



# **Paquet de recherche de recyclage des matériaux bitumineux de démolition des routes dans des enrobés à chaud : EP5 : Formulation des enrobés avec matériaux recyclés**

**Forschungspaket Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut : EP5 : Mischgutoptimierung von Recyclingbelägen**

**Research package on recycling of reclaimed asphalt in hot mixes : EP5 : Mix design optimization using recycled asphalt pavements**

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

**A.-G. Dumont, professeur EPF  
N. Bueche, Dr. ès. sc EPF  
M. Pittet, chef de laboratoire**

**Projet de recherche VSS 2005/456 sur demande de l'Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)**

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)



# **Paquet de recherche de recyclage des matériaux bitumineux de démolition des routes dans des enrobés à chaud : EP5 : Formulation des enrobés avec matériaux recyclés**

**Forschungspaket Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut : EP5 : Mischgutoptimierung von Recyclingbelägen**

**Research package on recycling of reclaimed asphalt in hot mixes : EP5 : Mix design optimization using recycled asphalt pavements**

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

**A.-G. Dumont, professeur EPF  
N. Bueche, Dr. ès. sc EPF  
M. Pittet, chef de laboratoire**

**Projet de recherche VSS 2005/456 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

Laboratoire des Voies de Circulation (LAVOC), EPFL

### Membres

Prof. A.-G. Dumont, EPFL-LAVOC

Dr. N. Bueche, EPFL-LAVOC

M. Pittet, EPFL-LAVOC

## Commission d'experts responsables

Commission d'experts FK4 : Matériaux

Commission d'experts FK5 : Construction et géotechnique

## Paquet de recherche (EP1, EP2, EP3, EP4, EP5)

### Président

Markus Caprez, ETH Zürich

### Président commission de suivi

Alex Nellen, Implenia Schweiz AG, Bern

### Membres

Thomas Arn, Lombardi SA, Minusio

Hans-Peter Beyeler, Office Fédéral des Routes OFROU, Ittigen

Andrea Bieder, Ammann Schweiz AG, Langenthal

Tony Bühler, Implenia Suisse SA, Satigny

Markus Grieder, Tiefbauamt Basel-Landschaft, Liestal

Martin Horat, Tiefbauamt Stadt Zürich, Zürich

Daniel Kästli, Kästli AG, