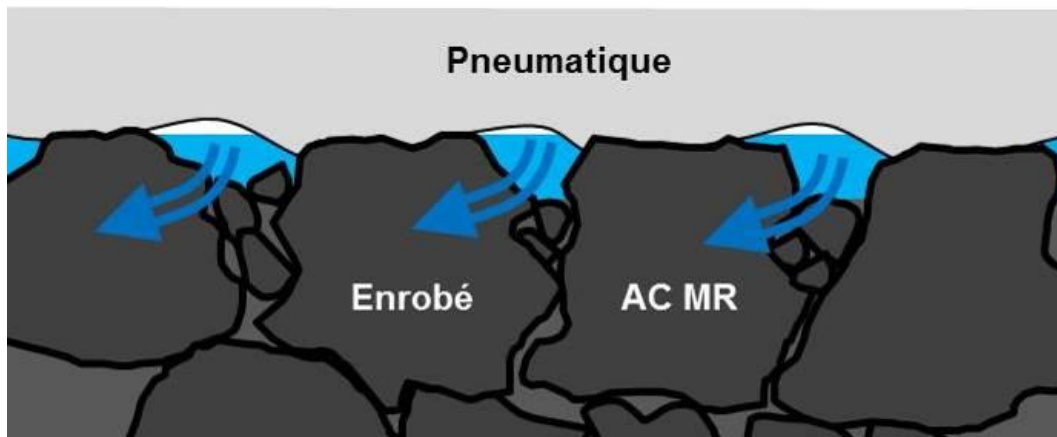


Fig. 3 Schéma de l'évacuation latérale de l'eau (flèches bleues) sur une surface de macrorugueux.

Une autre propriété issue de la macrotecture bien développée de l'enrobé macrorugueux est que les pneumatiques ne sont pas toujours en contact avec l'eau sur la chaussée. Ceci va donc diminuer les projections d'eau issue du passage d'un véhicule.

2.2 Aspects normatifs des enrobés macrorugueux

Depuis 2009, les normes concernant spécifiquement les enrobés macrorugueux sont :

- SN 640 430b [3] (2008) Enrobé bitumineux compactés – Conception, exécution et exigences relatives aux couches en place
- SN 640 430 [4] (2013) Enrobé bitumineux compactés – Conception, exécution et exigences relatives aux couches en place
- SN 640 431-1b-NA [6] (2008) Mélanges bitumineux – Spécification des matériaux – Partie 1 Enrobés bitumineux
- SN 640 431-1-NA [7] (2013) Mélanges bitumineux – Spécification des matériaux – Partie 1 Enrobés bitumineux

Pour ce qui est des caractéristiques du sable et des granulats la norme en vigueur en 2015 est :

- SN 670 103b [16] (2006) Granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels utilisés dans la construction des chaussées, aérodromes et d'autres zones de circulation

2.2.1 Caractéristiques des composants

Composants minéraux

Par similitude avec le sujet traité dans la thèse de Ferreira Patricia Nunes [30] sur l'utilisation de béton bitumineux très mince (BBTM) au Brésil qui se base sur l'expérience française en la matière, les prescriptions utilisées pour les granulats utilisés dans cette thèse sont les même que pour les enrobés macrorugueux. Ils doivent être à plus de 95% concassés afin d'être de type cubique avec une angularité marquée (arêtes vives). L'angularité de ces granulats donne au mélange bitumineux une bonne résistance à l'orniérage et au cisaillement. Les granulats doivent également avoir une microtexture bien développée pour garantir une adhérence élevée ce qui nécessite des granulats aux propriétés élevées.

La norme SN 670 103b-NA-F [16] relative aux composants minéraux donne les exigences suivantes pour les macrorugueux :

Tab. 2 Exigences normatives des composant minéraux (SN 670 103b-NA-F)

	Sable (0/2)	Granulat (2/4)	Granulat (4/8)	Granulat (8/11)	Granulat (11/16)
Granularité (Catégorie)	G _{F85} G _{TC10}	G _{C85/15} G _{20/15}	G _{C85/15} G _{20/15}	G _{C85/15} G _{20/15}	G _{C85/15} G _{20/15}
Forme des grains (Coef. d'aplatissement)	-	A ₂₅	A ₂₅	A ₂₅	A ₂₅
Angularité (Coef. d'écoulement)	Ecs déclaré	-	-	-	-
% de grain concassé (Catégorie)	C _{95/1}	C _{95/1}	C _{95/1}	C _{95/1}	C _{95/1}
Résistance à la fragmentation (Coef. Los Angeles)	-	-	LA ₂₅	LA ₂₀	LA ₂₅
Résistance au polissage (coef. polissage accéléré)	PSV ₅₀	PSV ₅₀	PSV ₅₀	PSV ₅₀	PSV ₅₀

Liant

Du fait de la structure discontinue de la courbe granulométrique et de la teneur en vides élevée, la surface spécifique de contact entre les granulats est plus faible que pour un enrobé dense classique (sorte AC). Ceci nécessite donc l'emploi d'un bitume à hautes performances, permettant de "compenser" les effets des vides sur la structure de l'enrobé en garantissant notamment une adhésion élevée entre les granulats par le bitume. C'est pourquoi les bitumes utilisés dans la fabrication des enrobés macrorugueux sont généralement modifiés aux polymères (PmB). Les liants polymères confèrent généralement à l'enrobé une meilleure résistance à la fissuration, à l'orniérage et au désenrobage.

Les classes de bitumes recommandées selon la norme SN 640 431-1-NA [7] pour les enrobés macrorugueux sont les suivantes :

- PmB 45/80-50 (CH-C)
- PmB 65/105-45 (CH-C)
- PmB 25/55-65 (CH-E)
- PmB 45/80-65 (CH-E)
- PmB 65/105-60 (CH-E)

Remarques : Selon la norme SN 640 431-1-NA [7], L'utilisation des trois premières sortes de liants doivent prendre en considération les sollicitations du trafic et du climat sans plus de précision. Les deux dernières sortes de liant sont celles qui sont généralement employées.

Selon la norme SN 640 431-1-NA [7] Le dosage en liant doit être supérieur ou égale à 5.8% massique pour l'AC MR 8 et supérieur ou égale à 5.6% massique pour l'AC MR 11. Entre 2008 et 2013 la teneur minimale en liant pour l'AC MR 4 était de 6.2%

Chaux et fibres

Il est possible d'incorporer de la chaux entre 1 et 2.5% de la masse des granulats afin d'offrir une meilleure stabilité du mastic et de réduire le risque d'égouttage. Cet ajout de chaux est à incorporer en réduisant d'autant la proportion de filler. L'ajout de chaux est même recommandé par l'OFROU selon les informations fournies au chapitre 3.2.

Pour ce qui est des fibres organiques, la proportion d'ajout est de 0.2% de la masse de liant. Elles jouent le même rôle que la chaux.

Dans cette étude, l'emploi de ces additifs n'est pas pris en compte.

2.2.2 Granulométrie

Au niveau de la granulométrie, les enrobés macrorugueux se situent dans la famille des mélanges à squelette de pierres. Le triangle de formulation volumétrique représenté sur la figure ci-dessous montre le positionnement des enrobés AC MR par rapport à d'autres types de mélanges. Les enrobés macrorugueux présentent donc un squelette dit "pierreux".

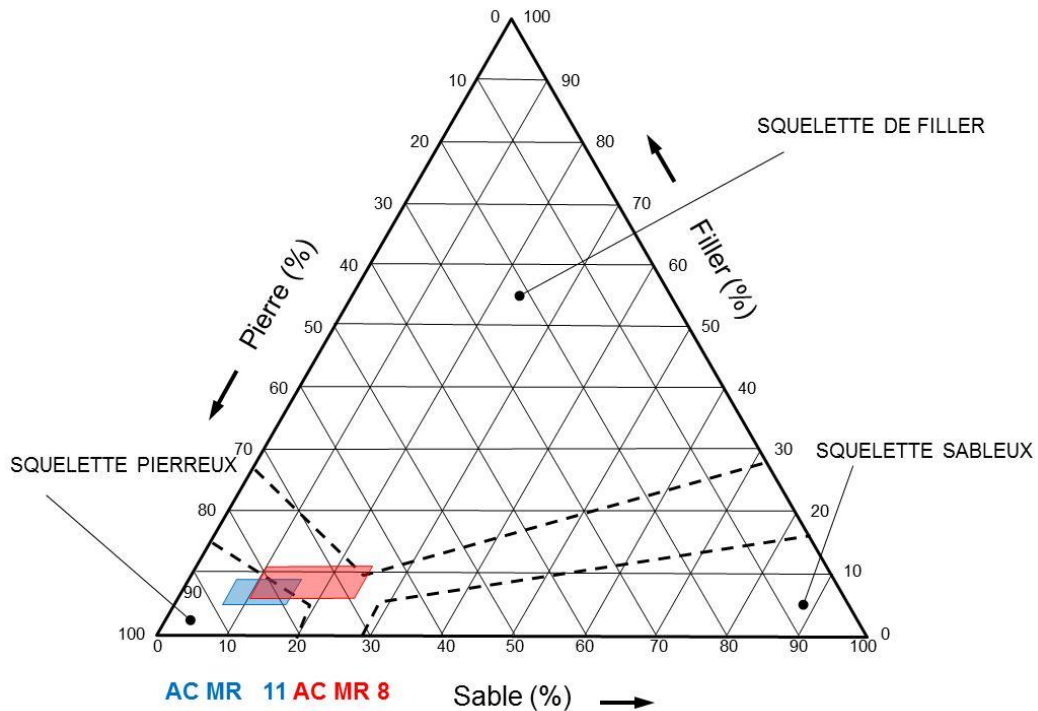


Fig. 4 Position des AC MR dans le triangle granulométrique issu de la méthode belge de formulation [27].

Les fuseaux granulométriques des enrobés macrorugueux sont explicités sur la figure 5 ainsi que les plages de valeurs nominale selon la norme SN 640 431-1-NA [7] dans le tableau ci-dessous.

Le fuseau granulométrique de l'AC MR 4 est donné à titre indicatif vu qu'il était normalisé selon la SN 640 431-1b-NA [6] lors du démarrage de cette étude.

Tab. 3 Courbes granulométriques des AC MR

Tamis [mm]	Plages des valeurs nominales de la granularité		
	Passant au tamis [% massique]		
	AC MR 4	AC MR 8	AC MR 11
16.0			100
11.2		100	90...100
8.0		90...100	30...40
5.6	100		
4.0	90...100	32...42	23...33
2.0	30...40	21...31	16...26
1.0	18...28		
0.5	16...24	13...21	9...17
0.063	8...12	6...11	5...9

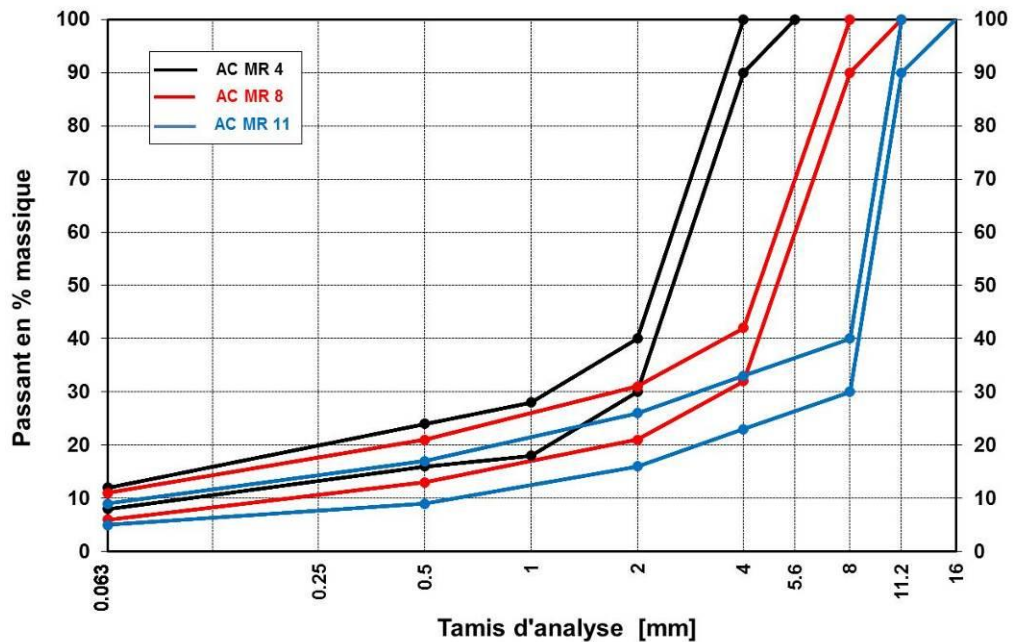


Fig. 5 Fuséole granulométrique des enrobés AC MR selon SN 640 431-1b-NA et SN 640 431-1-NA.

La figure ci-dessus montre les discontinuités des fuséoles granulométriques en fonction de la classe d'enrobé macrorugueux. Pour les AC MR 8, la discontinuité se situe entre la fraction des sables (0/4) qui représentent entre 32 et 42% du mélange et les granulats (5.6/11.2) qui eux représentent le reste du mélange. Pour les AC MR 11, la discontinuité se situe entre la fraction des sables et des petits gravillons (0/8) qui représentent entre 30 et 40% du mélange et les gros granulats (8/16) qui eux représentent le reste du mélange.

La forte discontinuité entre la fraction des sables et celles des gravillons amène une teneur en fines plus faible que pour les enrobés denses classiques qui se situe autour de 7.5%. Les gravillons constituent donc la matrice principale du mélange.

2.2.3 Teneur en vides

Complément relatif à la détermination des vides

Comme mentionné précédemment, la teneur en vides des enrobés macrorugueux est un paramètre déterminant qui constitue également un des fils conducteurs de la présente recherche. Il est cependant utile de préciser les méthodes de détermination des vides en laboratoire.

La mesure de la teneur en vides Marshall (V_m) peut être déterminée en laboratoire de différentes façons. Le choix de la méthode va notamment influencer le résultat de la mesure et il convient d'adopter une méthode en adéquation avec la gamme de vides attendus. Selon la norme SN 640 431-1-NA [7]. Le pourcentage de vides dépend de la masse volumique réelle du mélange ρ_m (sans les vides d'air) et de la masse volumique apparente de l'éprouvette ρ_b (inclut les vides d'air).

La masse volumique apparente doit être déterminée selon SN EN 12697-6 où quatre méthodes d'essai sont autorisées que ce soit pour des éprouvettes compactées en laboratoire ou des carottes/éprouvettes prélevées *in situ*. Relevons encore que les méthodes B, C et D sont considérées comme procédés de référence en Suisse :

- Méthode A : Masse volumique apparente sèche
- Méthode B : Masse volumique apparente surface saturée sèche (SSS)
- Méthode C : Masse volumique apparente éprouvette paraffinée

- Méthode D : Masse volumique apparente géométrique

La masse volumique d'un corps d'épreuve dépend de sa masse et de son volume. La masse est obtenue par une pesée dans l'air à sec. La détermination du volume varie selon les méthodes. Les méthodes A, B et C consistent à déterminer le volume à partir de la masse dans l'air et de la masse dans l'eau (méthodes hydrostatiques) ; les différences principales entre les méthodes étant les suivantes :

- Méthode A : La masse dans l'eau est déterminée sans traitement préalable.
- Méthode B : Corps d'épreuve saturé avec de l'eau puis sa surface est séchée avec une peau de chamois humide.
- Méthode C : Eprouvette étanchée avec de la paraffine avant d'être immergée pour que l'eau ne pénètre pas dans les vides de l'éprouvette.

La quatrième méthode (D) consiste à déterminer le volume du corps d'épreuve par la mesure des dimensions

Le choix de la méthode dépend du volume de vides estimés au sein de l'échantillon ainsi que de leur accessibilité dans l'éprouvette. Selon la normalisation SN 640 436 [10], les domaines d'application sont les suivants :

- Méthode A : Convient pour des éprouvettes très denses et pratiquement non absorbantes. Cette méthode ne sera généralement pas appliquée.
- Méthode B : Convient pour les éprouvettes avec un faible niveau d'absorption de l'eau soit jusqu'à 5% environ de teneur en vides. Méthode recommandée par la normalisation SN (sauf pour les AC F, PA, SDA et AC MR).
- Méthode C : Adaptée dans le cas de vides pouvant aller jusqu'à 15% environ. Cette méthode représente un cas "intermédiaire" entre les méthodes B et D. Elle est cependant plus complexe à appliquer que les autres méthodes hydrostatiques.
- Méthode D : Cette méthode est à appliquer dans le cas des enrobés semi-denses SDA (SN 640 436 [10]) ainsi que des enrobés PA. Elle convient aux mélanges dont les pourcentages de vides sont supérieurs à 15%.

Dans le cas du projet concerné, les gammes de vides attendues laissent penser que les méthodes C ou D sont *a priori* adaptées pour la détermination du pourcentage de vides. Sauf exception, la méthode avec paraffine (hydrostatique), plus précise est utilisée dans le cadre de ce projet.

Evolution de la teneur en vides

Les enrobés macrorugueux ont comme caractéristiques principales une teneur en vides plus élevée qu'un enrobé dense classique. Ce paramètre, déterminant pour cette recherche, a suivi une évolution qui peut être retracée par les différentes normes VSS [2] [3] [4] [5] [6] [7] :

En novembre 1996, la norme sur les couches de roulement en enrobé macrorugueux, SN 640 435a, indique les valeurs nominales limites de la teneur en vides sur éprouvettes Marshall à :

- 6% volumiques \pm 1%

En mai 2002, la norme SN 640 430 intègre les enrobés macrorugueux dans la dénomination générale ACVTL (Asphalt Concrete for Very Thin Layers), béton bitumineux pour couches très minces). Les teneurs en vides des couches en place sont les suivantes :

- ACVTL 8 : valeurs individuelles : 2.5 à 9.0%, valeurs moyennes : 3.0 à 8.0%
- ACVTL 11 : valeurs individuelles : 2.5 à 9.0%, valeurs moyennes : 3.0 à 8.0%

Décembre 2003, la norme sur les enrobés bitumineux compactés, SN 640 430a [2], fait mention des enrobés macrorugueux. Les teneurs en vides des couches en place indiquées sont identiques à la norme précédente soit :

- AC MR 8 : valeurs individuelles : 2.5 à 9.0%, valeurs moyennes : 3.0 à 8.0%
- AC MR 11 : valeurs individuelles : 2.5 à 9.0%, valeurs moyennes : 3.0 à 8.0%

Février 2008, la norme sur les enrobés bitumineux compactés, SN 640 430b [3], fait toujours mention des enrobés macrorugueux mais il existe une classe supplémentaire, les AC MR 4. De plus, Les teneurs en vides des couches en place ont été modifiées pour atteindre :

- AC MR 4 : valeurs individuelles : 6.0 à 16%, valeurs moyennes : 6.0 à 14.0%
- AC MR 8 : valeurs individuelles : 5.5 à 13%, valeurs moyennes : 6.0 à 12.0%
- AC MR 11 : valeurs individuelles : 5.5 à 13%, valeurs moyennes : 6.0 à 12.0%

La norme SN 640 430 [4] de décembre 2013 contient toujours les enrobés macrorugueux mais la classe des AC MR 4 a été supprimée. Au niveau de la teneur en vides des couches en place, celle-ci est abaissée pour atteindre :

- AC MR 8 : valeurs individuelles : 2.5 à 8.0%, valeurs moyennes : 3.0 à 7.0%
- AC MR 11 : valeurs individuelles : 2.5 à 8.0%, valeurs moyennes : 3.0 à 7.0%

La teneur en vides sur éprouvette Marshall de la norme SN 640 431-1a-NA [5] de 2003 fixe la fourchette de vides à 3...6%. Lors de sa révision en 2008 cette fourchette passe à 6...10% de vides. Avec la dernière révision de cette norme (SN 640 431-1-NA [7]) cette fourchette revient à ce qu'elle était en 2003 soit 3...6% de vides.

Autres exigences normatives

Les paragraphes suivants donnent quelques valeurs importantes issues des normes précitées :

Les normes SN 640 430b [3] (2008) et SN 640 430 [4] (2013) proposent que les enrobés macrorugueux soient utilisés comme couche de roulement. Elles donnent les valeurs suivantes de teneurs en vides en place (déjà mentionné), d'épaisseur nominale des couches compactées, d'exigences relatives aux degrés de compactage des couches :

Tab. 4 Exigences des normes SN 640 430b (2008) et SN 640 430 (2013)

	AC MR 4 (2008)	AC MR 4 (2013)	AC MR 8 (2008)	AC MR 8 (2013)	AC MR 11 (2008)	AC MR 11 (2013)
Épaisseur nominale des couches en compactée	15...20 [mm]	-	20...35 [mm]	25...40 [mm]	35...50 [mm]	35...50 [mm]
Degrés de compactage des couches	VI ¹ ≥ 94% VM ² ≥ 96%	-	VI ≥ 97% VM ≥ 98%	VI ≥ 97% VM ≥ 98%	VI ≥ 97% VM ≥ 98%	VI ≥ 97% VM ≥ 98%
	¹ Valeurs Individuelles		² Valeurs Moyennes			

Les normes SN 640 431-1b-NA [6] (2008) et SN 6410 431-1-NA [7] (2013) proposent les types de bitumes ainsi que les fuseaux granulométriques à employer, qui ne changent pas entre 2008 et 2013. Elles donnent les valeurs de teneur en agrégats d'enrobés, de teneurs en vides des éprouvettes Marshall (déjà mentionné), du rapport de résistance en traction ITSR et des exigences relatives à la profondeur d'ornièrre à 30'000 cycles :

Tab. 5 Exigences des normes SN 640 431-1b-NA (2008) et SN 6410 431-1-NA (2013)

	AC MR (2008)	AC MR (2013)
Teneur en agrégats d'enrobés	0%	0%
Rapport de résistance en traction ITSR	≥ 70%	≥ 70%
Profondeur d'ornièrre à 30'000 cycles	≤ 7.5%	≤ 7.5%

2.3 Enrobés comparables aux macrorugueux

Plusieurs enrobés sont proposés aujourd'hui pour améliorer les caractéristiques de surface. Du point de vue leurs propriétés, de la teneur en vides et de la granulométrie, les enrobés macrorugueux ont des points communs avec les SMA (Splittmastixasphalt), les

SDA (enrobés semi-denses) et les PA (enrobés drainants). Ils montrent également des similitudes avec les enrobés désignés BBM (bétons bitumineux minces), BBTM (bétons bitumineux très minces) et les BBSG (bétons bitumineux semi-grenus), enrobés discontinus ou à granulométrie discontinue.

2.3.1 Enrobé semi-dense (SDA)

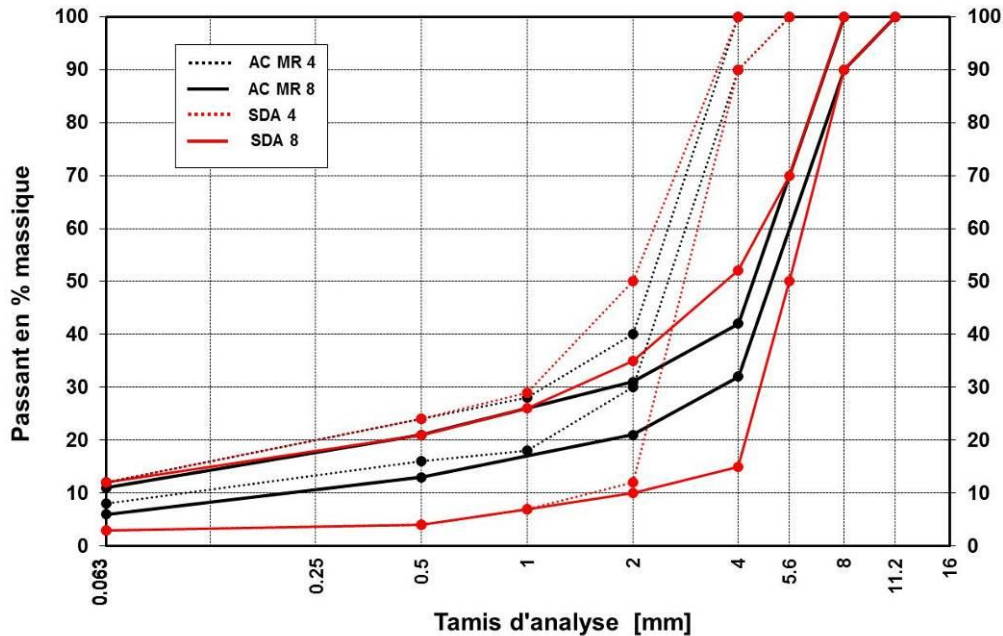


Fig. 6 Fuseau granulométrique des AC MR 4 et 8 et des SDA 4 et 8

Les enrobés semi-denses, selon la norme SN 640 436 [10] présentent également une courbe granulométrique discontinue entre les sables et les gros gravillons. En revanche, les fuseaux granulométriques des SDA sont plus larges si bien que les fuseaux granulométriques des AC MR s'inscrivent dans ceux des SDA comme le montre la figure ci-dessous.

Les SDA nécessitent également des bitumes modifiés aux polymères avec une teneur en liant minimale similaire aux enrobés macrorugueux ($\geq 5.8\%$). La teneur en vides Marshall permise se situe entre 10 et 22% selon la sorte de SDA soit presque deux fois plus que les enrobés macrorugueux. Cette teneur en vides très élevée confère à l'enrobé de très bonnes propriétés phoniques (environ -5 dB (A)) et de bonnes propriétés surfaciques. Les autres valeurs normatives comme le ratio ITSR, la profondeur d'ornièrre à 30'000 cycle et le degré de compactage sont similaire aux enrobés macrorugueux. En revanche, comme Les SDA sont des enrobés très récents, il est difficile d'avoir une vue sur leurs performances mécaniques à long terme. On restera prudent sur leur utilisation pour des chaussées sinueuses, en altitude (> 800 m environ) ou en forte pente car leur résistance aux efforts est proche de celle des enrobés macrorugueux. Ce genre d'enrobé est posé principalement à l'intérieur des localités dans des zones d'habitation, là où les sollicitations dues au trafic sont moindres et où les performances phoniques sont appréciées. [29] [41]

2.3.2 Splittmastixasphalt (SMA)

Tout comme les enrobés macrorugueux, les Splittmastixasphalt (béton bitumineux grenu à forte teneur en mastic ou Stone Mastic Asphalt selon la SN 640 431-5a-NA [8]) présentent une granulométrie discontinue. La courbe granulométrique des SMA 8 est pratiquement confondue avec celle de l'AC MR 8 tandis que celle des SMA 11 débute dans les mêmes gammes de valeurs que le AC MR 8 mais est plus ouverte dans la gamme de valeurs 4/8 mm. Les SMA nécessitent de recourir à un bitume modifié par des polymères avec une teneur en liant supérieure au macrorugueux de 0.4...0.6% suivant la

sorte de SMA. En revanche, les exigences relatives à la profondeur d'ornièrè sont de 3% supérieures pour les SMA. Ils montrent des caractéristiques comparables aux enrobés macrorugueux pour la baisse des émissions sonores, la diminution de la projection d'eau et la rugosité marquée de la surface de roulement. Ils sont essentiellement appliqués comme couches de roulement sur des routes à fort trafic. La teneur en vides Marshall permise est inférieure aux enrobés macrorugueux pour se situer entre 2...5% du fait de leur teneur en mastic élevée. Ceci offre donc une meilleure cohésion du matériau et ils peuvent être posés sur des tronçons sinueux contrairement aux macrorugueux. [29] [32] [41]

2.3.3 Enrobé drainant (PA)

Les revêtements drainants, selon la norme SN 640-431-7a-NA [9] présentent une courbe granulométrique fortement discontinue. Le saut principal de la courbe granulométrique se situe au niveau des petits granulats (2/4 pour les PA 8 et 4/5.6 pour les PA 11). Les sables et les petits gravillons représentent donc entre 15...20% du mélange. Le bitume utilisé est également modifié par des polymères avec une teneur en liant minimale qui varie entre 6.0% pour les PA 8 et 5.5% pour les PA 11. Les enrobés drainants montrent des caractéristiques comparables aux enrobés macrorugueux dans le domaine de la réduction des émissions sonores, de la rugosité de surface mais sont nettement meilleurs dans l'évacuation des eaux de pluie (pas de projection d'eau). En revanche, comme la teneur en vides Marshall ($\geq 16\%$ pour PA 8 et $\geq 18\%$ pour PA 11) et en vides communicants sont plus élevées que pour les macrorugueux, la cohésion du matériau n'est pas optimale ce qui fait que ces enrobés sont déconseillés sur les routes à forte sinuosité ainsi qu'en altitude (risque de gel). Leurs propriétés sont très influencées par les saletés qui peuvent venir obstruer les vides. [29] [41]

2.3.4 Béton bitumineux mince (BBM) ou ultra mince (BBTM)

Les bétons bitumineux minces (BBM) ne sont que peu ou pas utilisés en Suisse malgré leurs présences dans la normalisation (reprise directe de la norme EN 13108-2 [20]). Ils sont très similaires aux Splittmastixasphalt (SMA) et donc aux enrobés macrorugueux. Ils sont également utilisés comme couche de roulement avec des épaisseurs de couches inférieures à 30 mm. Au niveau de la courbe granulométrique, il existe un saut entre la partie des sables (0/2) qui représente 25 à 35% du mélange. Plus la granulométrie maximal des BBM et BBTM est grande, plus le saut est marqué. Tout comme les autres enrobés, le liant utilisé est modifié par des polymères. Les propriétés des BBM et BBTM sont similaires aux enrobés macrorugueux. En revanche, la teneur en vides est plus élevée pour les BBM et BBTM que pour les macrorugueux et se situe entre 10 et 25% de vides. Ceci déconseille donc la pose de ce type d'enrobé sur des routes à forte sinuosité. [29] [40] [41]

2.3.5 Béton bitumineux semi-grenu (BBSG)

Les bétons bitumineux semi-grenus, selon la norme En 13108-1 [19], sont comparables aux enrobés macrorugueux mais ne sont pas normalisés et donc utilisés en Suisse. La courbe granulométrique présente un saut moins marqué avec une fraction des sables (0/2) qui représente entre 28 et 40% du mélange. La teneur en vides est comparable aux enrobés macrorugueux et se situe autour de 4 à 8%. Les bétons bitumineux semi-grenus offrent pratiquement les mêmes performances de surface et les mêmes propriétés qu'un enrobé macrorugueux, c'est pourquoi ils sont aussi utilisés comme couche de roulement sur des chaussées fortement sollicitées. [28] [21]

3 Utilisation des enrobés macrorugueux

Afin d'obtenir des statistiques sur l'utilisation et l'état des enrobés macrorugueux, une analyse est faite en utilisant la base de donnée MISTRA TRASSEE de l'OFROU. Cette base de donnée permet de voir où sont utilisés les enrobés macrorugueux, leur âge, leur état.

En complément, un entretien a été réalisé avec M. Hans-Peter Beyeler de la division infrastructure routière de l'OFROU, pour identifier la position de l'OFROU au sujet de l'utilisation des enrobés macrorugueux sur le réseau autoroutier suisse.

Afin d'obtenir un retour des entreprises de construction routière et des gestionnaires des réseaux routiers sur les enrobés macrorugueux, une consultation via un questionnaire a été menée lors de la journée technique du LAVOC de novembre 2011. Ce questionnaire (annexe I), se compose de trois parties :

- Partie I – Inventaire des tronçons équipés de macrorugueux et appréciation
- Partie II – Caractéristiques techniques de l'enrobé
- Partie III – Remarques

3.1 Analyse statistique du réseau des routes nationales suisses

Un moyen d'évaluer l'utilisation des enrobés macrorugueux (AC MR) dans les infrastructures routières suisses ainsi que leur état consiste à exploiter les statistiques issues de base de données existantes. La base de données de MISTRA TRASSEE comporte notamment des informations sur les matériaux mis en place sur le réseau national ou sur les réseaux cantonaux. Ces informations peuvent également être recoupées avec d'autres données disponibles dans TRASSEE, comme l'état des chaussées. En observant l'évolution de ces valeurs au gré des modifications des normes (de 2008 à 2013), il est possible d'évaluer statistiquement les conséquences de la modification des exigences relatives à la teneur en vides des enrobés AC MR.

Afin d'obtenir une vue générale sur l'ensemble du territoire suisse et tenir compte de pratiques pouvant varier suivant les régions, cette analyse statistique se base uniquement sur le réseau des routes nationales. Ce choix assure également une bonne disponibilité des données souhaitées sur l'ensemble du réseau étudié, ce qui ne serait pas forcément le cas sur un réseau cantonal (notamment pour les types de matériaux en place).

Le réseau des routes nationales se compose presque exclusivement d'autoroutes ou semi-autoroutes avec d'importantes charges de trafic. Néanmoins, aucune différenciation entre les axes ne sera effectuée ici, de telles zones de congestion étant relativement difficiles à localiser avec suffisamment de précision.

La teneur en vides des chaussées n'étant pas directement renseignée dans TRASSEE, il a été choisi de se référer à l'année de construction, en admettant que la formulation utilisée respecte la normalisation en vigueur cette année-là. Pour ces dernières, l'hypothèse est faite que les enrobés ont été commandés avant la modification de la normalisation de 2013.

L'évolution des propriétés phoniques, liée à la teneur en vides, n'est pas abordée dans le présent rapport, l'accent étant mis sur le comportement mécanique (durabilité) des enrobés AC MR. Pour cela, il semble donc intéressant de comparer des matériaux posés en 2008 et en 2013, aux teneurs en vides *a priori* différentes, afin d'évaluer si une différence au niveau de l'état de dégradation des enrobés peut être détectée.

La présente analyse se base sur des données exportées du système TRASSEE le 11 novembre 2015. En raison des fréquentes actualisations de ces données, les

informations traitées peuvent parfois différer de la réalité *in situ*, l'analyse statistique étant évidemment tributaire de la qualité et de l'actualité de celles-ci.

3.1.1 Utilisation des enrobés macrorugueux sur le réseau des routes nationales suisses

L'utilisation des enrobés macrorugueux sur le réseau national suisse est représentée dans la figure ci-dessous. Les tronçons actuellement revêtus d'enrobés AC MR y sont mis en évidence (en violet). Ces revêtements sont rencontrés dans toutes les régions, avec toutefois une plus forte concentration pour les filiales F1 et F5.

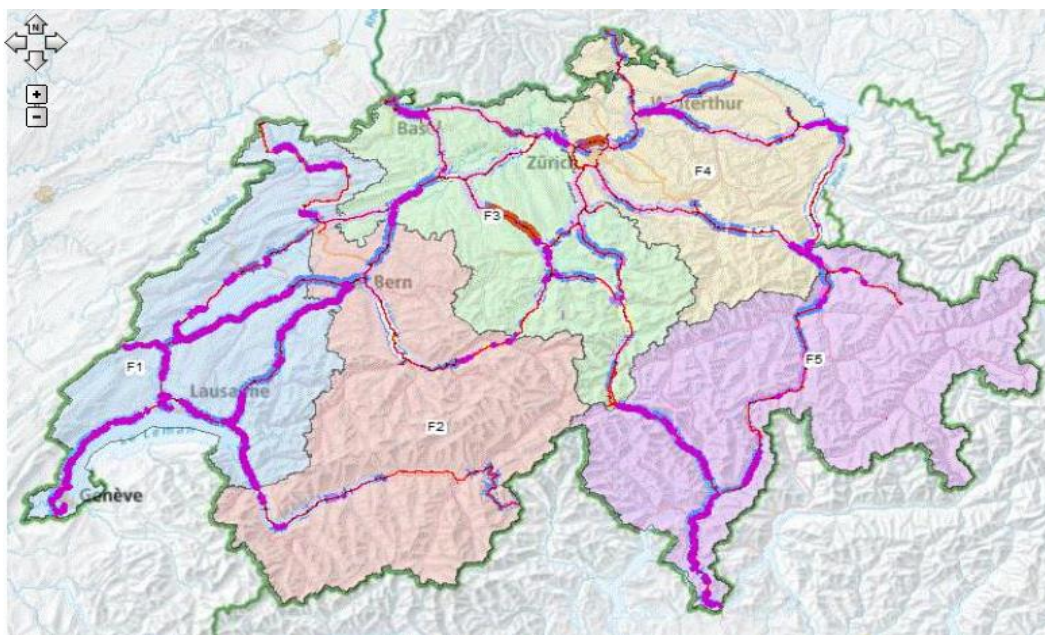


Fig. 7 Utilisation des AC MR sur le réseau national suisse. (Source : MISTRA TRASSE)

La proportion d'AC MR sur les routes nationales par rapport aux autres types de revêtement est donnée dans la figure ci-après. Actuellement, près du quart des couches de roulement des routes nationales sont revêtues d'enrobé AC MR. En 2009, cette proportion n'était encore que de 15%. En 6 ans, il y a donc eu une augmentation de 9%, soit presque 500'000 m² par année (hors considération d'éventuelles extensions du réseau des routes nationales). Au niveau des autres types de revêtements, il peut être relevé qu'une grande majorité de ceux-ci sont des enrobés AC ou des SMA (ils représentent à eux deux plus de 50% des couches de roulement des routes nationales). Les autres matériaux sont rencontrés de manière plus sporadique.

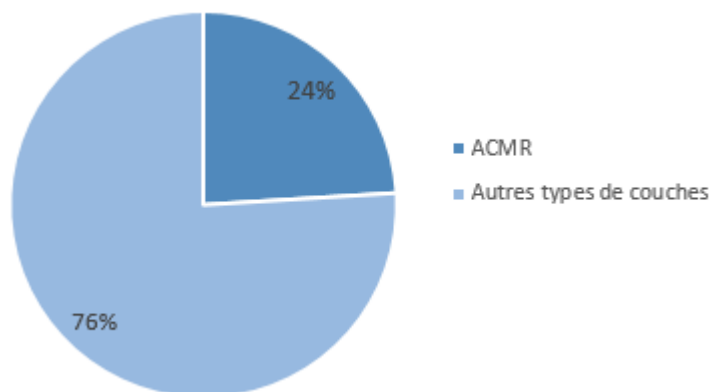


Fig. 8 Part surfacique des AC MR dans le réseau national suisse (Source : MISTRA TRASSE)

Pour les revêtements de type macrorugueux, différentes sortes peuvent être observées dans la figure ci-dessous où la lettre "L" fait référence à la caractéristique Low Noise.

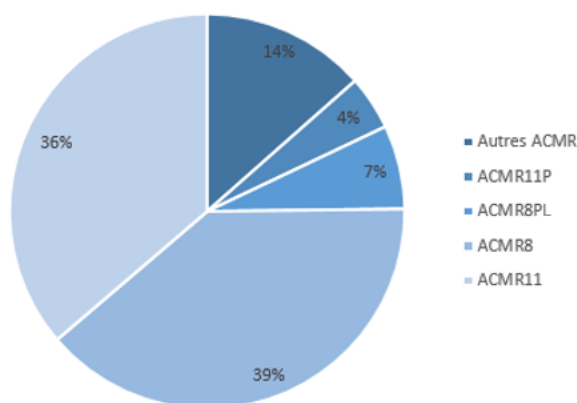


Fig. 9 Répartition des différents types d'AC MR sur le réseau national suisse (Source : MISTRA TRASSE)

Dans la suite des investigations, les matériaux suivants seront étudiés :

- AC MR 8
- AC MR 11

Les autres types d'AC MR (AC MR 6 et AC MR 16) ainsi que les enrobés AC MR 8 PL ne sont pas étudiés plus avant en raison de la faible qualité des données disponibles.

3.1.2 Etat des chaussées des routes nationales en enrobé macrorugueux

Les données d'état extraites de TRASSEE pour cette analyse sont les données d'état actuel, et correspondent pour chaque tronçon mesuré à la donnée d'état la plus récente contenue dans la base de données. Nous pouvons observer que la majorité de ces données proviennent de la campagne de relevé d'état réalisée en 2013 (ZEBNS13).

Les indices d'état mesurés sont décrits dans la norme SN 640 925b [15] et les quatre indices suivants sont utilisés par la suite :

- I_0 : Dégradations de surface (sans profondeur d'ornières)
- I_2 : Planéité longitudinale
- I_3 : Planéité transversale
- I_4 : Qualité antidérapante

Pour chaque indice, une valeur moyenne des notes, pondérées par la surface attribuée à chaque mesure, est établie pour les différentes années étudiées. Les valeurs nulles qui peuvent apparaître dans les résultats ci-après indiquent une absence de données et non pas une note moyenne égale à 0, qui correspondrait alors à un état parfait.

Dans les figures 10 et 11, les histogrammes rouges désignent un indice de vides Marshall normé par l'intervalle de valeurs limites 6.0...10.0 % (période 2009-2013) tandis que les histogrammes bleus correspondent à des teneurs en vides situées dans l'intervalle 3.0...7.0 % (avant 2009 et dès 2013, périodes regroupées au vu de la similitude des exigences).

L'analyse est menée pour les deux catégories d'enrobés macrorugueux principalement utilisées soit AC MR 8 et AC MR 11

Enrobés AC MR 8

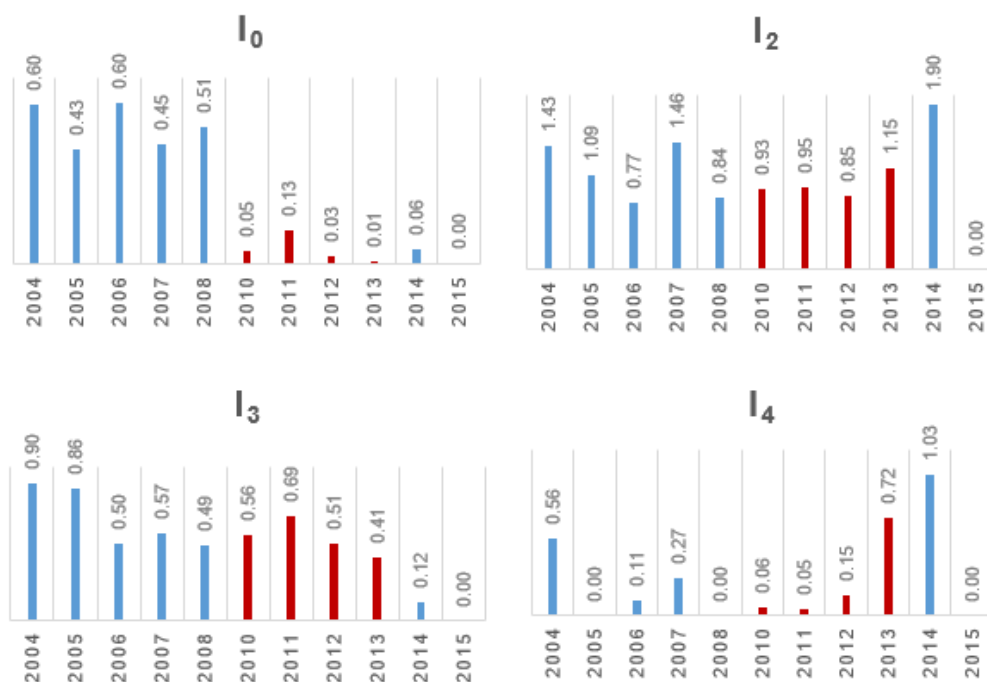


Fig. 10 Notes moyennes des 4 indices d'état pour les enrobés AC MR 8, par année de construction (Source : MISTRA). Les histogrammes en rouge correspondent aux valeurs limites 6.0...10.0 % de vides Marshall et les histogrammes en bleu aux valeurs limites 3.0...7.0 %.

Il est possible d'observer :

- Une amélioration sensible des notes relatives aux dégradations de surface (I_0) est observable à partir de 2008, année à laquelle le pourcentage de vides Marshall a été augmenté. Ces deux valeurs sont extrêmement bonnes, les tendances observées ne peuvent être considérées comme représentatives. Les valeurs de 0.4 et 0.05 révèlent des chaussées en bon état et quasiment neuves. Il faut également considérer que les saisies durant la période de reprise des routes nationales (2008-2010) par la confédération peuvent ne pas être à jour. Les causes exactes de cette "amélioration" seraient donc à investiguer davantage le cas échéant.
- Durant cette transition de 4 ans, l'état relatif à la planéité longitudinale (I_2) s'est en moyenne légèrement amélioré mais la planéité transversale (I_3) s'est quant à elle légèrement détériorée. Ces tendances sont cependant relativement modérées.
- La tendance généralement observée est celle d'une augmentation de l'indice d'état en fonction de l'âge de la chaussée. Cela pouvait être légitimement attendu. Globalement, ces valeurs moyennes indiquent un état "Bon" ou "Moyen". Le comportement de ces revêtements macrorugueux semblant globalement satisfaisant.

- Concernant la qualité antidérapante (I_4), l'impact du film de liant recouvrant les granulats en surface de chaussée doit être pris en considération. Ainsi, une route neuve aura un film de liant qui pèjore généralement la qualité antidérapante et se traduit par une diminution du coefficient de frottement. Cette chaussée présentera des caractéristiques d'adhérence optimales non pas directement après la mise en œuvre des enrobés, comme c'est le cas pour les autres indices, mais après un certain temps d'utilisation. Ainsi, au jeune âge, les chaussées présentent fréquemment une qualité antidérapante moins bonne qu'après quelques mois de service. La valeur relative aux chaussées construites en 2013 doit donc être considérée avec précaution.

Enrobés AC MR 11

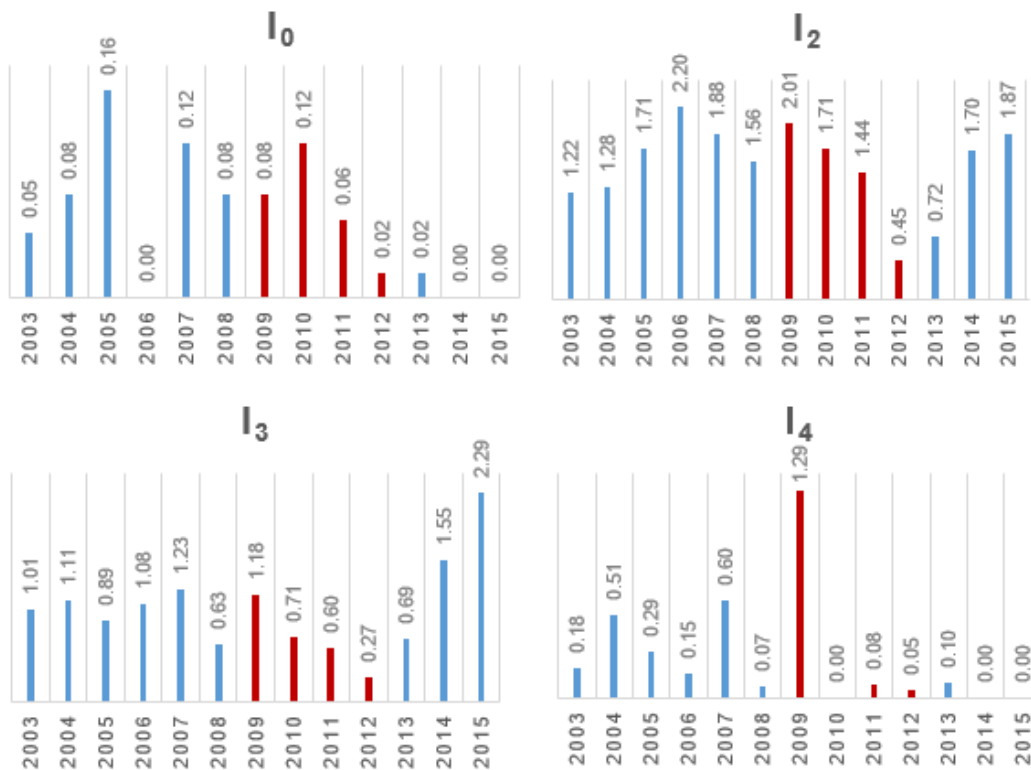


Fig. 11 Notes moyennes des 4 indices d'état pour les ACMR 11, par année de construction (Source : MISTRA). Les histogrammes en rouge correspondent aux valeurs limites 6.0 - 10.0 %-Vol de vides Marshall et les histogrammes en bleu aux valeurs limites 3.0 - 7.0 %-Vol.

Pour les enrobés macrorugueux dont le diamètre maximal des granulats est de 11.2 mm, il est plus difficile d'affirmer que l'indice d'état est sensiblement meilleur pour les chaussées plus récentes. En effet, les indices relatifs à la planéité longitudinale (I_2) et transversale (I_3) sont plutôt moins bons pour les années 2014 et 2015. Pour les dégradations de surfaces (I_0), les valeurs d'état sont toutes très bonnes. Cela ne permet pas de mettre en évidence un impact significatif de la teneur en vides sur l'état de dégradation des chaussées.

Concernant l'influence des valeurs limites, il n'est pas possible de conclure sur la base des éléments ci-dessus que l'augmentation des vides ait influencé de manière significative l'état des chaussées. Les indices d'état sont globalement proches.

Comme mentionné précédemment, la valeur moyenne relativement élevée de l'indice I_4 calculée pour 2010 peut provenir du film de liant encore présent à la surface du revêtement.

Comparaison pour deux années caractéristiques

Pour pouvoir effectuer des comparaisons selon une base identique, les moyennes globales d'état du réseau des couches de roulement des routes nationales (tous matériaux confondus) sont établies pour 2 années caractéristiques soit en 2006 (avant l'augmentation des teneurs en vides) et en 2011 (milieu de la période d'augmentation des teneurs en vides). Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tab. 6 Comparaison des notes moyennes pour deux années de référence

2006				
Note moyenne				
	I_0	I_2	I_3	I_4
Réseau national suisse	0.45	1.18	0.68	0.19
ACMR 8	0.65	0.79	0.43	0.10
ACMR 11	0.00	2.20	1.08	0.15
2011				
Note moyenne				
	I_0	I_2	I_3	I_4
Réseau national suisse	0.07	1.15	0.55	0.05
ACMR 8	0.13	0.95	0.69	0.05
ACMR 11	0.06	1.44	0.60	0.08

Les valeurs obtenues pour les enrobés macrorugueux sont globalement proches des notes moyennes des autres revêtements posés la même année. Pour la planéité longitudinale (I_2), les indices d'état de l'enrobé AC MR 11 sont supérieurs à la moyenne, et ceux de l'enrobé AC MR 8 sont inférieurs à cette même valeur moyenne.

Considérant la différence entre les deux années de référence, il ne peut être conclu que les revêtements posés en 2011, présentant davantage de vides, se comportent moins bien que ceux posés en 2006.

3.1.3 Synthèses de l'analyse statistique

Les conclusions qui peuvent être faites sur cette analyse statistiques ne concernent que les routes nationales, dont les sollicitations varient peu (trafic élevé, vitesse > 80 km/h) et soumises à des conditions climatique relativement homogène (peu de route en altitude). D'autres analyses devraient être menées pour d'autres types de routes et de sollicitations afin de posséder un point de vue global des revêtements macrorugueux et de l'influence de la teneur en vides sur leur état de dégradation.

Au niveau de l'évolution moyenne des indices d'état, la modification de normalisation n'a vraisemblablement pas engendré de changements significatifs des indices I_2 , I_3 et I_4 , alors que l'indice I_0 s'est vraisemblablement amélioré pour les enrobés AC MR 8. Les causes de cette amélioration de l'indice I_0 sont à investiguer davantage.

Afin de pouvoir évaluer de manière exhaustive l'évolution de la qualité antidérapante (I_4) durant la période de modification de la normalisation, un recul de quelques années supplémentaires serait nécessaire permettant ainsi d'atteindre l'usure nécessaire à faire disparaître le film de liant en surface de la chaussée.

L'état moyen des enrobés macrorugueux par rapport à la moyenne des couches de roulement du réseau national (analyse de deux années caractéristiques) est globalement meilleur pour les enrobés AC MR 8. Les enrobés AC MR 11 semble globalement légèrement moins performants (indices d'état plus élevés). Sur la base de ces seules statistiques, il est cependant difficile de mettre en évidence un impact significatif de la teneur en vides sur l'état des couches de roulement en enrobé AC MR.

3.2 Stratégie de l'Office fédéral des routes

Un entretien en décembre 2013 avec M. H.-P. Beyeler, de la division infrastructure routière de l'OFROU donne l'expérience de l'OFROU sur l'utilisation des enrobés macrorugueux sur certain tronçon autoroutier.

Historiquement, les enrobés macrorugueux ont été posés tout d'abord en Suisse Romande principalement pour leurs propriétés phoniques. Ils n'ont pas de problèmes spécifiques connus à ce jour et présentent un comportement satisfaisant ce qui fait que ce type d'enrobé est devenu le matériau standard pour les autoroutes depuis plus de 10 ans. Le seul risque subsiste au niveau de l'accrochage inter-couches sur des AC T 22 H.

Aujourd'hui, la teneur en vides des enrobés macrorugueux utilisés sur autoroute est de l'ordre de 8%. Une planche d'essai a été réalisée avec une teneur en vides supérieure de 12%. Cette planche est actuellement en cours d'analyse et si les résultats s'avèrent satisfaisants, cette formule est destinée au UPlaNS de Nidwald en 2014.

L'OFROU a fixé les exigences suivantes pour les macrorugueux. Ces exigences vont dans le sens des normes à l'exception des deux premiers points qui sont des exigences supplémentaires :

- Un ajout de chaux éteinte de 1.5% de la masse de granulats (s'ajoute en compensation du filler) dans toutes les recettes afin d'avoir une meilleure cohésion des matériaux et un vieillissement ralenti de l'enrobé.
- Un coefficient de polissage des granulats de PSV₅₄ au lieu de PSV₅₀ afin d'avoir une adhérence accrue sur la durée de vie de ce type d'enrobé.
- Une durée de vie de 15 ans doit être visée pour ces enrobés.
- Un minimum de vides communicants est souhaité afin de garder un revêtement étanche.
- Une épaisseur de pose de l'enrobé de 3 cm est prescrite.

3.3 Retour de la consultation, Inventaire des tronçons et appréciation

La consultation auprès de divers spécialistes et de gestionnaires de réseaux a été faite en collaboration avec la ville d'Yverdon-les-Bains, le responsable du réseau des routes nationales en Valais, un bureau d'ingénieur et un responsable de secteur de l'OFROU.

Il ressort que les enrobés macrorugueux sont posés sur tous les types de chaussées pouvant accueillir un fort trafic :

- Milieu urbain ou extra-urbain
- Route à grande vitesse

Une note qualitative et globale a été attribuée aux enrobés macrorugueux par rapport aux enrobés classiques (-5 Macrorugueux moins bon ; 0 macrorugueux équivalent ; +5 macrorugueux nettement meilleur). Le tableau ci-après donne les tronçons ainsi que la note correspondante.

Tab. 7 Tronçons équipés de macrorugueux et appréciation de ceux-ci

Tronçon	Canton	Type de route	Note
RC 1565, Courrendlin - Vicques	Jura	Route cantonale	2
RC 18, Courtételle	Jura	Route cantonale	2
Yverdon, Rue des Uttins	Vaud	Rte collectrice	0
Yverdon, Rue de Graveline	Vaud	Rte collectrice	0
Yverdon, Rue de Graveline	Vaud	Rte collectrice	-1
Yverdon, Pl. de la Sallaz	Vaud	Rte collectrice	0
Yverdon, Av. des Trois Lacs	Vaud	Rte collectrice	0
Yverdon, Av. des Trois Lacs	Vaud	Rte collectrice	0

Yverdon, Rue des Caserne	Vaud	Rte collectrice	-1
Yverdon, Rue des Philosophes	Vaud	Rte collectrice	0
Yverdon, Rue des Découvertes	Vaud	Rte collectrice	0
A9, Martigny	Valais	Autoroute	1
A9, Martigny	Valais	Autoroute	2
A9, Vétroz	Valais	Autoroute	2
A9, Bex St-Maurice	Valais	Autoroute	3
N16, Boncourt - Bure	Jura	Route nationale	*
N16, Moutier Nord-Sud	Jura	Route nationale	*

* enrobé nouvellement posé : pas possible d'attribuer une note

Globalement, sur les routes à grande vitesse analysées (>80 km/h), les enrobés macrorugueux sont bien appréciés pour leurs propriétés et leur bon comportement. Les propriétés mises en avant sont la réduction des émissions sonores et l'évacuation des eaux de surface facilitée par la macrotecture de l'enrobé.

Pour le milieu urbain, les enrobés macrorugueux ne présentent pas de différences significatives par rapport aux enrobés standards. Ils sont même parfois jugés défavorables par le risque d'arrachement des granulats provoqué par des véhicules lourds et par le risque plus élevé de ressuage si la pose n'est pas faite dans les règles de l'art. De plus, les propriétés phoniques ne sont que peu remarquées car le bruit de roulement est très vite couvert par d'autres bruits (moteur,...).

Comme les macrorugueux sont des enrobés relativement récents et que le recul sur leur durabilité est faible, certaines questions, issue du retour du questionnaire, restent encore ouvertes.

- Stabilité de l'enrobé au gel
- Arrachement des granulats
- Conservation des propriétés phoniques

3.4 Commentaires finaux

3.4.1 Enseignement relatif à l'emploi des enrobés macrorugueux

Les enrobés macrorugueux sont des produits utilisés principalement en Suisse. Ce sont également des produits relativement nouveaux et le recul sur l'évolution de leurs propriétés est encore faible surtout avec les changements apparus dans la normalisation quant à la teneur en vides.

L'analyse statistique montre un bon comportement au niveau des indices d'état pour les AC MR 8 et un comportement globalement moins bon pour les AC MR 11 par rapport aux autres enrobés. De plus, la teneur en vides n'a, *a priori* pas d'impact significatif sur l'état des couches de roulement.

Le tableau ci-dessous donne une série d'avantages et d'inconvénients liés aux enrobés macrorugueux relevés dans les chapitres 1 et 3.

Tab. 8 Avantages et inconvénients relevés sur les enrobés macrorugueux

Avantages	Inconvénients
Réduction des émissions sonores d'environ -3 dB (A) par rapport à un enrobé traditionnel	Déconseillé de poser ce type d'enrobé sur des chaussées à forte déclivité ou à forte sinuosité
Meilleure adhérence sur la chaussée due à la macrotecture de l'enrobé	Risque de baisse des propriétés des macrorugueux si des saletés s'incrustent dans l'enrobé
Diminution des projections d'eau lorsque la chaussée est humide	Peu de connaissances sur les propriétés mécaniques des macrorugueux sur le long terme
Meilleure résistance à l'orniérage	

Les matériaux utilisés dans la fabrication des enrobés macrorugueux doivent répondre à des exigences élevées. Au niveau des granulats les propriétés minimales demandées sont un PSV_{50} et un LA_{25} . Pour le bitume, il doit impérativement être modifié par des polymères afin garder une adhérence et une cohésion du mélange élevée.

La question de la teneur en vides joue un rôle central dans cette étude. Une augmentation de la teneur en vides va favoriser certaines propriétés fonctionnelles comme la réduction des émissions sonores et l'évacuation des eaux de surface mais n'est *a priori* pas sans conséquence sur les propriétés structurelles comme la résistance à l'orniérage ou la résistance aux efforts.

3.4.2 Questions ouvertes

En se référant à l'enquête réalisée et en fonction de l'état des connaissances sur les enrobés macrorugueux, plusieurs questions restent en suspens quant à la durabilité mécanique de ce type d'enrobé :

- Influence des vides et des vides communicants sur la résistance au gel
- Influence des vides sur la couche d'encollage de l'enrobé
- Durabilité des propriétés structurelles et fonctionnelles des enrobés macrorugueux

4 Essais en vraie grandeur

La réalisation d'essais en vraie grandeur permet de tester diverses structures de chaussées à l'échelle 1:1 tout en contrôlant les sollicitations (charges, températures, vitesses de sollicitation). Ce chapitre décrit les objectifs des essais en vraie grandeur et fournit les détails relatifs à la définition des sollicitations et instrumentation des chaussées. Les essais de contrôle de la pose sont également abordés. L'analyse des résultats d'essais est ensuite réalisée au chapitre 5.

4.1 Objectifs des essais en vraie grandeur

La réalisation des essais en vraie grandeur a pour objectif global l'analyse de l'incidence sur le comportement mécanique (et donc la durabilité) d'une augmentation de la teneur en vides des enrobés macrorugueux. Pour cela, trois structures ont été testées qui se distinguent par la teneur en vides de la couche de roulement et/ou par la couche de base. Ces essais ont été menés dans la halle fosse de l'EPFL à l'aide du simulateur de trafic lourd avec les buts suivants :

- Evaluer les performances fonctionnelles (orniérage et qualité antidérapante) en fonction de la teneur en vides.
- Evaluer le comportement structurel de la chaussée, soit les déformations horizontales à l'interface et au bas des couches bitumineuses ainsi que les déformations verticales en surface (orniérage).
- Fournir les éléments nécessaires pour la réalisation des calculs de coefficients d'équivalence "a" pour les enrobés macrorugueux.

4.2 Choix des matériaux

4.2.1 Sélection et provenances des matériaux mis en place

Les données de base relatives aux enrobés macrorugueux utilisés dans le cadre de cette recherche sont les suivantes :

- Granulats : Gravier morainique alluvionnaire concassé provenant de la carrière de JPF à Grandvillard (Fribourg).
- Filler : "Grès des carrières" provenant de FAMSA à Massongez (Valais).
- Liant : Bitume modifié aux polymères : PmB 45/80-65 (CH-E) Styrelf® E60.
- Pas de matériaux de recyclage (fraisat d'enrobé)

L'utilisation de granulats avec des caractéristiques mécaniques élevées apporte une microtexture bien développée et une résistance au polissage accrue. En outre, ces granulats sont passablement sollicités du fait des teneurs en vides élevées.

L'utilisation d'un bitume modifié aux polymères est une exigence normative qui se justifie en raison des performances élevées attendues par rapport aux cycles de température, adhésion liant-granat et résistance à l'orniérage. En outre, comme expliqué au chapitre 2.1.3, les fortes sollicitations internes des enrobés macrorugueux impliquent le recours à des liants à performances élevées donc modifié par des polymères.

Dans l'état actuel, la normalisation suisse n'autorise pas l'utilisation de fraisat d'enrobé dans les enrobés macrorugueux. Ceci doit garantir l'utilisation de granulats avec des performances élevées (CPA, Los Angeles).

L'ensemble des caractéristiques des matériaux retenus sont données dans le tableau ci-après, les fiches des produits sont également données dans l'annexe II.

Tab. 9 Propriétés des matériaux utilisés

	Sable (0/4)	Pierre (4/8)	Pierre (8/11)	Filler		Bitumes Pmb 45/80-65
Densité [to/m ³]	2.67	2.67	2.66	2.71	Densité [to/m ³]	1.03
Vide Rigden [%]	-	-	-	34	Temp. A&B [°C]	≥ 65
Angularité [E _{cs}]	E _{cs} 19 Anguleux	-	-	-	Pénétrabilité [1/10mm] à 25°C	45-80
Polissage [CPA]	-	-	CPA ₅₀	-	Temp. Frass [°C]	-10°C
Los Angeles [LA]	-	LA ₂₅	LA ₂₀	-		

4.2.2 Définition des champs d'essais

Pour les essais en vraie grandeur, deux variantes de teneur en vides cible ont été élaborées, ceci afin d'évaluer les valeurs limites prévues dans la normalisation (valeur individuelle, vides des couches) :

- Couche de roulement AC MR 8, cible 8% de vides (en place)
- Couche de roulement AC MR 8, cible 13% de vides (en place)

Le choix de teneurs en vides des couches (valeurs individuelles) permet ainsi d'investiguer la valeur moyenne de 8% (référence) ainsi que la valeur limite (13%) proposée dans la normalisation SN 640 430b [3] de 2008.

Les essais en vraie grandeur sont réalisés sur trois champs, représentés dans la figure 12.

- Champ 1 : AC MR 8 (8% de vides) ; AC T 22 S ; Grave I 0/32
- Champ 2 : AC MR 8 (8% de vides) ; AC EME 22 C1 ; Grave I 0/32
- Champ 3 : AC MR 8 (13% de vides) ; AC EME 22 C1 ; Grave I 0/32

Nous pouvons relever ici que deux couches de base différentes ont été utilisées soit un enrobé AC EME 22 C1 comme structure de référence fréquemment utilisée pour les revêtements autoroutiers ainsi qu'un enrobé de type AC T 22S tiède. Le choix d'un champ avec enrobé tiède (EBT) en couche de base permet de bénéficier d'enseignements sur ces matériaux qui font l'objet d'autres recherches menées par le LAVOC (Projet PLANET).

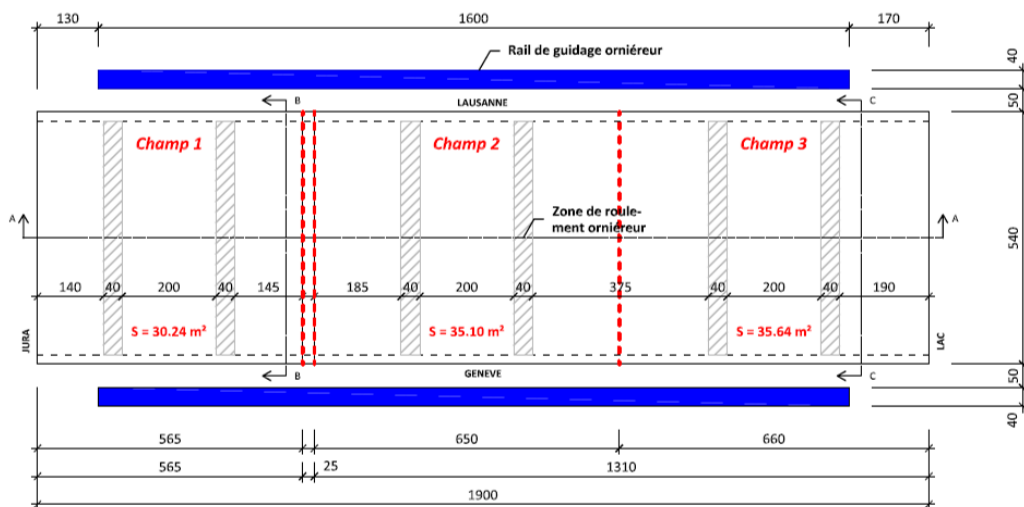


Fig. 12 Schéma des champs d'essai étudiés (champ 1 et 2 : AC MR 8 avec 8% de vides ciblés, champ 3 : AC MR 8 avec 13% de vides ciblés)

Les différents enrobés utilisés sont issus des recettes standards de la centrale d'enrobage à l'exception de l'enrobé macrorugueux avec 13% de vides cible qui est issu d'une étude de formulation analytique, utilisant le logiciel PradoWin développé par le CRR [31]. Il n'y pas eu d'optimisation de formulation en amont de cette recherche mais il est proposé une optimisation de la formulation basée sur une autre étude au chapitre 7.

Les couches de roulement en enrobé macrorugueux, testées dans cette étude, sont décrites et analysées au chapitre 4.7.

La couche de base en enrobé tiède AC T 22 S a été réalisée avec l'ajout de cire Fischer-Tropsch Sasobit® qui est un additif permettant d'abaisser la viscosité du mélange dans le domaine de production et compactage de l'enrobé, tout en garantissant une résistance élevée dans le domaine des températures de service [26]. Une formulation standard d'enrobé AC T 22S est utilisée, la cire étant ajoutée à un dosage de 3% de la masse de bitume (recommandation du fournisseur). La courbe granulométrique de cet enrobé est donnée dans la figure 13 ainsi que certaines caractéristiques :

- Type de liant : Azalt® 50/70S
- Teneur en liant sur enrobé : 3.99%
- Teneur en vides Marshall : 6.2%-vol
- Masse volumique réel : 2.536 to/m³
- Teneur en fraisât d'enrobé : 0%

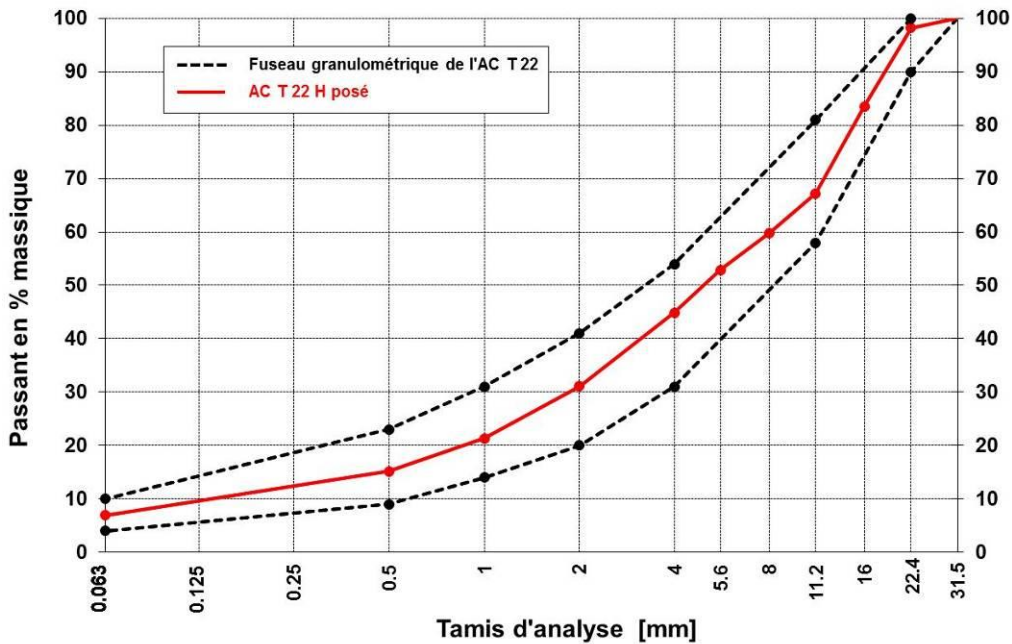


Fig. 13 Courbe granulométrique de l'AC T 22 H

L'enrobé AC EME 22 C1 utilisé en couche de base est également issu des recettes standards de la centrale. La courbe granulométrique de cet enrobé est donnée dans la figure 14 ainsi que certaines caractéristiques :

- Type de liant : Modulotal® 15/25
- Teneur en liant sur enrobé : 4.98%
- Teneur en vides Marshall : 3.1%-vol
- Masse volumique réel : 2.498 to/m³
- Teneur en fraisât d'enrobé : 0%

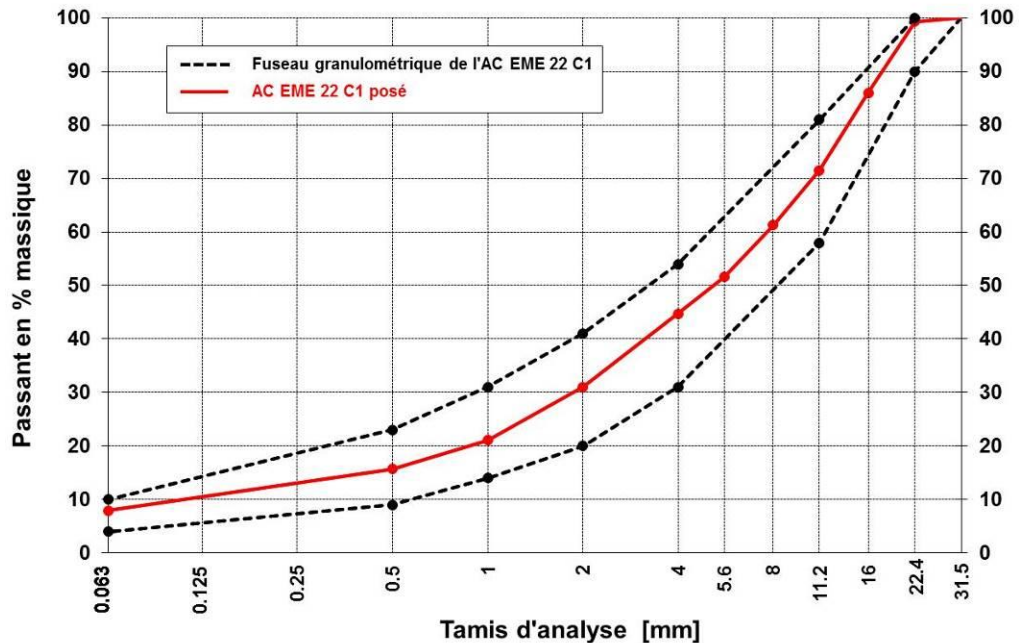


Fig. 14 Courbe granulométrique de l'AC EME 22 C

Les différents enrobés ont été fabriqués dans la même centrale à Grandvillard (Fribourg) soit à une distance de transport d'environ une heure. Les épreuves types de formulation ou les recettes des matériaux posés pour les essais en vraie grandeur sont données dans l'annexe III.

4.3 Dimensionnement des structures de chaussées

4.3.1 Caractéristiques du trafic, des matériaux et hypothèses de base

Trafic

Les caractéristiques suivantes sont retenues pour le trafic :

- 160'000 passages
- Pneu supersingle
- Pression des pneumatiques 0.9 MPa
- Charge : 11.5 to.

Le coefficient d'agressivité moyen (CAM) est calculé en fonction d'un essieu de référence de 13 to proposé par la méthode française de dimensionnement et de la configuration de celui-ci [37]. Dans notre cas, le CAM vaut 0.735.

Matériaux

Les caractéristiques retenues pour les différents matériaux sont données dans le tableau 14, les différents éléments étant définis sur la base des recommandations de la méthode française SETRA [34]. Le choix d'utiliser un module avec une fréquence de 4.5 Hz se base sur la formule de Franken [31] $f(\text{Hz}) = 0.45 \cdot V$ (km/h). La vitesse de 10 km/h correspond à la vitesse de l'ornièreur lourd utilisé pour ces essais.

Tab. 10 Caractéristiques des matériaux pour le dimensionnement

Couche	Type	Epaisseur [cm]	Module (15°C, 4.5 Hz) [MPa]	Coef. Poisson
Champ 1				
1	AC MR 8	3	5'000	0.35
2	EBT	8	5'400	0.35
3+4	Grave I 0/32	44	270	0.35
5	Sable	145	90	0.35
6	Béton	∞	20'000	0.2
Champs 2+3				
1	AC MR 8	3	5'000	0.35
2	EME C1 25%RA	8	11'300	0.35
3+4	Grave I 0/32	44	270	0.35
5	Sable	145	90	0.35
6	Béton	∞	20'000	0.2

Nous pouvons ajouter les éléments suivants relatifs au choix des caractéristiques des matériaux en vue de la modélisation :

- Température de sollicitation 15 °C.
- Conformément aux recommandations de la méthode française [34], la couche de grave est subdivisée en couches d'épaisseur 20-25 cm dont le module est croissant. La première couche de grave a un module de 270 MPa soit trois fois celui du sol support (sable), la seconde couche de grave a un module de 360 MPa (valeur maximale pour une couche de grave).
- L'enrobé basse température possède des performances (*i.e.* module) au moins équivalentes à celles d'un enrobe à chaud. Les valeurs retenues sont issues du guide technique SETRA.
- L'AC MR 8 a un module d'élasticité identique pour les différents champs d'essais. L'impact de la teneur en vides sur le module de l'enrobé AC MR n'est pas jugé déterminant. La valeur proposée de 5'000 MPa tiens compte d'une teneur en vides supérieurs à la moyenne en utilisant un module réduit par rapport à ceux utilisés dans la modélisation réalisée pour le projet européen NR2C qui sont de 7'400 MPa [25].
- Pour l'AC EME C1, le module d'élasticité (15°C, 4,5 Hz) est obtenu sur la base d'essais 2PB-TR réalisés au laboratoire du LAVOC avec des matériaux du même type.
- Gravier drainant non modélisé. Ils sont pris en considération dans la couche de sable

4.3.2 Calcul selon une méthode rationnelle (méthode française)

La méthode multicouche de dimensionnement appliquée, appelée également méthode française ou méthode rationnelle, est une méthode mécanico-empirique qui prend en compte les sollicitations à l'intérieure de la chaussée (état de contraintes et de déformations). Ce dimensionnement permet de déterminer l'épaisseur nécessaire des couches de la chaussée afin qu'elles puissent supporter les sollicitations prévues tout au long de la durée de service. Le cas échéant, un dimensionnement au gel doit être réalisé dans une seconde phase.

Le principe de cette méthode consiste à comparer les sollicitations admissibles et les sollicitations calculées (*i.e.* réelles) à différents points de profondeur de la chaussée, les valeurs calculées ne devant pas excéder les valeurs admissibles. Deux critères de rupture sont considérés dans la méthode française de dimensionnement des chaussées routières :

- Rupture par fatigue : vérification des déformations ou contraintes horizontales au bas des couches bitumineuses, le type de sollicitation à vérifier dépendant du mode de rupture et donc du type de chaussée.
- Rupture par orniérage structurel : Vérification de la déformation verticale au sommet du sol support.

Selon le type de chaussée (souple, semi-rigide, rigide, ...), les points de calculs peuvent varier de même que les paramètres de modélisation. Chaque couche de la structure est définie par une épaisseur, un module élastique et un coefficient de poisson [38]. Les calculs ont été réalisés à l'aide du logiciel NOAH®.

La vérification des déformations nécessite la détermination des caractéristiques en fatigue des matériaux utilisés pour les couches de base (AC EME, AC T). Les déformations admissibles sont déterminées à partir de la loi de fatigue établie par des essais en laboratoire sur éprouvettes trapézoïdales. Cette loi établit une relation entre la déformation (ou la contrainte) imposée durant l'essai et le nombre de cycles nécessaires pour aboutir à la rupture par fatigue de l'éprouvette. Elle peut être représentée par une droite (dite de Wöhler) dans un espace logarithmique. Cette droite permet de déterminer ϵ_6 , qui correspond à la déformation conduisant à une rupture de l'éprouvette après 10^6 cycles de sollicitation.

Les valeurs ϵ_6 obtenues en laboratoire sont ensuite corrigées pour tenir compte de divers facteurs. La méthode française utilise les coefficients suivants :

- K_r : « coefficient de risque » qui ajuste la valeur de la déformation au risque de calcul retenu. Il tient compte de la dispersion sur l'épaisseur des couches et sur les résultats de l'essai de fatigue. Ce coefficient permet d'introduire une notion probabiliste dans le dimensionnement des chaussées. Ce coefficient est déterminé par la formule $K_r = 10^{-ub\delta}$ avec u : variable centrée réduite associée au risque qui est ici de 5%, b : pente de la loi de fatigue et δ : écart-type de la distribution log N à la rupture. Pour le cas étudié ici, ce coefficient vaut 0.787 pour le champ 1 et 0.888 pour les champs 2 et 3.
- K_c : « coefficient de calage » qui ajuste la déformation admissible au comportement réel des chaussées. Les valeurs de ce coefficient, qui dépend du matériau, ont été déterminées à partir d'observations de chaussées en service et d'essais accélérés. Dans notre cas, il vaut 1.3 pour le champ 1 et 1.0 pour les champs 2 et 3.
- K_s : « coefficient de support » qui tient compte d'éventuelles hétérogénéités dans la couche supportant les couches d'enrobés. Ce coefficient permet de diminuer les contraintes admissibles dans les matériaux. Dans notre cas il vaut 1.0 pour tous les champs.

Dimensionnement du champ 1

Le tableau ci-dessous synthétise les différents résultats de dimensionnement pour le champ 1, une analyse de sensibilité étant réalisée pour l'épaisseur des différentes couches.

Tab. 11 Récapitulatif des résultats du dimensionnement pour le champ 1

Cas	Ep. AC MR8 [cm]	Ep. AC T [cm]	Ep. grave [cm]	Ep. sable [cm]	NE11.5t, max	Risque	ϵ_{adm} [10^{-6}]	ϵ_{calc} [10^{-6}]
1	3	8	44	145	17'000	5%	162	253
					56'000	50%	206	253
					92'000	75%	227	253
					185'000	95%	262	253
2	4	9	43	145	24'500	5%	162	237
					77'000	50%	206	237
					127'000	75%	227	237
					260'000	95%	262	237
3	4	9	42	145	32'500	5%	162	222
					107'000	50%	206	222
					175'000	75%	227	222
					360'000	95%	262	222

4	4	10	41	145	45'000	5%	162	208
					150'000	50%	206	208
					245'000	75%	227	208
					490'000	95%	262	208
5	4	11	40	145	60'000	5%	162	195
					205'000	50%	206	195
					325'000	75%	227	195
					680'000	95%	262	195
6	4	12	39	145	87'000	5%	162	183
					290'000	50%	206	183
					470'000	75%	227	183
					950'000	95%	262	183

Sur la base des différentes itérations, la structure de chaussée finalement retenue est indiquée en rouge dans le tableau ci-dessus. Ce choix se fait en analysant le risque et le nombre d'essieux auquel la structure doit résister soit 87'000 essieux de 11.5 to pour un risque de 5%.

Dimensionnement des champs 2 et 3

Le tableau ci-dessous contient les différentes variantes de chaussée évaluées, la solution retenue étant également indiquée en couleur rouge. Comme cette chaussée doit pouvoir résister au passage de 180'000 essieux de 11.5 to avec un risque de 5%, cette chaussée est donc dimensionnée adéquatement pour résister au passage des 160'000 essieux prévus.

Tab. 12 Récapitulatif des résultats du dimensionnement pour les champs 2 et 3

Cas	Ep. AC MR8 [cm]	Ep. EME [cm]	Ep. grave [cm]	Ep. sable [cm]	NE11.5t, max	Risque	ϵ_{adm} [10 ⁻⁶]	ϵ_{calc} [10 ⁻⁶]
1	3	8	44	145	83'000	5%	171	182
					270'000	50%	192	182
					450'000	75%	202	182
					900'000	95%	217	182
2	4	9	42	145	350'000	5%	171	157
					1'200'000	50%	192	157
					2'000'000	75%	202	157
					4'000'000	95%	217	157
3	2	8	45	145	38'000	5%	171	195
					130'000	50%	192	195
					220'000	75%	202	195
					450'000	95%	217	195
4	3	9	43	145	180'000	5%	171	168
					600'000	50%	192	168
					1'000'000	75%	202	168
					2'000'000	95%	217	168

4.3.3 Synthèse des structures retenues

Pour les essais en halle-fosse, les structures suivantes ont finalement été retenues :

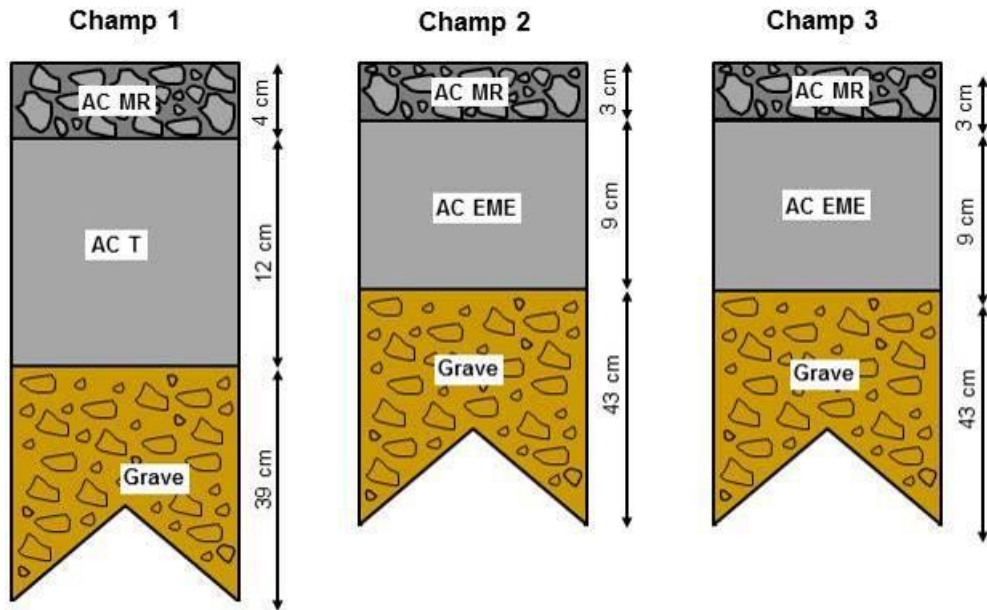


Fig. 15 Schéma des structures retenues pour les essais en vraie grandeur.

4.4 Instrumentation et déroulement des essais en vraie grandeur

4.4.1 Construction des structures

La halle-fosse, équipée pour réaliser des essais en vraie grandeur sur des structures de chaussées, se compose d'une fosse de 19 m x 5 m. Les sollicitations sont réalisées à l'aide d'un ornièreur lourd (simulateur de trafic) circulant dans le sens de la largeur de 5 m, ce qui permet aisément de tester plusieurs structures de chaussées simultanément. A l'une de ses extrémités, la halle fosse dispose d'un puits de 6 m de profondeur, alors que le reste de la fosse à une profondeur de 2 m. La partie profonde peut être couverte d'éléments en béton constituant un plancher au même niveau que le reste de la fosse, soit à 2 m de profondeur.

La structure construite prend tous l'espace en surface et descend jusqu'à 2 mètres comme le montre la figure 16. La mise en place des enrobés se fait avec des moyens identiques (camions, finisseur, compacteurs) à ceux utilisés sur les routes. En revanche, en raison de la configuration générale de la halle, la pose est effectuée perpendiculairement au sens de roulement du simulateur de trafic lourd.

Une structure isolée thermiquement a également été construite au-dessus des champs, afin de réaliser des essais en ayant un contrôle optimal sur les températures permettant notamment la réalisation de cycles de températures.



Fig. 16 Construction des structures de chaussées dans la halle fosse

4.4.2 Instrumentation des structures de chaussées

Un suivi des sollicitations au cours des cycles de chargement a été réalisé, par l'installation de différents capteurs au sein de la chaussée. Au total, les différents champs ont été équipés de 70 capteurs soit 54 jauges de déformations (modèle Kyowa), 6 capteurs de déplacement pour mesure des déformations verticales (LVDT – Linear Variable Differential Transformer) et 10 sondes de température (Pt100). Les différents systèmes de mesures ont été posés au niveau de l'interface grave / couche de base et au niveau de l'interface couche de base / couche de roulement. Les figures 18 et 19 donnent le schéma de l'installation des différents appareils de mesures.

Jauges de déformation

Les jauges de déformation (Kyowa) sont utilisées afin de mesurer les déformations horizontales aux interfaces entre les différentes couches de la chaussée. Les jauges sont construites selon un protocole développé au LAVOC permettant d'assurer une bonne liaison entre la jauge et les couches bitumineuses par la fixation de barrettes en aluminium aux extrémités du capteur. Ces jauges sont présentées sur la photo ci-dessous :



Fig. 17 Jauges de déformation (Kyowa).

Les capteurs sont disposés longitudinalement et transversalement au sens de sollicitation selon le schéma proposé dans les figures 18 et 19 où les capteurs de déformation sont indiqués en couleur rouge et les capteurs de température en couleur verte (bas des couches bitumineuses). Une instrumentation identique a été utilisée pour les différents champs.

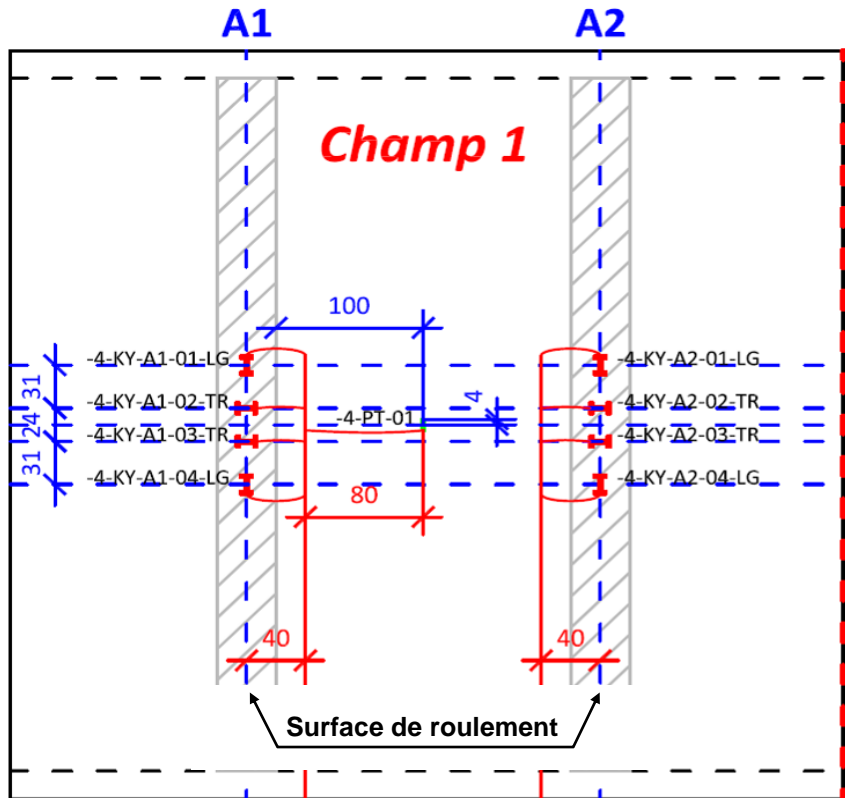


Fig. 18 Schéma de pose de l'instrumentation à l'interface entre la couche de base et la couche de roulement (champ 1).

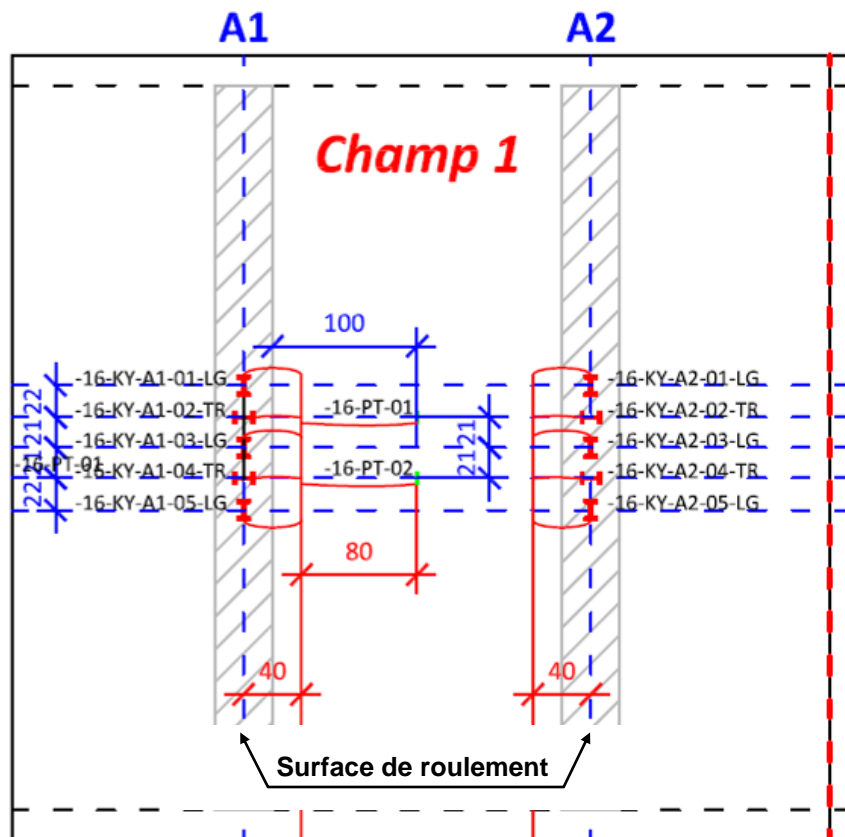


Fig. 19 Schéma de pose de l'instrumentation au bas des couches bitumineuses (champ 1).

Capteurs de température Pt100

Au total, 8 capteurs de température Pt100 ont été utilisés (voir figure ci-dessous). Pour chaque champ, deux sondes de température ont été installées dans la structure à l'interface entre la grave et la couche de base. A cela, un capteur additionnel a été installé sur la surface de la chaussée et un dernier est utilisé afin de mesurer la température de l'air (environ 1 m du sol).



Fig. 20 Jauge de température Pt100.

Jauges de déplacement (LVDT)

Les déformations verticales au sommet de la chaussée, ont été mesurées à l'aide d'une poutre de déflexions équipée de 6 capteurs LVDT comme le montre les figures 21 et 22. Le principe consiste à positionner les capteurs LVDT perpendiculairement au sens de sollicitations et mesurer le demi-bassin de déflexions au passage de la charge. Comme consigné dans la la figure 22, le premier capteur LVDT est positionné à environ 9 cm de la charge, le dernier capteur étant situé à 39 cm de la charge.



Fig. 21 Jauges de déplacement LVDT.

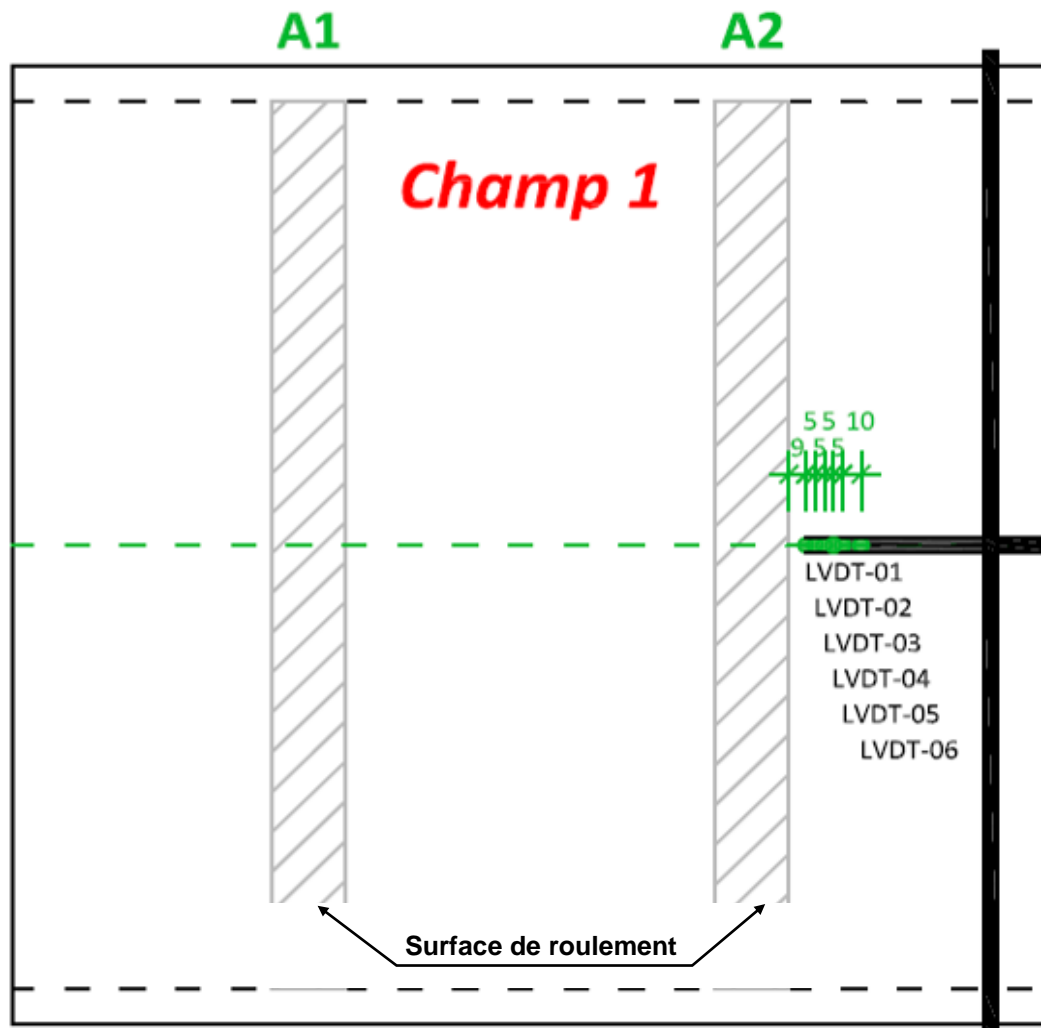


Fig. 22 Schéma de pose des jauges de déplacement LVDT.

4.4.3 Simulateur de trafic lourd

Le simulateur de trafic équipant la halle-fosse est constitué d'un essieu de camion et permet donc de reproduire aussi fidèlement que possible les charges imposées par le trafic poids lourds. L'essieu est monté sur un rail de guidage rectiligne et suit un mouvement de type alternatif. Une photo de l'installation est donnée ci-dessous. Une fiche technique du simulateur et de la halle fosse est donnée en annexe IV :



Fig. 23 Photo du simulateur de trafic lourd.

Les principales caractéristiques du simulateur sont les suivantes :

- Fréquence : jusqu'à 2000 passages/heure
- Charge de l'essieu : max. 130 kN
- Roues jumelées, supersingles ou simples
- Vitesse de déplacement : max. 12 km/h
- Déplacement transversal : max. \pm 40 cm
- Longueur totale de roulement : 4 m
- Longueur de roulement à vitesse constante : 2 m

4.4.4 Contrôle de la température

Un puissant système calorifique est utilisé pour réguler et contrôler la température aussi bien en surface qu'au fond de la fosse. Afin de pouvoir effectuer des mesures à différentes températures, les champs tests de la halle-fosse ont été couverts par une structure isolante permettant de mieux contrôler les températures. Dans le cadre de nos essais les températures ont été variées entre de -10°C et $+35^{\circ}\text{C}$ pour l'air ambiant à l'intérieur de la structure isolante. Le système de régulation des températures par le fond de la fosse n'a pas été utilisé, de même que le système d'injection d'eau dans la fondation.

4.4.5 Programme de chargement pour les essais en vraie grandeur

L'expérience de la halle-fosse est menée en plusieurs étapes successives sur une durée totale de sept semaines afin d'évaluer :

- Le modèle de réponse des champs sous l'action d'une charge
- Le modèle de performances des champs sous l'action répétée des charges

La première partie (modèle de réponse) a pour but de valider les paramètres introduits dans les modèles utilisés pour le dimensionnement alors que la seconde (modèle de performances) a pour objectif de donner des informations directes sur le comportement à long terme des couches de roulement.

Les paramètres intervenant dans ces essais sont :

- Température : de -10 à 35°C
- Charges : de 8 à 13 to
- Pression des pneus : 8 bars
- Vitesse : de 1.2 à 3.8 km/h en moyenne
- Nombre de cycles : en fonction des essais

Modèle de réponse

Les mesures de déformations et de déflexions effectuées sur les planches construites à la halle-fosse doivent permettre de vérifier si les déformations calculées par la modélisation correspondent à celles mesurées lors du passage de différentes charges de trafic. Etant donné la sensibilité élevée des matériaux bitumineux aux variations de température, lesquelles se manifestent par d'importantes variations des modules de rigidité, des mesures ont été effectuées pour quatre températures d'essai soit : -5°C , $+5^{\circ}\text{C}$, $+15^{\circ}\text{C}$ et $+25^{\circ}\text{C}$. Les températures de référence définies ci-dessus sont mesurées au bas des couches bitumineuses. De plus, 4 charges ont été appliquées : 8 to., 10 to., 11.5 to. et 13 to. Ces mesures sont faites sur les trois champs.

Modèle de performances

Cette partie des essais se divise en trois blocs de mesures afin d'analyser différents modèles de performances.

Le premier bloc de mesures consiste à réaliser des cycles de températures afin d'évaluer, là aussi, les déformations et les déflexions en fonction des sollicitations

thermiques. Pour ce faire, la température oscille entre -10°C et 10°C . Ces mesures sont faites sur tous les champs.

Le deuxième bloc de mesures consiste à évaluer les performances des enrobés à haute température ($+35^{\circ}\text{C}$) afin d'analyser plus particulièrement la résistance à l'orniérage. Ces mesures sont faites exclusivement sur les champs 1 et 2. (AC MR avec 8% de vides cible)

Le troisième bloc de mesures consiste à analyser le comportement des enrobés en présence d'eau et de basses températures (-10°C) afin d'évaluer les éventuels effets de ces sollicitations combinées. Ces mesures sont faites exclusivement sur le champ 3 (AC MR avec 13% de vides cible).

4.5 Portance de la fondation

Afin de vérifier la conformité du compactage de la grave de fondation ainsi que recueillir des informations utiles en vue des modélisations, quatre essais de plaque selon la norme SN 640 585b [14] ont été réalisés au sommet de la grave comme le montre la figure ci-dessous.



Fig. 24 Essai de plaque sur la grave de fondation.

Les résultats des essais de plaque sont consignés dans le tableau ci-dessous.

Tab. 13 Résultat de l'essai de plaque selon SN 640 585b [14]

	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	Mesure 4
M_{E1}	44.8 MN/m ²	75.0 MN/m ²	66.7 MN/m ²	58.3 MN/m ²
M_{E2}	230.8 MN/m ²	214.3 MN/m ²	200.0 MN/m ²	214.3 MN/m ²
$f_E = M_{E2} / M_{E1}$	5.15 [-]	2.86 [-]	3.00 [-]	3.64 [-]

Nous pouvons observer :

- Les différentes valeurs M_{E1} sont sensiblement inférieures aux exigences normatives ($\geq 100 \text{ MN/m}^2$) ; la valeur moyenne mesurée est de 61 MN/m^2 .

- Le coefficient f_E est particulièrement sévère, une valeur $f_E \leq 2.5$ étant demandée dans la normalisation SN. La valeur moyenne mesurée à la halle fosse est de $f_E = 3.7$.
Le coefficient f_E relativement élevé ainsi que les valeurs M_{E1} mesurées semblent indiquer que les matériaux auraient pu être davantage compactés, ou alors que des matériaux de qualité inadaptée ont été utilisés. Un éventuel post-compactage de la fondation (déformations permanentes) lors de sollicitations élevées peut éventuellement apparaître.

4.6 Contrôle des épaisseurs de pose

Différents nivellements ont été réalisés lors de la construction de la chaussée, ceci afin de vérifier l'épaisseur des couches en place ainsi que le respect des valeurs attendues. Ces données seront notamment utilisées pour les modélisations réalisées dans le cadre de la détermination du coefficient d'équivalence (chapitre 6).

Tab. 14 Epaisseurs réelles des champs

Couches	Champ 1		Champ 2		Champ 3	
Surface	5.2 cm	5.1 cm	4.7 cm	4.8 cm	4.0 cm	4.3 cm
Base	11.9 cm	11.9 cm	10.3 cm	9.5 cm	9.4 cm	8.9 cm
Grave	37.3 cm	40.3 cm	39.8 cm	43.5 cm	43 cm	43.3 cm
Sable	146.9 cm	144.4 cm	147.4 cm	144.4 cm	144.9 cm	144.9 cm

Nous pouvons observer :

- L'épaisseur des couches de roulement est toujours supérieure de plus d'un centimètre par rapport à ce qui était prévu soit plus de 50% de la tolérance de pose qui est de ± 5 mm.
- L'épaisseur des couches de base est conforme à ce qui est attendu. L'écart maximum mesuré est de 1.3 cm
- L'épaisseur de la couche de grave est en moyenne conforme à la norme SN 640 580 [13] mais au niveau des valeurs individuelles 50% de celles-ci ont un écart supérieur à 10 mm.

4.7 Analyse des enrobés AC MR

Différents essais sur les enrobés AC MR prélevés lors de la construction des planches ont été réalisés. Ces essais concernent d'une part le contrôle de la fourniture, mais également une série spécifique d'essais étendus sur enrobés. Les principaux résultats sont consignés ci-après ; davantage de détails (procès-verbaux d'essais) étant fournis en Annexe V du présent rapport.

4.7.1 Contrôle de fourniture

L'analyse granulométrique des enrobés posés est indiquée dans le tableau 15 et sur la figure 25. Nous pouvons observer :

- AC MR 8, cible 8% de vides en place : La recette cible de l'enrobé est positionnée en milieu-inférieur du fuseau, la courbe étant relativement conventionnelle pour ce type de matériau. L'enrobé posé est positionné en-dessous de la courbe cible, avec une différence maximale pour les tamis situés entre 4 mm (8.1%) et 1 mm (4.7%). Le point de filler est relativement bien maîtrisé. L'enrobé finalement posé est en-dehors du fuseau cible de la normalisation SN 640 431-1b-NA [6].

AC MR 8, cible 13% de vides en place : Une recette cible spécifique a été mise en place, ceci dans le but d'atteindre une teneur en vides plus élevées (hors exigences normatives). La démarche de formulation a été réalisée selon la méthode volumétrique belge, développée par le CRR [27], [31]. Dans un premier temps, la recette cible de l'enrobé AC MR 8 (8% de vides en place) a été reconstituée afin d'évaluer le biais entre les calculs et les résultats obtenus en laboratoire/centrale. Suite à cela, une proposition de formulation pour un AC MR 8 avec cible 13% de vides

a été effectuée. Cette proposition de formulation a finalement été testée en laboratoire et à la centrale d'enrobage. La formulation de l'enrobé AC MR 8 avec pour cible 13% de vides en place est finalement obtenue en agissant principalement sur les fractions 0/2 et 2/4. La courbe granulométrique cible est donc positionnée hors fuseau pour les fractions situées entre 0.063 mm et 4 mm. De plus, la teneur en liant a été réduite comparativement à l'enrobé avec 8% de vides cible.

L'enrobé posé est là aussi sensiblement éloigné de la recette cible, avec certaines difficultés dans la maîtrise des fractions fines.

- Il apparaît finalement que les enrobés AC MR 8 posés à la halle fosse sont quelque peu éloignés des recettes cibles. Le positionnement hors fuseau normatif n'est pas un point critique dans le cadre d'un tel projet de recherche.

Tab. 15 Courbes granulométriques des enrobés AC MR 8 testés

AC MR 8, cible 8% de vides en place

Tamis [mm]	11.2	8	5.6	4	2	1	0.5	0.063
% de passant (cible)	100.0	96.6	65.6	40.0	24.7	18.6	15.6	8.3
% de passant (pose)	100.0	94.9	60.6	31.9	19.1	13.9	11.0	6.8

AC MR 8, cible 13% de vides en place

Tamis [mm]	11.2	8	5.6	4	2	1	0.5	0.063
% de passant (cible)	100.0	95.0	59.0	28.0	18.0	13.0	10.0	5.1
% de passant (pose)	100.0	92.2	49.9	20.5	11.4	8.6	7.0	4.7

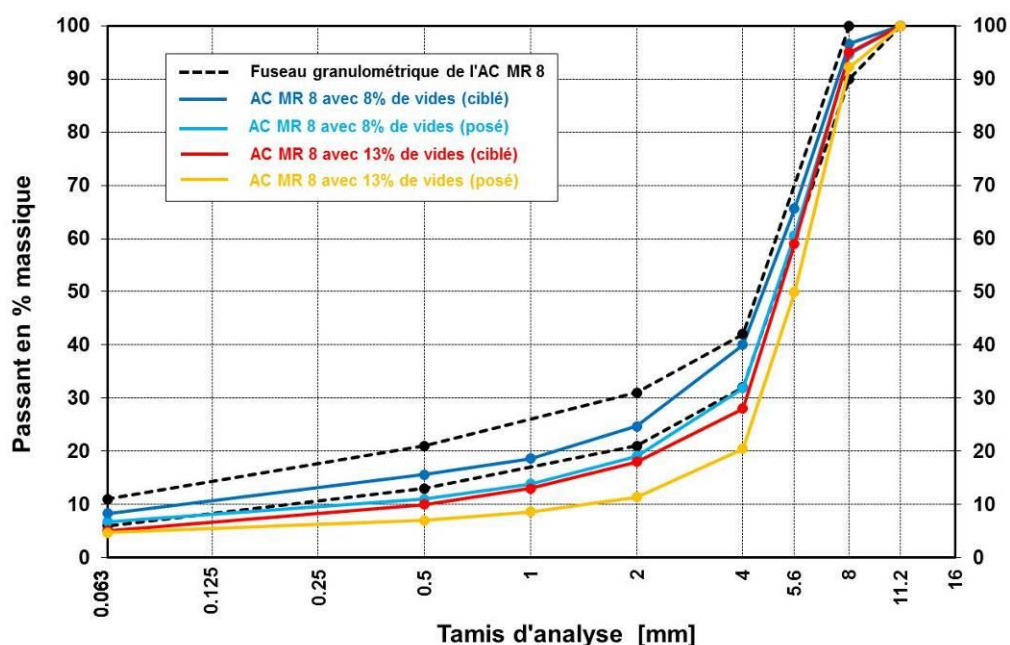


Fig. 25 Courbes granulométriques des AC MR 8 ciblés et posés

La teneur en liant ainsi que le module de richesse des deux enrobés sont consignés dans le tableau 16. Nous pouvons relever une différence de teneur en liant d'environ 0.11% et 0.44%-Vol pour les deux recettes.

Pour rappel, les exigences normatives relatives à la teneur en liant sur enrobé sont de min 5.80% (SN 640 431-1b-NA [6]). Ainsi, l'enrobé avec la valeur cible de 8% de vides en place est à la limite de la norme. Pour l'enrobé avec la valeur cible de 13% de vides en place, une teneur en liant inférieure à 5.80% était visée, ceci afin d'augmenter la teneur en vides en place (tout en modifiant également la courbe granulométrique comme vu précédemment). Malgré les différences observées dans la teneur en liant et la fraction de

filler entre de qui était ciblé et ce qui a été posé, les modules de richesse restent stables et conformes aux attentes, indiquées dans l'épreuve type de formulation (ETF).

Tab. 16 Teneur en liant et module de richesse

	AC MR 8 (cible 8% vides en place)		AC MR 8 (cible 13% vides en place)	
	Cible (ETF)	Mesure	Cible (ETF)	Mesure
Teneur en liant/E [%-Vol]	5.91	5.8	5.50	5.10
Module richesse Mr [-]	3.66	3.6	3.45	3.5

La teneur en vides de différents échantillons Marshall 50/50 a été mesurée en laboratoire. Les résultats pour l'enrobé AC MR 8, cible 8% de vides en place sont consignés dans le tableau ci-dessous.

Tab. 17 Mesure des vides de l'enrobé AC MR 8 (cible : 8% de vides en place), échantillons Marshall 50/50

Mesure	Type de mesure	Teneur en vides [%]	MVA [g/cm ³]
1	géométrique	16.4	2.077
2	géométrique	24.5	1.870
3	Hydrostatique (pesée)	11.2	2.206
4	Hydrostatique (pesée)	10.9	2.206

Nous pouvons observer les éléments suivants :

- Comme attendu, la mesure géométrique des vides abouti à des valeurs substantiellement plus élevées que la mesure hydrostatique. Par expérience, la différence entre les mesures géométriques et hydrostatiques sont généralement d'environ 2...3%. Les différences observées ici sont sensiblement plus élevées.
- Dans le cas d'un enrobé AC MR 8 comportant 8% de vides en place (cible), la mesure des vides doit être effectuée de manière hydrostatique. Nous pouvons donc évaluer que la teneur en vides Marshall est d'environ 11% (moyenne vides selon mesure géométrique : 20%) pour l'enrobé dont la teneur en vides en place cible est de 8%.
- Les vides Marshall indiqués dans l'ETF sont de 7.9%.
- Comme cela pouvait être attendu (et souhaité), les vides Marshall mesurés en laboratoire sont légèrement au-dessus des valeurs limites normatives selon SN 640 431-1b-NA [6] qui sont de 6.0...10.0%.

Les résultats de mesure des vides Marshall 50/50 pour l'enrobé avec cible de 13% de vides sont quant à eux disponibles dans le tableau ci-dessous.

Tab. 18 Mesure des vides de l'enrobé AC MR 8 (cible : 13% de vides en place), échantillons Marshall 50/50

Mesure	Type de mesure	Teneur en vides [%]	MVA [g/cm ³]
1	géométrique	21.1	1.963
2	hydrostatique	12.0	2.189
3	hydrostatique	17.7	2.039
4	hydrostatique	11.7	2.189

Nous pouvons observer :

- La teneur en vides moyenne pour les mesures hydrostatiques est de 13.8%, la mesure géométrique indiquant une teneur en vides de 21.1% soit 7.3% de plus. Comme observée précédemment, les vides mesurés géométriquement sont sensiblement plus élevés que ceux mesurés de manière hydrostatique.
- Les vides (hydrostatiques) pour l'enrobé avec une teneur en vides cible de 13% sont en moyenne 2.8% plus élevés que ceux mesurés pour l'enrobé avec vides cibles de 8% (en place).

- Comme il pouvait être logiquement attendu, les vides mesurés (valeurs moyennes et individuelles) sont sensiblement plus élevés que les exigences normatives. Ceci était attendu dans le cadre de cette recherche.
- Dans le cas d'un enrobé comportant (théoriquement) 13% de vides, la mesure doit alors être réalisée de manière géométrique. Nous pouvons donc supposer que la teneur en vides de la planche avec pour valeur cible 13% de vides en place est de 21% pour les vides Marshall.

Les résultats de l'analyse dans liants récupérés sont indiqués dans le tableau ci-dessous qui contient également les exigences relatives au liant récupéré (moyenne de 2 ou 3 échantillons selon les essais). Pour rappel, le liant utilisé est un bitume Sytreff E60 (PmB-E 45/80-65). Les analyses en laboratoire du liant des AC MR 8 ont été effectuées 4 ans après la pose. Le liant a donc subi un vieillissement naturel et les valeurs sont à comparer avec les exigences sur liants récupérés (SN 670 210b-NA [17]).

Tab. 19 Résultats d'essais sur le liant récupéré (PmB-E 45/80-65 Styrelf E60)

	AC MR 8 (cible 8% vides en place)		AC MR 8 (cible 13% vides en place)	
	Labo	Norme	Labo	Norme
Temp. A&B [°C]	70.1	63...73	70.4	63...73
Pénétration à 25°C (1/10mm)	26	27...48	25	27...48
Indice de pénétration IP [mm]	1.3	-	1.3	-

Nous pouvons relever que les liants récupérés sont conformes aux exigences normatives pour la température anneau et bille, la pénétration étant légèrement plus faible que les valeurs indiquées dans la norme SN 670 210b-NA [17] mais la différence n'est pas jugées significative.

Les résultats d'un essai Marshall réalisés pour les deux enrobés sont finalement consignés dans le tableau ci-dessous. Les vides indiqués sont la moyenne de quatre éprouvettes (Marshall 50/50). Les résultats des essais de stabilité et de fluage (Marshall) sont faits sur la moyenne de 4 éprouvettes.

Tab. 20 Résultats d'essai de stabilité et de fluage Marshall

	AC MR 8 (cible 8% vides en place)	AC MR 8 (cible 8% vides en place)
Vides Vm (hydrostatique avec paraffine)	17.3% (17.9% / 17.1% / 17.3% / 16.8%)	19.0% (18.6% / 19.3% / 19.3% / 18.7%)
Stabilité S	5.9 KN	6.1 KN
Fluage F	2.2 mm	2.4 mm
Fluage Ft	1.1 mm	1.2 mm
Quotient Marshall S/Ft	2.2 KN/mm	2.6 KN/mm

Nous pouvons relever :

- Les deux enrobés présentent des valeurs de stabilité et fluage comparables.
- Les normes SN 640 431-1b-NA [6] ne contiennent pas d'exigences relatives à la stabilité et au fluage Marshall pour ces enrobés ; des exigences étant cependant indiquées pour la résistance à l'orniérage.
- Dans les deux cas, les vides Marshall Vm sont sensiblement supérieurs aux exigences normatives qui bornent ces valeurs à 6...10% (SN 640 431-1b-NA [6]) Les mesures de vides sont faites de manière hydrostatique avec utilisation de paraffine.
- Ces résultats sont cohérents et, là aussi, comparables à ceux de l'étude réalisée pour les « Revêtements peu bruyants à l'intérieur des localités – EP1 : Formulation » [41].

Sur la base des différentes mesures de vides discutées ci-dessus, nous pouvons indiquer :

- L'enrobé AC MR 8, avec cible 8% de vides en place comporte une teneur en vides Marshall de 15.0% (moyenne des mesures pour essai Marshall et hydrostatiques selon les tableaux 17 et 20).
- L'enrobé AC MR 8, avec cible 13% de vides en place comporte une teneur en vides Marshall de 19.4% (moyenne des mesures pour essai Marshall et géométrique selon les tableaux 18 et 20)

4.7.2 Essais étendus sur granulats et enrobés

Une autres séries d'essais en laboratoire a été menée sur les enrobés macrorugueux posés pour les essais en vraie grandeur. L'ensemble des résultats sont disponibles en Annexe VI du présent rapport.

Les résultats de l'essai de sensibilité à l'eau sont consignés dans le tableau ci-dessous (échantillons Marshall 25/25). Les essais sont réalisés sur les enrobés prélevés lors de la construction des planches, réchauffés en laboratoire. Les deux enrobés présentent un ratio ITSR comparable. Ces valeurs respectent les exigences normatives (ratio $\geq 70\%$). L'analyse des forces de rupture indique une pression légèrement plus faible dans le cas de l'enrobé avec davantage de vides, la différence étant de 34% tant pour les échantillons secs que humides.

Tab. 21 Résultats d'essai ITSR sur fourniture

Mode de conservation	AC MR 8 (cible 8% vides en place)		AC MR 8 (cible 13% vides en place)	
	Air 70h. à 23°C	Eau 70h. à 40°C	Air 70h. à 23°C	Eau 70h. à 40°C
Température de l'essai de traction indirecte	22°C	22°C	22°C	22°C
ITS w	-	886 kPa	-	658 kPa
ITS d	989 kPa	-	737 kPa	-
Ratio ITSR	90%		89%	

La presse à cisaillement giratoire permet d'évaluer la compactibilité d'un enrobé à chaud. Les résultats sont donnés dans le tableau ci-dessous.

Tab. 22 Résultats d'essai PCG

	AC MR 8 (cible 8% vides en place)	AC MR 8 (cible 13% vides en place)
Compacité à 1 giration (calc.)	67.6%	63.9%
Compacité à 40 girations	80.4%	76.1%
Compacité à 200 girations	85.5%	80.7%
Pente [-]	3.44	3.25

Alors que la compacité à 1 giration donne une indication relative à la mise en place de l'enrobé, il est couramment admis que 10 girations correspondent à environ 1 cm d'épaisseur de matériau *in situ*. Ainsi, la couche d'enrobé en place étant de 4 cm, la valeur de compacité à 40 girations est particulièrement intéressantes. Les vides (géométriques) de l'enrobé avec teneur en vides cibles de 8% en place sont de 19.6% à 40 girations ; cette valeur étant de 23.9% pour l'enrobé avec teneur en vides cible de 13%. Ces résultats semblent donc indiquer une teneur en vides trop élevée des matériaux par rapport à ce qui est attendu. Cela confirme donc les observations effectuées précédemment.

La résistance à l'orniérage des enrobés de type AC MR est une caractéristique importante. Ainsi, des essais ont été réalisés sur des plaques confectionnées en laboratoire à partir d'enrobés prélevés lors de la construction des planches d'essais. Les résultats sont consignés dans le tableau 23 et les figures 26 et 27. Pour rappel, l'essai au simulateur de trafic LCPC est réalisé sur deux plaques d'essai d'épaisseur 50 mm à une température de 60°C, avec une pression de gonflage du pneu de 0.6 MPa et avec une charge de 5 KN.

Tab. 23 Résultats d'essai d'orniérage

	AC MR 8 (cible 8% vides en place)		AC MR 8 (cible 13% vides en place)	
	Calculée	Mesurée	Calculée	Mesurée
Ornière à 10'000 cycles	8.9%	8.7%	10.5%	10.4%
Ornière à 30'000 cycles	11.1%	10.2%	13.4%	12.7%
Pente	0.207		0.218	

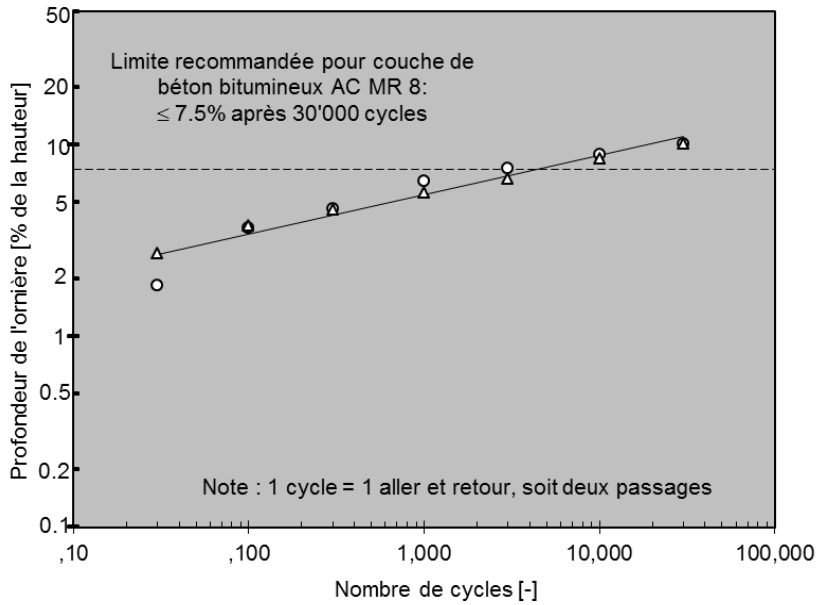


Fig. 26 Evolution de la profondeur d'ornière en fonction du nombre de cycle pour l'AC MR 8 (cible 8% de vides en place)

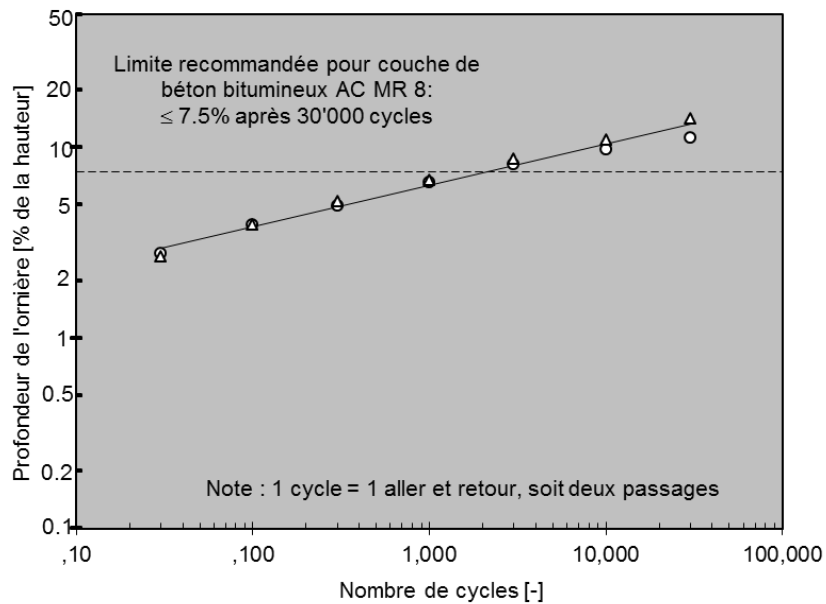


Fig. 27 Evolution de la profondeur d'ornière en fonction du nombre de cycle pour l'AC MR 8 (cible 13% de vides en place)

La profondeur d'ornière est supérieur à la valeur limite de la norme SN 640 431-1-NA [7] qui fixe cette limite à 7.5% à 30'000 cycles. Ces enrobés montrent donc une susceptibilité accrue aux déformations permanentes.

L'essai Cantabro permet d'évaluer la qualité des granulats par l'évaluation de la perte des matériaux. Les résultats, consignés dans le tableau ci-dessous, sont la moyenne de 3 éprouvettes Marshall conditionnées à -10°C et déposées dans un tambour rotatif afin d'analyser la perte de matériaux. Les éprouvettes ont, là aussi, été confectionnées en laboratoire sur la base d'enrobés prélevés lors de la construction des planches d'essais.

Tab. 24 Résultats d'essai Cantabro

	AC MR 8 (cible 8% vides en place)		AC MR 8 (cible 13% vides en place)	
Nombre de tours	500	500	500	500
Energie de compactage	2x50 coups	2x25 coups	2x50 coups	2x25 coups
Perte de matériaux	21%	23%	36%	47%

Ces résultats sont globalement cohérents et nous pouvons relever des valeurs de pertes de matériaux relativement élevées. Les valeurs sont supérieures à celle obtenue pour un enrobé poreux étudié dans le cadre du projet de recherche 1999/280 « Propriétés mécaniques des asphaltes poreux, recommandations pour la normalisation » [36].

Un essai de traction indirecte (compression diamétrale) a été réalisé en laboratoire à trois différentes températures d'essais soit -10 °C, 15 °C et 40 °C. La méthodologie d'essai est celle issue du projet VSS 27/81 [22], testée sur des échantillons Marshall 25/25. La résistance à la rupture des différents échantillons est enregistrée. Les différents résultats étant la moyenne de 4 éprouvettes et les valeurs minimales et maximales sont également mentionnées dans le tableau ci-dessous.

Tab. 25 Résultats d'essai de traction indirecte

	AC MR 8 (cible 8% vides en place)		AC MR 8 (cible 13% vides en place)	
Température [°C]	-10		-10	
Teneur en vides HM [%]	13.6	(min : 13.4 / max : 4.9)	18.5	(min : 18.2 / max : 9)
Contraintes [N/mm²]	3.5	(min : 3.1 / max : 3.7)	2.6	(min : 2.5 / max : 2.8)
Δ(D)/D [10⁻³]	8.6	(min : 7.6 / max : 10.5)	6.9	(5.5...8.0)
	AC MR 8 (cible 8% vides en place)		AC MR 8 (cible 13% vides en place)	
Température [°C]	15		15	
Teneur en vides HM [%]	13.4	(min : 13.2 / max : 13.7)	18.5	(min : 18.0 / max : 18.8)
Contraintes [N/mm²]	1.83	(min : 1.64 / max : 1.91)	1.48	(min : 1.40 / max : 1.60)
Δ(D)/D [10⁻³]	17.2	(min : 15.8 / max : 18.8)	18.1	(min : 16.3 / max : 19.9)
	AC MR 8 (cible 8% vides en place)		AC MR 8 (cible 13% vides en place)	
Température [°C]	40		40	
Teneur en vides HM [%]	13.6	(min : 13.1 / max : 14.0)	18.6	(min : 18.2 / max : 19.0)
Contraintes [N/mm²]	0.45	(min : 0.42 / max : 0.49)	0.33	(min : 0.32 / max : 0.35)
Δ(D)/D [10⁻³]	15.3	(min : 14.3 / max : 17.2)	15.0	(min : 13.7 / max : 16.0)

L'effet de la teneur en vides est visible par une baisse de 26% de la résistance à la traction indirecte entre L'AC MR 8 avec une valeur cible à 8% de vides en place et l'AC MR 8 avec une valeur cible à 13% de vides en place.

Ces résultats sont globalement comparables à ceux de l'étude réalisée pour les « Revêtements peu bruyants à l'intérieur des localités – EP1 : Formulation » [41]. En effet, la contrainte à la rupture mesurée à -10°C est de 4.4 N/mm² pour un enrobé comparable au macrorugueux avec 14.6% de vides Marshall et de 0.29 N/mm² pour une mesure à 45°C.

Différents échantillons ont été prélevés afin de réaliser des d'adhésion entre les couches ainsi que des essais de rigidité. La figure ci-après illustre la position des prélèvements de carottes et plaques d'enrobé (zone avec et sans circulation) pour le champ 1.

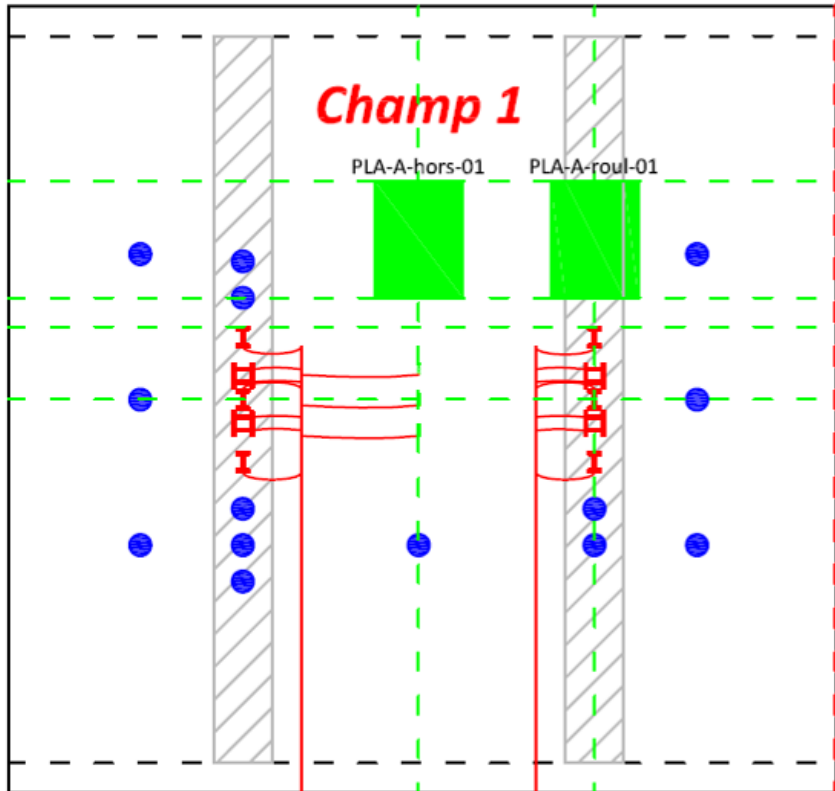


Fig. 28 Schéma des prélèvements (rond bleu = carotte / carré vert = plaque).

L'essai Leutner consiste à cisailer une carottes d'enrobé afin de mesurer la résistance de la couche d'encollage (interface entre deux couches d'enrobé). Les résultats de cet essai sont indiqués dans le tableau ci-dessous où les valeurs indiquées sont la moyenne de trois échantillons.

Tab. 26 Résultats d'essai Leutner

	AC MR 8 (cible 8% vides en place)	AC MR 8 (cible 13% vides en place)
Intervalle	23.2 ... 34.2 KN	13.1 ... 16.6 KN
Valeur moyennes	27.8 KN	14.3 KN

Les valeurs d'adhésion sont globalement satisfaisantes et respectent les exigences de la norme SN 670 461 [18] qui sont de 10...12 KN.

Les essais de rigidité (détermination du module complexe) ont été réalisés sur des éprouvettes trapézoïdales sciées dans des plaques prélevées *in situ*. Les courbes maîtresses étant indiquées dans la figure 29 (AC MR 8 avec cible 8% de vides) et la figure 30 (AC MR 8 avec cible 13% de vides).

- Dans les conditions de référence (15°C, 10 Hz), le module de rigidité mesuré est de 6'310 MPa (cible 8% de vides) et respectivement 4'172 MPa (cible 13% de vides). La diminution du module complexe avec l'augmentation de la teneur en vides pouvait être légitimement attendue. Il est possible de relever que cette différence représente environ 50%.
- Dans le cadre du dimensionnement, une valeur de 5'400 MPa (18 °C, 10 Hz) est généralement considérée. Cela est tout à fait consistant avec les résultats des mesures effectuées en laboratoire.
- Dans une optique de durée de vie de la chaussée, nous pouvons cependant relever que la valeur du module de rigidité de la couche de roulement n'a que peu d'impact

sur les sollicitations calculées au bas des couches bitumineuses (déformations horizontales, fatigue).

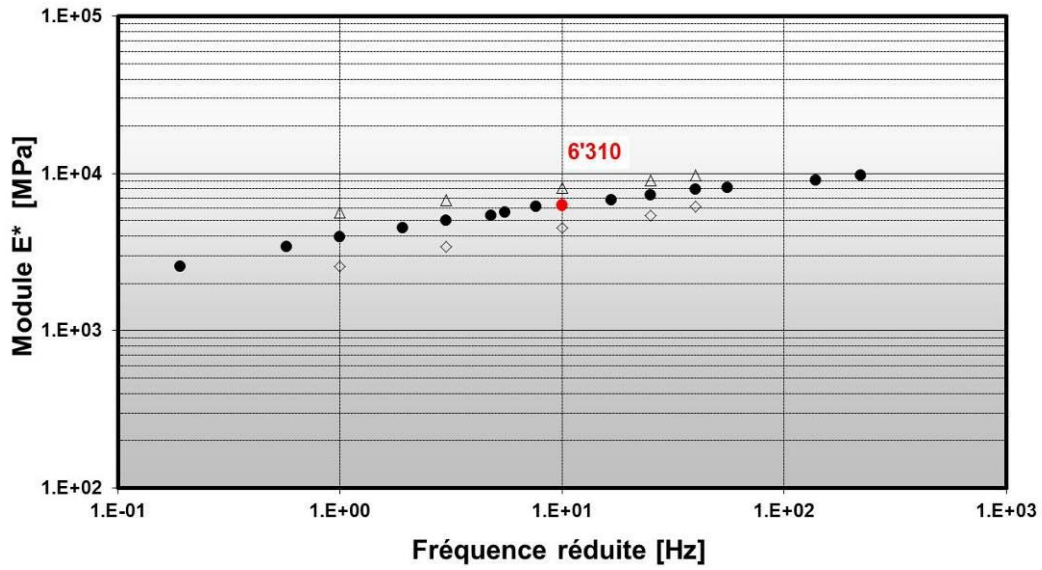


Fig. 29 Courbe maîtresse ($T_{ref}=15^\circ\text{C}$) de l'AC MR 8 avec cible 8% de vides en place (rouge : conditions de référence 15°C , 10 Hz)

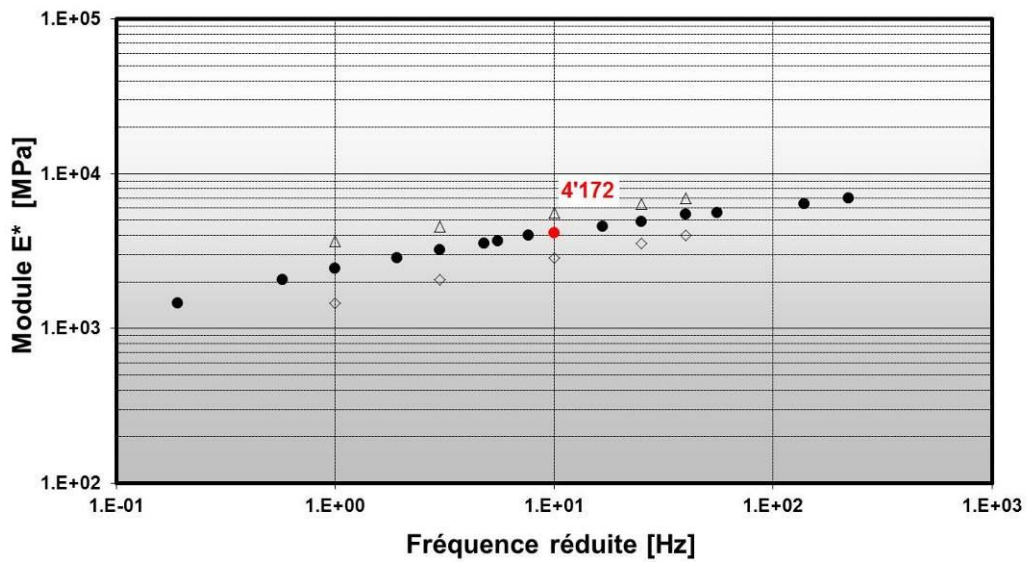


Fig. 30 Courbe maîtresse ($T_{ref}=15^\circ\text{C}$) de l'AC MR 8 avec cible 13% de vides en place (rouge : conditions de référence 15°C , 10 Hz)

5 Résultats des essais en vraie grandeur

5.1 Analyse du comportement fonctionnel

5.1.1 Qualité antidérapante

Des essais pour mesurer la qualité antidérapante ont été réalisés sur les 2 bandes de roulement de chaque champ. Les essais ont été réalisés à une température de 20°C selon les modalités prévues dans les normes SN 640 510a [11] et SN 640 511b [12]. Le tableau ci-dessous donne les résultats moyens corrigés de ces essais.

Tab. 27 Résultats de l'essai SRT et hauteur de sable

Essai SRT						
	Champ 1		Champ 2		Champ 3	
	Trace G.	Trace D.	Trace G.	Trace D.	Trace G.	Trace D.
Valeur Initiale	64.3 [-]		67.7 [-]		72.6 [-]	
Valeur à 3'200 passages	45.3 [-]	48.2 [-]	45.9 [-]	50.3 [-]	48.7 [-]	53.1 [-]
Valeur finale	59.3 [-]	66.7 [-]	55.3 [-]	64.0 [-]	53.3 [-]	52.3 [-]

Hauteur de sable						
	Champ 1		Champ 2		Champ 3	
	Trace G.	Trace D.	Trace G.	Trace D.	Trace G.	Trace D.
Valeur initiale	1.71 mm		2.08 mm		3.07 mm	
Valeur finale à 3'200 passages	1.41 mm	1.54 mm	1.60 mm	1.63 mm	2.63 mm	1.88 mm

Les résultats de l'essai SRT donnent un aperçu de la microrugosité. Selon les normes SN 640 510a [11] et SN 640 511b [12] afin que ces enrobés puissent être appliqués sur les routes, cette valeur ne doit pas être inférieure à 65 [-]. Dans tous les cas cette valeur n'est pas respectée à l'exception d'une bande de roulement du champ 1 en AC MR 8 avec 15% de vides. De plus l'AC MR 8 avec 19.4% de vides a tendance à conserver des valeurs de qualité antidérapante faible plus longtemps. Les valeurs à 3'200 passages sont également particulièrement basses.

Pour ce qui est de la hauteur de sable, cet essai donne un aperçu de la macrorugosité et est conforme aux attentes.

5.1.2 Uni transversal (orniérage)

Des mesures au transversoprofilographe ont été réalisées parallèlement aux essais en vraie grandeur sur l'ensemble des champs afin de suivre l'évolution de la profondeur d'ornièr.

Les figures 31, 32 et 33 donnent une image de l'évolution de l'orniérage au cours des essais en fonction du nombre de passages auquel les enrobés ont été soumis. Pour rappel, les champs 1 et 2 ont subi un essai à température élevée (35°C) alors que le champ 3 a subi un essai de détection des eaux dans la chaussée qui a été réalisé à basses températures (-10°C).

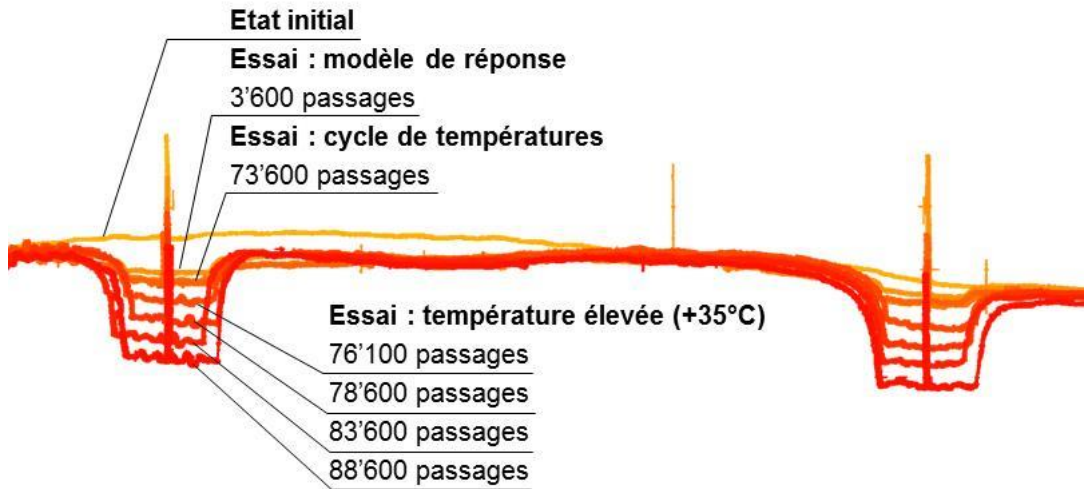


Fig. 31 Evolution de la profondeur d'ornièrre pour le champ 1

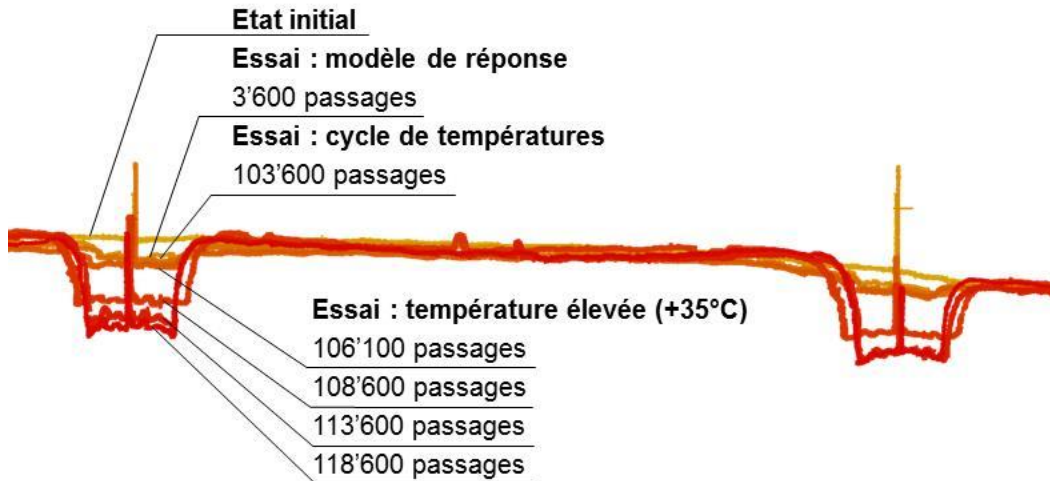


Fig. 32 Evolution de la profondeur d'ornièrre pour le champ 2

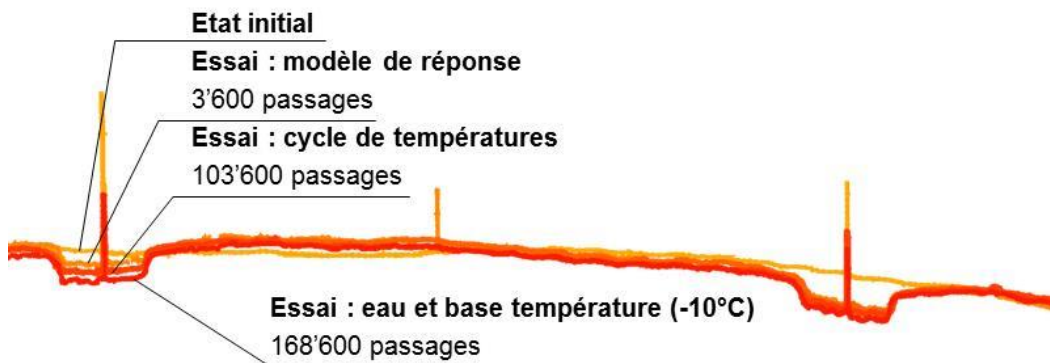


Fig. 33 Evolution de la profondeur d'ornièrre pour le champ 3

La profondeur d'ornièrre moyenne après l'essai "modèle de réponse" et "cycles de températures" est de 3.5 mm pour le champ 1 avec 73'600 passages, 2.0 mm pour le champ 2 avec 103'600 passages et 3.5 mm pour le champ 3 avec également 103'600 passages.

Durant l'essai d'ornièrage à température élevée (+35°C), l'ornièrage passe à 13.5 mm pour le champ 1 avec 15'000 passages supplémentaires, 11.5 mm pour le champ 2 avec également 15'000 passages supplémentaires.

La profondeur d'ornièrè moyenne finale mesurée est de 17.0 mm avec 88'600 passages pour le champ 1, 13.5 mm avec 118'600 passages pour le champ 2 et de 5.0 mm avec 168'600 passages pour le champ 3.

De manière générale, la résistance à l'ornièrage est faible comme l'a montré l'essai en laboratoire. Au début de l'essai à températures extrêmes, la profondeur d'ornièrè entre les champs 2 et 3 montre déjà une grande différence (plus 43% de profondeur d'ornièrè pour le champ 3). Ceci peut s'expliquer par la teneur en vides plus importante dans l'enrobé macrorugueux du champ 3 alors que la couche de base est identique pour les deux champs et par la différence d'épaisseur des couches d'enrobés entre ces deux champs.

L'essai à température élevée entre les champs 1 et 2 montre une stabilisation de l'ornièrage plus rapide pour le champ 2. En effet, la profondeur d'ornièrè pour le champ 2 est 15% plus faible que pour le champ 1. La différence d'épaisseur et de matériaux pour la couche de base en est la cause principale.

Le champ 3 donne de très bons résultats mais il n'a pas été testé comme les deux autres champs ce qui rend la comparaison impossible.

Ces valeurs finales d'ornièrage, transformées en indice d'état I_3 selon la norme SN 640 925b [15] donnent une note comprise entre 3.6...5.0 pour le champ 1 (mauvais), entre 3.3...4.5 pour le champ 2 (critique-mauvais) et entre 1...1.5 pour le champ 3 (moyen).

5.2 Analyse du comportement structurel

5.2.1 Essai d'arrachement

Sur les champs d'essais 2 et 3, que ce soit sur les bandes de roulement ou non, 12 essais d'arrachement ont été effectués pour mesurer la résistance à l'interface des deux couches d'enrobés. Cet essai a été réalisé avec l'aide de l'appareil Dyna Z15, Proceq, illustré ci-dessous :



Fig. 34 Appareil pour l'essai d'arrachement Dyna Z15, Proceq

Les résultats de cet essai sont donnés dans le graphique ci-dessous.

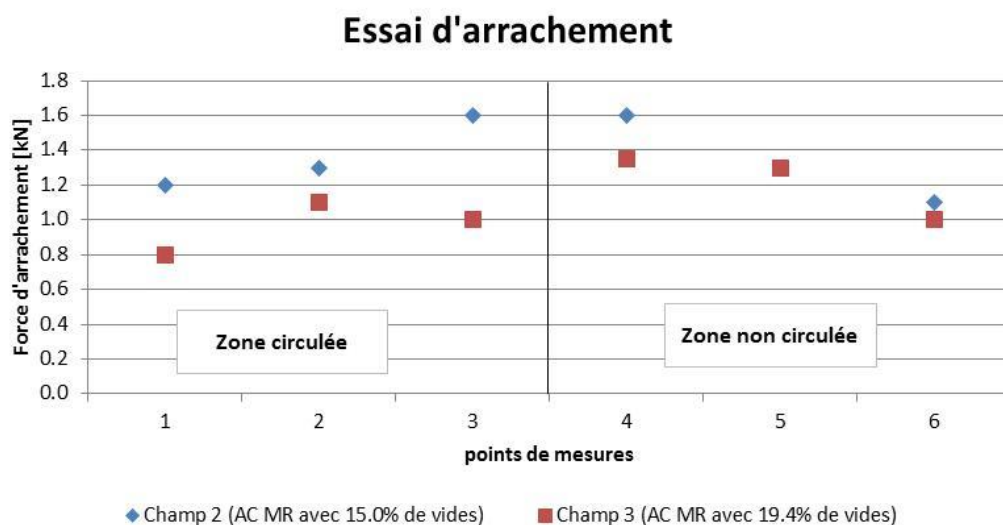


Fig. 35 Résultats de l'essai d'arrachement

De manière générale, on peut constater que l'arrachement est plus important (force d'arrachement inférieure) sur le champ composé d'un AC MR 8 avec une teneur en vides de 19.4% que sur le champ présentant une teneur en vides de 15.0%. On peut également constater que pour l'AC MR 8 avec 15.0% de vides, la position ne joue pas de rôle significatif (bande de roulement ou non) tandis que l'on constate une baisse moyenne de la résistance à l'arrachement sur la bande de roulement pour l'AC MR 8 avec 19.4% de vides. Ces deux résultats s'expliquent principalement par la différence de teneur en vides des enrobés de surface. Ainsi l'adhésion entre couche est plus faible si la teneur en vides est plus élevée.

5.2.2 Détection d'eau dans la chaussée

A la fin de l'essai en vraie grandeur, le champ 3 a subi un dernier essai afin d'analyser la présence d'eau dans la chaussée pour l'enrobé macrorugueux avec 18.5% de vides. Les résultats montrent que pour toutes les carottes analysées, de l'eau est détectée sur toute leur hauteur (Essai fait avec de la fluorescéine).

Cet essai montre que ce champ n'est pas étanche et que l'eau peut s'infiltrer de tous côtés. Les vides sont répartis de manière homogène sur la planche et sont communicants. La présence d'eau dans la chaussée peut faire naître un risque pour la structure soit au niveau du gel ou par la remontée de fines.

5.2.3 Backcalculation et FWD

Afin de déterminer la valeur des différents modules d'élasticité des couches mises en place, un essai au falling weight deflectometer (FWD) a été réalisé sur 8 points de mesures par champ. L'appareil est illustré sur la figure 36 et la société mandatée pour la réalisation de cet essai est Infralab SA à Romanel (Vaud).

Cet essai consiste à faire tomber un poids de 50 kN et de mesurer les déflexions ainsi provoquées à différentes distances du point d'impact de la charge. Les 24 mesures effectuées au total contiennent chacune 9 mesures de déflexions et ont été réalisées à une température d'environ 16.5°C. Avec ces mesures de déflexions, il est possible par calcul inverse, d'obtenir la valeur des différents modules des matériaux qui constituent la structure routière.



Fig. 36 Falling weight deflectometer

Sur la base des 8 mesures effectuées sur chaque champ, le bassin de déflexions moyen est donné dans la figure ci-dessous.

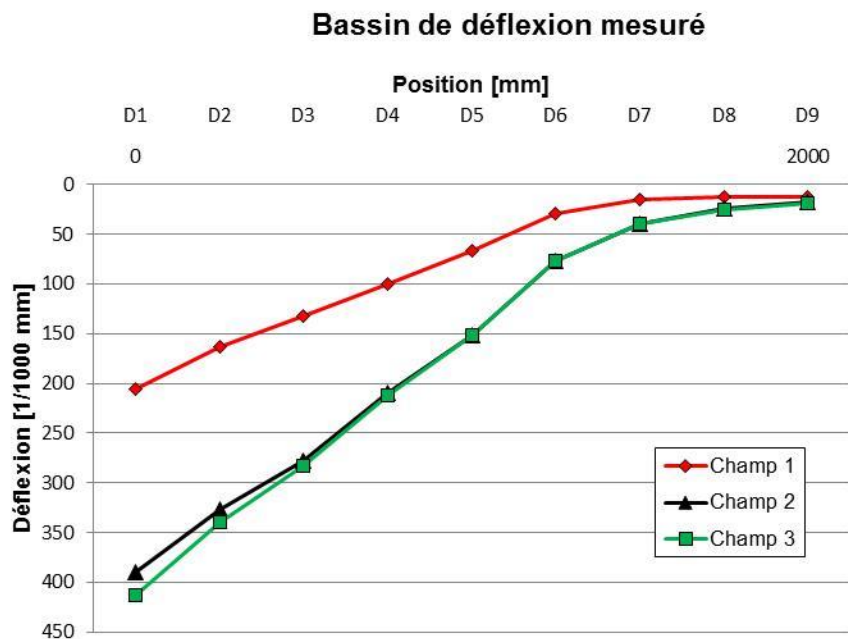


Fig. 37 Bassin de déflexions moyen par champ d'essai

Au droit de la charge sur le champ 1, les déflexions (moyenne des 8 mesures par champ) sont 50% plus faibles que les champs 2 et 3. Ceci s'explique principalement par la différence des épaisseurs d'enrobés entre ces champs (17 cm pour le champ 1, 14 cm pour le champ 2 et 13 cm pour le champ 3) et par les différents types d'enrobés constituant la couche de base (AC T 22 S pour le champ 1 et AC EME 22 C1 pour les champs 2 et 3). Toujours au même endroit, il est possible de constater une différence de déflexions de 5% entre le champ 2 et 3. Outre la faible différence sur l'épaisseur des couches, il est difficile de dire si la différence de teneur en vides joue un rôle. Il est également possible de constater que pour les champs 2 et 3 le bassin de déflexions est globalement identique.

La synthèse des résultats de cet essai et les calculs des modules de rigidité sont donnés dans le tableau ci-après pour une température de 25°C et une fréquence de 10 Hz :

Tab. 28 Résultats de l'essai FWD

	Champ 1	Champ 2	Champ 3
Module des couches bitumineuses	4'142 MN/mm ²	4'423 MN/mm ²	4'096 MN/mm ²
Coefficient de variation	0.21	0.17	0.22
Module des couches de grave	233 MN/mm ²	126 MN/mm ²	142 MN/mm ²
Coefficient de variation	0.21	0.12	0.08
Module du sol	132 MN/mm ²	84 MN/mm ²	75 MN/mm ²
Coefficient de variation	0.30	0.07	0.10

Les modules d'élasticité des couches sont suffisants avec des moyennes comprises entre 4'096 et 4'423 MN/mm². Les coefficients de variation sont faibles (< 0.35) ce qui indique une bonne homogénéité des couches. Les légères différences entre les moyennes des modules d'élasticité s'expliquent par le fait que les modules sont donnés pour l'ensemble des couches bitumineuses (fusion de la couche de roulement avec la couche de base) et en fonction de leurs épaisseurs. Dans ce cas et pour l'exemple : l'épaisseur de l'AC T 22 S va compenser son module plus faible. Les mesures ainsi que la synthèse du rapport de cet essai sont disponibles dans l'annexe VII.

5.2.4 Réponses des structures sous sollicitations

Le but de ces essais est d'obtenir des mesures instantanées (réponses) de déformations sous différentes conditions (vitesses, températures, chargement). La pression des pneumatiques (8 bars) ainsi que le type de roues sont restés constants quel que soit le type d'essais.

Comme le signal de réponse de la structure est composé de plusieurs milliers de mesures issues des jauges de déformations horizontales, le LAVOC a développé un logiciel spécifique permettant d'extraire les valeurs utiles. Le signal est tout d'abord réduit pour correspondre à un état non chargé puis les valeurs maximales des déformations horizontales qui correspondent aux pics du signal, sont extraites. Ce traitement permet ainsi déterminer les amplitudes maximales d'un signal, mesures nécessaires à cette recherche. Le principe de traitement du signal est explicité dans la figure ci-dessous.

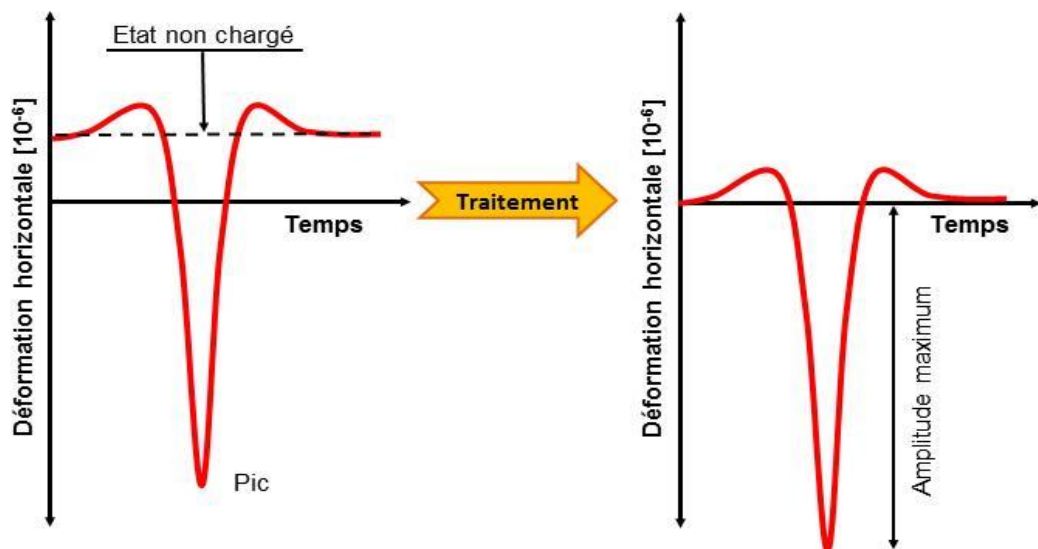


Fig. 38 Exemple de traitement d'un signal de déformation (au bas des couches bitumineuses)

Résultat de l'essai : Modèle de réponse

Cet essai a été réalisé, comme dit précédemment, sous quatre températures (-5, +5, +15, +25°C), avec des charges différentes (8, 10, 11.5 et 13 to) ainsi qu'avec des vitesses moyennes de chargement différentes (V1 = 1.2, V2 = 1.6, V3 = 2.6 et V4 = 3.8 Km/h).

Mesure des déformations horizontales

Les résultats de ces mesures sont donnés dans les tableaux suivants. Ils donnent la valeur moyenne des amplitudes des déformations des signaux issue du traitement de chaque jauge pour le bas de la couche bitumineuse et à l'interface des couches bitumineuses.

Tab. 29 Mesures des déformations horizontales (10^6) pour le champ 1

Charges	Vitesse	-5°C		+5°C		+15°C		+25°C	
		Bas	Interface	Bas	Interface	Bas	Interface	Bas	Interface
8 to	V1	71.49	-39.390	101.13	-55.38	137.40	-78.71	200.96	-52.26
	V2	69.54	-39.030	98.04	-53.46	127.55	-74.66	190.97	-51.26
	V3	67.44	-39.536	95.62	-53.57	123.39	-74.01	176.73	-53.61
	V4	66.87	-41.765	90.23	-52.27	115.17	-74.03	162.74	-56.18
10 to	V1	81.54	-46.747	113.08	-60.93	154.38	-89.12	217.86	-55.01
	V2	79.62	-43.942	108.48	-58.57	144.78	-85.11	208.51	-56.64
	V3	77.22	-43.864	106.96	-60.88	138.23	-85.68	194.15	-62.20
	V4	76.23	-49.788	102.62	-60.42	131.35	-85.34	189.67	-63.35
11.5 to	V1	88.12	-51.622	122.75	-65.78	162.41	-96.68	246.89	-62.36
	V2	86.52	-51.817	118.45	-68.70	154.83	-95.93	237.58	-66.23
	V3	84.04	-53.061	111.61	-61.84	149.44	-98.16	214.84	-72.69
	V4	82.38	-55.592	108.36	-60.64	143.34	-96.86	203.82	-76.76
13 to	V1	94.49	-56.639	131.59	-76.56	173.92	-108.74	267.11	-74.56
	V2	92.08	-56.328	125.54	-74.44	154.83	-95.93	256.58	-79.12
	V3	89.31	-57.905	119.24	-65.94	156.57	-106.31	233.95	-85.51
	V4	87.53	-51.465	117.74	-65.38	149.56	-104.01	227.62	-86.88

Tab. 30 Mesures des déformations horizontales (10^6) pour le champ 2

Charges	Vitesse	-5°C		+5°C		+15°C		+25°C	
		Bas	Interface	Bas	Interface	Bas	Interface	Bas	Interface
8 to	V1	72.89	-51.09	101.50	-70.38	139.97	-101.53	220.73	-137.31
	V2	70.71	-51.55	97.58	-67.31	133.93	-98.51	212.57	-131.70
	V3	69.29	-51.34	95.36	-66.05	126.03	-94.42	201.03	-124.81
	V4	67.70	-51.44	90.95	-62.46	120.72	-87.92	188.38	-125.41
10 to	V1	83.38	-58.79	115.36	-81.09	155.25	-112.59	245.55	-145.17
	V2	81.05	-60.72	111.43	-79.33	149.20	-111.17	236.74	-144.35
	V3	79.78	-57.42	107.23	-74.62	141.96	-107.28	219.46	-146.15
	V4	78.19	-60.93	105.42	-73.00	136.01	-100.65	214.69	-139.95
11.5 to	V1	90.12	-67.52	122.86	-87.78	166.41	-123.15	264.61	-161.29
	V2	88.88	-64.18	119.36	-86.01	158.20	-119.46	250.57	-166.53
	V3	86.04	-66.83	115.20	-82.07	153.37	-117.14	237.38	-164.98
	V4	86.69	-67.25	113.02	-80.22	146.90	-115.12	233.15	-156.00
13 to	V1	97.65	-73.07	130.71	-95.03	175.68	-132.45	282.79	-179.72
	V2	95.51	-72.73	126.69	-93.34	167.84	-130.54	267.79	-185.75
	V3	93.71	-68.63	125.05	-92.18	161.31	-127.38	259.46	-178.21
	V4	92.26	-67.22	118.53	-86.30	155.77	-124.57	250.05	-175.20

Tab. 31 Mesures des déformations horizontales (10^{-6}) pour le champ 3

Charges	Vitesse	-5°C		+5°C		+15°C		+25°C	
		Bas	Interface	Bas	Interface	Bas	Interface	Bas	Interface
8 to	V1	89.57	-72.72	134.70	-101.98	197.88	-168.38	302.35	-245.38
	V2	80.92	-68.40	131.43	-100.03	191.41	-159.63	295.38	-226.11
	V3	78.64	-66.10	124.10	-95.07	176.46	-130.14	268.84	-170.08
	V4	77.45	-65.63	119.66	-95.23	171.27	-143.82	258.20	-167.74
10 to	V1	99.83	-82.20	151.63	-113.66	219.23	-172.16	341.36	-221.00
	V2	93.64	-82.05	131.12	-112.25	211.84	-169.04	331.97	-214.38
	V3	92.73	-76.86	141.26	-109.22	199.81	-161.24	301.15	-189.89
	V4	90.27	-78.51	136.20	-104.60	192.83	-155.20	300.17	-202.15
11.5 to	V1	102.82	-90.22	151.63	-113.66	226.13	-167.89	370.10	-229.60
	V2	100.76	-88.93	156.16	-120.12	225.40	-180.46	344.83	-213.61
	V3	99.37	-83.85	148.02	-114.16	209.26	-163.01	324.51	-212.33
	V4	98.32	-87.17	144.42	-112.52	201.87	-158.13	322.53	-221.94
13 to	V1	110.37	-94.88	168.43	-128.65	245.63	-198.20	392.80	-249.60
	V2	108.32	-97.74	164.37	-127.64	231.74	-185.08	365.33	-237.08
	V3	106.73	-92.20	158.33	-124.06	220.23	-186.41	346.45	-236.27
	V4	104.95	-95.28	152.84	-124.40	214.67	-177.87	343.32	-251.55

Les mesures montrent qu'à l'interface des couches bitumineuses soit entre la couche de base et la couche d'enrobé macrorugueux, les déformations sont toutes négatives. Ceci montre que l'enrobé macrorugueux travaille ici exclusivement en compression. Suite à cet essai, il est possible de tirer les observations suivantes :

- L'effet le plus marqué est celui de la température. Dans les mêmes conditions de chargement et de vitesse, on constate des déformations de plus en plus importantes avec la hausse de la température. Ceci s'explique par la diminution des modules de rigidité avec l'augmentation de la température.
- L'augmentation des déformations avec l'augmentation de la charge est peu marquée.
- L'effet de la vitesse est bien marqué dans les températures élevées mais est peu perceptible dans les basses températures.
- Les différences de déformations entre les champs montrent que la teneur en vides joue un rôle (déformations du champ 3 supérieures aux champs 1 et 2) mais ce n'est pas la seule explication. En effet, les déformations du champ 2 sont supérieures au champ 1 ce qui montre que la couche de base joue également un rôle.
- Au niveau des champs. Les déformations sont très dispersées en fonction des températures. Le champ 3 a une variation d'environ 200×10^{-6} alors que le champ 1 a une variation d'environ 50×10^{-6} .

Les graphiques ci-après illustrent cette situation :

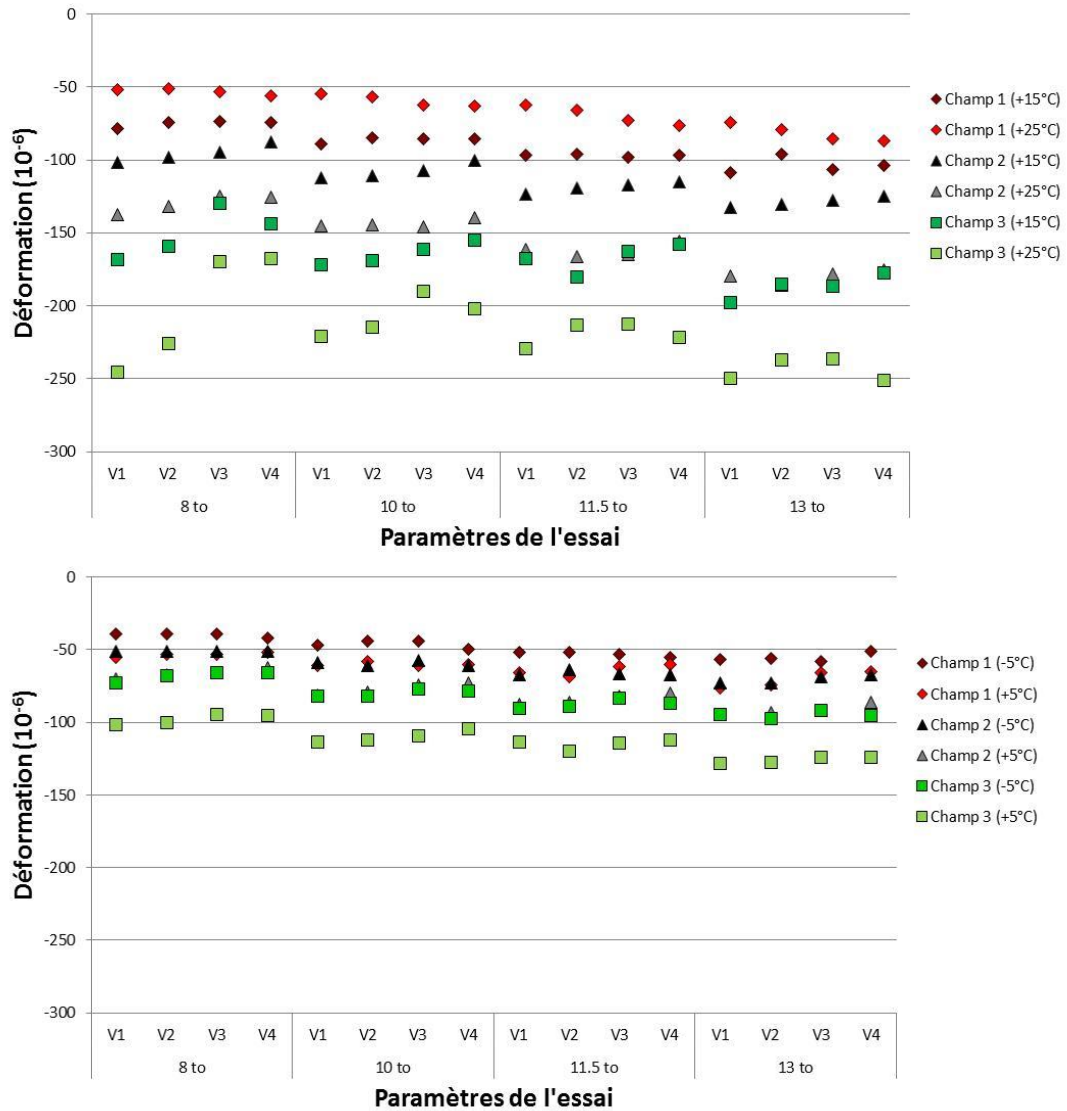


Fig. 39 Mesures des déformations à l'interface des couches bitumineuses selon les champs d'essai

Les mesures utilisées pour le dimensionnement sont celles au bas des couches bitumineuses car elles correspondent aux déformations maximales en traction. Suite à cet essai, il est possible de tirer les observations suivantes :

- Plus la charge augmente, plus les déformations sont importantes. Il est possible d'observer dans chaque champ une augmentation des déformations de 25 à 35% due l'augmentation de la charge.
- Plus la vitesse de chargement augmente, plus les déformations sont faibles. Ceci est valable pour tous les champs et toutes les températures. Il est possible d'observer une diminution de 5 à 10% des déformations avec une augmentation de la vitesse et donc une diminution du temps de chargement d'un facteur 3.
- Plus la température augmente, plus les déformations augmentent, ce qui s'explique par la diminution des modules de rigidité avec l'augmentation de la température.
- La variation des déformations entre le champ 1 et 2 est très faible alors que le champ 3 a des déformations plus importantes de 30% que les deux autres. Ceci s'explique principalement par la teneur en vides de l'enrobé de surface qui est plus élevée dans le champ 3.
- Par rapport aux déformations calculées dans le dimensionnement de ces structures, (183×10^{-6} pour le champ 1 et 168×10^{-6} pour les champs 2 et 3) seules les déformations mesurées du champ 3 dépassent ces valeurs d'environ 30%. Ceci s'explique principalement par la teneur en vides élevée de l'enrobé de surface du

champ 3 qui fait baisser le module de cette couche d'environ 800 MPa par rapport à ce qui était attendu.

Les graphiques ci-dessous montrent cette situation :

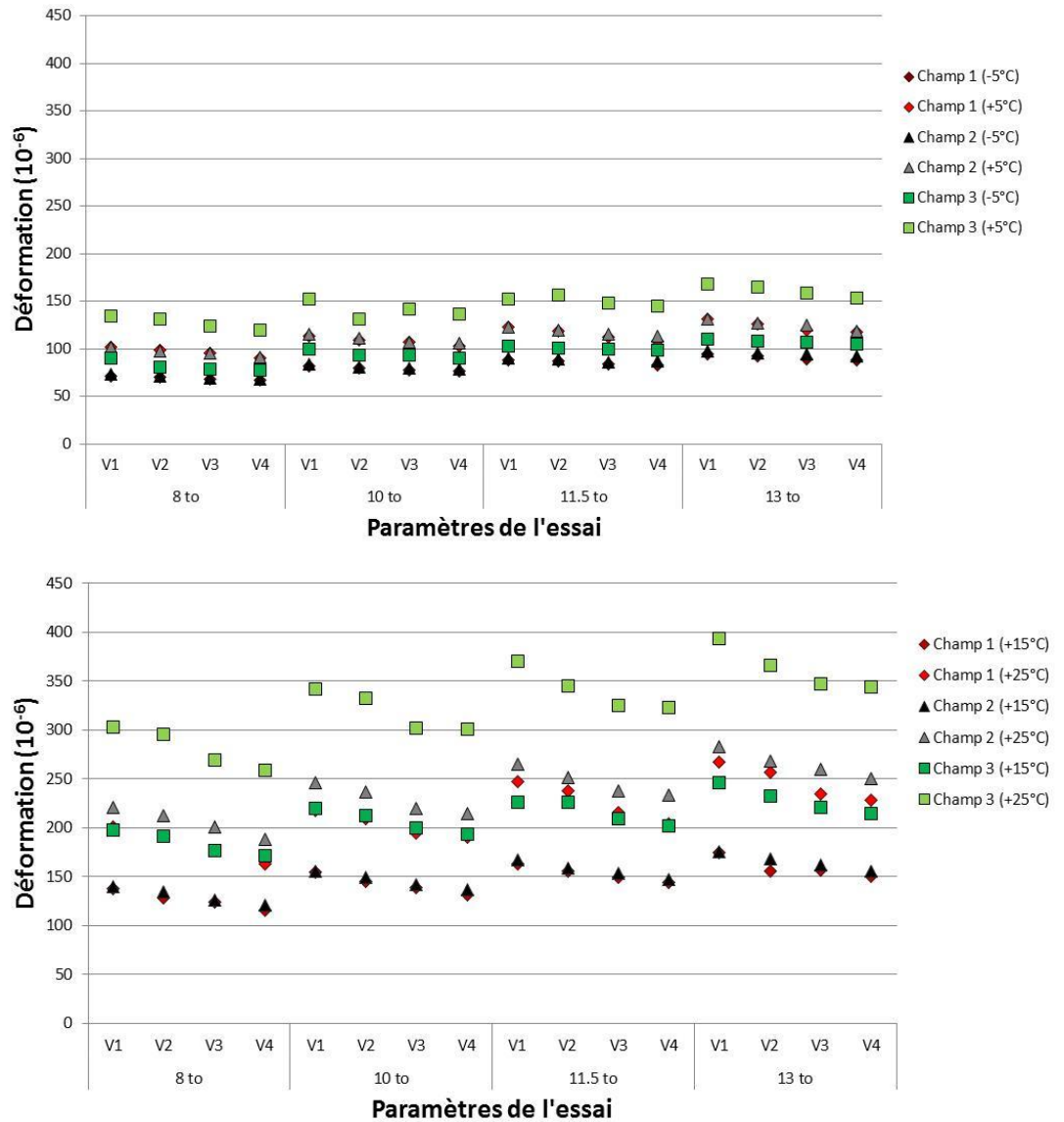


Fig. 40 Mesures de déformations selon les champs d'essai

Mesure des déflexions

Les mesures de déflexions donnent les déformations élastiques au sommet des couches bitumineuses (surface de la route) liées aux passages de la charge de trafic. Les résultats de ces mesures sont donnés dans les tableaux suivants. Ils donnent la valeur traitée D1 soit la valeur de déflexions le plus près de la charge.

Tab. 32 Mesures des déflexions (mm) pour le champ 1

Charges	Vitesse	-5°C	+5°C	+15°C	+25°C
8 to	V1	0.08	0.10	0.10	0.11
	V2	0.08	0.10	0.10	0.11
	V3	0.08	0.10	0.11	0.11
	V4	0.08	0.09	0.10	0.11
10 to	V1	0.11	0.12	0.13	0.13
	V2	0.10	0.12	0.12	0.13
	V3	0.10	0.12	0.12	0.14
	V4	0.10	0.12	0.12	0.14
11.5 to	V1	0.12	0.14	0.14	0.16
	V2	0.12	0.14	0.13	0.16
	V3	0.12	0.13	0.13	0.16
	V4	0.11	0.13	0.13	0.16
13 to	V1	0.14	0.16	0.15	0.18
	V2	0.13	0.15	0.13	0.19
	V3	0.13	0.15	0.15	0.18
	V4	0.13	0.15	0.14	0.19

Tab. 33 Mesures des déflexions (mm) pour le champ 2

Charges	Vitesse	-5°C	+5°C	+15°C	+25°C
8 to	V1	0.13	0.16	0.22	0.25
	V2	0.13	0.15	0.22	0.25
	V3	0.13	0.15	0.21	0.25
	V4	0.13	0.14	0.20	0.24
10 to	V1	0.16	0.20	0.26	0.30
	V2	0.17	0.21	0.25	0.30
	V3	0.16	0.20	0.25	0.29
	V4	0.16	0.19	0.25	0.30
11.5 to	V1	0.19	0.24	0.30	0.34
	V2	0.19	0.24	0.29	0.33
	V3	0.19	0.22	0.29	0.33
	V4	0.18	0.22	0.29	0.34
13 to	V1	0.21	0.26	0.33	0.38
	V2	0.22	0.26	0.32	0.37
	V3	0.21	0.26	0.32	0.37
	V4	0.20	0.25	0.31	0.37

Tab. 34 Mesures des déflexions (mm) pour le champ 3

Charges	Vitesse	-5°C	+5°C	+15°C	+25°C
8 to	V1	0.16	0.18	0.20	0.22
	V2	0.14	0.18	0.20	0.22
	V3	0.13	0.17	0.19	0.21
	V4	0.14	0.17	0.19	0.21
10 to	V1	0.19	0.22	0.25	0.27
	V2	0.18	0.23	0.25	0.27
	V3	0.17	0.22	0.25	0.27
	V4	0.17	0.20	0.25	0.27
11.5 to	V1	0.21	0.22	0.29	0.31
	V2	0.21	0.26	0.29	0.31
	V3	0.19	0.23	0.28	0.31
	V4	0.20	0.24	0.28	0.31
13 to	V1	0.22	0.28	0.32	0.35
	V2	0.23	0.28	0.32	0.35
	V3	0.22	0.27	0.31	0.35
	V4	0.22	0.27	0.31	0.35

Suite à cet essai, il est possible de tirer les observations suivantes :

- Pour le champ 1, l'amplitude maximale des déflexions est comprise entre 0.08 mm et 0.19 mm pour le champ 2 elle est comprise entre 0.13 mm et 0.37 mm et pour le champ 3 elle est comprise entre 0.16 mm et 0.35 mm.
- Le champ 1 a des déflexions deux fois plus faibles que celles des champs 2 et 3. Ceci vient du fait que les couches de base sont constituées de deux matériaux différents (champ 1 : AC T et champs 2 et 3 : EME), avec des épaisseurs différentes et plus importantes pour le champ 1.
- L'augmentation de la température (de -5°C à +25°C) s'accompagne d'une augmentation des déflexions de 38% pour le champ 1, de 83% pour le champ 2 et de 53% pour le champ 3.
- L'effet de l'augmentation des charges est visible par une augmentation des déflexions.
- L'effet des vitesses ne joue pas de rôle significatif sur les déflexions mesurées.
- Dans les températures élevées (+15°C et +25°C), les déflexions pour le champ 3 sont 15% plus faibles que celles du champ 2.
- A 15°C, Les mesures de déflexions sont similaires à celle trouvée par le Falling Weight Deflectometer.
- La teneur en vides des différents enrobés de surface ne joue pas de rôle significatif.

Les graphiques ci-dessous montrent cette situation :

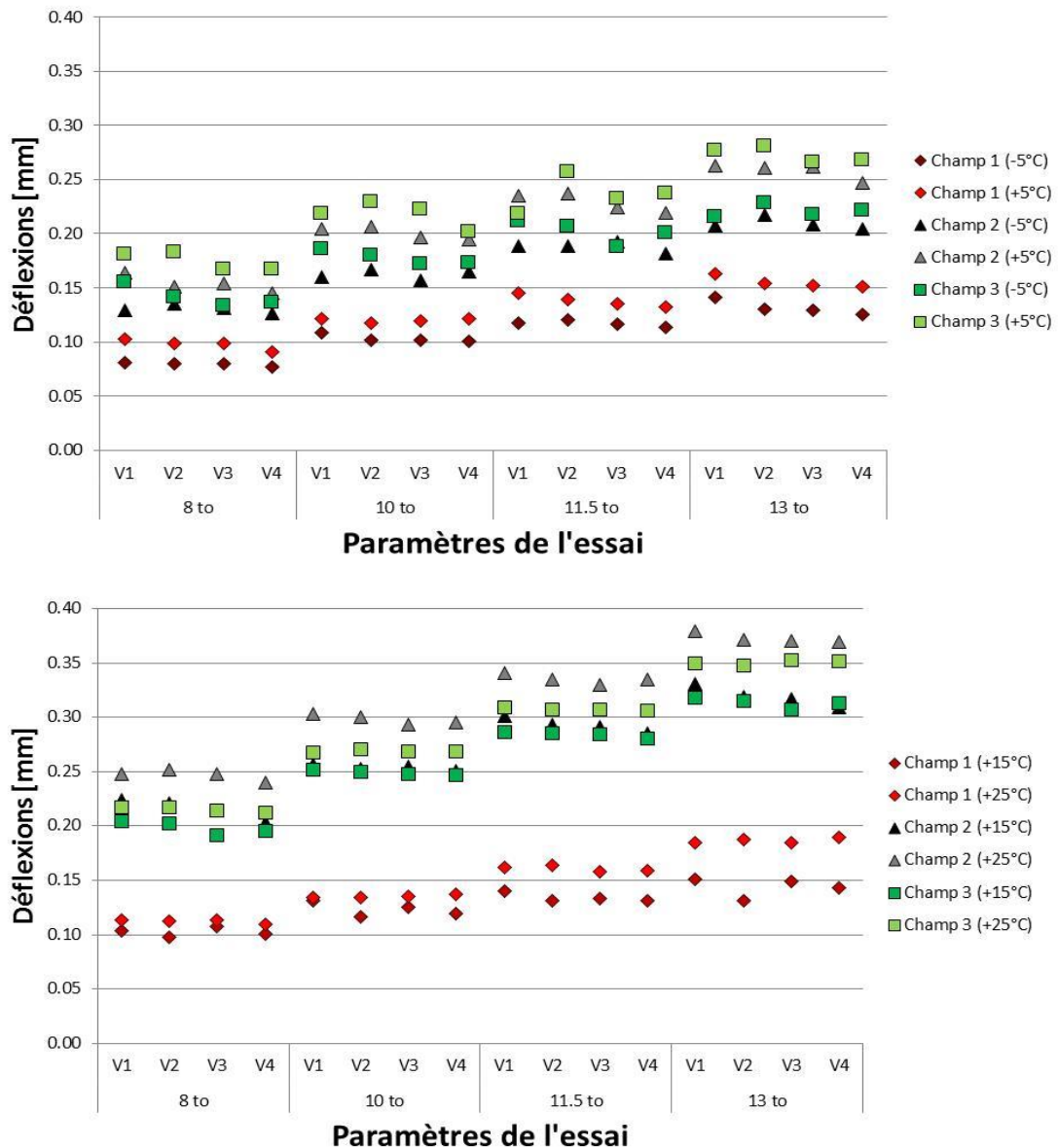


Fig. 41 Mesures de déflexions au sommet des couches bitumineuse selon les champs d'essai

Si l'on tient compte du bassin de déflexion, il est possible de déterminer le coefficient de rigidité relatif des couches bitumineuses selon la formule $(D1-D6)/D1$. D1 étant la mesure de déflexion la plus près de la charge et D6 étant une mesure sur le bassin de déflexion. Suite à cela, il est possible de tirer les observations suivantes :

- Pour le champ 1, l'amplitude maximale du coefficient de rigidité relatif est comprise entre 54% et 85%. Pour le champ 2 elle est comprise entre 49% et 70%. Et pour le champ 3 elle est comprise entre 53% et 80%.
- L'augmentation de la température (de -5°C à +25°C) s'accompagne d'une augmentation du coefficient de rigidité relatif de 57% pour le champ 1, de 42% pour le champ 2 et de 50% pour le champ 3. De plus, pour les champs 1 et 3 l'augmentation des températures montre un rétrécissement de l'ampleur du bassin de déflexion.
- L'effet de l'augmentation des charges et des vitesses de chargement ne joue pas un rôle significatif.
- La teneur en vides des différents enrobés de surface ne joue pas de rôle significatif dans l'analyse des déflexions.

Résultat de l'essai : Cycles de températures

Cet essai fait suite à l'essai modèle de réponse. Il a été réalisé en faisant varier successivement la température de -10 à 10°C sur des cycles de 24 heures.

En plus de la pression et du type de pneumatiques, la vitesse moyenne de 3.8 km/h et la charge (11.5 to) restent constantes tout au long des 100'000 cycles de l'essai.

Mesure des déformations horizontales

Les résultats de ces mesures sont illustrés sur les figures suivantes. Ils donnent la valeur moyenne des amplitudes des déformations des signaux issue du traitement de chaque jauge pour le bas de la couche bitumineuse et à l'interface des couches bitumineuses.

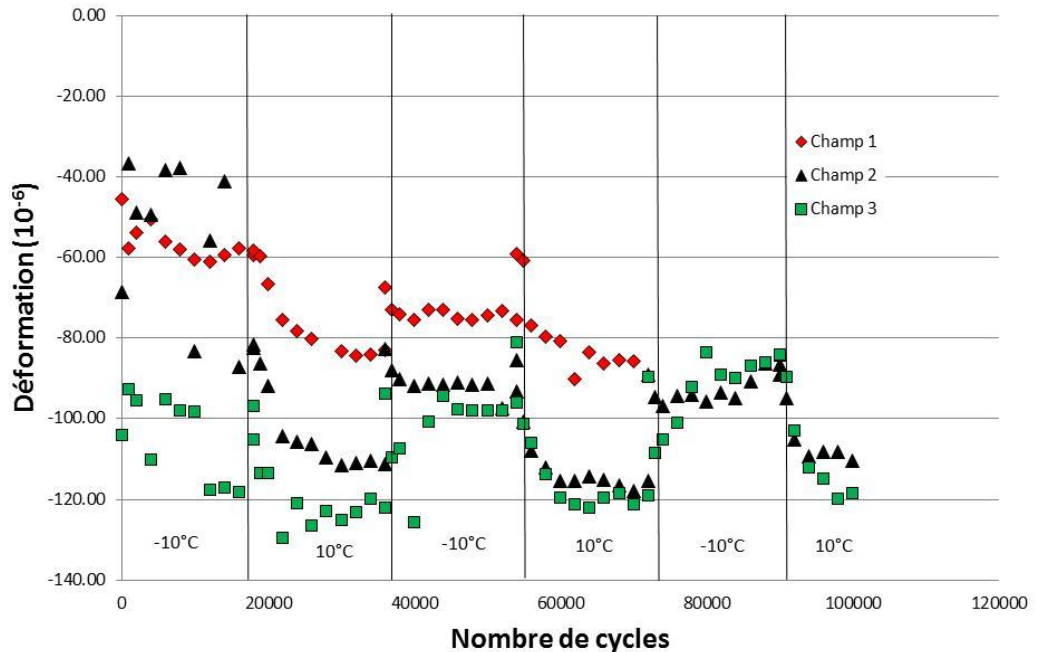


Fig. 42 Mesures des déformations horizontale à l'interface des couches bitumineuses, selon les champs d'essai

Les mesures à l'interface des couches bitumineuses montrent que, les déformations sont très variables mais restent toujours en compression. Suite à cet essai, il est possible de tirer les observations suivantes :

- L'effet de la température se manifeste légèrement et les déformations sont conformes aux attentes. La différence de déformations entre +10 et -10°C est de l'ordre de 26%.
- Les différents teneurs en vides des enrobés macrorugueux n'ont pas une influence significative sur cet essai. En effet, les champs 2 et 3 ont pratiquement les mêmes résultats.
- L'effet de la température est visible avec une augmentation des déformations de 20% avec l'augmentation de la température. Ceci s'explique par la diminution des modules de rigidité avec l'augmentation de la température.

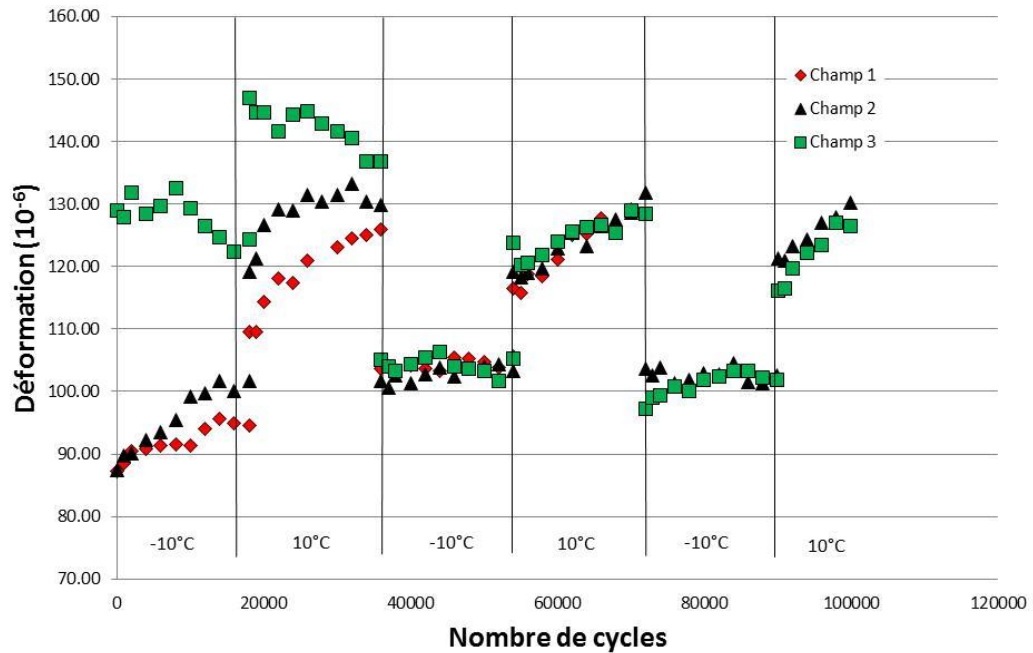


Fig. 43 Mesures des déformations horizontale au bas des couches bitumineuses, selon les champs d'essai

Les mesures au bas des couches bitumineuses sont de l'ordre 103×10^{-6} pour les températures de -10°C et de l'ordre de 125×10^{-6} pour les températures de 10°C . Suite à cet essai, il est possible de tirer les observations suivantes :

- L'effet de la température montre une augmentation des déformations de 24% pour tous les champs. Ceci s'explique par la diminution des modules de rigidité avec l'augmentation de la température.
- A base température (-10°C), les déformations restent constantes tout au long de l'essai ce qui montre le comportement élastique des matériaux à cette température. Il n'en va pas de même pour des températures plus élevées. En effet, les déformations augmentent tout au long de l'essai. Ceci montre le comportement viscoélastique du matériau.
- Les différents teneurs en vides des enrobés macrorugueux n'ont pas une influence significative sur cet essai.
- Les déformations mesurées sont inférieures aux déformations calculées de 25%.
- Il n'y a pas d'explication quant à la consolidation du champ 3 après 30'000 cycle.

Mesure des déflexions

Les mesures de déflexions donnent les déformations élastiques au sommet des couches bitumineuses (surface de la route) liées aux passages de la charge de trafic. Les résultats de ces mesures sont donnés dans la figure ci-dessous qui donne la valeur traitée D1 soit la valeur de déflexion le plus près de la charge.

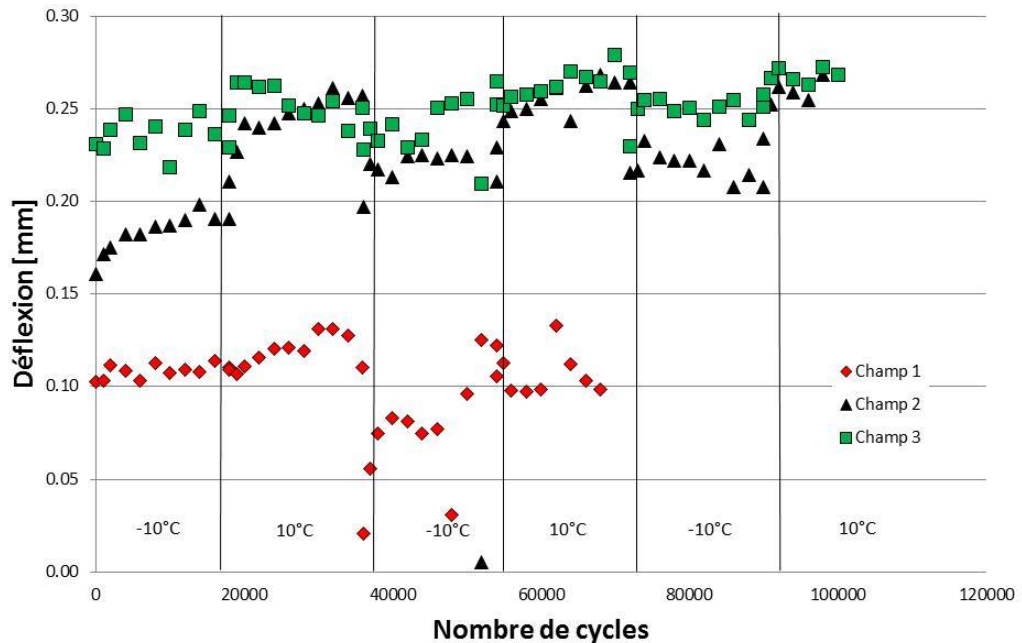


Fig. 44 Mesures des déflexions au sommet des couches bitumineuses, selon les champs d'essai

Les mesures de déflexion au sommet des couches bitumineuses sont de l'ordre 0.25 mm pour les champs 3, de 0.23 mm pour le champ 2 et de 0.10 mm pour le champ 1. Suite à cet essai, il est possible de tirer les observations suivantes :

- Les épaisseurs des couches bitumineuses de base ont une influence significative sur les déflexions. En effet, les champs 2 et 3 (couche de base en EME de 9.5 cm d'épaisseur) ont des déflexions plus de deux fois supérieures à celles mesurées sur le champ 1 (couche de base en EBT de 12 cm d'épaisseur).
- La variation de la température n'a pas d'effet significatif à l'exception du champ 2 où il est possible de mesurer une augmentation de 4 mm des déflexions.

Si l'on tient compte du bassin de déflexion et du coefficient de rigidité relatif, il est possible de tirer les observations suivantes :

- Pour le champ 1, le coefficient de rigidité varie entre 55% à -10°C et 61% à +10°C. Pour le champ 2, il varie entre 50% à -10°C et 55% à +10°C. Pour le champ 3, il varie entre 55% à -10°C et 60% à +10°C. Ceci montre que l'ampleur du bassin de déflexion n'augmente que d'environ 5% avec l'augmentation de la température.

6 Détermination du coefficient d'équivalence "a"

Sur la base de la norme SN 640 324 [1], la portance d'une chaussée routière est exprimée par sa valeur structurelle SN (structural number). Cette portance est définie par la somme des épaisseurs "D" de chacune des couches de la chaussée multipliée par ses valeurs de portance "a" (coefficient d'équivalence).

Pour des chaussées neuves, le coefficient d'équivalence de certain enrobés prend les valeurs suivantes :

- AC, AC B, AC T, AC MR et SMA : a = 4.0
- PA et PA B : a = 2.6
- AC EME 22 C1 : a = 4.4
- AC EME 22 C2 : a = 5.6
- AC F : a = 3.2

Le dimensionnement à la portance s'effectue donc en déterminant une valeur minimale du structural number nécessaire en croisant les données relatives au sol de fondation et au trafic. L'épaisseur des couches "D" peut ainsi être déterminée avec la contrainte de respecter les valeurs minimales des épaisseurs données par le catalogue des types de chaussée.

6.1 Contexte et but de la démarche

Les essais en vraie grandeur et les essais en laboratoire, ont montré que la teneur en vides des enrobés macrorugueux influait particulièrement sur le module de rigidité. En effet, un enrobé dense classique de sorte AC a un module de rigidité moyen d'environ 10'000 MPa (à 15°C et pour une fréquence 10 Hz). Les enrobés macrorugueux, testés dans cette étude, montre un module de 6'310 MPa pour le macrorugueux avec 15.0% de vides et un module de 4'172 MPa pour le macrorugueux contenant 19.4% de vides (à 15°C et pour une fréquence de 10 Hz).

C'est donc sur ce constat qu'il est possible de déterminer le coefficient d'équivalence "a" tel qu'il figure dans la norme SN 640 324 [1].

L'objectif de ce chapitre est de déterminer l'effet structurel d'une couche de roulement en enrobé macrorugueux sur une structure classique de chaussée de type 1 [1]. Il s'agit, plus précisément, de voir l'effet de cette couche sur les déformations horizontales au bas des couches bitumineuses avec un enrobé macrorugueux dont le module de rigidité varie.

6.2 Méthodologie et hypothèses pour la détermination du coefficient d'équivalence "a"

La détermination du coefficient d'équivalence "a" a été menée avec le logiciel Alizé, développé par le LCPC [34]. Ce logiciel donne les déformations en tout point d'une chaussée à l'aide d'un calcul élastique-linéaire.

La méthodologie pour déterminer ce coefficient s'appuie sur la modélisation et l'analyse de plusieurs structures de chaussée de type 1 [1] (couche(s) en enrobé bitumineux sur grave non traitée). Le choix des structures s'est porté sur celles devant supporter un type de trafic T2, T3, T4 et T5 et reposant sur un sol de fondation de portance moyenne soit S2. Le choix de ces quatre structures se veut représentatif des chaussées couramment construites avec des enrobés macrorugueux quant au choix du sol de fondation, celui-ci permet d'avoir des déformations maximum au bas des couches bitumineuse et ainsi de voir l'effet maximum d'une couche de roulement en enrobé macrorugueux.

La structure de chaussée est modélisée par une couche roulement en enrobé macrorugueux de 4 cm d'épaisseur soit l'épaisseur maximum de pose prévue dans la norme SN 640 430 [4] afin d'avoir, là également, l'effet maximum d'une telle couche. La couche de base est modélisée par une grave bitume (GB 3 selon la désignation française) avec un module de 9'300 MPa (à 15°C et pour une fréquence de 10Hz). Il s'agit d'un matériau standard qui correspond aux AC T utilisé en Suisse. Pour la grave, il a été choisi une grave non traitée disposant d'un module de 60 MPa pour les 20 premiers cm et 180 MPa pour le reste de l'épaisseur. Cette façon de décomposer la grave résulte des recommandations de la méthode française SETRA [34]. Quant au sol de fondation, il est modélisé par un sol ayant un module de 20 MPa. La structure ainsi créée dispose également d'interface entre les couches considérées comme collées. Un exemple de structure est donné dans l'annexe VIII.

La modélisation s'effectue en variant le module de rigidité de la couche en enrobé macrorugueux de 2'000 MPa à 10'000 MPa. Cette fourchette assez large du module de rigidité correspond au constat fait lors des essais. Pour les autres propriétés nécessaires à la modélisation, la couche d'enrobé macrorugueux reprend celle de la grave bitume (GB3).

Le tableau ci-dessous donne les caractéristiques des structures de chaussées modélisées :

Tab. 35 Structures des chaussées modélisées

Matériaux	Module [MPa]	Epaisseur des chaussées [cm]			
		St. 1	St. 2	St. 3	St. 4
Macrorugueux (GB 3)	2'000 ... 10'000	4	4	4	4
AC (GB 3)	9'300	6	9	13	18
Grave	180	15	15	20	20
	60	20	20	20	20
Sol support (pf 1)	20	Infini	Infini	Infini	Infini

6.3 Résultats

Les résultats du calcul des déformations horizontales au bas des couches bitumineuses sont donnés dans le tableau ci-dessous en fonction des différents modules pour la couche d'enrobé macrorugueux. Un exemple de calcul des déformations est donné dans l'annexe VIII.

Tab. 36 Résultats des calculs de déformation horizontale au bas des couches bitumineuses à l'aide du logiciel Alizé

Structure	Module de la couche de macrorugueux [MPa]	Déformation au bas des couches bitumineuses	
		[ϵ_6]	Variation [%]
St. 1	10'000	-267.6	+0.00
	8'000	-272.3	+1.76
	6'000	-278.8	+4.19
	4'000	-289.4	+8.15
	2'000	-309.5	+15.66
St. 2	10'000	-207.8	+0.00
	8'000	-212.6	+2.31
	6'000	-219.3	+5.53
	4'000	- 229.3	+10.35
	2'000	-245.9	+18.33
St. 3	10'000	-147.3	+0.00
	8'000	-151	+2.51
	6'000	-155.9	+5.84

	4'000	-162.8	+10.52
	2'000	-172.9	+17.38
St. 4	10'000	-106.7	+0.00
	8'000	-109.4	+2.53
	6'000	-112.8	+5.72
	4'000	-117.2	+9.84
	2'000	-123.3	+15.56

Les résultats montrent une augmentation des déformations horizontales au bas des couches bitumineuse allant jusqu'à 18% entre une couche de roulement en enrobé classique avec un module de 10'000 MPa et un même enrobé avec un module de 2'000 MPa.

En faisant l'hypothèse que le coefficient d'équivalence "a" varie linéairement avec les déformations horizontales présentées dans le tableau ci-dessus, on peut estimer que la fourchette dans laquelle évolue le coefficient d'équivalence pour les enrobés macrorugueux se situe entre 3.4 et 4.

Concernant les enrobés testés dans le cadre de cette étude, l'enrobé macrorugueux avec un module de 6'310 MPa a un coefficient d'équivalence se situant autour de 3.7 et l'enrobé macrorugueux avec un module de 4'172 MPa a un coefficient d'équivalence se situant autour de 3.65. Ces deux estimations se font en regard du module et donc des teneurs en vides respectives desdits enrobés macrorugueux.

6.4 Commentaires et recommandations

La différence de valeur pour le coefficient d'équivalence qui passe de 4 à 3.65 représente une différence d'épaisseur de 0.85 mm par cm d'enrobé. En ramenant cette valeur à l'épaisseur maximale d'enrobé qu'il est possible de poser soit 5 cm, cela représente une différence d'épaisseur d'environ 4.5 mm.

En outre, les enrobés macrorugueux sont utilisés comme couche de roulement et les essais en vraie grandeur montrent que cette couche travaille en compression donc n'est pas soumise à la fatigue.

Compte tenu de ces deux arguments, il est recommandé de retenir un coefficient d'équivalence $a = 4$.

7 Formulation et optimisation des performances

7.1 Introduction

Dans le cas de la présente étude, le but est de faire une étude de formulation et d'optimisation des performances qui analyse l'intervalle de vides cible compris entre 8 et 13% de vides moyens en place. Mais entre le début de cette étude et son achèvement, la teneur en vides proposée par les normes a changé. La figure ci-dessous montre cette évolution pour les AC MR 8 ainsi que l'arrivée des enrobés semi-denses dans la normalisation. De plus, cette figure montre que les enrobés semi-denses ont pris le pas sur les enrobés macrorugueux pour les teneurs en vides comprises entre 8 et 13% de vides. Elle montre également que suite à l'arrivée des enrobés semi-denses, la teneur en vides des enrobés macrorugueux est "presque" revenue aux valeurs de 2003.

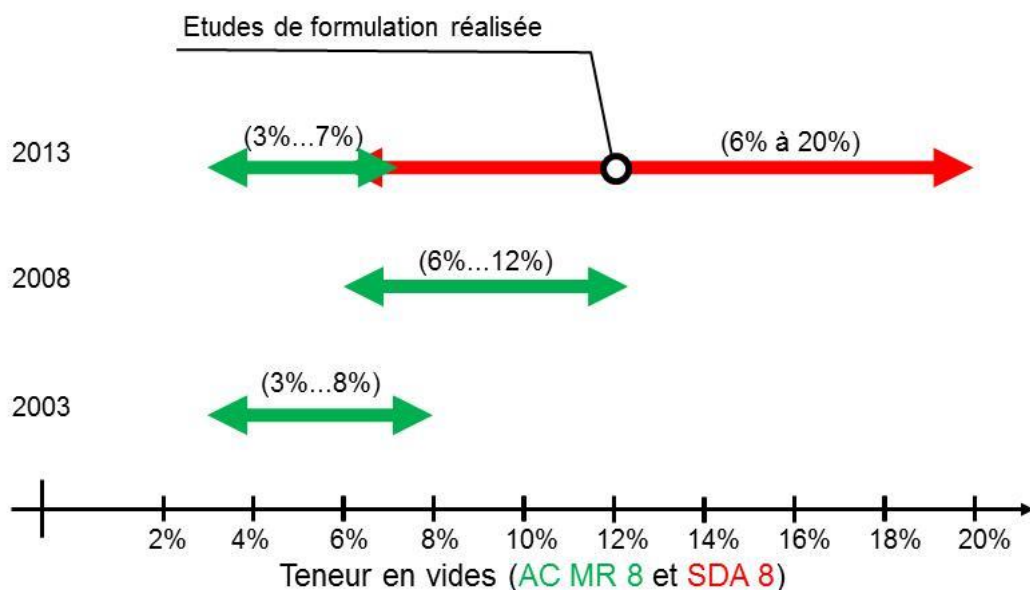


Fig. 45 Teneur en vides caractéristiques normalisées des AC MR 8 et SDA 8 et étude de formulation déjà réalisée.

Pour des questions de disponibilité de la halle fosse, il n'a pas été possible de réaliser une étude de formulation et d'optimisation des performances pour les enrobés macrorugueux utilisés dans le cadre de la présente étude selon la méthodologie développée dans le rapport 2000/421-2 « Formulation et optimisation des formules d'enrobés » [33]. Cette méthodologie de formulation s'appuie sur la méthode de formulation volumique du CRR [31] en y associant des étapes préliminaires et/ou supplémentaires. L'objectif de cette démarche étant de déterminer une composition volumique optimale de granulats, de liants et de vides qui permette d'atteindre les performances visées.

Plusieurs études de formulation et d'optimisation des performances ont déjà été réalisées par le LAVOC sur différents types d'enrobés en se basant sur cette méthodologie. Il est possible de citer l'étude de formulation des enrobés semi-denses [41] qui est utilisée dans le cadre de la présente étude. Cette étude propose une série d'optimisation de formulation en fonction de plusieurs teneurs en vides et classes d'enrobé, toutes basées sur des enrobés macrorugueux. De plus, l'épreuve type de formulation utilisée dans l'essai en vraie grandeur a fait l'objet d'une vérification de formulation avec comme objectif une teneur en vides de 8%. Cette vérification a été menée à l'aide du logiciel PradoWin qui se base sur la méthode de formulation volumique du CRR [31]

Il a été également convenu que cette étude ne s'intéresse qu'aux AC MR 8.

7.2 Résultats des études de formulation utilisées

7.2.1 Etude portant sur les enrobés semi-denses

L'étude portant sur la formulation et l'optimisation des performances de plusieurs enrobés semi-denses [41], nommés LNA (Low Noise Asphalt), propose différents produits. Le produit qui correspond le mieux aux objectifs de cette recherche est le LNA 8₁₂ (8 pour le diamètre maximum des granulats et 12 pour la teneur en vides cible). En effet, la base de travail pour cet enrobé est un AC MR 8 et les matériaux employés ont des caractéristiques comparables avec ceux de cette étude.

Cet enrobé a les caractéristiques suivantes :

Tab. 37 Principales caractéristiques de la formule LNA 8₁₂ finale

Tamis (mm)	11.2	8	4	2	1	0.5	0.25	0.063
% de passant	100.0	97.3	32.9	23.6	19.1	16.1	13.6	10.5

Teneur en liant sur enrobé :	6.49% massique
Teneur en vides Marshall :	11.7% (vides géométriques)
Module de richesse :	4.02
Masse volumique apparente :	2.038 to/m ³
Ornière à 30'000 cycles :	4.1% (simulateur de trafic léger type LCPC)
Essai ITSR :	92%
Stabilité Marshall :	11.0 KN
Fluage Marshall :	3.8 mm

7.2.2 Analyse portant sur l'AC MR 8₈

Afin de réaliser l'essai en vraie grandeur, une épreuve type de formulation a été utilisée afin d'obtenir un AC MR 8 avec 8% de vides en places. Cette formulation a également été évaluée à l'aide du logiciel PradoWin. Les essais de conformité et de performances de cet enrobé sont donnés en annexe IX.

Cet enrobé a les caractéristiques suivantes et est baptisé ici MR 8₈ :

Tab. 38 Principales caractéristiques de la formule MR 8₈ finale

Tamis (mm)	11.2	8	5.6	4	2	1	0.5	0.063
% de passant	100.0	96.6	65.6	40.0	24.7	18.6	15.6	8.3

	ETF	PradoWin
Teneur en liant sur enrobé :	5.91% massique	5.92%
Teneur en vides Marshall :	7.9% (vides géométriques)	6.16%
Module de richesse :	3.66	3.77
Masse volumique apparente :	2.270 to/m ³	2.287 to/m ³
Ornière à 30'000 cycles :	3.9% (simulateur de trafic léger)	-
Essai ITSR :	98.5%	-
Stabilité Marshall :	-	-
Fluage Marshall :	-	-

Il est possible de constater que les valeurs de l'épreuve type de formulation sont très similaires aux résultats issus du logiciel PradoWin. Seule la teneur en vides donnée par le logiciel PradoWin est sensiblement plus faible qu'attendue.

7.3 Comparaisons de ces deux enrobés

Comme le montre la figure ci-dessous, la courbe granulométrique de l'AC MR 8₈ et la courbe granulométrique du LNA 8₁₂ restent dans le fuseau granulométrique des AC MR 8. Ils sont donc conformes.

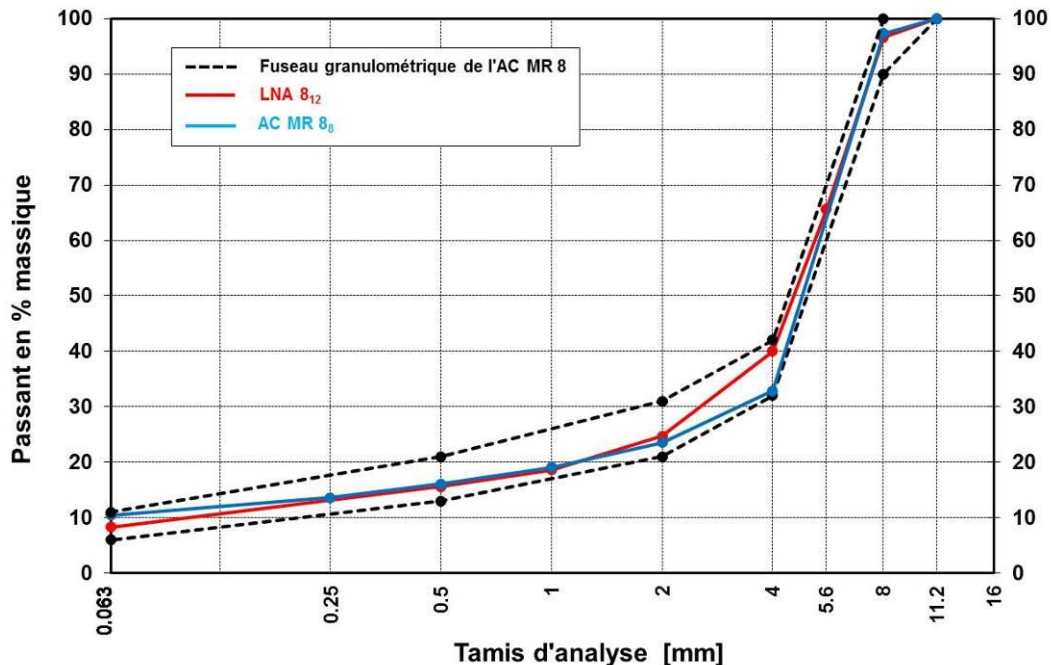


Fig. 46 Fuseau granulométrique des MR 8 et courbes granulométriques du MR 8₈ et du LNA 8₁₂ (SDA).

Pour ce qui est des teneurs en liant (massique), les deux formules sont conformes aux recommandations de la norme qui demande une teneur en liant supérieur à 5.8%. L'essai ITSR et l'essai d'orniérage respectent eux aussi les valeurs fixées dans les normes (SN 640 430 [4] et SN 640 430-1-NA [7]).

Le module de richesse fait le lien entre la teneur en liant et la granulométrie. Selon l'étude sur les SDA « Revêtements peu bruyants à l'intérieur des localités – EP1 : Formulation » [41], il est recommandé, pour les enrobés macrorugueux, de viser des valeurs du module de richesse comprises entre 3.8 et 4.2. A ce niveau, L'AC MR 8₈ a des valeurs légèrement inférieures à ce qui est attendu. Pour ce qui est du LNA 8₁₂, il est conforme aux prescriptions.

L'étude sur les SDA « Revêtements peu bruyants à l'intérieur des localités – EP1 : Formulation » [41] montre également que l'ajout de chaux hydratée dans un LNA (1.5% massique) améliore les performances de celui-ci. Les résultats montrent une légère baisse de la teneur en vides Marshall, une sensibilité à l'eau identique, une susceptibilité à l'orniérage réduite de 23%, et une résistance à la traction légèrement améliorée.

7.4 Commentaires

Sachant qu'un enrobé comme le LNA 8₁₂ respecte les normes en vigueur, il en ira de même avec un enrobé ayant une plus faible teneur en vides. Une diminution des contraintes liées à une teneur en vides plus faible et un module de richesse plus faible mène à un meilleur comportement mécanique.

L'AC MR 8₈ confirme cette appréciation car ses performances mécaniques sont meilleures que celles du LNA 8₁₂ et est aussi conforme aux attentes et aux normes.

L'ajout de chaux hydratée peut être recommandé pour des enrobés macrorugueux avec une teneur en vides élevée afin d'en améliorer les performances mécaniques. L'ajout de chaux peut légèrement diminuer la teneur en vides et influencer négativement les performances phoniques. De plus, cet ajout doit être compensé par une diminution proportionnelle de la teneur en filler.

8 Conclusions et recommandations

8.1 Conclusions générales

Ce projet de recherche a permis de mieux cerner les enrobés macrorugueux ainsi que les impacts d'une teneur en vides élevée sur ceux-ci. En effet, la teneur en vides en places moyenne autorisée par les normes pour un AC MR 8 est subitement passée de 3...8% à 6...12%. Cette recherche a donc évalué, en vraie grandeur, des enrobés macrorugueux avec des teneurs en vides élevées.

Les essais en vraie grandeur montrent au niveau des propriétés fonctionnelles des enrobés macrorugueux les éléments suivants

- L'essai SRT qui évalue la qualité antidérapante liée à la microtexture donne des résultats inférieurs aux valeurs limites fixées dans la normalisation. Les résultats montrent également une baisse de la qualité antidérapante avec l'augmentation de la teneur en vides. En revanche, la baisse de la qualité antidérapante liée à la microtexture est compensée par l'augmentation de la macrotecture. En effet, plus la teneur en vides est importante plus la macrotecture est développée.
- Les essais d'orniérage (laboratoire et en vraie grandeur) montrent une forte susceptibilité à l'orniérage pour les enrobés macrorugueux surtout si la teneur en vides est importante.
- Pour ce qui est de l'essai d'arrachement, la teneur en vides diminue significativement la résistance de l'interface des couches bitumineuses.

Pour ce qui est des propriétés structurelles des enrobés macrorugueux, les essais en vraie grandeur montrent les éléments suivants :

- Les déformations horizontales au bas des couches bitumineuses sont conformes aux valeurs calculées lors du dimensionnement. Seul l'enrobé avec 19.4% de vides dépasse ces valeurs de près de 30%. Les déformations sont principalement liées au module de rigidité qui baisse avec l'augmentation de la teneur en vides.
- Au niveau des mesures de déflexions, la variation des teneurs en vides n'a pas d'influence significative.

La présente étude s'est également intéressée au coefficient d'équivalence "a" et a une étude de formulation plus poussée applicable à ce type d'enrobé. Les conclusions de cette partie sont données dans le chapitre ci-dessous.

8.2 Recommandations

Les recommandations faites ci-dessous, peuvent être utilisées pour adapter les normes en vigueur.

8.2.1 Matériaux

L'utilisation de matériaux avec de bonnes propriétés est fortement recommandée. Les granulats doivent présenter des propriétés mécaniques élevées (granulats durs, CPA élevé). Les bitumes utilisés doivent être modifiés par des polymères.

Une attention particulière doit également être apportée lors de la fabrication de l'enrobé afin que la recette respecte les propriétés attendues pour ce genre d'enrobé.

L'ajout de chaux peut être recommandé afin d'améliorer les performances mécaniques des enrobés. Comme la teneur en vides diminue légèrement avec l'utilisation de la chaux, les performances phoniques peuvent en être affectées.

8.2.2 Formulation

Pour des teneurs en vides en places moyennes inférieures à 7% (valeurs limites de la norme SN 640 430 [4]), il est recommandé de se baser sur les études préexistantes pour la formulation des enrobés macrorugueux comme l'étude « Mise au point et application d'une formule d'enrobé MR 8 phono-absorbant au liant bitume-caoutchouc » [39]. Pour des teneurs en vides en places moyennes supérieures à 7% le présent rapport recommande de se baser sur l'étude « Revêtements peu bruyants à l'intérieur des localités – EP1 : Formulation » [41] avec la formulation du LNA 8₁₂, qui est applicables par analogie aux AC MR 8.

8.2.3 Coefficient d'équivalence

Ce projet de recherche montre que pour le dimensionnement d'une structure routière, l'effet d'une teneur en vides élevée influe principalement sur le module de rigidité. C'est sur ce constat que la recherche donne une fourchette pour le coefficient d'équivalence qui variant entre 3.4 et 4.0 (3.65 pour un module de rigidité d'environ 4'000 MPa et 4.0 pour un module de rigidité d'environ 10'000 MPa).

Compte tenu qu'une différence de coefficient d'équivalence de 0.35 ne représente qu'une différence d'épaisseur maximum de 4.5 mm pour une couche de roulement. Il est donc recommandé de maintenir le coefficient d'équivalence "a" à 4.0 comme mentionné dans la norme SN 640 324 [1].

Annexes

I	Questionnaire distribué	91
II	Caractéristiques principales des matériaux	95
II.1	Granulats	95
II.1.1	Fraction 0/4	95
II.1.2	Fraction 4/8	96
II.1.3	Fraction 8/11	97
II.1.4	Fraction 11/16	98
II.2	Filler	99
II.3	Bitumes	100
II.3.1	Bitumes pour AC T	100
II.3.2	Bitumes pour EME	101
II.3.3	Bitume pour AC MR	102
III	Epreuve type de formulation ou recette des enrobé posé	105
III.1	AC EME C1	105
III.2	AC T 22 S	106
III.3	AC MR 8 avec 8% de vides cible	107
III.4	AC MR 8 avec 13% de vides cible	108
IV	Fiches technique de la halle fosse	109
V	Procès-verbaux des résultats d'essai du Contrôle de la fourniture	111
V.1	AC MR 8 avec 8% de vides cible	111
V.1.1	Identification de la formule posée et stabilité et fluage Marshall	111
V.1.2	Teneur en vides Marshall 50/50.....	112
V.1.3	Essai sur liant récupéré.....	115
V.2	AC MR 8 avec 13% de vides cible	116
V.2.1	Identification de la formule posée et stabilité et fluage Marshall	116
V.2.2	Teneur en vides Marshall.....	117
V.2.3	Essai sur liant récupéré.....	120
VI	Procès-verbaux des résultats d'essais sur granulats et enrobés	121
VI.1	Macrorugueux avec 8% de vides cible	121
VI.1.1	Sensibilité à l'eau (ITSR).....	121
VI.1.2	Presse à cisaillement giratoire (PCG)	122
VI.1.3	Simulateur de trafic léger (orniérage)	123
VI.1.4	Essai Cantabro.....	124
VI.1.5	Traction indirecte (ITS à 3 points)	125
VI.1.6	Essai Leutner	128
VI.1.7	Module de rigidité	129
VI.2	Macrorugueux avec 13% de vides cible	130
VI.2.1	Sensibilité à l'eau (ITSR).....	130
VI.2.2	Presse à cisaillement giratoire (PCG)	131
VI.2.3	Simulateur de trafic léger (orniérage)	132
VI.2.4	Essai Cantabro.....	133
VI.2.5	Traction indirecte (ITS à 3 points)	134
VI.2.6	Essai Leutner	137
VI.2.7	Module de rigidité	138
VII	Données liées à la backcalculation et au FWD	139
VII.1	Résultats du FWD	139
VII.2	Synthèse Infralab	140

VIII	Exemple de structure et calcul dans Alizée	141
VIII.1	Exemple de structure	141
VIII.2	Exemple de calcul de déformations (str. S2T5).....	141
IX	Formulation du MR 8 avec 8% de vides	143
IX.1	Epreuve type de formulation	143
IX.2	Essai de sensibilité à l'eau	144
IX.3	Essai d'orniérage	145
IX.4	Essai de conformité.....	146

I Questionnaire distribué

ENAC – Faculté de l’environnement naturel, architectural et construit
IIC – Institut d’Ingénierie Civile
LAVOC – LABORATOIRE DES VOIES DE CIRCULATION

GC C1 397 (Bâtiment GCB)
Station 18
CH – 1015 LAUSANNE

Téléphone : + 41 21 693 23 45
Télécopie : + 41 21 693 63 49
<http://lavoc.epfl.ch/>



RÉCOLTE D'EXPÉRIENCES AVEC LES ENROBÉS MACRORUGUEUX (AC MR)

Ce questionnaire est mené dans le cadre du projet VSS 2009/502 intitulé « Formulation et comportement des enrobés de surface macrorugueux ». Toutes les données seront traitées de manière confidentielle. Le répondant au questionnaire ne sera pas mentionné dans la recherche en question excepté sur demande particulière.

Ce questionnaire est rempli par :
Service / Entreprise :
Adresse, coordonnées postales :
Téléphone :
Mail :
Domaine :	<input type="checkbox"/> Administration <input type="checkbox"/> Entreprise <input type="checkbox"/> Laboratoire <input type="checkbox"/> Autres

Question 1

- a) Pouvez-vous répertorier les tronçons du réseau routier / autoroutier revêtus d'un enrobé macrorugueux (AC MR) que vous connaissez ?

N°	Axe routier	Au km	Longueur [m]	Type de route	Type AC MR	Date de pose	Note*
ex.	RC6, Courrendlin	77.818	1400	Route cantonale	AC MR 8	01.01.2006	0
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							

* Evaluation globale du tronçon : Comparativement à un enrobé à chaud traditionnel, quelle note attribuez-vous à ce tronçon ?
Echelle : nombres entiers de -5 à +5 (-5 : macrorugueux nettement moins bon ; 0 : équivalence entre enrobés ; +5 macrorugueux nettement meilleur). Tous critères compris : Cycle de vie, réalisation, dégradations, entretien, coûts, ...

b) Connaissez-vous des réalisations de tronçons revêtus d'un enrobé macrorugueux prévues en 2012 ?

oui non

c) Comment qualifiez-vous le comportement des enrobés macrorugueux en conditions climatiques extrêmes ? (ex : fortes pluies, fortes chutes de neige, ...)

.....

Question 2

a) Dans la mesure où celles-ci sont en votre possession, pouvez-vous nous communiquer les caractéristiques des tronçons énumérés à la question 1 ?

N°	Epaisseur de la couche de roulement [cm]	Liant		Vides		Dégradations remarquées (Marquer d'un X ce qui convient)		
		Teneur / enrobé %	Type	%	Méthode de mesure	Fissuration	Pertes phono-absorbantes	Arrachage des grains
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								

b) Dans la mesure des disponibilités, pourriez-vous nous transmettre la (ou les) fiche(s) de spécification de l'enrobé ou les résultats des essais effectués ?

oui non

c) Des mesures ou une évaluation de ces tronçons ont-elles été effectuées ? (Spécifier l'année)

	Portance	Bruit	Profil transversal	Profil longitudinal	Texture	Visuelle	Autre (spécifier)
ex.	-	2006	2008	2008	2009	2008	Carottage (2007)
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							

d) Dans la mesure des disponibilités, pourriez-vous nous transmettre les résultats des essais ou les évaluations effectuées ?

oui non

Question 3

a) Certains tronçons présentent-ils des fortes sinuosités, intersections, giratoires ?

Si oui, lesquels ? (Les numéros de la question 1 suffisent)

.....

Remarques diverses

.....

Etes-vous ouvert à être contacté sur le thème des enrobés macrorugueux ?

oui non

Nous vous remercions pour votre participation

Vous pouvez répondre par mail à l'adresse marc-antoine.fenart@epfl.ch ou par fax au +41 21 693 63 49
 Envoi papier : EPFL – LAVOC – Station 18 – 1015 Lausanne


LAVOC – EPFL

3/3

II Caractéristiques principales des matériaux

II.1 Granulats

II.1.1 Fraction 0/4



Laboroute sa
Accrédité EN ISO/IEC 17025:2005

1564 DOMDIDIÉR
Tél: 028875 1872 Internet: www.laboroute.ch
Fax: 028875 12 09

Fiche de conformité technique

Classe granulaire:
0/4c

Client : JPF Gravières SA
Rue de Gruyères 106
1630 Bulle

Code produit : 930

Provenance : Gravières de progression
Site de production : Grandvillard

Classe : G_{A85} - G_{T10}

Affectation : Granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels

Période de production : 14.04.09 au 01.09.09

Analyses qualitatives et quantitatives

Essai	Valeur	Unité	Date	Essai	Valeur	Unité	Date
Grains concs.	-	[C]	-	CPA	-	[CPA]	-
Forme	-	[A]	-	Angularité	E _{ca19}	[E _{cs}]	18.08.09
Los Angeles	-	[LA]	-	Porosité filler	31.9	[%]	16.09.08
MV réelle	2.67	[Mg/m ³]	18.08.09	Anneau-bille	12.8	[°C]	18.09.08
MV vrac	1.55	[Mg/m ³]	27.11.07	Affinité	-	[%]	-
WA ₂₄	WA ₂₄ 1	[%]	18.08.09	Teneur en fine	f _{1c}	[f _{octare}]	01.09.09

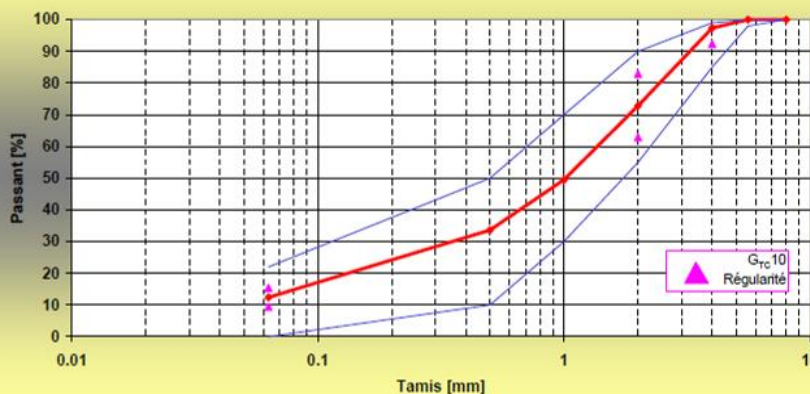
Pédrographie

Polluants org.	<0.1	[m _{pc}]	13.05.07	Durabilité	Conforme [-]	13.05.07	
Dur	69.9	[%]	13.05.07	Tendre	3.8	[%]	13.05.07
Mi-dur	26.3	[%]	13.05.07	Très tendre	0	[%]	13.05.07

Analyse granulométrique

Tamis	0.063	0.5	1	2	4	5.6	8
Passant	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Moyenne	12	34	49	73	97	100	100
Fuseau supérieur norme	22	50	70	90	99	100	100
Fuseau inférieur norme	0	10	30	55	85	98	100


Courbe granulométrique moyenne



Lieu: 1564 Domdidier Date: 10.09.2009 Norme: EN 13043 / SN 670 103

Signature: _____
B. Schmid Directeur

II.1.2 Fraction 4/8



Laboroute sa
Accrédité BIV ISO/IEC 17025:2005

1564 DOMMIDIÉ
Tel: 028775 18 72 Internet: www.laboroute.ch
N°: 076008 47 73 E-mail: info@laboroute.ch
Fax: 028778 92 09

**Fiche de déclaration de
conformité produit**

Classe granulaire: **4/8c**

Client : **JPF Gravières SA**
Rue de Gruyères 106
1630 Bulle

Code produit : **931**

Provenance : Graviers de progression

Site de production : Grandvillard

Classe : G_c85/15 - G₂₀15

Affectation : Granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels

Période de production : 14.04.09 au 01.09.09

Analyses qualitatives et quantitatives

Essai	Valeur	Unité	Date	Essai	Valeur	Unité	Date
Grains conca.	C _{35/1}	[C]	18.08.09	CPA	-	[CPA]	-
Forme	A ₁₅	[A]	18.08.09	Angularité	-	[E _{cs}]	-
Los Angeles	LA ₂₅	[LA]	19.09.08	Porosité filler	-	[%]	-
MV réelle	2.66	[Mg/m ³]	18.08.09	Anneau-bille	-	[°C]	-
MV vrac	1.33	[Mg/m ³]	27.11.07	Affinité	-	[%]	-
WA ₂₄	WA ₂₄ 1	[%]	18.08.09	Teneur en fine	f ₁	[f ₁ secare]	01.09.09

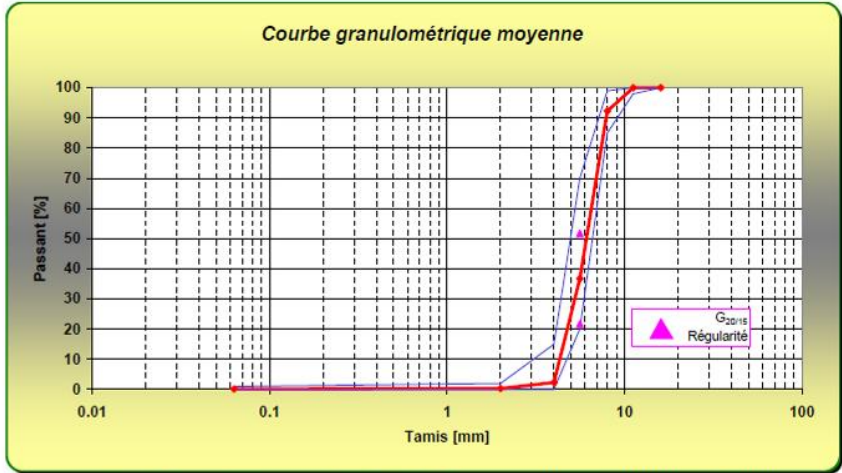
Pétrographie

Polluants org.	<0.1	[m _L c]	13.05.07	Durabilité	Conforme [-]	13.05.07	
Dur	68.3	[%]	13.05.07	Tendre	4.2	[%]	13.05.07
Mi-dur	28.5	[%]	13.05.07	Très tendre	0	[%]	13.05.07

Analyse granulométrique

Tamis	0.063	2	4	5.6	8	11.2	16
Passant	0.1	0.3	2.3	3.7	92	100	100
Fuseau supérieur norme	1	2	15	70	99	100	100
Fuseau inférieur norme	0	0	0	20	85	98	100


Courbe granulométrique moyenne



Lieu: 1564 Dommidié Date: 10.09.2009 Norme: EN 13043 / SN 670 103

Signature: _____
B. Schmid Directeur

II.1.3 Fraction 8/11



Laboroute sa
Accrédité EN ISO/IEC 17025:2005

1564 DOMDIDIÉ
Tel: 026875 18 72 Internet: www.laboroute.ch
N°: 076208 47 73 E-mail: info@laboroute.ch
Fax: 026876 92 09

Fiche de déclaration de conformité produit

Classe granulaire: 8/11c

Client : JPF Gravières SA
Rue de Gruyères 106
1630 Bulle

Code produit : 932

Provenance : Graviers de progression

Site de production : Grandvillard

Classe : G_C85/15

Affectation : Granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels

Période de production : 14.04.09 au 01.09.09

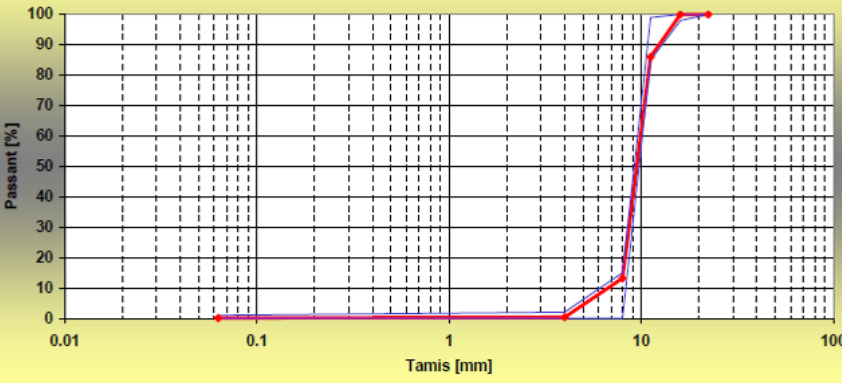
Analyses qualitatives et quantitatives

Essai	Valeur	Unité	Date	Essai	Valeur	Unité	Date
Grains conca.	C _{95/1}	[C]	18.08.09	CPA	CPA ₉₀	[CPA]	06.04.09
Forme	A ₁₅	[A]	18.08.09	Angularité	-	[E _{CS}]	-
Los Angeles	LA ₂₀	[LA]	19.09.08	Porosité filler	-	[%]	-
MV réelle	2.67	[Mg/m ³]	18.08.09	Anneau-bille	-	[°C]	-
MV vrac	1.31	[Mg/m ³]	27.11.07	Affinité	80.4	[%]	01.10.08
WA ₂₄	WA ₂₄ 1	[%]	18.08.09	Teneur en fine	f ₁	[f _{decares}]	01.09.09
Petrographie							
Polluants org.	<0.1	[m _{PC}]	13.05.07	Durabilité	Conforme	[-]	13.05.07
Dur	76.7	[%]	13.05.07	Tendre	1.6	[%]	13.05.07
Mi-dur	21.7	[%]	13.05.07	Très tendre	0	[%]	13.05.07

Analyse granulométrique

Tamis	0.063	4	8	11.2	16	22.4
Passant	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Moyenne	0.1	0.3	13	86	100	100
Fuseau supérieur norme	1	2	15	99	100	100
Fuseau inférieur norme	0	0	0	85	98	100


Courbe granulométrique moyenne



Lieu: 1564 Domdidier Date: 10.09.2009 Norme: EN 13043 / SN 670 103

Signature: _____
B. Schmid Directeur

II.1.4 Fraction 11/16



Laboroute sa
Accrédité EN ISO/IEC 17025:2005

1564 DOMDIDIER
Tel: 028875 18 72 | E-mail: info@laboroute.ch
Net: 076208 47 73 | E-mail: info@laboroute.ch
Fax: 028876 92 09

**Fiche de déclaration de
conformité produit**

Classe granulaire: 11/16c

Client : JPF Gravières SA
Rue de Gruyères 106
1630 Bulle

Code produit : 933

Provenance : Gravières de progression

Site de production : Grandvillard

Classe : G_c85/15

Affectation : Granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels

Période de production : 14.04.09 au 01.09.09

Analyses qualitatives et quantitatives

Essai	Valeur	Unité	Date	Essai	Valeur	Unité	Date
Grains conca.	C _{30/1}	[C]	18.08.09	CPA	-	[CPA]	-
Forme	A ₂₀	[A]	18.08.09	Angularité	-	[E _{cs}]	-
Los Angeles	LA ₂₀	[LA]	19.09.08	Porosité filler	-	[%]	-
MV réelle	2.66	[Mg/m ³]	18.08.09	Anneau-bille	-	[°C]	-
MV vrac	1.32	[Mg/m ³]	27.11.07	Affinité	-	[%]	-
WA ₂₄	WA ₂₄ 1	[%]	18.08.09	Teneur en fine	t ₁	[t _{accaref}]	01.09.09

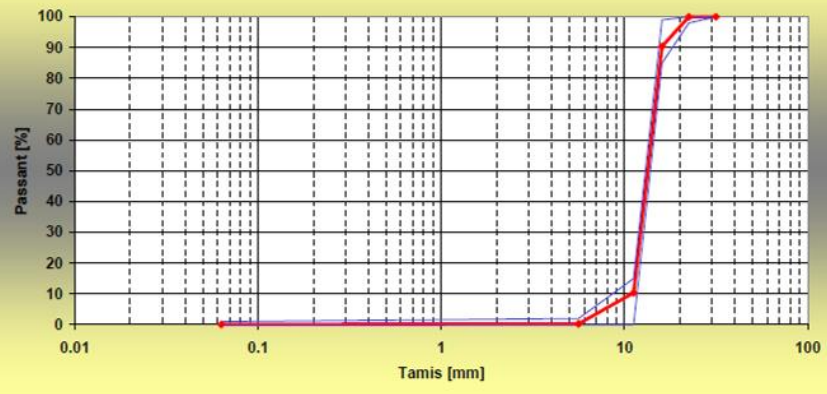
Pétrographie

Polluants org.	<0.1	[m _{pc}]	13.05.07	Durabilité	Conforme	[-]	13.05.07
Dur	61.9	[%]	13.05.07	Tendre	1.3	[%]	13.05.07
Mi-dur	36.8	[%]	13.05.07	Très tendre	0	[%]	13.05.07

Analyse granulométrique

Tamis	0.063	5.6	11.2	16	22.4	31.5
Passant	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Moyenne	0.1	0.3	10	90	100	100
Fuseau supérieur norme	1	2	15	99	100	100
Fuseau inférieur norme	0	0	0	85	98	100

Courbe granulométrique moyenne



Lieu: 1564 Domdidier

Date: 10.09.2009

Norme: EN 13043 / SN 670 103

Signature: _____
B. Schmid Directeur

II.2 Filler



• Bureau
 Rte des Ilettes 6
 Case postale 43
 1869 Massongex
 T 024 472 20 88
 F 024 472 23 27
 info@famsa.ch
 www.famsa.ch
 TVA N° 211099

DÉCLARATION DE CONFORMITÉ GRANULATS POUR MÉLANGES HYDROCARBONÉS

Selon : EN 13043 : 2000 / AC : 2004 - SN 670 103 b

Filler

Usage prévu : mélanges hydrocarbonés et enduits superficiels pour la construction des chaussées, aérodrômes et autres zones de circulation.

Production contrôlée par Consultest AG - 8472 Ohringen - STS 091

Responsable de production : Luis Ricardo - FAMSA SA - 1869 Massongex

Données générales

- Article n°	FIL
- Nom du produit	Filler
- N° de certificat	FIL

Données géométriques

- Granularité. Passant à 0.125	93 [%]
- Granularité. Passant à 0.063	77 [%]

Données physiques et chimiques

- Porosité du filler sec compacté (Rigden)	V ₂₈₄₅
- Delta température bille-anneau	ΔTBA _{6/25}
- Solubilité dans l'eau	WS ₁₀
- Sensibilité à l'eau. (augmentation volume EN 1744-4)	< 3 [%vol.]
- Teneur en carbonates des granulats calcaires	CC _{NR}
- Teneur en chaux éteinte du filler additivé	K _{NR}
- Masse volumique absolue	2.71 [Mg/m ³]
- Pétrographie, teneurs en éléments impropres. (total)	≤ 5 [% masse]
- Pétrographie, fines nocives, teneurs en éléments argileux	≤ 2 [% masse]

APD = Aucune Performance Déterminée
NR = Non requis

Sur la base de l'examen initial et des contrôles systématiques définis dans le manuel qualité, le producteur déclare que le matériau FIL respecte entièrement les exigences issues des normes y relatives.

Massongex, le 31 août 2009

Lieu et date

FAMSA
Rte des Ilettes 6
Case postale 43
1869 MASSONGEX

Timbre et signature

Luis Ricardo



II.3 Bitumes

II.3.1 Bitumes pour AC T

AZALT[®] 50/70 BITUME ROUTIER A CHAUD



CARACTERISTIQUES		METHODE	SPECIFICATIONS
Pénétrabilité à 25°C	1/10 mm	EN 1426	50 - 70
Point de ramollissement Bille et Anneau	°C	EN 1427	46 - 54
Point d'éclair (Cleveland)	°C	EN ISO 2592	≥ 230
Solubilité à 25°C	%	EN 12592	≥ 99,0
Teneur en paraffines	%	EN 12606-2	≤ 4,5
Après vieillissement RTFOT		EN 12607-1	
Variation de masse	%		≤ 0,5
Pénétrabilité restante	%	EN 1426	≥ 50
Point de ramollissement Bille et Anneau	°C	EN 1427	≥ 48
Augmentation du point de ramollissement	°C	EN 1427	≤ 9

Le bitume AZALT[®] 50/70 satisfait la norme NF EN 12591 « Spécifications des bitumes routiers » (Décembre 1999).

Production et chargement au départ des raffineries suivantes :

Normandie (76), Provence (13), Grandpuits (77), Feyzin (69), Donges (44), Reichstett (67), SRD (59), Anvers (Belgique), Tarragone (Espagne).

Révision : 2003/11

Les informations techniques figurant sur cette fiche sont fournies à titre indicatif et ne sont pas exhaustives. Elles ne sauraient, en aucun cas, engager notre responsabilité en ce qui concerne les procédés d'utilisation du produit ou les résultats obtenus. Le choix et la mise au point de ces procédés incombent aux utilisateurs sous leur entière responsabilité. Pour plus de renseignements, contacter notre service commercial.

TOTAL France
Direction BITUMES, 51 esplanade du Général de Gaulle, La Défense 10, F-92907 PARIS LA DEFENSE (France)
Tel : +33 / (0) 1 41 35 89 46 - Fax : +33 / (0) 1 41 35 86 15

II.3.2 Bitumes pour EME

MODULOTAL[®] 15/25

BITUME ROUTIER POUR ENROBÉS A MODULE ÉLEVÉ



CARACTERISTIQUES	METHODE	SPECIFICATIONS	VALEURS TYPES	
Pénétrabilité à 25°C	1/10 mm	EN 1426	15 - 25	23
Point de ramollissement Bille et Anneau	°C	EN 1427	58 - 65	63.3
Densité relative à 25°C	-	EN ISO 3838	1,0 - 1,10	1.023
Point d'éclair (Cleveland)	°C	EN ISO 2592	≥ 250	330
Point de fragilité Fraass	°C	EN 12593	≤ 0	- 5
Solubilité	%	EN 12592	≥ 99,5	99.9
Teneur en paraffine	%	EN 12606-2	≤ 4,5	2.3
Après vieillissement RTFOT		EN 12607-1		
Pénétrabilité restante	%	EN 1426	-	14
Point de ramollissement Bille et Anneau	°C	EN1427	-	69.5

Lieu de production et de chargement : Raffinerie de Normandie (76) - France.

TOTAL France
 Direction BITUMES, 51 esplanade du Général de Gaulle, La Défense 10, F-92907 PARIS LA DEFENSE (France)
 Tel : +33 / (0) 1 41 35 89 46 - Fax : +33 / (0) 1 41 35 86 15

II.3.3 Bitume pour AC MR

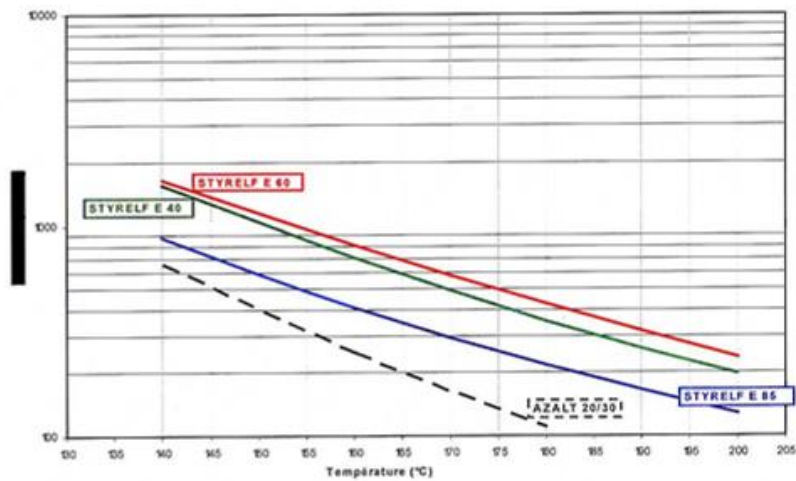
STYRELF® E

DENSITÉS CALCULÉES ET TEMPÉRATURES D'UTILISATION CONSEILLÉES

CARACTERISTIQUES	STYRELF E20	STYRELF E40	STYRELF E60	STYRELF E85
Densité relative à 25 °C ⁽²⁾	1.034	1.025	1.032	1.020
Densité relative à la Température d'enrobage ⁽³⁾	0.944	0.936	0.947	0.940
Température d'enrobage (°C)	185 – 195	185 – 195	175 – 185	165 - 175
Température de Stockage prolongé (>7jours en °C)	130 – 150	130 – 150	130 – 150	130 – 150
Température de compactage (°C)	170 – 190	165 - 185	155 - 175	145 - 165

(2) valeurs typiques
(3) valeurs calculées

VISCOSITE DES STYRELF E EN FONCTION DE LA TEMPERATURE



Tous les STYRELF® E contiennent un dope d'adhésivité.

Les fiches de données de sécurité sont disponibles sur Internet : <http://www.quickfds.com>
 Découvrez tous nos bitumes sur notre site Internet : <http://www.bitume.total.fr>

Révision : 2007/02

Les informations techniques figurant sur cette fiche sont fournies à titre indicatif et ne sont pas exhaustives. Elles ne sauraient, en aucun cas, engager notre responsabilité en ce qui concerne les procédés d'utilisation du produit ou les résultats obtenus. Le choix et la mise au point de ces procédés incombent aux utilisateurs sous leur entière responsabilité. Pour plus de renseignements, contacter notre service commercial.

TOTAL France
 Direction BITUMES, 51 esplanade du Général de Gaulle, La Défense 10, F-92907 PARIS LA DEFENSE (France)
 Tel : +33 / (0) 1 41 35 89 46 - Fax : +33 / (0) 1 41 35 86 15

STYRELF® E

BITUME POLYMÈRE


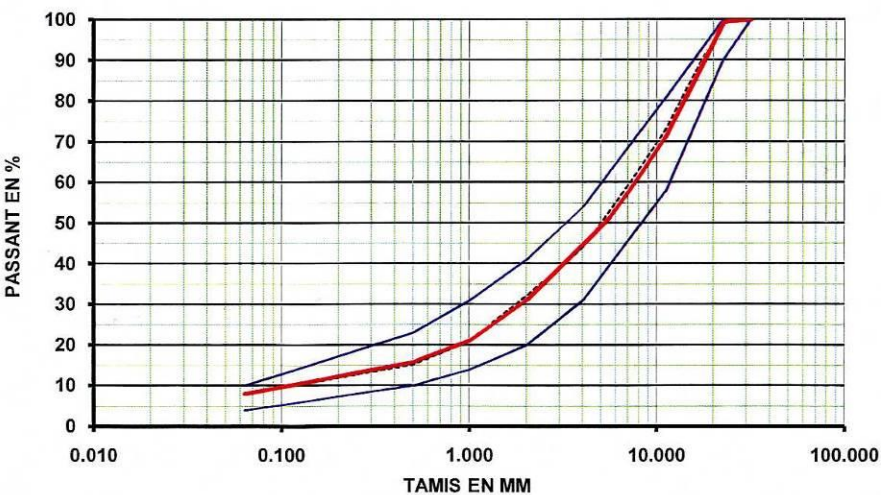



CARACTERISTIQUES	METHODE	STYRELF® E40	STYRELF® E60	STYRELF® E85
Appellation selon norme 670 210a-NA - EN 14023: 2005		PMB 25/55-65	PMB 45/80-65	PMB 65/105-60
TBA (°C)	EN 1427	≥ 65 (classe 5)	≥ 65 (classe 5)	≥ 60 (classe 6)
Pénétrabilité (1/10mm) à 25°C	EN 1426	25-55 (classe 3)	45-80 (classe 4)	65-105 (classe 6)
Point éclair Cleveland (°C)	EN ISO 2592	≥ 250 (classe 2)	≥ 235 (classe 3)	≥ 235 (classe 3)
Point de fragilité Fraass (°C)	EN 12593	≤ -10 (classe 5)	≤ -15 (classe 7)	≤ -18 (classe 8)
Intervalle de plasticité	EN 14023	≥ 80 (classe 3)	≥ 80 (classe 3)	≥ 80 (classe 3)
Force Ductilité - (J/cm²)	EN 13589	≥ 2 at 10°C (classe 6)	≥ 3 at 5°C (classe 2)	≥ 3 at 5°C (classe 2)
Retour élastique à 25°C (%)	EN 13398	≥ 80 (classe 2)	≥ 80 (classe 2)	≥ 80 (classe 2)
Test après RTFOT	EN 12607-1			
Variation de masse (%)		≤ 0,5 (classe 3)	≤ 0,5 (classe 3)	≤ 0,8 (classe 4)
Augmentation TBA (°C)	EN 1427	≤ 8 (classe 2)	≤ 8 (classe 2)	≤ 8 (classe 2)
Diminution TBA (°C)	EN 1427	≤ 5 (classe 3)	≤ 5 (classe 3)	≤ 5 (classe 3)
Pénétrabilité résiduelle (%)	EN 1426	≥ 60 (classe 7)	≥ 60 (classe 7)	≥ 60 (classe 7)
Retour élastique à 25°C	EN 13398	≥ 60 (classe 3)	≥ 60 (classe 3)	≥ 60 (classe 3)
Stabilité 3 j 180°C	EN 13399			
TBA haut - TBA bas (°C)	EN 1427	≤ 5 (classe 2)	≤ 5 (classe 2)	≤ 5 (classe 2)

TOTAL (SUISSE) SA
 Département BITUMES, chez des Coquelicots 16, CH-1214 VERNIER
 Tel : +(41) 22 306 66 37 - Fax : +(41) 22 306 66 99


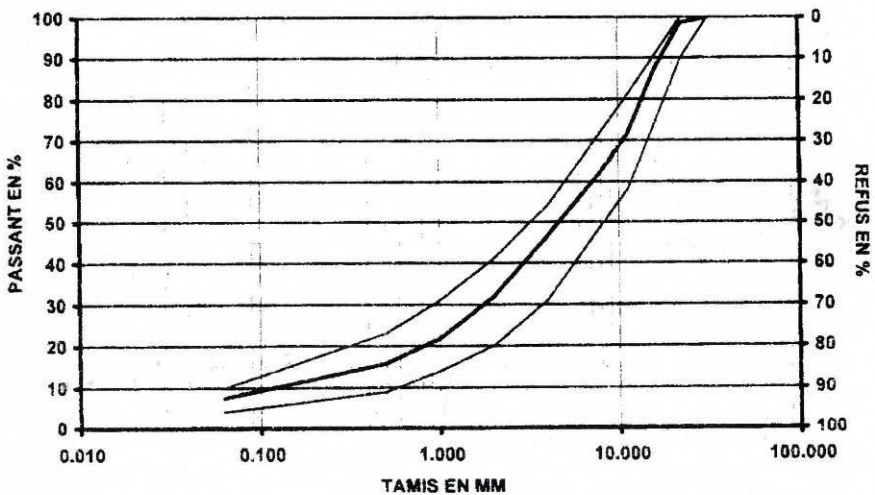
III Epreuve type de formulation ou recette des enrobé posé

III.1 AC EME C1

 Laboroute sa Accrédité EN ISO/IEC 17025:2005 1564 Domicidier Tél. 026/675.16.72 Fax 026/675.32.09 Internet www.laboroute.ch N°L 079/206.47.75 E-mail info@laboroute.ch		EPREUVE TYPE DE FORMULATION										
TYPE : AC EME22-C1 CLIENT : JPF Gravières SA 1630 Bulle		PROVENANCE DES AGREGATS : 100% Grandvillard; Filler de Récupération CENTRALE D'ENROBAGE : Grandvillard BITUME : Modulotal 15-25 IDENTIFICATION DE L'ESSAI DE QUALIFICATION : B-08 / 1127										
	Valeurs caractéristique de l'épreuve type	Valeurs nominale de la recette	Exigences Norme SN 640 431-1aNA									
Liant dosé %	4.70 %	4.70 %										
Liant soluble %	4.98 %	4.70 %	≥ 4.60 %									
Type de liant utilisé pour l'épreuve-type	Modulotal 15-25											
Stabilité Marshall S_{st}	≥ 16.9 kN	≥ kN	≥ non requis kN									
Fluage Marshall F_{mm}	≤ 3.2 mm	≤ mm	non requis mm									
Masse volumique app. (ρ_{app})	2.421 kg/m ³	2.409 kg/m ³										
Masse volumique réelle (ρ_{real})	2.498 kg/m ³	2.509 kg/m ³										
Teneur en vides (V_m)	3.1 VOL-%	4.0 VOL-%	3.0-6.0 VOL-%									
Teneur en vides du squelette granulaire comblé par le liant (VFB)	79.0 %	≤ %	≤ %									
Traction par fendage ITSR	98.2 %	≥ 70 %	≥ 70 %									
Profondeur d'ornièrre %	2.3 %	≤ 5.0 %	≤ 5 %									
Module de richesse (M_R)	≥ 3.1	≥ 2.7	≥ 2.7									
Validation des propriétés de l'enrobé à la production												
Tolérance pour l'évaluation de la conformité de la production d'enrobé bitumineux SN 640 431-21NA Teneur en liant soluble : $\varnothing \leq 11 \text{ mm} \pm 0.50\%$ $\varnothing \geq 16 \text{ mm} \pm 0.60\%$												
COMPOSITION GRANULOMETRIQUE :												
Tamis d'analyse \square mm	0.063	0.5	1.0	2.0	4.0	5.6	8	11.2	16	22.4	31.5	45.0
Passant de l'épreuve type en % de la masse	7.9	15.7	21.1	31.0	44.7	51.6	61.3	71.5	86	99.3	100	100
Passant des valeurs nominales en % de la masse	8.0	15	21	32	44	53	63	73	87	99	100	100
Ecart adm. par rapport à la valeur nominale en %	± 3		± 5	± 7					± 9	- 9 / + 5		
												
Valable dès le : 14.11.2008						Signature: 		Modifications		Date: _____		
								Date: _____		Signature: _____		

LR_BS/02.02.01/Attestation/ER E153/1.Epreuve type de formulation ACEME22-C1_Modulotal 15-25

III.2 ACT 22 S

 Laboroute sa 1564 DOMDIDIER Tel. 026/676 16 72 Internet: www.laboroute.ch Nat. 076/206 47 73 E-mail: info@laboroute.ch Fax. 026/676 92 09		ATTESTATION D'APTITUDE POUR LES BETONS BITUMINEUX										
TYPE: ACT 22 S Recycling PROVENANCE DES AGREGATS: Grandvillard +15% de recycling		CLIENT: JPF Gravières SA CENTRALE D'ENROBAGE: Grandvillard 1630 Bulle BITUME: 70/100S + Bitume du recycling										
Agrégat	En %	En poids kg	Corrections			Valeurs formule	Valeurs Norme					
0/4 #	30.0	290	0/2	2/4	Liant dosé %	3.50 %						
4/8 #	14.0	135	217	72	Liant soluble %	4.10 %	≥ 4.00 %					
8/11 #	8.0	77			Stabilité Marshall S _M	≥ 7.5 kN	≥ kN					
11/16 #	14.0	135			Fluage Marshall F _{max}	≤ 2.7 mm	mm					
16/22 #	14.0	135	772.0	Total minéral	Masse volumique app. (D _{app})	2.403 kg/m ³						
Recyclant #	15.0	144.8			Masse volumique réelle (D _{réelle})	2.532 kg/m ³						
					Teneur en vides (V _v)	5.1 vol.-%	4.0-7.0 vol.-%					
Filler	5.0	48			Teneur en vides du squelette granulaire comblé par le liant (VFB)	≤ %	≤ %					
Total Agrégats	100.0				Traction par fendage ITSR	≥ 70 %	≥ 70 %					
Bitume	3.50	35.0			Profondeur d'ornièrre	≤ 10 %	≤ 10 %					
Total mélange :		1000	Total:		Tolérance pour l'évaluation de la conformité de la production d'enrobé bitumineux SN 640 431-21NA Teneur en liant soluble : ∅ ≤ 11 mm ± 0.50% ∅ ≥ 16 mm ± 0.60%							
			Date:	Signature:								
COMPOSITION GRANULOMETRIQUE :												
Tamis d'analyse □ mm	0.063	0.5	1.0	2.0	4.0	5.6	8	11.2	16	22.4	31.5	45.0
Passant en % de la masse	7.5	15.9	21.8	31.9	46.7	54.3	62.5	71.6	87.4	98.7	100	100
												
Valable dès le : 09.03.2007										Signature: _____		Modification: Nouvelle recette

LR_BS:02.02.01/Attestation/ER E153/ACT 22S Recycling .1

III.3 AC MR 8 avec 8% de vides cible

Laboroute sa Accrédité EN ISO/IEC 17025:2005 1564 DOMDIDIER Tel: 026 675 16 72 Fax: 026 675 92 09 Internet: www.laboroute.ch E-mail: info@laboroute.ch		EPREUVE TYPE DE FORMULATION													
TYPE : AC MR 8		PROVENANCE DES AGREGATS : Grandvillard; filler FAMSA													
CLIENT : JPF Gravières SA 1630 Bulle		CENTRALE D'ENROBAGE : Grandvillard		BITUME : PmB 45/80-65 (CH-E) Styrelf E60											
		IDENTIFICATION DE L'ESSAI DE QUALIFICATION : E-08 / 089													
		Valeurs caractéristique de l'épreuve type	Valeurs nominale de la recette	Valeurs Norme SN 640 431 1aNA et directives ASTRA											
Liant dosé	%	-- , -- %	5.80 %												
Liant soluble	%	5.91 %	5.80 %	≥ 5.70 %											
Type de liant utilisé pour l'épreuve-type		PmB 45/80-65 (CH-E); Styrelf E60													
Stabilité Marshall	S_{25}	≥ kN	≥ kN	≥ kN											
Fluage Marshall	F_{25}	≤ mm	≤ mm	≤ mm											
Masse volumique app.	(ρ_{app})	2.270 to/m^3	2.283 to/m^3												
Masse volumique réelle	(ρ_{rel})	2.464 to/m^3	2.468 to/m^3												
Teneur en vides	(V_m)	7.9 VOL-%	7.5 VOL-%	6.0-9.0 VOL-%											
Teneur en vides du squelette granulaire corrigé par le liant	(VFB)	%	≤ %	≤ %											
Traction par fendage	ITSR	98.5 %	≥ 70 %	≥ 70 %											
Profondeur d'ornièrè	%	3.9 %	≤ 7.5 %	≤ 7.5 %											
Validation des propriétés de l'enrobé		mélange en laboratoire													
Tolérance pour l'évaluation de la conformité de la production d'enrobé bitumineux SN 640 431-21NA															
Teneur en liant soluble : \varnothing ≤ 11 mm ± 0.50%															
\varnothing ≥ 16 mm ± 0.60%															
COMPOSITION GRANULOMETRIQUE :															
Tamis d'analyse	□ mm	0.063	0.5	1.0	2.0	4.0	5.6	8	11.2	16	22.4	31.5	45.0		
Passant de l'épreuve type en % de la masse		8.3	15.6	18.6	24.7	40.0	65.6	96.6	100	100	100	100	100		
Passant des valeurs nominales en % de la masse		8.5	13	17	24	40	67	95	100	100	100	100	100		
Ecart adm. par rapport à la valeur nominale en %		± 2		± 4	± 6	± 7		- 8 / + 5							
Valable dès le : 08.05.2008		Signature:		Modifications				Date:				Signature:			

III.4 AC MR 8 avec 13% de vides cible

Laboroute sa		RECETTE											
		POUR BETONS BITUMINEUX											
TYPE : AC MR 8 ^{13%}		PROVENANCE DES AGREGATS : Grandvillard											
CLIENT : JPF Gravières SA 1630 Bulle		CENTRALE D'ENROBAGE : Grandvillard BITUME : PmB 45/80-65(CH-E)											
Agréгат	En %	En poids kg	Corrections 0/2 2/4		Valeurs formule	Valeurs Norme SN 640 431-1aNA							
0/4 #	22.0	208	146 63	Liant dosé	% 5.30 %								
4/8 #	74.0	701		Liant soluble	% 5.50 %	≥ 5.8 %							
#				Stabilité Marshall	S ₂₅ ≥ kN	≥ kN							
#				Fluage Marshall	F _{max} ≤ mm	mm							
Fibres Viatop	0.2	2		Masse volumique app. (D _{app})	2.157 kg/m ³								
				Masse volumique réelle (D _r)	2.479 kg/m ³								
Filler	4.0	38		Teneur en vides (V _m)	13.0 vol.-%	6.0-9.0 vol.-%							
Total Agcharge	100.2			Teneur en vides de squelette granulaire contrôlé par le liant (VFB)	≤ %	≤ %							
Bitume	5.30	53		Traction par fendage	ITSR ≥ 70 %	≥ 70 %							
				Profondeur d'ornièrè	≤ 7.5 %	≤ 7.5 %							
Total mélange : 1000				Tolérance pour l'évaluation de la conformité de la production d'enrobé bitumineux SN 640 431-21NA Teneur en liant soluble : ∅ ≤ 11 mm ± 0.50% ∅ ≥ 16 mm ± 0.60%									
Date:			Signature:										
COMPOSITION GRANULOMETRIQUE :													
Tamis d'analyse	mm	0.063	0.5	1.0	2.0	4.0	5.6	8	11.2	16	22.4	31.5	45.0
Passant en % de la masse		5.1	10	13	18	28	59	95	100	100	100	100	100

TAMIS EN MM

REFUS EN %

Valable dès le : 27.04.2010	Signature:	Modification : Augmentation de la teneur en liant de 0.2%
-----------------------------	------------	-----------------------------------------------------------

IV Fiches technique de la halle fosse

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

LAVOC - Laboratoire des voies de circulation

LAVOC-EPFL Tél. ++ 41 21 693 23 45 / Fax ++ 41 21 693 63 49
CH-1015 Lausanne http://dgcwww.epfl.ch/lavoc



HALLE FOSSE

L'ornièreur lourd installé sur une fosse, permet de tester des structures de chaussée.

Constitué d'un essieu de camion à roues jumelées, il permet de reproduire aussi fidèlement que possible les charges dynamiques imposées par le trafic lourd.

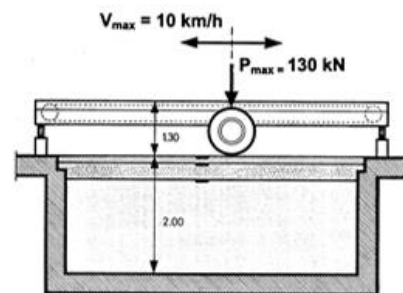
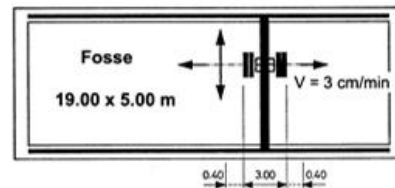
L'essieu est monté sur un rail de guidage rectiligne. Son mouvement est donc de type alternatif sinusoïdal.

La fosse, dans laquelle sont créées les structures de chaussée à tester, possède les équipements nécessaires pour faire varier :

- le niveau de la nappe phréatique
- la température entre $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$

La halle entourant la fosse permet de contrôler les conditions climatiques de surface. Des rampes infrarouges permettent de tester les structures aux températures estivales. Les caractéristiques principales de l'ornièreur sont les suivantes :

- fréquence jusqu'à 2000 passages/heure
- charge de l'essieu : max. 130 kN
- vitesse de déplacement max: 2,7 m/s



- longueur totale de roulement : 4 m
- déplacement transversal max. : $\pm 40\text{ cm}$
- longueur de roulement à vitesse const. : 2 m



2^{ème} édition

V Procès-verbaux des résultats d'essai du Contrôle de la fourniture

V.1 AC MR 8 avec 8% de vides cible

V.1.1 Identification de la formule posée et stabilité et fluage Marshall

Laboratoire des Voies de Circulation

EPFL - LAVOC
Station 18
1015 Lausanne
Tél: 021/693.23.45
Fax: 021/693.63.49

PROCES-VERBAL



Examen de qualification d'un enrobé

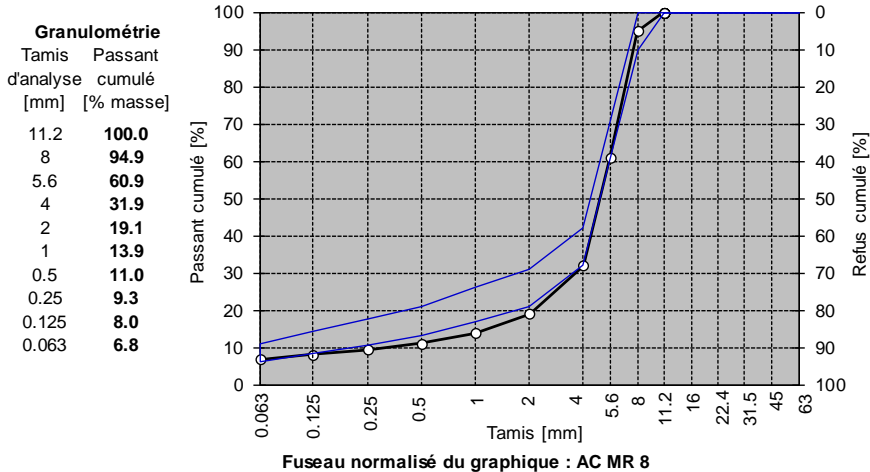
Informations générales

Mandant : **VSS 2009/502** Code LAVOC : **OFENRSUR100ANM_EN**
N° d'échantillon LAVOC : **OFENRSUR100** N° d'échantillon client : -
Description du produit : **MR 8 au liant PMB (vides 8%)**
Objet : **Formulation et comportement des enrobés de surface macro-rugueux**
Prélèvement réalisé par : **Lavoc**
Lieu de prélèvement : -
Mode d'échantillonnage : **par quartage**
Date de prélèvement : **29.04.2010** Réalisé par : **LAVOC**
Date de l'essai : **10.07.2014** Opérateur : **JC.REYMOND**

Résultats

Modes opératoires : SN EN 12697-1-5-6-8-30-34 et B-01, B-02, B-03, B-04, B-07, B-08, G-03 LAVOC

Température de compactage	155 °C	Rapport filler/bitume :	1.2
Teneur en liant sur enrobé :	5.48 %	Module de richesse :	3.6
Teneur en liant sur granulats :	5.80 %	MVR du granulat (calculée) :	2.695 Mg/m³
MVR du liant (estimée) :	1.03 Mg/cm³	MVR de l'enrobé (estimée) :	2.476 Mg/m³



Caractéristiques Marshall



Masse volumique apparente *	2.048 Mg/m³	Stabilité S *	5.9 kN
Teneur en vides Vm*	17.3 %	Fluage F *	2.2 mm
Teneur en vides comblés VFB *	38.6 %	Fluage Ft *	1.1 mm
Teneur en vides squelette VMA *	28.2 %	Quotient Marshall S/F *	2.7 kN/mm

* moyenne de 4 éprouvettes

Nombre de coups de dame : **50 / 50**

Date : Le responsable des essais:

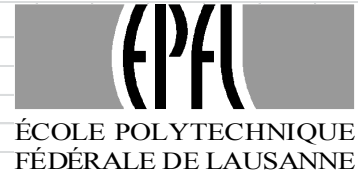
V.1.2 Teneur en vides Marshall 50/50

Laboratoire des Voies de Circulation		PROCES-VERBAL		 ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE
EPFL - LAVOC		 STS 080		
Bât. GCB 1015 Lausanne Tél: 021/693.23.45 Fax: 021/693.63.49				
Essai Marshall				
Informations générales				
Mandant :	LAVOC-EPFL	Code LAVOC :	OFENRSUR004AMAR_EN	
N° d'échantillon LAVOC :	OFENRSUR004A	N° d'échantillon client :	0	
Description du produit :	AC MR 8 - (Avec 8% de vides)			
Objet :	Contrôle des vides contenus dans l'enrobé : (Masse volumique géométrique)			
Prélèvement réalisé par :	Lavoc			
Lieu de prélèvement :	Halle Fosse			
Mode d'échantillonnage :	par quartage			
Date de prélèvement :	29.04.2010	Réalisé par :	-	
Date de l'essai :	29.04.2010	Opérateur :	Jean-W. Fils-Aimé / Q.S	
Résultats				
Modes opératoires : SN EN 12697-6-8-30-34 et B-01, B-03, B-07, B-08 LAVOC				
Caractéristiques générale de l'enrobé				
Température de compactage	130 °C			
Teneur en liant sur enrobé :	5.55 %			
Teneur en liant sur granulats :	5.88 %			
MVR du liant (estimée) :	1.03 Mg/m ³			
MVR du granulat (calculée) :	2.699 Mg/m ³			
MVR de l'enrobé (mesurée) :	2.476 Mg/m ³			
Nombre de coups de dame :	50 / 50			
Caractéristiques Marshall				
Masse volumique apparente *	1.870 Mg/m ³			
Teneur en vides Vm *	24.5 %			
Teneur en vides comblés VFB *	29.7 %			
Teneur en vides du squelette minéral VMA *	34.5 %			
Stabilité SM *	0.0 kN			
Fluage F *	0.0 mm			
Fluage Ft *	0.0 mm			
Quotient Marshall S/F *	#### kN/mm			
* Moyenne de 4 éprouvettes				
Date :	Vous avez oublié la BD		Le responsable des essais : Tapez 'CTRL b'	

Laboratoire des Voies de Circulation

EPFL - LAVOC
Bât. GCB
1015 Lausanne
Tél: 021/693.23.45
Fax: 021/693.63.49

PROCES-VERBAL



Détermination de la sensibilité à l'eau de mélanges hydrocarbonés à chaud

Informations générales

Mandant : **LAVOC-EPFL** Code LAVOC : **OFENRSUR004DSE-EN**
 N° d'échantillon LAVOC : **OFENRSUR004** N° d'échantillon client : -
 Description du produit : **AC MR 8 - (Avec 8% de vides)**
 Objet : **Contrôle des vides contenus dans l'enrobé**
 Lieu de prélèvement : **Halle Fosse**
 Date de prélèvement : **29.04.2010** - Réalisé par : -
 Date de l'essai : **29.04.2010** Opérateur : **Jean-W. Fils-Aimé / Q.S**

Résultats

Mode opératoire: EN 12697-12 et EN 12697-23

Caractéristiques générale de l'enrobé

Teneur en liant sur enrobé : **5.38 %** MVR du granulat (mesurée) : **2.700 g/cm³**
 Teneur en liant sur granulats : **5.69 %** MVR de l'enrobé (calculée) : **2.483 g/cm³**
 erreur **1.030 g/cm³**

Caractéristiques des éprouvettes

Mode de fabrication : **Marshall** MVA géométrique ** : **2.077 g/cm³**
 Energie de compactage : **2x 50 coups** Teneur en vides (géométriques) ** : **16.4 %**
 Diamètre ** : **101.5 mm** MVA hydrostatique ** : **2.206 g/cm³**
 Hauteur ** : **64.8 mm** Teneur en vides (hydrostatiques) ** : **11.2 %**

Caractéristiques de l'essai de détermination de la sensibilité à l'eau

Mode de conservation	Air 70 h. à 23°C		Eau 70 h. à 40°C	
	Température de l'essai de traction indirecte [°C]	0		
ITS_w^* [kPa]	-		#DIV/0!	
ITS_d^* [kPa]	0		-	
Ratio $ITSR$ [%]	#DIV/0!			

* Moyenne de 3 éprouvettes

** Moyenne de 6 éprouvettes

Date :

Le responsable des essais :

Laboratoire des Voies de Circulation

EPFL - LAVOC
Bât. GCB
1015 Lausanne
Tél: 021/693.23.45
Fax: 021/693.63.49

PROCÈS-VERBAL

**Essai Marshall****Informations générales**

Mandant : **LAVOC-EPFL** Code LAVOC : **OFENRSUR004MAR_EN**
 N° d'échantillon LAVOC : **OFENRSUR004** N° d'échantillon client : **0**
 Description du produit : **AC MR 8 - (Avec 8% de vides)**
 Objet : **Contrôle des vides contenus dans l'enrobé : (MVA par pesée hydrostatique)**
 Prélèvement réalisé par : **Lavoc**
 Lieu de prélèvement : **Halle Fosse**
 Mode d'échantillonnage : **par quartage**
 Date de prélèvement : **29.04.2010** Réalisé par : **####**
 Date de l'essai : **29.04.2010** Opérateur : **Jean-W. Fils-Aimé / Q.S**

Résultats

Modes opératoires : SN EN 12697-6-8-30-34 et B-01, B-03, B-07, B-08 LAVOC

Caractéristiques générale de l'enrobé

Température de compactage : **130 °C**
 Teneur en liant sur enrobé : **5.55 %**
 Teneur en liant sur granulats : **5.88 %**
 MVR du liant (estimée) : **1.03 Mg/m³**
 MVR du granulat (calculée) : **2.699 Mg/m³**
 MVR de l'enrobé (mesurée) : **2.476 Mg/m³**
 Nombre de coups de dame : **50 / 50**

Caractéristiques Marshall

Masse volumique apparente *	2.206 Mg/m³
Teneur en vides Vm *	10.9 %
Teneur en vides comblés VFB *	52.2 %
Teneur en vides du squelette minéral VMA *	22.8 %
Stabilité SM *	0.0 kN
Fluage F *	0.0 mm
Fluage Ft *	0.0 mm
Quotient Marshall S/F *	#### kN/mm

* Moyenne de 4 éprouvettes

Date : **Vous avez oublié la BD**

Le responsable des essais : **Tapez 'CTRL b'**

V.1.3 Essai sur liant récupéré

Laboratoire des Voies de Circulation

EPFL - LAVOC
Station 18
1015 Lausanne
Tél: 021/693.23.45
Fax: 021/693.63.49

PROCES-VERBAL



Détermination de l'indice de pénétrabilité (IP)

Informations générales

Mandant : **VSS 2009/502** Code LAVOC : **OFENRSUR100IPE**
 N° d'échantillon LAVOC : **OFENRSUR100** N° d'échantillon client : -
 Description du produit : **MR 8 au liant PMB (vides 8%) - Essai sur enrobé réchauffé - Liant récupéré**
 Objet : **Formulation et comportement des enrobés de surface macro-rugueux**
 Prélèvement réalisé par : **Lavoc**
 Lieu de prélèvement : -
 Mode d'échantillonnage : -
 Date de prélèvement : - Réalisé par : **LAVOC**
 Date de l'essai : **14.08.2014** Opérateur : **JC-REYMOND**

Résultats

Mode opératoire : SN EN 1426, SN EN 1427, SN EN 12591 et L-06, L-07, L-08 du LAVOC

Pénétration à 25°C *	26 10 ⁻¹ mm
Température Anneau et Bille **	70.1 °C

Indice de pénétration	1.3
-----------------------	-----

* moyenne de 3 mesures
 ** moyenne de 2 mesures

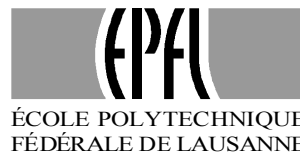
V.2 AC MR 8 avec 13% de vides cible

V.2.1 Identification de la formule posée et stabilité et fluage Marshall

Laboratoire des Voies de Circulation

EPFL - LAVOC
Station 18
1015 Lausanne
Tél: 021/693.23.45
Fax: 021/693.63.49

PROCES-VERBAL



Examen de qualification d'un enrobé

Informations générales

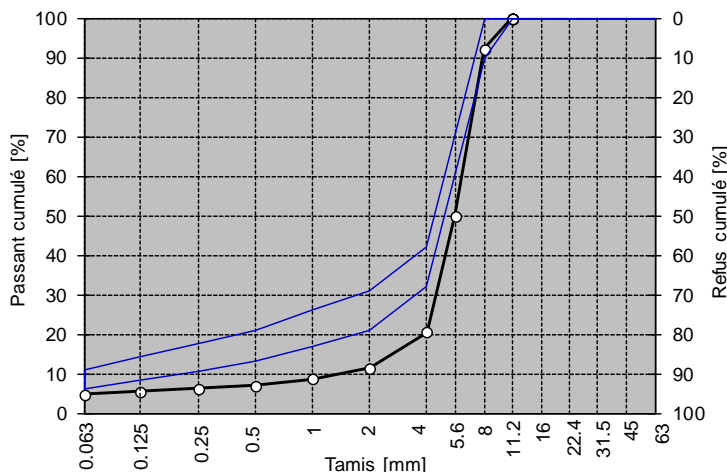
Mandant : **VSS 2009/502** Code LAVOC : **OFENRSUR101ANM_EN**
 N° d'échantillon LAVOC : **OFENRSUR101** N° d'échantillon client : -
 Description du produit : **MR 8 au liant PMB (vides 13%) - Essai sur enrobé réchauffé**
 Objet : **Formulation et comportement des enrobés de surface macro-rugueux**
 Prélèvement réalisé par : **Lavoc**
 Lieu de prélèvement : **Halle-Fosse**
 Mode d'échantillonnage : -
 Date de prélèvement : **29.04.2010** Réalisé par : **LAVOC**
 Date de l'essai : **14.07.2014** Opérateur : **JC.REYMOND**

Résultats

Modes opératoires : SN EN 12697-1-5-6-8-30-34 et B-01, B-02, B-03, B-04, B-07, B-08, G-03 LAVOC

Température de compactage	155 °C	Rapport filler/bitume :	0.9
Teneur en liant sur enrobé :	5.10 %	Module de richesse :	3.5
Teneur en liant sur granulats :	5.38 %	MVR du granulat (estimée) :	2.695 Mg/m³
MVR du liant (estimée) :	1.03 Mg/cm³	MVR de l'enrobé (calculée) :	2.490 Mg/m³

Tamis d'analyse [mm]	Passant cumulé [% masse]
11.2	100.0
8	92.2
5.6	49.9
4	20.5
2	11.4
1	8.6
0.5	7.0
0.25	6.1
0.125	5.5
0.063	4.7



Fuseau normalisé du graphique : AC MR 8

Caractéristiques Marshall

Masse volumique apparente * :	2.017 Mg/m³	Stabilité S * :	6.1 kN
Teneur en vides Vm* :	19.0 %	Fluage F * :	2.4 mm
Teneur en vides comblés VFB * :	34.5 %	Fluage Ft * :	1.2 mm
Teneur en vides squelette VMA * :	29.0 %	Quotient Marshall S/F * :	2.6 kN/mm


* moyenne de 4 éprouvettes

Nombre de coups de dame : **50 / 50**

Date :

Le responsable des essais:

V.2.2 Teneur en vides Marshall

Laboratoire des Voies de Circulation		 ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE	
EPFL - LAVOC			
Bât. GCB	PROCES-VERBAL		
1015 Lausanne			
Tél: 021/693.23.45 Fax: 021/693.63.49			
Détermination de la sensibilité à l'eau de mélanges hydrocarbonés à chaud			
Informations générales			
Mandant :	LAVOC-EPFL	Code LAVOC :	OFENRSUR003DSE-EN
N° d'échantillon LAVOC :	OFENRSUR003	N° d'échantillon client :	-
Description du produit :	AC MR 8 avec 13%		
Objet :	Contrôle des vides contenus dans l'enrobé		
Lieu de prélèvement :	Halle Fosse		
Date de prélèvement :	28.04.2010	-	Réalisé par : -
Date de l'essai :	29.04.2010		Opérateur : Jean-W. Fils-Aimé / Q.S
Résultats			
Mode opératoire: EN 12697-12 et EN 12697-23			
Caractéristiques générale de l'enrobé			
Teneur en liant sur enrobé :	5.30 %	MVR du granulat (mesurée) :	2.700 g/cm ³
Teneur en liant sur granulats :	5.60 %	MVR de l'enrobé (calculée) :	2.486 g/cm ³
erreur	1.030 g/cm ³		
Caractéristiques des éprouvettes			
Mode de fabrication :	de laboratoire	MVA géométrique ** :	1.963 g/cm ³
Energie de compactage :	0	Teneur en vides (géométriques) ** :	21.1 %
Diamètre ** :	101.6 mm	MVA hydrostatique ** :	2.189 g/cm ³
Hauteur ** :	66.2 mm	Teneur en vides (hydrostatiques) ** :	12.0 %
Caractéristiques de l'essai de détermination de la sensibilité à l'eau			
		Air	Eau
Mode de conservation		70 h. à 23°C	70 h. à 40°C
Température de l'essai de traction indirecte [°C]		0	
ITS_w * [kPa]		-	#DIV/0!
ITS_d * [kPa]		0	-
Ratio $ITSR$ [%]		#DIV/0!	
	* Moyenne de 3 éprouvettes	** Moyenne de 6 éprouvettes	

Laboratoire des Voies de Circulation

EPFL - LAVOC
 Bât. GCB
 1015 Lausanne
 Tél: 021/693.23.45
 Fax: 021/693.63.49

PROCES-VERBAL

**Essai Marshall****Informations générales**

Mandant : **LAVOC-EPFL** Code LAVOC : **OFFENSUR003MAR_EN**
 N° d'échantillon LAVOC : **OFENRSUR003** N° d'échantillon client : **0**
 Description du produit : **AC MR 8 - (avec 13% de vides)**
 Objet : **Contrôle des vides contenus dans l'enrobé : (MVA par pesée hydrostatique)**
 Prélèvement réalisé par : **Autre**
 Lieu de prélèvement : **Halle Fosse**
 Mode d'échantillonnage : **par quartage**
 Date de réception : **28.04.2010**
 Date de l'essai : **28.04.2010** Opérateur : **Jean-W. Fils-Aimé**

Résultats

Modes opératoires : SN EN 12697-6-8-30-34 et B-01, B-03, B-07, B-08 LAVOC



Caractéristiques générale de l'enrobé

Température de compactage	130 °C
Teneur en liant sur enrobé :	5.50 %
Teneur en liant sur granulats :	5.82 %
MVR du liant (estimée) :	1.03 Mg/m³
MVR du granulat (calculée) :	2.700 Mg/m³
MVR de l'enrobé (mesurée) :	2.479 Mg/m³
Nombre de coups de dame :	50 / 50

Caractéristiques Marshall

Masse volumique apparente *	2.039 Mg/m³
Teneur en vides Vm *	17.7 %
Teneur en vides comblés VFB *	38.0 %
Teneur en vides du squelette minéral VMA *	28.6 %
Stabilité SM *	0.0 kN
Fluage F *	0.0 mm
Fluage Ft *	0.0 mm
Quotient Marshall S/F *	#### kN/mm

* Moyenne de 4 éprouvettes

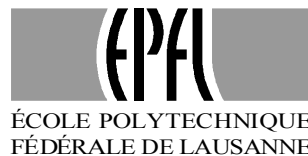
Laboratoire des Voies de Circulation				 ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE	
EPFL - LAVOC		PROCES-VERBAL			
Bât. GCB					
1015 Lausanne					
Tél: 021/693.23.45					
Fax: 021/693.63.49					
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Essai Marshall</div>					
Informations générales					
Mandant : LAVOC-EPFL		Code LAVOC : OFFENSUR003MAR_EN			
N° d'échantillon LAVOC : OFENRSUR003		N° d'échantillon client : 0			
Description du produit : AC MR 8 - (Avec 13% de vides)					
Objet : Contrôle des vides contenus dans l'enrobé : (MVA par pesée hydrostatique)					
Prélèvement réalisé par : Autre					
Lieu de prélèvement : Halle Fosse					
Mode d'échantillonnage : par quartage					
Date de réception : 28.04.2010					
Date de l'essai : 28.04.2010		Opérateur : Jean-W. Fils-Aimé			
Résultats					
Modes opératoires : SN EN 12697-6-8-30-34 et B-01, B-03, B-07, B-08 LAVOC					
Caractéristiques générale de l'enrobé					
Température de compactage		130 °C			
Teneur en liant sur enrobé :		5.50 %			
Teneur en liant sur granulats :		5.82 %			
MVR du liant (estimée) :		1.03 Mg/m³			
MVR du granulat (calculée) :		2.700 Mg/m³			
MVR de l'enrobé (mesurée) :		2.479 Mg/m³			
Nombre de coups de dame :		50 / 50			
Caractéristiques Marshall					
Masse volumique apparente *		2.189 Mg/m³			
Teneur en vides Vm *		11.7 %			
Teneur en vides comblés VFB *		50.0 %			
Teneur en vides du squelette minéral VMA *		23.4 %			
Stabilité SM *		0.0 kN			
Fluage F *		0.0 mm			
Fluage Ft *		0.0 mm			
Quotient Marshall S/F *		#### kN/mm			
* Moyenne de 4 éprouvettes					

V.2.3 Essai sur liant récupéré

Laboratoire des Voies de Circulation

EPFL - LAVOC
Station 18
1015 Lausanne
Tél: 021/693.23.45
Fax: 021/693.63.49

PROCES-VERBAL



Détermination de l'indice de pénétrabilité (IP)

Informations générales

Mandant : **VSS 2009/502** Code LAVOC : **OFENRSUR101IPE**
 N° d'échantillon LAVOC : **OFENRSUR101** N° d'échantillon client :-
 Description du produit : **MR 8 au liant PMB (vides 13%) - Essai sur enrobé réchauffé - Liant récupéré**
 Objet : **Formulation et comportement des enrobés de surface macro-rugueux**
 Prélèvement réalisé par : **Lavoc**
 Lieu de prélèvement : -
 Mode d'échantillonnage : -
 Date de prélèvement : - Réalisé par : **LAVOC**
 Date de l'essai : **15.08.2014** Opérateur : **JC-REYMOND**

Résultats

Mode opératoire : SN EN 1426, SN EN 1427, SN EN 12591et L-06, L-07, L-08 du LAVOC

Pénétration à 25°C *	25 10 ⁻¹ mm
Température Anneau et Bille **	70.4 °C

Indice de pénétration	1.3
-----------------------	-----

* moyenne de 3 mesures

** moyenne de 2 mesures

VI Procès-verbaux des résultats d'essais sur granulats et enrobés

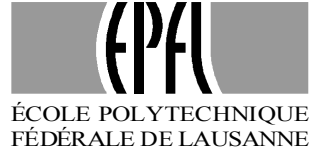
VI.1 Macrorugueux avec 8% de vides cible

VI.1.1 Sensibilité à l'eau (ITSR)

Laboratoire des Voies de Circulation

EPFL - LAVOC
Station 18
1015 Lausanne
Tél: 021/693.23.45
Fax: 021/693.63.49

PROCES-VERBAL



Détermination de la sensibilité à l'eau de mélanges hydrocarbonés à chaud

Informations générales

Mandant : **VSS 2009/502** Code LAVOC : **OFENRSUR100DSE-EN**
 N° d'échantillon LAVOC : **OFENRSUR100** N° d'échantillon client :-
 Description du produit : **MR 8 au liant PMB (vides 8%) - Essai sur enrobé réchauffé**
 Objet : **Formulation et comportement des enrobés de surface macro-rugueux**
 Lieu de prélèvement : **Halle-Fosse**
 Date de prélèvement : **29.04.2010** - Réalisé par : **LAVOC**
 Date de l'essai : **26.06.2014** Opérateur : **JC.REYMOND**

Résultats

Mode opératoire: EN 12697-12 et EN 12697-23

Caractéristiques générale de l'enrobé

Teneur en liant sur enrobé : **5.48 %** MVR du granulat (calculée) : **2.695 Mg/m³**
 Teneur en liant sur granulats : **5.80 %** MVR de l'enrobé (estimée) : **2.476 Mg/m³**
 MVR du liant (estimée) : **1.030 Mg/m³**

Caractéristiques des éprouvettes

Mode de fabrication : **Marshall** MVA géométrique (D)** : **2.004 Mg/m³**
 Energie de compactage : **2 x 25 coups** Teneur en vides (géométriques) ** : **19.0 %**
 Diamètre ** : **101.6 mm** MVA hydrostatique (B)** : **2.004 Mg/m³**
 Hauteur ** : **64.8 mm** Teneur en vides (hydrostatiques) ** : **19.0 %**

Caractéristiques de l'essai de détermination de la sensibilité à l'eau

Mode de conservation		Air	Eau
		70 h. à 23°C	70 h. à 40°C
Température de l'essai de traction indirecte	[°C]	22	
ITS _w *	[kPa]	-	886
ITS _d *	[kPa]	989	-
Ratio <i>ITSR</i>	[%]	90	


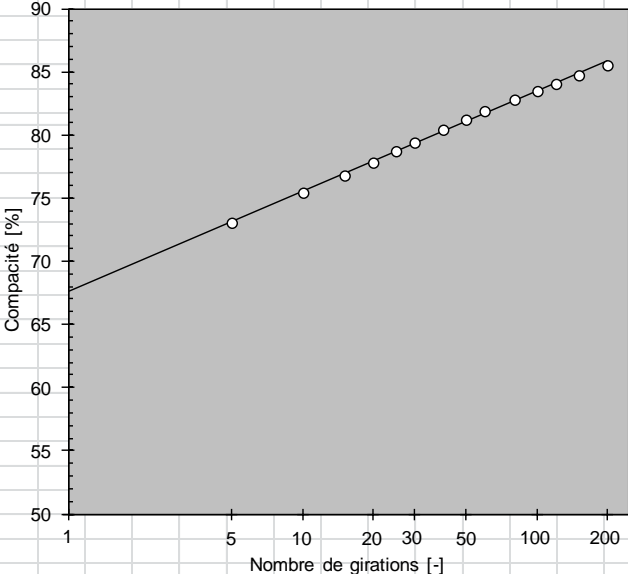
* Moyenne de 3 éprouvettes

** Moyenne de 6 éprouvettes

Date :

Le responsable des essais :

VI.1.2 Presse à cisaillement giratoire (PCG)

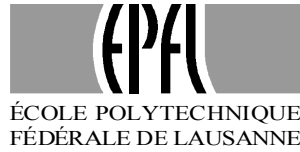
Laboratoire des Voies de Circulation		 ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE																															
EPFL - LAVOC																																	
Bât. GCB	PROCES-VERBAL																																
1015 Lausanne																																	
Tél: 021/693.23.45																																	
Fax: 021/693.63.49																																	
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> Presse à cisaillement giratoire (PCG) </div>																																	
Informations générales																																	
Mandant : VSS 2009/502	Code LAVOC : OFENRSUR 100PCG																																
N° d'échantillon LAVOC : OFENRSUR 100	N° d'échantillon client : -																																
Description du produit : AC MR 8 - 8% - Essai sur enrobé réchauffé																																	
Objet : Formulation et comportement des enrobés de surface macro-rugueux																																	
Prélèvement réalisé par :	Lavoc																																
Lieu de prélèvement :	Halle-Fosse																																
Mode d'échantillonnage :	Quarteur à couloirs																																
Date de prélèvement :	29.04.2010	Réalisé par :	JWFA																														
Date de l'essai :	01.09.2014	Opérateur :	JCR																														
Résultats																																	
Mode opératoire: NF P 98-252																																	
Teneur en liant sur enrobé :		5.48 %	(mesurée)																														
Teneur en liant sur granulats :		5.80 %	(calculée)																														
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Nbre de girations [-]</th> <th>Compacité moyenne * [% volume]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>5</td><td>73.1</td></tr> <tr><td>10</td><td>75.4</td></tr> <tr><td>15</td><td>76.8</td></tr> <tr><td>20</td><td>77.9</td></tr> <tr><td>25</td><td>78.7</td></tr> <tr><td>30</td><td>79.4</td></tr> <tr><td>40</td><td>80.4</td></tr> <tr><td>50</td><td>81.2</td></tr> <tr><td>60</td><td>81.9</td></tr> <tr><td>80</td><td>82.8</td></tr> <tr><td>100</td><td>83.5</td></tr> <tr><td>120</td><td>84.1</td></tr> <tr><td>150</td><td>84.7</td></tr> <tr><td>200</td><td>85.5</td></tr> </tbody> </table>				Nbre de girations [-]	Compacité moyenne * [% volume]	5	73.1	10	75.4	15	76.8	20	77.9	25	78.7	30	79.4	40	80.4	50	81.2	60	81.9	80	82.8	100	83.5	120	84.1	150	84.7	200	85.5
Nbre de girations [-]	Compacité moyenne * [% volume]																																
5	73.1																																
10	75.4																																
15	76.8																																
20	77.9																																
25	78.7																																
30	79.4																																
40	80.4																																
50	81.2																																
60	81.9																																
80	82.8																																
100	83.5																																
120	84.1																																
150	84.7																																
200	85.5																																
<div style="display: flex; align-items: center;"> <table border="1" style="width: 20%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Nbre de girations [-]</th> <th>Compacité moyenne * [% volume]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>5</td><td>73.1</td></tr> <tr><td>10</td><td>75.4</td></tr> <tr><td>15</td><td>76.8</td></tr> <tr><td>20</td><td>77.9</td></tr> <tr><td>25</td><td>78.7</td></tr> <tr><td>30</td><td>79.4</td></tr> <tr><td>40</td><td>80.4</td></tr> <tr><td>50</td><td>81.2</td></tr> <tr><td>60</td><td>81.9</td></tr> <tr><td>80</td><td>82.8</td></tr> <tr><td>100</td><td>83.5</td></tr> <tr><td>120</td><td>84.1</td></tr> <tr><td>150</td><td>84.7</td></tr> <tr><td>200</td><td>85.5</td></tr> </tbody> </table>  </div>				Nbre de girations [-]	Compacité moyenne * [% volume]	5	73.1	10	75.4	15	76.8	20	77.9	25	78.7	30	79.4	40	80.4	50	81.2	60	81.9	80	82.8	100	83.5	120	84.1	150	84.7	200	85.5
Nbre de girations [-]	Compacité moyenne * [% volume]																																
5	73.1																																
10	75.4																																
15	76.8																																
20	77.9																																
25	78.7																																
30	79.4																																
40	80.4																																
50	81.2																																
60	81.9																																
80	82.8																																
100	83.5																																
120	84.1																																
150	84.7																																
200	85.5																																
* moyenne sur 2 éprouvettes																																	
Compacité à 1 giration :		67.6 %																															
Compacité à 200 girations :		85.5 %																															
Pente de la droite de régression :		3.44																															
Date :		Le responsable des essais :																															

VI.1.3 Simulateur de trafic léger (orniérage)

Laboratoire des Voies de Circulation

EPFL - LAVOC
Station 18
1015 Lausanne
Tél: 021/693.23.45
Fax: 021/693.63.49

PROCES-VERBAL



Essai au simulateur de trafic LCPC

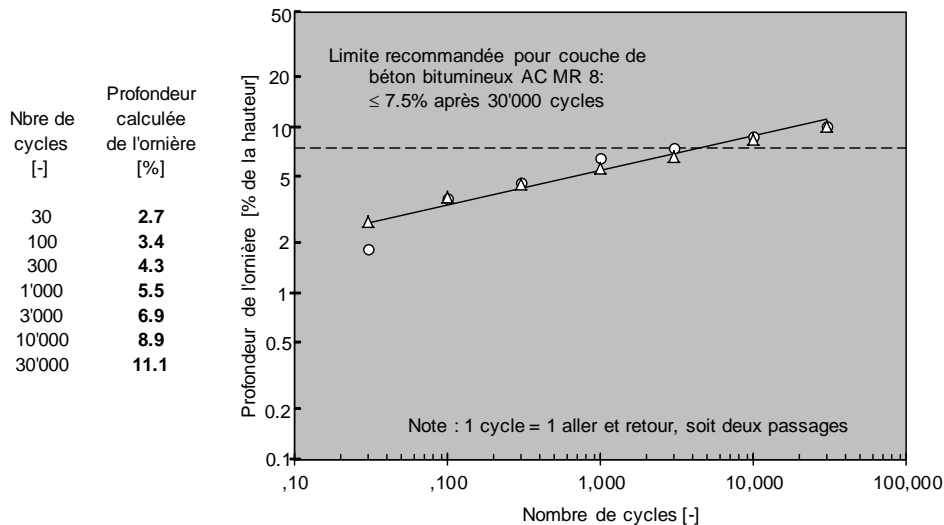
Informations générales

Mandant : **VSS 2009/502** Code LAVOC : **OFENRSUR100STL**
 N° d'échantillon LAVOC : **OFENRSUR100** N° d'échantillon client :-
 Description du produit : **MR 8 au liant PMB (vides 8%) - Essai sur enrobé réchauffé**
 Objet : **Formulation et comportement des enrobés de surface macro-rugueux**
 Prélèvement réalisé par : **Lavoc**
 Lieu de prélèvement : **Halle Fosse**
 Mode d'échantillonnage : **-**
 Date de prélèvement : **29.04.2010** Réalisé par : **LAVOC**
 Date de l'essai : **08.07.2014** Opérateur : **JC.REYMOND**

Résultats

Normes et modes opératoires: SN 670 422-NA, EN 12697-22, SN 670 433, EN 12697-33

Teneur en liant sur enrobé :	5.48 % (mesurée)	Épaisseur théorique des plaques :	50 mm
Teneur en liant sur granulats :	5.80 %	Température d'essai :	60 °C
Teneur en vides moyenne :	19.2 %	Pression de gonflage :	0.6 MPa
Degré de compacité Marshall :	97.7 %	Charge par roue :	5'000 N
		Fréquence de chargement :	1 cycle.s-1





Pente : **0.207**
 Ornière calculée à 10'000 cycles : **8.9 %** Ornière mesurée à 10'000 cycles : **8.7 %**
 Ornière calculée à 30'000 cycles : **11.1 %** Ornière mesurée à 30'000 cycles : **10.2 %**
 Coefficient de corrélation : **0.94**

Date :


Le responsable des essais :

VI.1.4 Essai Cantabro

Laboratoire des Voies de Circulation		 ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE					
EPFL - LAVOC				<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Essai Cantabro</div>			
Bât. GCB							
1015 Lausanne							
Tél: 021/693.23.45							
Fax: 021/693.63.49		PROCES-VERBAL					
Informations générales							
Mandant :	VSS 2009/502	Code LAVOC :	OFENRSUR 100CTO				
N° d'échantillon LAVOC :	OFENRSUR 100 - 1	N° d'échantillon client :	-				
Description du produit :	AC MR 8 - 8% de vides - Carottes n° 1/2/3 - 2 x 50 coups						
Objet :	Formulation et comportement des enrobés de surface macro-rugueux						
Prélèvement réalisé par :	Lavoc						
Lieu de prélèvement :	Halle Fosse						
Mode d'échantillonnage :	par quartage						
Date de prélèvement :	00.01.1900	Réalisé par :	-				
Date de l'essai :	13.08.2014	Opérateur :	Jean-W Fils-Aimé				
Résultats							
Mode opératoire: LAVOC							
Température de l'essai : -10 °C							
Teneur en vides moyenne des éprouvettes Marshall : 12.3 %							
		<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Nombre de tours dans le tambour Los Angeles</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">500</td> </tr> </table>		Nombre de tours dans le tambour Los Angeles		500	
Nombre de tours dans le tambour Los Angeles							
500							
<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;">Perte en matériaux * [%]</td> <td style="width: 50%; text-align: center;">21</td> </tr> </table>		Perte en matériaux * [%]	21				
Perte en matériaux * [%]	21						
* Moyenne de 3 éprouvettes							

Laboratoire des Voies de Circulation		 ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE					
EPFL - LAVOC				<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Essai Cantabro</div>			
Bât. GCB							
1015 Lausanne							
Tél: 021/693.23.45							
Fax: 021/693.63.49		PROCES-VERBAL					
Informations générales							
Mandant :	LAVOC - EPFL	Code LAVOC :	OFENRSUR 100-2CTO				
N° d'échantillon LAVOC :	OFENRSUR 100 - 2	N° d'échantillon client :	-				
Description du produit :	AC MR 8 - 8% de vides - Carottes n° 5/6/7 - 2 x 25 coups						
Objet :	Cantabro 500 tours						
Prélèvement réalisé par :	Lavoc						
Lieu de prélèvement :	Halle Fosse						
Mode d'échantillonnage :	par quartage						
Date de prélèvement :	00.01.1900	Réalisé par :	-				
Date de l'essai :	13.08.2014	Opérateur :	Jean-W Fils-Aimé				
Résultats							
Mode opératoire: LAVOC							
Température de l'essai : -10 °C							
Teneur en vides moyenne des éprouvettes Marshall : 15.9 %							
		<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Nombre de tours dans le tambour Los Angeles</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">500</td> </tr> </table>		Nombre de tours dans le tambour Los Angeles		500	
Nombre de tours dans le tambour Los Angeles							
500							
<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;">Perte en matériaux * [%]</td> <td style="width: 50%; text-align: center;">23</td> </tr> </table>		Perte en matériaux * [%]	23				
Perte en matériaux * [%]	23						
* Moyenne de 3 éprouvettes							

VI.1.5 Traction indirecte (ITS à 3 points)

Laboratoire des Voies de Circulation		PROCES-VERBAL		 ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE	
EPFL - LAVOC					
Bât. GCB					
1015 Lausanne					
Tél: 021/693.23.45					
Fax: 021/693.63.49					
Compression diamétrale					
Informations générales					
Mandant :	VSS 2009/502	Code LAVOC :	OFENRSUR100BRE		
N° d'échantillon LAVOC :	OFENRSUR100	N° d'échantillon client :	-		
Description du produit :	MR 8 au liant PMB (vides 8%) - Essai sur enrobé réchauffé				
Objet :	Formulation et comportement des enrobés de surface macro-rugueux				
Prélèvement réalisé par :	Lavoc				
Lieu de prélèvement :	Halle Fosse				
Mode d'échantillonnage :	-				
Date de prélèvement :	29.04.2010	Réalisé par :	LAVOC		
Date de l'essai :	12.08.2014	Opérateur :	JC.REYMOND		
Résultats					
Mode opératoire: SN EN 12697-6-8-23					
Caractéristiques générale de l'enrobé					
Teneur en liant sur enrobé :	5.48 %	MVR du granulat (calculée) :	2.695 g/cm³		
Teneur en liant sur granulats :	5.80 %	MVR de l'enrobé (estimée) :	2.476 g/cm³		
MVR du liant (estimée) :	1.03 g/cm³				
Caractéristiques des éprouvettes					
Diamètre * :	101.6 mm	Masse volumique apparente * :	2.140 g/cm³		
Hauteur * :	57.7 mm	Teneur en vides comblés HR * :	45.6 %		
Elancement * :	0.6	Mode de fabrication :	Marshall		
Caractéristiques de l'essai de compression diamétrale					
Température de l'essai		-10 °C	Valeur minimum	Valeur maximum	
Teneur en vides HM	[%]	13.6 *	13.4	13.9	
Contrainte	[N/mm ²]	3.5 *	3.1	3.7	
$\Delta(D)/D$	[10 ⁻³]	8.6 *	7.6	10.5	
Coefficient de traction	[N/mm ²]	645 *	559	684	
* Moyenne de 4 éprouvettes					
Date :		Le responsable des essais :			

Laboratoire des Voies de Circulation

EPFL - LAVOC
Bât. GCB
1015 Lausanne
Tél: 021/693.23.45
Fax: 021/693.63.49

PROCES-VERBAL



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Compression diamétrale

Informations générales

Mandant : **VSS 2009/502** Code LAVOC : **OFENRSUR101BRE**
 N° d'échantillon LAVOC : **OFENRSUR100** N° d'échantillon client : -
 Description du produit : **MR 8 au liant PMB (vides 8%) - Essai sur enrobé réchauffé**
 Objet : **Formulation et comportement des enrobés de surface macro-rugueux**
 Prélèvement réalisé par : **Lavoc**
 Lieu de prélèvement : **Halle Fosse**
 Mode d'échantillonnage : -
 Date de prélèvement : **29.04.2010** Réalisé par : **LAVOC**
 Date de l'essai : **12.08.2014** Opérateur : **JC.REYMOND**

Résultats

Mode opératoire: SN EN 12697-6-8-23

Caractéristiques générale de l'enrobé

Teneur en liant sur enrobé :	5.48 %	MVR du granulat (calculée) :	2.695 g/cm³
Teneur en liant sur granulats :	5.80 %	MVR de l'enrobé (estimée) :	2.476 g/cm³
MVR du liant (estimée) :	1.03 g/cm³		

Caractéristiques des éprouvettes

Diamètre * :	101.6 mm	Masse volumique apparente * :	2.143 g/cm³
Hauteur * :	57.7 mm	Teneur en vides comblés HR * :	45.9 %
Elancement * :	0.6	Mode de fabrication :	Marshall

Caractéristiques de l'essai de compression diamétrale

Température de l'essai	15 °C	Valeur minimum	Valeur maximum
Teneur en vides HM [%]	13.4 *	13.2	13.7
Contrainte [N/mm ²]	1.83 *	1.64	1.91
$\Delta(D)/D$ [10 ⁻³]	17.2 *	15.8	18.8
Coefficient de traction [N/mm ²]	168 *	160	176

* Moyenne de 4 éprouvettes

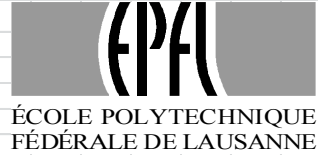
Date :

Le responsable des essais :

Laboratoire des Voies de Circulation

EPFL - LAVOC
 Bât. GCB
 1015 Lausanne
 Tél: 021/693.23.45
 Fax: 021/693.63.49

PROCES-VERBAL



Compression diamétrale

Informations générales

Mandant : **VSS 2009/502** Code LAVOC : **OFENRSUR102BRE**
 N° d'échantillon LAVOC : **OFENRSUR100** N° d'échantillon client : -
 Description du produit : **MR 8 au liant PMB (vides 8%) - Essai sur enrobé réchauffé**
 Objet : **Formulation et comportement des enrobés de surface macro-rugueux**
 Prélèvement réalisé par : **Lavoc**
 Lieu de prélèvement : **Halle Fosse**
 Mode d'échantillonnage : -
 Date de prélèvement : **29.04.2010** Réalisé par : **LAVOC**
 Date de l'essai : **12.08.2014** Opérateur : **JC.REYMOND**

Résultats

Mode opératoire: SN EN 12697-6-8-23

Caractéristiques générale de l'enrobé

Teneur en liant sur enrobé : **5.48 %** MVR du granulat (calculée) : **2.695 g/cm³**
 Teneur en liant sur granulats : **5.80 %** MVR de l'enrobé (estimée) : **2.476 g/cm³**
 MVR du liant (estimée) : **1.03 g/cm³**

Caractéristiques des éprouvettes

Diamètre * : **101.6 mm** Masse volumique apparente * : **2.140 g/cm³**
 Hauteur * : **57.8 mm** Teneur en vides comblés HR * : **45.7 %**
 Elancement * : **0.6** Mode de fabrication : **Marshall**

Caractéristiques de l'essai de compression diamétrale

Température de l'essai	40 °C	Valeur minimum	Valeur maximum
Teneur en vides HM [%]	13.6 *	13.1	14.0
Contrainte [N/mm ²]	0.45 *	0.42	0.49
$\Delta(D)/D$ [10 ⁻³]	15.3 *	14.3	17.2
Coefficient de traction [N/mm ²]	47 *	41	54

* Moyenne de 4 éprouvettes

Date : Le responsable des essais :

VI.1.7 Module de rigidité

EPFL - LAVOC
Bât. GCB
Station 18
1015 LAUSANNE
TEL (021) 6932345

PROCES-VERBAL



COURBE MAÎTRESSE PARTIELLE DU MODULE E* - RÉFÉRENCE 15 °C SELON EN 12697-26

MR 8 AU LIANT PmB - VIDES THÉORIQUE 8%

HALLE-FOSSE - Prélèvement du 29.04.2010

MANDANT : VSS 2009/502
TYPE D'ENROBE : MR 8 au liant PmB - Planche avec vides théorique 8%
DATE DE FABRICATION : 29.04.2010
DATE DE L'ESSAI : 21-22.08.2014
OPÉRATEUR (S) : M.PITTET

CONDITIONS D'ESSAI

TEMPÉRATURE [°C]: 10, 15, 20
FREQUENCE [Hz]: 1, 3, 10, 25, 40
EPSILON THEO. [1E-6]: 40

CARACTERISTIQUES DU BETON BITUMINEUX

TENEUR EN LIANT SOLUBLE / E (MESURE) [%]: 5.48
TENEUR EN VIDES MOY. GEOMETRIQUE [%]: 12.8
TENEUR EN VIDES MOY. HYDROSTATIQUE [%]: -
DEGRE DE COMPACTAGE [%]: -

MODULE E* indicatif mesuré en fatigue (100 cycles) à 10 °C / 25 H. - MPa

ESSAI DE RIGIDITE - MODULE E* A 15°C / 10 Hz : **6'310 MPa**

RESULTATS D'ESSAI

T [°C]	f [Hz]	E* [MPa]	E* Ecart type [MPa]	Phi [°]	E1 [MPa]	E2 [MPa]	f réf. 15°C [Hz]
-10	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
-5	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
0	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
10	1	5661	216	17.4	5402	1695	5.5
	3	6818	262	15.0	6585	1767	16.6
	10	8116	299	12.9	7912	1809	55.4
	25	9093	342	11.7	8905	1837	138.4
	40	9801	492	10.6	9636	1795	221.5
15	1	3965	72	23.5	3636	1581	1
	3	5032	97	20.8	4705	1785	3
	10	6310	160	17.5	6019	1894	10
	25	7269	228	16.1	6985	2013	25
	40	7961	310	15.2	7683	2086	40
20	1	2557	68	30.8	2197	1309	0.19
	3	3414	52	27.1	3040	1554	0.57
	10	4527	69	22.8	4173	1755	1.91
	25	5425	69	20.6	5079	1905	4.79
	40	6148	175	19.2	5806	2021	7.66
25	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	2728	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
35	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
40	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
45	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-

VI.2 Macrorugueux avec 13% de vides cible

VI.2.1 Sensibilité à l'eau (ITSR)

Laboratoire des Voies de Circulation

EPFL - LAVOC
Station 18
1015 Lausanne
Tél: 021/693.23.45
Fax: 021/693.63.49

PROCES-VERBAL



Détermination de la sensibilité à l'eau de mélanges hydrocarbonés à chaud

Informations générales

Mandant : **VSS 2009/502** Code LAVOC : **OFENRSUR101DSE-EN**
 N° d'échantillon LAVOC : **OFENRSUR100** N° d'échantillon client : -
 Description du produit : **MR 8 au liant PMB (vides 13%) - Essai sur enrobé réchauffé**
 Objet : **Formulation et comportement des enrobés de surface macro-rugueux**
 Lieu de prélèvement : **Halle-Fosse**
 Date de prélèvement : **29.04.2010** - Réalisé par : **LAVOC**
 Date de l'essai : **26.06.2014** Opérateur : **JC.REYMOND**

Résultats

Mode opératoire: EN 12697-12 et EN 12697-23

Caractéristiques générale de l'enrobé

Teneur en liant sur enrobé : **5.10 %** MVR du granulat (estimée) : **2.695 Mg/m³**
 Teneur en liant sur granulats : **5.37 %** MVR de l'enrobé (calculée) : **2.490 Mg/m³**
 MVR du liant (estimée) : **1.030 Mg/m³**

Caractéristiques des éprouvettes

Mode de fabrication : **Marshall** MVA géométrique (D)** : **1.890 Mg/m³**
 Energie de compactage : **2 x 25 coups** Teneur en vides (géométriques) ** : **24.1 %**
 Diamètre ** : **101.6 mm** MVA hydrostatique (B)** : **1.890 Mg/m³**
 Hauteur ** : **68.6 mm** Teneur en vides (hydrostatiques) ** : **24.1 %**

Caractéristiques de l'essai de détermination de la sensibilité à l'eau

Mode de conservation	Air		Eau	
	70 h. à 23°C		70 h. à 40°C	
Température de l'essai de traction indirecte [°C]	22			
ITS_w * [kPa]	-	658		
ITS_d * [kPa]	737		-	
Ratio $ITSR$ [%]	89			


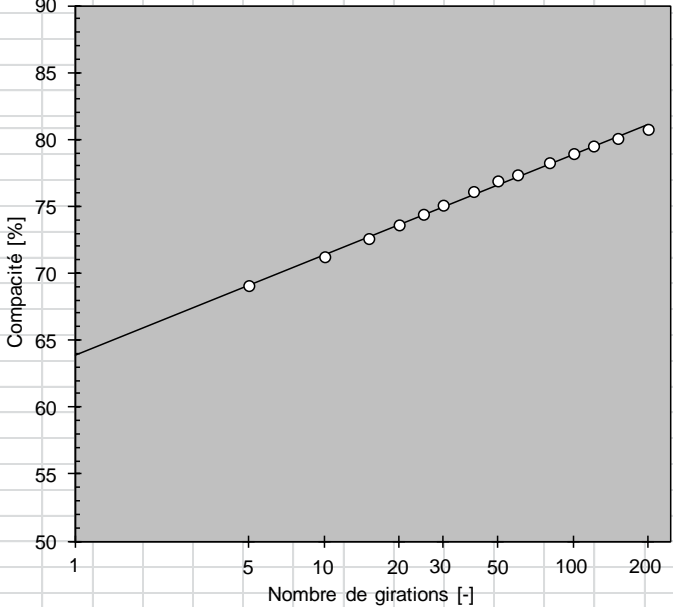
* Moyenne de 3 éprouvettes

** Moyenne de 6 éprouvettes


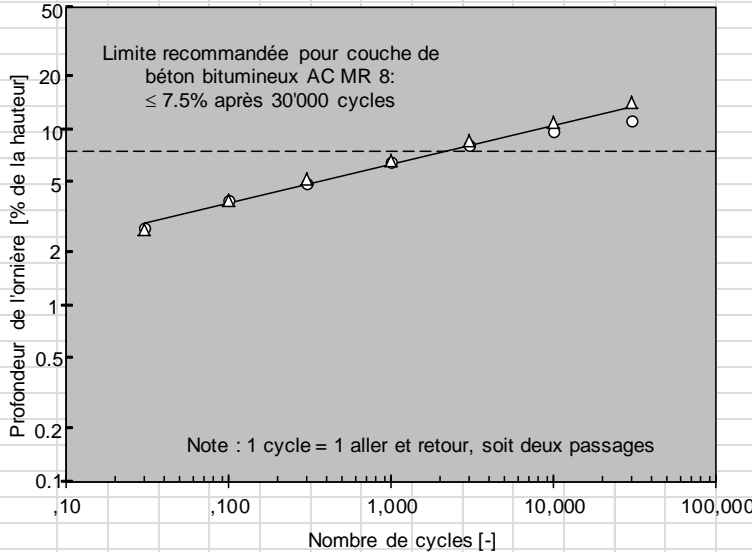
Date :

Le responsable des essais :


VI.2.2 Presse à cisaillement giratoire (PCG)


Laboratoire des Voies de Circulation		 ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE																															
EPFL - LAVOC																																	
Bât. GCB	PROCES-VERBAL																																
1015 Lausanne																																	
Tél: 021/693.23.45 Fax: 021/693.63.49																																	
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> Presse à cisaillement giratoire (PCG) </div>																																	
Informations générales																																	
Mandant : VSS 2009/502	Code LAVOC : OFENRSUR 101PCG																																
N° d'échantillon LAVOC : OFENRSUR 101	N° d'échantillon client : -																																
Description du produit : AC MR 8 - 13% - Essai sur enrobé réchauffé																																	
Objet : Formulation et comportement des enrobés de surface macro-rugueux																																	
Prélèvement réalisé par : Lavoc																																	
Lieu de prélèvement : Halle-Fosse																																	
Mode d'échantillonnage : Quartier à couloirs																																	
Date de prélèvement : 29.04.2010	Réalisé par : ###																																
Date de l'essai : 01.09.2014	Opérateur : JCR																																
Résultats																																	
Mode opératoire: NF P 98-252																																	
Teneur en liant sur enrobé :		5.10 %	(mesurée)																														
Teneur en liant sur granulats :		5.37 %	(calculée)																														
<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>Nbre de girations [-]</th> <th>Compacité moyenne * [% volume]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>5</td><td>69.0</td></tr> <tr><td>10</td><td>71.2</td></tr> <tr><td>15</td><td>72.6</td></tr> <tr><td>20</td><td>73.7</td></tr> <tr><td>25</td><td>74.4</td></tr> <tr><td>30</td><td>75.1</td></tr> <tr><td>40</td><td>76.1</td></tr> <tr><td>50</td><td>76.9</td></tr> <tr><td>60</td><td>77.4</td></tr> <tr><td>80</td><td>78.3</td></tr> <tr><td>100</td><td>79.0</td></tr> <tr><td>120</td><td>79.5</td></tr> <tr><td>150</td><td>80.0</td></tr> <tr><td>200</td><td>80.7</td></tr> </tbody> </table>				Nbre de girations [-]	Compacité moyenne * [% volume]	5	69.0	10	71.2	15	72.6	20	73.7	25	74.4	30	75.1	40	76.1	50	76.9	60	77.4	80	78.3	100	79.0	120	79.5	150	80.0	200	80.7
Nbre de girations [-]	Compacité moyenne * [% volume]																																
5	69.0																																
10	71.2																																
15	72.6																																
20	73.7																																
25	74.4																																
30	75.1																																
40	76.1																																
50	76.9																																
60	77.4																																
80	78.3																																
100	79.0																																
120	79.5																																
150	80.0																																
200	80.7																																
																																	
* moyenne sur 2 éprouvettes																																	
Compacité à 1 giration :		63.9 %																															
Compacité à 200 girations :		80.7 %																															
Pente de la droite de régression :		3.25																															
Date :	Le responsable des essais :																																

VI.2.3 Simulateur de trafic léger (orniérage)

Laboratoire des Voies de Circulation		PROCES-VERBAL		 ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE																			
EPFL - LAVOC																							
Station 18																							
1015 Lausanne																							
Tél: 021/693.23.45																							
Fax: 021/693.63.49																							
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Essai au simulateur de trafic LCPC</div>																							
Informations générales																							
Mandant :	VSS 2009/502	Code LAVOC :	OFENRSUR101STL																				
N° d'échantillon LAVOC :	OFENRSUR101	N° d'échantillon client :	-																				
Description du produit :	MR 8 au liant PMB (vides 13%) - Essai sur enrobé réchauffé																						
Objet :	Formulation et comportement des enrobés de surface macro-rugueux																						
Prélèvement réalisé par :	Lavoc																						
Lieu de prélèvement :	Halle Fosse																						
Mode d'échantillonnage :	-																						
Date de prélèvement :	29.04.2010	Réalisé par :	LAVOC																				
Date de l'essai :	15.07.2014	Opérateur :	JC.REYMOND																				
Résultats																							
Normes et modes opératoires: SN 670 422-NA, EN 12697-22, SN 670 433, EN 12697-33																							
Teneur en liant sur enrobé :	5.10 %	(mesurée)	Épaisseur théorique des plaques :	50 mm																			
Teneur en liant sur granulats :	5.37 %		Température d'essai :	60 °C																			
Teneur en vides moyenne :	29.5 %		Pression de gonflage :	0.6 MPa																			
Degré de compacité Marshall :	94.1 %		Charge par roue :	5'000 N																			
			Fréquence de chargement :	1 cycle.s-1																			
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Nbre de cycles [-]</th> <th>Profondeur calculée de l'ornière [%]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>30</td><td>3.0</td></tr> <tr><td>100</td><td>3.8</td></tr> <tr><td>300</td><td>4.9</td></tr> <tr><td>1'000</td><td>6.4</td></tr> <tr><td>3'000</td><td>8.1</td></tr> <tr><td>10'000</td><td>10.5</td></tr> <tr><td>30'000</td><td>13.4</td></tr> </tbody> </table>						Nbre de cycles [-]	Profondeur calculée de l'ornière [%]	30	3.0	100	3.8	300	4.9	1'000	6.4	3'000	8.1	10'000	10.5	30'000	13.4		
Nbre de cycles [-]	Profondeur calculée de l'ornière [%]																						
30	3.0																						
100	3.8																						
300	4.9																						
1'000	6.4																						
3'000	8.1																						
10'000	10.5																						
30'000	13.4																						
																							
<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td>Pente :</td> <td>0.218</td> <td>Omière calculée à 10'000 cycles :</td> <td>10.5 %</td> <td>Omière mesurée à 10'000 cycles :</td> <td>10.4 %</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Omière calculée à 30'000 cycles :</td> <td>13.4 %</td> <td>Omière mesurée à 30'000 cycles :</td> <td>12.7 %</td> </tr> <tr> <td>Coefficient de corrélation :</td> <td>0.98</td> <td colspan="4"></td> </tr> </table>						Pente :	0.218	Omière calculée à 10'000 cycles :	10.5 %	Omière mesurée à 10'000 cycles :	10.4 %			Omière calculée à 30'000 cycles :	13.4 %	Omière mesurée à 30'000 cycles :	12.7 %	Coefficient de corrélation :	0.98				
Pente :	0.218	Omière calculée à 10'000 cycles :	10.5 %	Omière mesurée à 10'000 cycles :	10.4 %																		
		Omière calculée à 30'000 cycles :	13.4 %	Omière mesurée à 30'000 cycles :	12.7 %																		
Coefficient de corrélation :	0.98																						
Date :		Le responsable des essais :																					

VI.2.4 Essai Cantabro

Laboratoire des Voies de Circulation		 ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE
EPFL - LAVOC	PROCES-VERBAL	
Bât. GCB		
1015 Lausanne Tél: 021/693.23.45 Fax: 021/693.63.49		
Essai Cantabro		
Informations générales		
Mandant : VSS 2009/502	Code LAVOC : OFENRSUR 101CTO	
N° d'échantillon LAVOC : OFENRSUR 101	N° d'échantillon client : -	
Description du produit : AC MR 8 (vides 13%) - Carottes n° 9 /10/11 - 2 x 50 coups - Essai sur enrobé réchauffé		
Objet : Formulation et comportement des enrobés de surface macro-rugueux		
Prélèvement réalisé par :	Lavoc	
Lieu de prélèvement :	Halle Fosse	
Mode d'échantillonnage :	par quartage	
Date de prélèvement :	29.04.2010	Réalisé par : -
Date de l'essai :	13.08.2014	Opérateur : Jean-W Fils-Aimé
Résultats		
Mode opératoire: LAVOC		
Température de l'essai : -10 °C		
Teneur en vides moyenne des éprouvettes Marshall : 18.7 %		
		Nombre de tours dans le tambour Los Angeles
		500
Perte en matériaux * [%]	36	
* Moyenne de 3 éprouvettes		

Laboratoire des Voies de Circulation		 ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE
EPFL - LAVOC	PROCES-VERBAL	
Bât. GCB		
1015 Lausanne Tél: 021/693.23.45 Fax: 021/693.63.49		
Essai Cantabro		
Informations générales		
Mandant : VSS 2009/502	Code LAVOC : OFENRSUR 102CTO	
N° d'échantillon LAVOC : OFENRSUR 101	N° d'échantillon client : -	
Description du produit : AC MR 8 (vides 13%) - Carottes n° 13 /14/15 - 2 x 25 coups - Essai sur enrobé réchauffé		
Objet : Formulation et comportement des enrobés de surface macro-rugueux		
Prélèvement réalisé par :	Lavoc	
Lieu de prélèvement :	Halle Fosse	
Mode d'échantillonnage :	par quartage	
Date de prélèvement :	29.04.2010	Réalisé par : -
Date de l'essai :	13.08.2014	Opérateur : Jean-W Fils-Aimé
Résultats		
Mode opératoire: LAVOC		
Température de l'essai : -10 °C		
Teneur en vides moyenne des éprouvettes Marshall : 22.6 %		
		Nombre de tours dans le tambour Los Angeles
		500
Perte en matériaux * [%]	47	
* Moyenne de 3 éprouvettes		

Laboratoire des Voies de Circulation

EPFL - LAVOC
Bât. GCB
1015 Lausanne
Tél: 021/693.23.45
Fax: 021/693.63.49

PROCES-VERBAL



Compression diamétrale

Informations générales

Mandant : **VSS 2009/502** Code LAVOC : **OFENRSUR102BRE**
 N° d'échantillon LAVOC : **OFENRSUR101** N° d'échantillon client : -
 Description du produit : **MR 8 au liant PMB (vides 13%) - Essai sur enrobé réchauffé**
 Objet : **Formulation et comportement des enrobés de surface macro-rugueux**
 Prélèvement réalisé par : **Lavoc**
 Lieu de prélèvement : **Halle Fosse**
 Mode d'échantillonnage : -
 Date de prélèvement : **29.04.2010** Réalisé par : **LAVOC**
 Date de l'essai : **12.08.2014** Opérateur : **JC.REYMOND**

Résultats

Mode opératoire: SN EN 12697-6-8-23

Caractéristiques générale de l'enrobé

Teneur en liant sur enrobé :	5.10 %	MVR du granulat (calculée) :	2.690 g/cm ³
Teneur en liant sur granulats :	5.37 %	MVR de l'enrobé (estimée) :	2.486 g/cm ³
MVR du liant (estimée) :	1.03 g/cm ³		

Caractéristiques des éprouvettes

Diamètre * :	101.6 mm	Masse volumique apparente * :	2.027 g/cm ³
Hauteur * :	61.2 mm	Teneur en vides comblés HR * :	35.2 %
Elancement * :	0.6	Mode de fabrication :	Marshall

Caractéristiques de l'essai de compression diamétrale

Température de l'essai	15 °C	Valeur minimum	Valeur maximum
Teneur en vides HM [%]	18.5 *	18.0	18.8
Contrainte [N/mm ²]	1.48 *	1.40	1.60
$\Delta(D)/D$ [10 ⁻³]	18.1 *	16.3	19.9
Coefficient de traction [N/mm ²]	130 *	112	147

* Moyenne de 4 éprouvettes

Date :

Le responsable des essais :

Laboratoire des Voies de Circulation

EPFL - LAVOC
Bât. GCB
1015 Lausanne
Tél: 021/693.23.45
Fax: 021/693.63.49

PROCES-VERBAL



Compression diamétrale

Informations générales

Mandant : **VSS 2009/502** Code LAVOC : **OFENRSUR103BRE**
 N° d'échantillon LAVOC : **OFENRSUR101** N° d'échantillon client : -
 Description du produit : **MR 8 au liant PMB (vides 13%) - Essai sur enrobé réchauffé**
 Objet : **Formulation et comportement des enrobés de surface macro-rugueux**
 Prélèvement réalisé par : **Lavoc**
 Lieu de prélèvement : **Halle Fosse**
 Mode d'échantillonnage : -
 Date de prélèvement : **29.04.2010** Réalisé par : **LAVOC**
 Date de l'essai : **12.08.2014** Opérateur : **JC.REYMOND**

Résultats

Mode opératoire: SN EN 12697-6-8-23

Caractéristiques générale de l'enrobé

Teneur en liant sur enrobé : **5.10 %** MVR du granulat (calculée) : **2.690 g/cm³**
 Teneur en liant sur granulats : **5.37 %** MVR de l'enrobé (estimée) : **2.486 g/cm³**
 MVR du liant (estimée) : **1.03 g/cm³**

Caractéristiques des éprouvettes

Diamètre * : **101.6 mm** Masse volumique apparente * : **2.023 g/cm³**
 Hauteur * : **61.2 mm** Teneur en vides comblés HR * : **35.0 %**
 Elancement * : **0.6** Mode de fabrication : **Marshall**

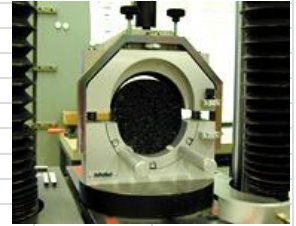
Caractéristiques de l'essai de compression diamétrale

Température de l'essai	40 °C	Valeur minimum	Valeur maximum
Teneur en vides HM [%]	18.6 *	18.2	19.0
Contrainte [N/mm ²]	0.33 *	0.32	0.35
$\Delta(D)/D$ [10 ⁻³]	15.0 *	13.7	16.0
Coefficient de traction [N/mm ²]	35 *	32	38

* Moyenne de 4 éprouvettes

VI.2.6 Essai Leutner

OFENSUR Essai Leutner selon SN				
Date fabrication du béton :	-			
Date de la pose de l'émulsion :	-			
Date de la pose du revêtement :	29.04.2010			
Date de prélèvement des éprouvettes :	03.08.2010			
Date de l'essai :	30.07.2014			
MR 13%				
Carotte n°	Diamètre [mm]	Épaisseur MR 8 [mm]	Épaisseur béton [mm]	Force de cisaillement [kN]
C1	150	43	-	13.2
C3				13.1
C13				16.6
				Moyenne [KN]
				14.3



VI.2.7 Module de rigidité

EPFL - LAVOC
Bât. GCB
Station 18
1015 LAUSANNE
TEL (021) 6932345

PROCES-VERBAL



COURBE MAÎTRESSE PARTIELLE DU MODULE E* - REFERENCE 15 °C SELON EN 12697-26
MR 8 AU LIANT PmB - VIDES THEORIQUE 13%
HALLE-FOSSE - Prélèvement du 29.04.2010

MANDANT : VSS 2009/502
 TYPE D'ENROBE : MR 8 au liant PmB - Planche avec vides théorique 8%
 DATE DE FABRICATION : 29.04.2010
 DATE DE L'ESSAI : 27-22.09.2014
 OPERATEUR (S) : M.PITTET

CONDITIONS D'ESSAI

TEMPERATURE [°C]: 10, 15, 20
 FREQUENCE [Hz]: 1, 3, 10, 25, 40
 EPSILON THEO. [1E-6]: 40

CARACTERISTIQUES DU BETON BITUMINEUX

TENEUR EN LIANT SOLUBLE / E (MESURE) [%]: 5.10
 TENEUR EN VIDES MOY. GEOMETRIQUE [%]: 17.3
 TENEUR EN VIDES MOY. HYDROSTATIQUE [%]: -
 DEGRE DE COMPACTAGE [%]: -

MODULE E* indicatif mesuré en fatigue (100 cycles) à 10 °C / 25 H: - MPa

ESSAI DE RIGIDITE - MODULE E* A 15°C / 10 Hz : 4'172 MPa

RESULTATS D'ESSAI

T [°C]	f [Hz]	E* [MPa]	E* Ecart type [MPa]	Phi [°]	E1 [MPa]	E2 [MPa]	f réf. 15°C [Hz]
-10	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
-5	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
0	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
10	1	3692	235	20.0	3470	1262	5.5
	3	4570	267	17.5	4358	1377	16.6
	10	5598	308	15.0	5409	1444	55.4
	25	6362	307	13.6	6184	1493	138.4
	40	6960	298	12.6	6792	1523	221.5
15	1	2450	150	25.7	2208	1062	1
	3	3215	185	22.6	2967	1238	3
	10	4172	221	19.3	3938	1377	10
	25	4933	241	17.7	4699	1503	25
	40	5447	245	16.9	5211	1588	40
20	1	1465	105	32.5	1235	788	0.19
	3	2066	138	28.9	1809	998	0.57
	10	2855	176	25.0	2586	1209	1.91
	25	3560	201	23.9	3255	1442	4.79
	40	4022	187	22.7	3709	1555	7.66
25	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	1460	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
35	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
40	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
45	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-

LAVOC / MP / 28.08.2014

OFENRSUR002MOD.XLS

VII Données liées à la backcalculation et au FWD

VII.1 Résultats du FWD

Tab. 1 Résultats du FWD

Point N°	Drop N°	Stress	Load	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
[-]	[-]	[kPa]	[kN]	[1/1000 mm]								
c2-04	1	1040	21.5	418	341	286	210	148	74	39	25	19
b2-04	2	1043	21.5	371	320	273	204	147	75	39	24	18
a2-04	3	1045	21.5	194	165	131	91	59	24	11	8	10
c2-02	4	1048	21.5	435	350	288	212	149	72	38	23	18
b2-02	5	1049	21.5	365	296	251	192	138	69	34	22	17
a2-02	6	1052	21.5	221	170	138	105	72	34	20	18	17
c2-01	7	1057	21.5	416	344	287	218	153	77	40	24	19
b2-01	8	1101	21.5	372	318	271	209	152	78	41	24	17
a2-01	9	1103	21.5	202	157	128	95	66	29	14	11	11
a1-04	10	1104	21.5	182	149	121	91	61	26	12	9	10
b1-04	11	1107	21.5	425	358	300	221	159	79	39	23	18
c1-04	12	1108	21.5	436	352	288	216	152	78	41	27	20
c1-02	13	1111	21.5	408	328	273	199	142	72	38	25	17
b1-02	14	1114	21.5	385	324	276	208	150	76	38	24	18
a1-02	15	1116	21.5	221	176	140	109	73	33	18	17	17
a1-01	16	1117	21.5	198	159	129	95	63	27	13	10	10
b1-01	17	1122	21.5	375	319	277	214	158	81	41	25	18
c1-01	18	1124	21.5	377	319	271	210	154	79	41	25	19
c2-03	19	1125	21.5	422	346	285	218	155	79	42	25	18
c1-03	20	1131	21.5	391	336	283	211	154	79	41	26	18
b2-03	21	1133	21.5	385	316	269	203	147	76	39	24	18
b1-03	22	1133	21.5	440	360	305	229	165	86	45	27	19
a2-03	23	1137	21.5	230	170	138	105	70	31	16	11	10
a1-03	24	1138	21.5	201	164	133	105	72	31	15	11	11

VII.2 Synthèse Infralab

5. SYNTHÈSE

Légende :

E_1	Module élastique moyen de la couche bitumineuse à 25°C et 10Hz	[MPa]	[MPa]
E_2	Module élastique moyen de la grave de fondation	[MPa]	
E_3	Module élastique moyen du sol		[MPa]

Tableaux de synthèse

Champ		1	2	3
Trace de roue		A1 et A2	B1 et B2	C1 et C2
Produit	Couche de roul. – Ep.	AC MR 8 (8%) – 5 cm	AC MR 8 (8%) – 4 cm	AC MR 8 (13%) – 4 cm
	Couche de base – Ep.	ACT 22 S - 12 cm	AC EME 22 C1 – 10 cm	AC EME 22 C1 – 9 cm
E1 [MPa]	Moyenne	4'142	4'423	4'096
	Coefficient de variation	0.21	0.17	0.22
E2 [MPa]	Moyenne	233	126	142
	Coefficient de variation	0.21	0.12	0.08
E3 [MPa]	Moyenne	132	84	75
	Coefficient de variation	0.30	0.07	0.10

- Les modules élastiques de la couche bitumineuse sont en général suffisants avec des moyennes entre 4'096 et 4'423 MPa. Les coefficients de variation sont faibles (< 0.35) ce qui indique une bonne homogénéité.

Les légères différences entre les moyennes de modules élastiques être expliquées par le produit de la couche base et son épaisseur relative : le module élastique d'une couche de base en AC EME 22 C1 est, a priori, supérieure à celui en ACT 22 S.

En comparant les modules des deux traces (A1-A2, B1-B2 et C1-C2), on constate qu', en général, les modules sont comparables. Quelques grosses différences existent néanmoins entre les modules côté « Genève ».

- Les moyennes des modules élastiques de la grave de fondation sont (très) faibles (entre 126 et 233 MPa).
- Le sol de fondation présente des valeurs suffisantes à élevées avec des moyennes entre 75 et 132 MPa.

Romanel-sur-Lausanne, le 26 mai 2010

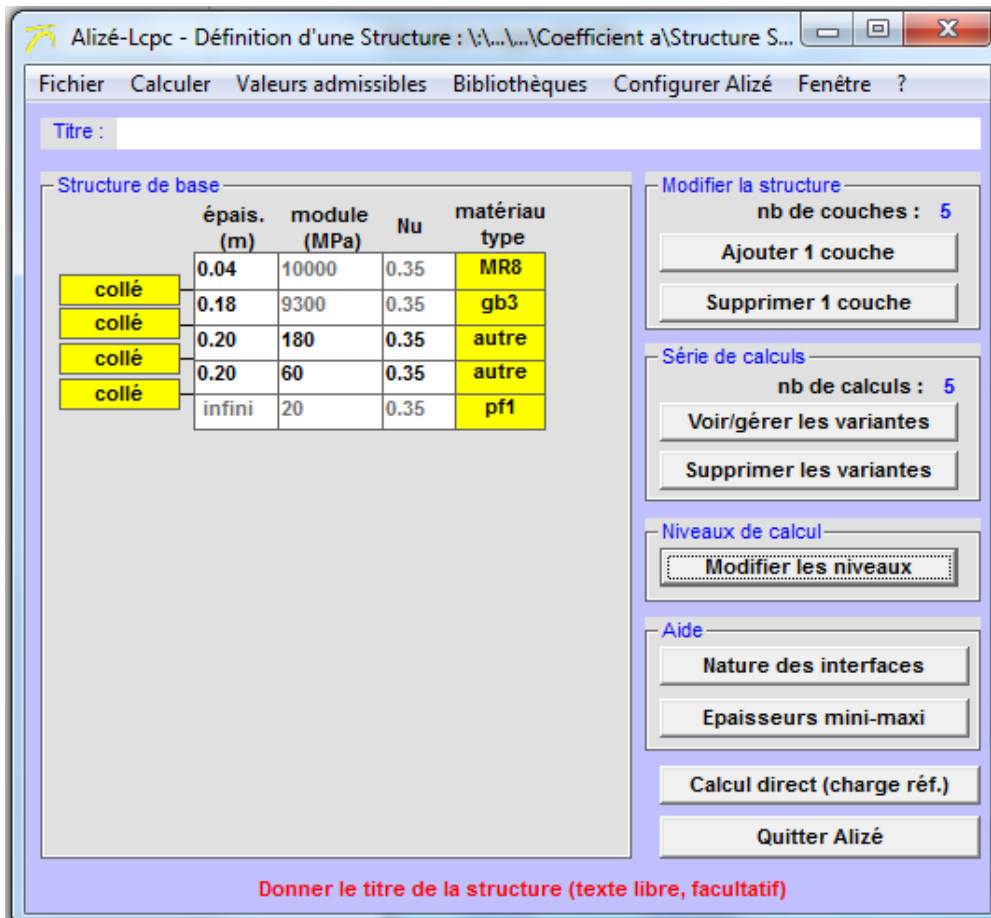
Infralab SA

Robert Braber
Responsable section auscultations

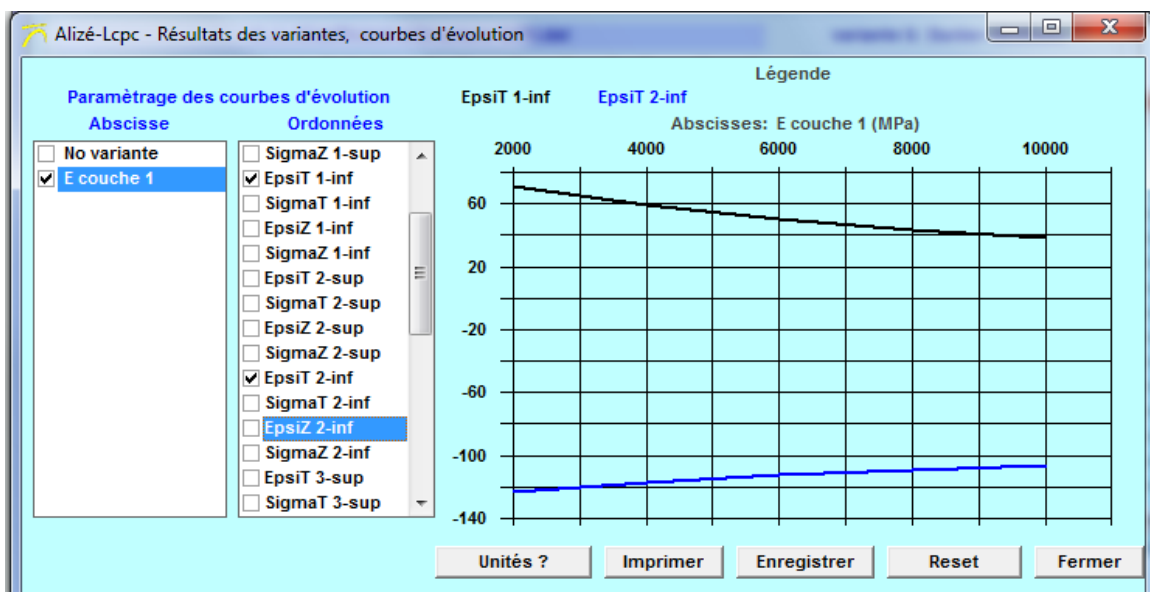
Tony Bühler
Directeur

VIII Exemple de structure et calcul dans Alizée

VIII.1 Exemple de structure



VIII.2 Exemple de calcul de déformations (str. S2T5)




IX Formulation du MR 8 avec 8% de vides

IX.1 Epreuve type de formulation

Laboroute sa Accrédité EN ISO/IEC 17025:2005 1564 DOMDIDIER Tél. 026/675 16 72 Internet: www.laboroute.ch Nat. 079/206 47 73 E-mail: info@laboroute.ch Fax. 026/675 92 09		EPREUVE TYPE DE FORMULATION												
TYPE : AC MR 8		PROVENANCE DES AGREGATS : Grandvillard; filler FAMSA												
CLIENT : JPF Gravières SA 1630 Bulle		CENTRALE D'ENROBAGE : Grandvillard												
		BITUME : PmB 45/80-65 (CH-E) Styrelf E60												
		IDENTIFICATION DE L'ESSAI DE QUALIFICATION : E-08 / 089												
	Valeurs caractéristique de l'épreuve type	Valeurs nominale de la recette	Valeurs Norme SN 640 431 1aNA et directives ASTRA											
Liant dosé %	-- . -- %	5.80 %												
Liant soluble %	5.91 %	5.80 %	≥ 5.70 %											
Type de liant utilisé pour l'épreuve-type	PmB 45/80-65 (CH-E); Styrelf E60													
Stabilité Marshall S_{M}	≥ kN	≥ kN	≥ kN											
Fluage Marshall F_{mm}	≤ mm	≤ mm	mm											
Masse volumique app. (D_{app})	2.270 to/m^3	2.283 to/m^3												
Masse volumique réelle (D_{r})	2.464 to/m^3	2.468 to/m^3												
Teneur en vides (V_m)	7.9 VOL-%	7.5 VOL-%	6.0-9.0 VOL-%											
Teneur en vides du squelette granulaire comblé par le liant (VFB)	%	≤ %	≤ %											
Traction par fendage ITSR	98.5 %	≥ 70 %	≥ 70 %											
Profondeur d'ornièrè %	3.9 %	≤ 7.5 %	≤ 7.5 %											
Validation des propriétés de l'enrobé	mélange en laboratoire													
Tolérance pour l'évaluation de la conformité de la production d'enrobé bitumineux SN 640 431-21NA														
Teneur en liant soluble : $\varnothing \leq 11 \text{ mm} \pm 0.50\%$														
$\varnothing \geq 16 \text{ mm} \pm 0.60\%$														
COMPOSITION GRANULOMETRIQUE :														
Tamis d'analyse \square mm	0.063	0.5	1.0	2.0	4.0	5.6	8	11.2	16	22.4	31.5	45.0		
Passant de l'épreuve type en % de la masse	8.3	15.6	18.6	24.7	40.0	65.6	96.6	100	100	100	100	100		
Passant des valeurs nominales en % de la masse	8.5	13	17	24	40	67	95	100	100	100	100	100		
Ecarts adm. par rapport à la valeur nominale en %	± 2		± 4	± 6	± 7		- 8 / + 5							
Valable dès le : 08.05.2008										Signature:			Modifications	
										Date:			Signature:	

LR,BS/02.02.01/Attestation/ER E153/2 Epreuve type de formulation ACMR8 ASTRA_Styrelf E 60

IX.3 Essai d'orniérage

 Laboratoire Principal de Lyon La tour de Millery 69390 Vernaison	ESSAI D'ORNIERAGE		
	SN 670 422		
	AC MR 8		
	Dossier n° : F08 02307	Techniciens L.GUDEFIN J.LEFEBVRE	Date 07.05.2008

Objet : AC MR 8 JPF (E-08/089)

Date du prélèvement : Liants/agrégats : 6.29% sur agrégats
 par : Teneur en liant S : 5.91% sur mortier bitumineux
 Lieu de prélèvement : Module de richesse : 3.51
 Date de réception :
 Date des essais : 06.05.2008
 Recette n° :

Masse volumique granulats :	2.700	kg/m3	Stabilité	S	Kn
Masse volumique app.	2.270	kg/m3	Fluage	F	mm
Masse volumique réelle :	2.464	kg/m3	Fluage tangentielle	Ft	mm
Teneur en vide :	7.9%		Quotien marshall	S/F	

Mode de fabrication : malaxeur Guédu type 2

Type de compactage : fort

Fabrication à : 180°C

Température moyenne de l'essai : 60 °C

Epaisseur de la couche : 30 mm

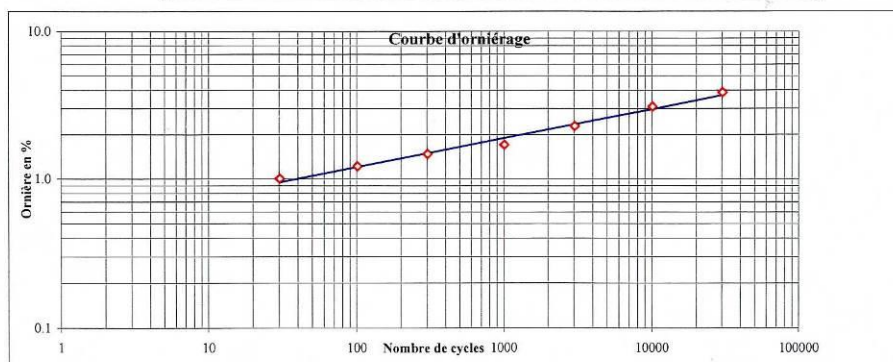
Murissement : 5 jours

Mesure de la M.V.A.
(Méthode géométrique)

	Densité apparente (T/m ³)	% de Vides
plaque n° 1	2.278	7.5
plaque n° 2	2.265	8.1
MOYENNE	2.272	7.8



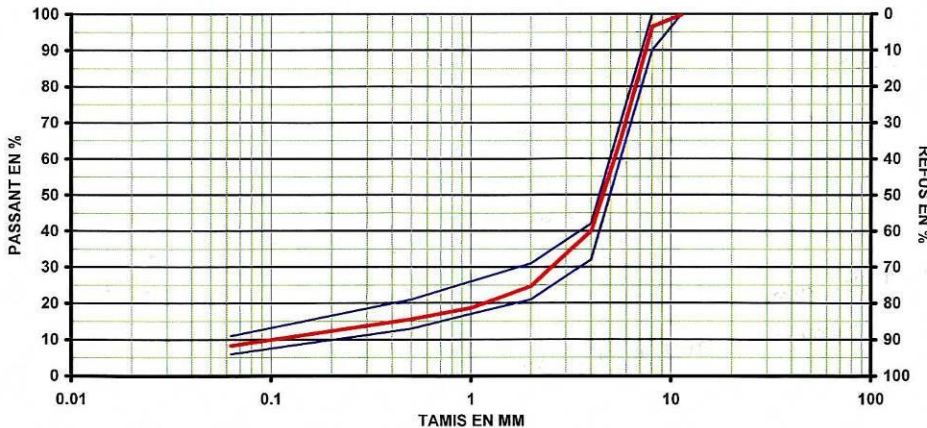

Résultats d'Orniérage

Nombres de cycles	Orniérage trouvé (%)			Orniérage calculé (%)
	plaque n° 1	plaque n° 2	MOYENNE	
30	1.5	0.5	1.0	1.0
100	1.6	0.8	1.2	1.2
300	1.8	1.2	1.5	1.5
1000	2.0	1.4	1.7	1.9
3000	2.9	1.7	2.3	2.3
10000	3.7	2.5	3.1	3.0
30000	4.2	3.5	3.9	3.7
Coefficient de corrélation =			0.987	
Pente de la droite =			0.197	



VISA

IX.4 Essai de conformité

 Laboroute sa Accrédité EN ISO/IEC 17025:2005		Béton bitumineux Contrôle		 STS 329												
1564 DOMDIDIER Tél 026/675 16 72 Internet www.laboroute.ch Nat 079/206 47 73 E-mail info@laboroute.ch Fax 026/676 92 09		SORTE : AC MR 8 Astra N° de laboratoire : E - 08 / 089														
Client : JPF Gravières SA Rue de Gruyères 106 1630 Bulle		Prélèvement, Date : 11.04.2008 Heure : par : LR/jw-ye Lieu prélèvement : Laboratoire Date d'entrée : 11.04.2008 Date du contrôle : 11.04.2008 Recette n° : Poids des matériaux reçus : 15.0 kg														
Chantier : Essai de conformité en laboratoire																
Centrale enrobage :																
Essai Marshall																
(EN 12697-5,6 et 8) Masse volumique app. (ρ_{mass}) 2.270 kg/m ³ V _m norme : (6.0-9.0 %(v/v)) Masse volumique réelle (ρ_{mc}) 2.464 kg/m ³ V _m nom. : (7.50 %(v/v)) Teneur en vides (V_m) 7.9 %(v/v) Teneur en vides du squelette granulaire (VMA) 20.9 %(v/v) Teneur en vides du squelette granulaire comblé par le liant (VFB) 62 %(v/v)		(EN 12697-3/4) <table border="1" style="float: right; margin-left: 20px;"> <tr> <td>Ex. norme</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Stabilité</td> <td>S kN</td> </tr> <tr> <td>Fluage</td> <td>F mm</td> </tr> <tr> <td>Fluage tangentielle</td> <td>F_t mm</td> </tr> <tr> <td>Quotient marshall</td> <td>S/F</td> </tr> <tr> <td>MV granulats:</td> <td>2.700 kg/m³</td> </tr> </table>			Ex. norme		Stabilité	S kN	Fluage	F mm	Fluage tangentielle	F _t mm	Quotient marshall	S/F	MV granulats:	2.700 kg/m ³
Ex. norme																
Stabilité	S kN															
Fluage	F mm															
Fluage tangentielle	F _t mm															
Quotient marshall	S/F															
MV granulats:	2.700 kg/m ³															
Détermination de la teneur en liant (EN 12697-1)																
(Ecart adm. norm. ± 0.5 %) Genre / sorte : PmB 45/80-65 (CH-E); Styrelf E60 Liant norme : (5.7-6.3 %) Liant/agrégats 6.29 % sur agrégats Liant nom. : (5.90 %) Teneur en liant S : 5.91 % sur mortier bitumineux		Temp. de prélèvement : °C Temp. comp. marshall : 160 °C Module de richesse : 3.66														
Composition granulométrique (EN 12697-2)																
Tamis d'analyse	mm	0.063	0.5	1.0	2.0	4.0	5.6	8.0	11.2	16	22.4	31.5	45			
Passant en % de la masse		8.3	15.6	18.6	24.7	40.0	65.6	96.6	100	100	100	100	100			
Valeurs nominales en % du 08.04.2008		8.6	13	17	22	36	59	94	100	100						
Ecart adm. par rapport à la valeur nominale en %		± 2		± 4	± 6	± 7		- 8 / + 5								
AC MR 8																
																
Remarques : Les résultats ne concernent que les échantillon(s) soumis à l'essai.		Date : 11.04.2008 Signature :  B. Schmid Directeur														

LR_BS/31.01.01/Enrobé/ER E150/3.ACMR8 ASTRA Styrelf E60_Essai marshall sur fabrication en labo

1/1

Glossaire

Terme	Signification
a	Coefficient d'équivalence structurel (a)
A ₂₅	Coefficient d'aplatissement (A ₂₅)
AC	Enrobé bitumineux dense (AC)
AC MR	Bétons bitumineux macrorugueux (AC MR)
AC F	Enrobé bitumineux dense – couche de fondation (AC F)
AC T	Enrobé bitumineux dense – couche de base (AC T)
ACVLT	Asphalt Concrete for Very Thin Layers (ACVLT)
BBM	Bétons bitumineux minces (BBM)
BBTM	Bétons bitumineux très minces (BBTM)
BBSG	Bétons bitumineux semi-grenus (BBSG)
C _{95/1}	% de grain concassé (C _{95/1})
CAM	Coefficient d'agressivité moyen (CAM)
CPA	Coefficient de polissage accéléré
CRR	Centre de recherche routière (CRR)
D	Épaisseur (D)
D _i	Emplacement des mesures de déflexions (D _i)
EBT	Enrobé basse température (EBT)
E _{cs}	Coefficient d'écoulement des granulats (E _{cs})
EPFL	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
EME	Enrobé bitumineux à module élevé (EME)
ETF	Epreuve type de formulation (ETF)
FWD	Falling Weight Deflectometer (FWD)
GB	Grave Bitume (GB)
li	Indice d'état (li)
LA ₂₅	Coefficient Los Angeles (LA ₂₅)
LCPC	Laboratoire de ponts et chaussées, IFSTTAR depuis 2011 (LCPC)
LAVOC	Laboratoire des voies de circulation (LAVOC)
LNA	Low Noise Asphalt (LNA)
LVDT	Linear Variable Differential Transformer (LVDT)
NR2C	New Road Construction Concepts (NR2C)
OFROU	Office fédéral des routes (OFROU)
PA	Enrobés drainants (PA)
PCG	Presse à cisaillement giratoire (PCG)
PSV ₅₀	Résistance au polissage (PSV ₅₀)
Pt100	Capteur de température (Pt100)
RAP	Enrobé recyclé fraisé (RAP)
RCC	Centre de recherche routière (RCC)
SDA	Enrobés bitumineux semi-denses (SDA)
SMA	Splittmastixasphalt (SMA)

SN	Normes suisses (SN)
SRT	Skip Restiance Tester (SRT)
Vi	Vitesses de chargement (Vi)
V _m	Vides Marshall (V _m)
VSS	Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

Bibliographie

Normes


-
- [1] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2011), « **Dimensionnement de la structure des chaussées** - Sol de fondation et chaussée », *SN 640324*.
-
- [2] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2003), « **Enrobé bitumineux compactés** - Conception, exécution et exigences relatives aux couches en place », *SN 640430a*.
-
- [3] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2008), « **Enrobé bitumineux compactés** - Conception, exécution et exigences relatives aux couches en place », *SN 640430b*.
-
- [4] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2013), « **Enrobé bitumineux compactés** - Conception, exécution et exigences relatives aux couches en place », *SN 640430*.
-
- [5] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2008), « **Mélanges bitumineux** - Spécifications des matériaux – Partie 1 : Enrobés bitumineux », *SN 640431-1a-NA*.
-
- [6] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2008), « **Mélanges bitumineux** - Spécifications des matériaux – Partie 1 : Enrobés bitumineux », *SN 640431-1b-NA*.
-
- [7] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2013), « **Mélanges bitumineux** - Spécifications des matériaux – Partie 1 : Enrobés bitumineux », *SN 640431-1-NA*.
-
- [8] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2008), « **Exigences Mélanges bitumineux** - Spécifications des matériaux - Partie 5: Béton bitumineux grenu à forte teneur en mastic », *SN 640431-5a-NA*.
-
- [9] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2008), « **Exigences, y compris les couches de drainage Mélanges bitumineux** - Spécifications des matériaux - Partie 7 : Bétons bitumineux drainants », *SN 640431-7a-NA*.
-
- [10] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2013), « **Enrobés et couches de roulement semi-denses** - Spécifications, exigences, conception et exécution », *SN 640436*.
-
- [11] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2011), « **Caractéristiques de surface des chaussées** - Norme de base », *SN 640510a*.
-
- [12] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (1984), « **Qualité antidérapante** - appréciation », *SN 640511b*.
-
- [13] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2014), « **CVouches de fondation non liées** – Exécution et exigences relatives aux couches en place », *SN 640580*.
-
- [14] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2006), « **Compactage et portance** - Exigences », *SN 640585b*.
-
- [15] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2003) « **Gestion de l'entretien des chaussées (GEC)** – Relevé d'état et appréciation en valeur d'indice », *SN 640 925b*
-
- [16] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2006), « **Granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels utilisés dans la construction des chaussées, aérodromes et d'autres zones de circulation** », *SN 670103b-NA-F*.
-
- [17] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2010), « **Bitumes et liants bitumineux** – cadre de spécification des bitumes modifiées par des polymères », *SN 670210 b-NA*.
-
- [18] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2006), « **Enrobés bitumineux** - Détermination de la liaison entre les couches (selon Leutner) », *SN 670461*.
-
- [19] Norme Européenne (2007), « **Mélanges bitumineux** - Spécifications des matériaux - Partie 1 : enrobés bitumineux », *En 13108-1*.
-
- [20] Norme Européenne (2007), « **Mélanges bitumineux** - Spécifications des matériaux - béton bitumineux très minces », *En 13108-2*.
-

Documentation

-
- [21] Angst Ch., Beltzung F., Bosshardt D., Grolimund H.-J., Pestalozzi H., (2008), « **Revêtements de routes peu bruyants à l'intérieur des localités – Rapport final 2007** », *Rapport OFROU/OFEV*, Berne.
-
- [22] Assef-Vaziri A.-H., Pigois M.et al., (1984), « **Essai de compression diamétrale appliqué aux enrobés hydrocarbonés** », *LAVOC, EPFL*, Suisse.
-

- [23] Arnaud L., Chenevière Ph., Dumont A.-G., Junod A. (2000), « **Besoin en adhérence des revêtements de chaussées** », *Mandat de recherche VSS 2000/360*, Berne.
- [24] Bitume Québec, LUCREB, (2006), « **Les enrobés bitumineux : formulation, fabrication, mise en place** », *présentation*, Montréal.
- [25] Bueche N., Vanelstraete A. et al., (2006), « **Concept and design of selected innovations for interurban infrastructure** », *NR2C*
- [26] Bueche N. (2011) « **Evaluation des performances net des impacts des enrobés bitumineux tièdes** », *Thèse de doctorat, EPFL*
- [27] Centre de Recherches routières (1997), « **Code de bonne pratique pour la formulation des enrobés bitumineux** », *R 69/97*, Bruxelles.
- [28] C. de La Roche, J.-F. Corté, J.- C. Gramsammer, H. Odéon, L. Tiret, G. Caroff, (1994), « **Etude de la fatigue des enrobés bitumineux à l'aide du manège de fatigue du LCPC** », *Revue Générale des Routes et des Aéroports (RGRA) n°716*.
- [29] Di Benedetto H., Corté J.-F. (2004), « **Matériaux routiers bitumineux 2 : Constitution et propriétés thermo-mécaniques des mélanges** », *Hermes Science Publications - Lavoisier*, Paris.
- [30] Ferreira, P. N. (2006), « **Étude de l'application des revêtements routiers à chaud très minces au Brésil** », *Thèse de doctorat*, Sao Paulo.
- [31] Francken L., Vanelstraete A. (1997), « **PRADO : formulation des enrobés bitumineux** », *Centre de Recherches Routières*, Belgique.
- [32] Gourier O., (2009) « **Etude de détail de l'enrobé SMA en comparaison aux enrobés français** », *Projet de fin d'étude*, Strasbourg.
- [33] Junod A., Dumont A.-G., (2004) « **Unterhalt 2000 : Formulation et optimisation des formules d'enrobés** », *Mandat de recherche OFROU 2000/421-2, n°1143*, Berne.
- [34] LCPC, SETRA, (1994) « **Conception et Dimensionnement des Structures de Chaussées – Guide technique** » *Laboratoire central des ponts et chaussées - Service d'études techniques des routes et autoroutes, Ministère de l'équipement, des transports et du tourisme*, France.
- [35] Mehdi O.-H. (2004), « **Elaboration d'une méthode prédictive de l'orniérage des revêtements bitumineux** », *Rapport OFROU*, Berne.
- [36] Poulidakos L. D., Dumont A.-G. et al. (2006), « **Propriétés mécaniques des asphaltes poreux, recommandations pour la normalisation** », *Mandat de recherche OFROU 1999/280*, Berne.
- [37] Perret J., (2003), « **déformations des couches bitumineuses au passage d'une charge de trafic** », *Thèse de doctorat N°2786, EPFL*.
- [38] Perret J., Dumont A.-G., et al. (2001) « **Evaluation des performances de nouveaux matériaux de revêtement : 1ère partie : Enrobés à haut module** », *Mandat de recherche VSS 1996/035*, Berne.
- [39] Pittet M. (2005), « **Mise au point et application d'une formule d'enrobé MR 8 phono-absorbant au liant bitume-caoutchouc** », *Rapport LAVOC n°RAA1MRLC*, Lausanne.
- [40] Planète TP, « **Les enrobés très minces ou ultra minces pour couche de surface** ».
- [41] Rychen P., Pittet M., Dumont A.-G. (2013), « **Revêtements peu bruyants à l'intérieur des localités – EP1 : Formulation** », *Rapport OFROU/OFEV*, Berne.
- [42] Société de technologie Michelin (2001), « **Le pneu, l'adhérence** ».

Clôture du projet

 <p>Schweizerische Eidgenossenschaft Confédération suisse Confederazione Svizzera Confederaziun svizra</p>	<p>Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC Office fédéral des routes OFROU</p>
<p>RECHERCHE DANS LE DOMAINE ROUTIER DU DETEC Version du 09.10.2013</p> <p>Formulaire N° 3 : Clôture du projet</p>	
<p>établi / modifié le : 06.01.2016</p>	
<p>Données de base</p>	
<p>Projet N° : VSS 2009/502</p>	
<p>Titre du projet : Formulation et comportement des enrobés de surfaces macrorugueux</p>	
<p>Echéance effective : janvier 2016</p>	
<p>Textes :</p>	
<p>Résumé des résultats du projet :</p>	
<p>Dans cette recherche, trois structures de chaussée ont été analysées pour déterminer l'influence de teneurs en vides élevées sur les propriétés structurelles et fonctionnelles des enrobés macrorugueux.</p> <p>Avec l'apparition des enrobés semi-denses et le retour aux anciennes valeurs de teneurs en vides pour les enrobés macrorugueux, l'optimisation de la formulation se base sur une vérification des épreuves type de formulation utilisées et sur une étude de formulation réalisée pour les enrobés semi-denses.</p> <p>Les essais en vraie grandeur ont montré que la qualité antidérapante de ce type d'enrobé est conforme aux attentes. La susceptibilité à l'orniérage s'est révélée importante, dans les structures soumises à des températures élevées (+35°C).</p> <p>L'analyse structurelle montre que les déformations tant horizontales que verticales, au bas des couches bitumineuses, sont cohérentes avec les cas de charges, de températures et de vitesses de sollicitation. Cette analyse montre également que l'augmentation de la teneur en vides provoque la baisse du modules de rigidité (dans notre cas, d'environ 50% par rapport à un enrobé classique). Pour les champs composés d'une couche de base en EME et d'une couche de roulement en AC MR avec des teneurs en vides différentes, les déformations horizontales tendent vers les mêmes valeurs. L'analyse des déflexions montre que les teneurs en vides des différents enrobés macrorugueux ne jouent pas de rôle significatif.</p> <p>Sur la base des essais réalisés et à l'aide du logiciel Alizé, développé par le LCPC, plusieurs chaussées ont été modélisées afin d'analyser les déformations au bas des couches bitumineuses. Ceci a permis de déterminer le coefficient d'équivalence "a" pour les couches d'enrobé macrorugueux et de préconiser son maintien à 4 quel que soit la teneur en vides de celui-ci.</p>	
<p>Recherche dans le domaine routier du DETEC : Formulaire 3 Page 1 / 3</p>	



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports,
de l'énergie et de la communication DETEC
Office fédéral des routes OFROU

Atteinte des objectifs :

Les objectifs d'analyser le comportement fonctionnel et structurel des enrobés macrorugueux avec de fortes teneurs en vides sont atteints.

Une proposition pour le coefficient d'équivalence structurel "a" a été donnée.

Déductions et recommandations :

Pas de modifications de normes préconisées

Publications :

Chef/cheffe de projet :

Nom : Dumont

Prénom : André-gilles

Service, entreprise, institut : EPFL-LAVOC

Signature du chef/de la cheffe de projet :

RECHERCHE DANS LE DOMAINE ROUTIER DU DETEC

Formulaire N° 3 : Clôture du projet

Appréciation de la commission de suivi :

Evaluation :

Les enrobés mis en place pour les essais en vraie grandeur ont montré des teneurs en vide de 5% supérieures aux valeurs attendues. Ceci a cependant permis de mieux caractériser le comportement des enrobés macrorugueux, spécialement en ce qui concerne leur susceptibilité à l'orniérage en fonction de la teneur en vide. Le module de rigidité est également influencé négativement par une teneur en vide excessive. Suite à l'étude des propriétés structurelles, la recherche propose pour les AC MR de conserver le coefficient d'équivalence $a = 4.0$. La commission de suivi trouve cette proposition pertinente.

Mise en oeuvre :

La susceptibilité des enrobés macrorugueux à l'orniérage en fonction de leur teneur en vide est à mettre en exergue au niveau normatif.

Le coefficient d'équivalence des AC MR reste inchangé: $a = 4.0$.

Besoin supplémentaire en matière de recherche :

aucun

Influence sur les normes :

aucune

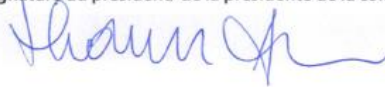
Président/Présidente de la commission de suivi :

Nom : Arn

Prénom : Thomas

Service, entreprise, institut : Lombardi SA Ingegneri Consulenti, Minusio

Signature du président/ de la présidente de la commission de suivi :



Index des rapports de recherche en matière de route

no. de rapport.	no. de projet	titre	année
1557	SVI 2010/001	Reklame im Strassenverkehr	2016
1555	SVI 2004/049	Sichere Schulwege – Gefahrenanalyse und Massnahmenplanung	2016
1554	VSS 2011/501	Evaluation des Frosttaumittelwiderstands von Beton – Vergleich von vier Prüfverfahren	2016
1551	VSS 2012/207	Akustische Installationen im Strassentunnel	2016
1550	VSS 2012/311	SERFOR: Voranalyse "Self Explaining and Forgiving Roads"	2016
1549	SVI 2011/015	Anforderungen an zukünftige Mobilitätshebungen	2016
1548	VSS 2010/404	Grundlagen für die Anforderungen an Schutzgeokunststoffe auf der Basis von neuen EN-Prüfmethoden	2016
1547	ASTRA 2011/012_OBF	Development of a self-healing asphalt road via induction heating	2015
1545	ASTRA 2011/013_OBF	Vergleich verschieden starker Asphalt-Belagsaufbauten: Ermittlung der Versagensgrenze eines T3-Normbelages mit der mobilen Grossversuchsanlage MLS10	2015
1544	VSS 2007/302	Rampenbewirtschaftung: Anforderungen an Regelungsverfahren	2015
1543	VSS 2012/402	Machbarkeitsstudie zur Reduktion von Feinstaub oder seiner Vorläufgase mittels spezieller Strassenbeläge	2015
1542	VSS 2011/713	Forschungspaket Nutzensteigerung für die Anwender des SIS: EP3: Transformationskonzepte zwischen Bezugssystemen	2015
1541	VSS 2010/301	Verkehrssicherheit zweistreifiger Kreisel	2015
1540	AGE 2013/001_ENG	TOSA - Transport par bus avec Optimisation du Système d'Alimentation	2015
1539	FGU 2010/007	Modelling of anhydritic swelling claystones	2015
1538	SVI 2011/021	Forschungspaket Verkehr der Zukunft (2060): Initialprojekt	2015
1537	FGU 2010/007	Geotechnischer Indexwert für die Beurteilung des Potentials zur Quarzstaubbelastung	2015
1536	VSS 2012/201	Wirkungskontrolle von Strassenprojekten	2015
1535	VSS 2012/403	Einfluss der Gesteinskörnung auf den Chloridwiderstand von Beton	2015
1534	VSS 2009/102	Forschungsbündel Erhebung verkehrsplanerischer Grundlagedaten: Teilprojekt 2: Methoden der Verkehrsbeobachtung	2015
1533	VSS 2009/101	Forschungsbündel Erhebung verkehrsplanerischer Grundlagedaten: Synthesebericht	2015
1532	VSS 2009/101	Forschungsbündel Erhebung verkehrsplanerischer Grundlagedaten: Teilprojekt 1: Systematik und Glossar	2015
1531	VSS 2011/906	Datenaustausch zwischen Strasseninformationssystemen und Verkehrsmodellen	2015
1530	VSS 2010/402	Einfluss biogener Öle auf die Ökobilanz von Strassenbaubindemittel	2015
1529	VSS 2005/404	Beschleunigte Alterungsmethode von heiss verarbeitbaren Fugenmassen zur Simulation des Einbaus	2015
1528	VSS 2011/308	Verkehrsablauf an ungesteuerten Knoten innerorts unter Berücksichtigung der verschiedenen Verkehrsarten; Ermittlung repräsentativer Richtwerte und Zusammenhänge	2015
1527	VSS 2006/510	Forschungspaket Brückenabdichtungen: Synthesebericht	2015
1526	VSS 2005/456	Paquet de recherche de recyclage des matériaux bitumineux de démolition des routes dans des enrobés à chaud : EP5: Formulation des enrobés avec matériaux recyclés	2015
1525	SVI 2004/058	Verträglichkeitskriterien für den Strassenraum innerorts	2015
1524	ASTRA 2012/003	Erarbeitung von Grundlagen zur Bemessung von Steinschlagschutzdämmen	2015
1523	VSS 2011/104	Monetarisierung des statistischen Lebens im Strassenverkehr	2015
1522	VSS 2011/106	Normierte gesamtverkehrliche Erschliessungsqualitäten - Grundlagenbericht	2015
1521	VSS 2006/514_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP4 - Zerstörungsfreie Prüfungen von Verbund und Oberflächen	2015

1520	ASTRA 2008/013_OBF	Nächtliche Immissionsprognosen von Strassenlärm (Hochleistungsstrassen)	2015
1519	VSS 2009/201	Lärmimmissionen bei Knoten und Kreiseln	2015
1518	SVI 2011/024	Langsamverkehrsfreundliche Lichtsignalanlagen	2015
1517	VSS 2011/103	Bemessungsverkehrsstärken: Ein neuer Ansatz	2015
1516	VSS 2011/711	Forschungspaket Nutzensteigerung für die Anwender des SIS: EP1: Zeitaspekte und Historisierung	2015
1515	SVI 2011/034	Längere Umsteigezeiten und Haltestellenaufenthaltszeiten - Auswirkungen und Massnahmen	2015
1514	VSS 2006/513_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP3 - Langzeitverhalten des Verbundes	2015
1513	VSS 2005/403	Fliesskoeffizienten von feinen Gesteinskörnungen aus der Schweiz	2015
1512	SVI 2004/069	Veloverkehr in den Agglomerationen - Einflussfaktoren, Massnahmen und Potenziale	2015
1511	VSS 2012/601	Die Physik zwischen Salz, Schnee und Reifen	2015
1510	VSS 2005/453	Forschungspaket Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut: EP2: Mehrfachrecycling von Strassenbelägen	2015
1509	ASTRA 2010/022	Markt- und Nutzermonitoring Elektromobilität (MANUEL)	2015
1508	VSS 2011/716	Forschungspaket Nutzensteigerung für die Anwender des SIS: EP6: Schnittstellen aus den Auswertungssystemen SIS (SIS-DWH)	2015
1507	FGU 2007/004	TBM Tunneling in Faulted and Folded Rocks	2015
1506	VSS 2006/512_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP2 - Flüssigkunststoff-Abdichtungen, Erfassen der Verbundproblematik	2015
1505	VSS 2006/509	Abdichtungssysteme und bitumenhaltige Schichten auf Betonbrücken - Initialprojekt	2014
1504	VSS 2005/504	Druckschwellversuch zur Beurteilung des Verformungsverhaltens von Belägen	2014
1503	VSS 2006/515_OBF	Research Package on Bridge Deck Waterproofing Systems: EP5-Mechanisms of Blister Formation	2014
1502	VSS 2010/502	Road – landside interaction : Applications	2014
1501	VSS 2011/705	Grundlagen zur Anwendung von Lebenszykluskosten im Erhaltungsmanagement von Strassenverkehrsanlagen	2014
1500	ASTRA 2010/007	SURPRICE (Sustainable mobility through road user charging) - Swiss contribution: Equity effects of congestion charges and intra-individual variation in preferences	2015
1499	ASTRA 2011/010	Stauprognoseverfahren und -systeme	2014
1498	VSS 2011/914	Coordinated Ramp Metering Control with Variable Speed Limits for Swiss Freeways	2014
1497	VSS 2009/705	Verfahren zur Bildung von homogenen Abschnitten der Strassenverkehrsanlage für das Erhaltungsmanagement Fahrbahnen	2014
1496	VSS 2010/601	Einfluss von Lärmschutzwänden auf das Raumnutzungsverhalten von Reptilien	2014
1495	VSS 2009/703	Zusammenhang Textur und Griffigkeit von Fahrbahnen und Einflüsse auf die Lärmemission	2014
1494	VSS 2010/704	Erhaltungsmanagement der Strassen - Erarbeiten der Grundlagen und Schadenkataloge zur systematischen Zustandserhebung und -bewertung von zusätzlichen Objekten der Strassen	2014
1493	VSS 2006/001	Neue Methoden zur Beurteilung der Tieftemperatureigenschaften von bitumenhaltigen Bindemitteln	2014
1492	SVI 2004/029	Kombiniertes Verkehrsmittel- und Routenwahlmodell	2014
1491	VSS 2007/704	Gesamtbewertung von Kunstbauten	2014
1490	FGU 2004/002	Langzeit-Beständigkeit von Tunnel-Abdichtungssystemen aus Kunststoffen (Best TASK)	2014
1489	VSS 2006/516_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP6 - Anschlüsse von Brückenabdichtungen	2014
1488	SVI 2007/020	Methodik zur Nutzenermittlung von Verkehrsdosierungen	2014
1487	SVI 2008/001	Erfahrungsbericht Forschungsbündel	2014
1486	SVI 2004/005	Partizipation in Verkehrsprojekten	2014
1485	VSS 2007/401	Anforderungen an Anschlussfugensysteme in Asphaltdecken - Teil 1: Praxiserfahrung	2014
1484	FGU 2010/003	Misestimating time of collision in the tunnel entrance due to a disturbed adaptation	2014

1483	VSS 2005/452	Forschungspaket Recycling von Ausbausphal in Heissmischgut: EP1: Optimaler Anteil an Ausbausphal	2014
1482	ASTRA 2010/018	SURPRICE: Sustainable mobility through road user charges Swiss contribution: Comprehensive road user charging (RUC)	2015
1481	VSS 2001/702	Application des méthodes de représentation aux données routières	2014
1480	ASTRA 2008/004	Prozess- und wirkungsorientiertes Management im betrieblichen Strassenunterhalt Modell eines siedlungsübergreifenden Unterhalts	2014
1479	ASTRA 2005/004	Entscheidungsgrundlagen & Empfehlungen für ein nachhaltiges Baustoffmanagement	2014
1478	VSS 2005/455	Research Package on Recycling of Reclaimed Asphalt in Hot Mixes - EP4: Evaluation of Durability	2014
1477	VSS 2008/503	Feldversuch mit verschiedenen Pflasterungen und Plattendecken	2014
1476	VSS 2011/202	Projet initial pour la conception multi-usagers des carrefours	2014
1475	VSS 1999/125	Ringversuch "Eindringtiefe eines ebenen Stempels, statische Prüfung an Gussasphalt"	2014
1474	VSS 2009/704	Wechselwirkung zwischen Aufgrabungen, Zustand und Alterungsverhalten im kommunalen Strassennetz-Entwicklung eines nachhaltigen Aufgrabungsmanagement	2014
1473	VSS 2011/401	Forschungspaket "POLIGRIP - Einfluss der Polierbarkeit von Gesteinskörnungen auf die Griffigkeit von Deckschichten - Initialprojekt"	2014
1472	SVI 2010/003	Einfluss der Verlässlichkeit der Verkehrssysteme auf das Verkehrsverhalten	2014
1471	ASTRA 2008/011	Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr Forschungspaket UVEK/ASTRA - Synthese	2014
1470	VSS 2011/907	Initialprojekt für ein Forschungspaket "Kooperative Systeme für Fahrzeug und Strasse"	2014
1469	VSS 2008/902	Untersuchungen zum Einsatz von Bewegungssensoren für fahrzeitbezogene Verkehrstelematik-Anwendungen	2014
1468	VSS 2010/503	Utilisation des géostructures énergétiques pour la régulation thermique et l'optimisation énergétique des infrastructures routières et ouvrages d'art	2014
1467	ASTRA 2010/021	Sekundärer Feinstaub vom Verkehr	2014
1466	VSS 2010/701	Grundlagen zur Revision der Normen über die visuelle Erhebung des Oberflächenzustands	2014
1465	ASTRA 2000/417	Erfahrungen mit der Sanierung und Erhaltung von Betonoberflächen	2014
1464	VSS 2002/403	Récupération de liants modifiés aux polymères issus d'échantillons d'enrobés	2014
1463	VSS 2006/511_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP1 – Standfester Gesamtaufbau, Prüfung und Bewertung	2014
1462	ASTRA 2011/004	Ermittlung der Versagensgrenze eines T2 Norm-Belages mit der mobiles Grossversuchsanlage MLS10	2014
1461	VSS 2001/506	Einfluss der Verdichtungstemperatur auf die Ergebnisse der Marshall-Prüfung und der Einbaukontrolle	2014
1460	SVI 2007/017	Nutzen der Verkehrsinformation für die Verkehrssicherheit	2014
1459	VSS 2002/501	Leichtes Fallgewichtsgesetz für die Verdichtungskontrolle von Foundationsschichten	2014
1458	VSS 2010/703	Umsetzung Erhaltungsmanagement für Strassen in Gemeinden - Arbeitshilfen als Anhang zur Norm 640 980	2014
1457	SVI 2012/006	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 5: Medizinische Folgen des Strassenunfallgeschehens	2014
1456	SVI 2012/005	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 4: Einflüsse des Wetters auf das Strassenunfallgeschehen	2014
1455	SVI 2012/004	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 3: Einflüsse von Fahrzeugeigenschaften auf das Strassenunfallgeschehen	2014
1454	SVI 2012/003	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 2: Einflüsse von Situation und Infrastruktur auf das Strassenunfallgeschehen: Phase 1	2014
1453	SVI 2012/002	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 1: Einflüsse von Mensch und Gesellschaft auf das Strassenunfallgeschehen: Phase 1	2014
1452	SVI 2012/001	Forschungspaket VeSPA: Synthesebericht Phase 1	2014
1451	FGU 2010/006	Gasanalytik zur frühzeitigen Branddetektion in Tunneln	2013
1450	VSS 2002/401	Kaltrecycling von Ausbausphal mit bituminösen Bindemitteln	2014

1449	ASTRA 2010/024	E-Scooter - Sozial- und naturwissenschaftliche Beiträge zur Förderung leichter Elektrofahrzeuge in der Schweiz	2013
1448	SVI 2009/008	Anforderungen der Güterlogistik an die Netzinfrastruktur und die langfristige Netzentwicklung in der Schweiz. Forschungspaket UVEK/ASTRA "Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz", Teilprojekt C	2014
1447	SVI 2009/005	Informationstechnologien in der zukünftigen Gütertransportwirtschaft Forschungspaket UVEK/ASTRA "Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz", Teilprojekt E	2013
1446	VSS 2005/454	Forschungspaket Recycling von Ausbausphal in Heissmischgut: EP3: Stofffluss- und Nachhaltigkeitsbeurteilung	2013
1445	VSS 2009/301	Öffnung der Busstreifen für weitere Verkehrsteilnehmende	2013
1444	VSS 2007/306	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von Anlagen des leichten Zweirad- und des Fussgängerverkehrs	2013
1443	VSS 2007/305	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit des strassengebundenen ÖV	2013
1442	SVI 2010/004	Messen des Nutzens von Massnahmen mit Auswirkungen auf den Langsamverkehr - Vorstudie	2013
1441_2	SVI 2009/010	Zielsystem im Güterverkehr. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz - Teilprojekt G	2013
1441_1	SVI 2009/010	Effizienzsteigerungspotenziale in der Transportwirtschaft durch integrierte Bewirtschaftungsinstrumente aus Sicht der Infrastrukturbetreiber Synthese der Teilprojekte B3, C, D, E und F des Forschungspakets Güterverkehr anhand eines Zielsystems für den Güterverkehr	2013
1440	SVI 2009/006	Benchmarking-Ansätze im Verkehrswesen	2013
1439	SVI 2009/002	Konzept zur effizienten Erfassung und Analyse der Güterverkehrsdaten Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz von Verkehrsmitteln im Güterverkehr der Schweiz TP A	2013
1438_2	SVI 2009/011	Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs - Teil 2. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP H	2013
1438_1	SVI 2009/011	Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs - Teil 1. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP H	2013
1437	VSS 2008/203	Trottoirüberfahrten und punktuelle Querungen ohne Vortritt für den Langsamverkehr	2013
1436	VSS 2010/401	Auswirkungen verschiedener Recyclinganteile in ungebundenen Gemischen	2013
1435	FGU 2008/007_OBF	Schadstoff- und Rauchkurzschlüsse bei Strassentunneln	2013
1434	VSS 2006/503	Performance Oriented Requirements for Bituminous Mixtures	2013
1433	ASTRA 2010/001	Güterverkehr mit Lieferwagen: Entwicklungen und Massnahmen Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B3	2013
1432	ASTRA 2007/011	Praxis-Kalibrierung der neuen mobilen Grossversuchsanlage MLS10 für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen in der Schweiz	2013
1431	ASTRA 2011/015	TeVeNOx - Testing of SCR-Systems on HD-Vehicles	2013
1430	ASTRA 2009/004	Impact des conditions météorologiques extrêmes sur la chaussée	2013
1429	SVI 2009/009	Einschätzungen der Infrastrukturnutzer zur Weiterentwicklung des Regulativs Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP F	2013
1428	SVI 2010/005	Branchenspezifische Logistikkonzepte und Güterverkehrsaufkommen sowie deren Trends Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B2	2013
1427	SVI 2006/002	Begegnungszonen - eine Werkschau mit Empfehlungen für die Realisierung	2013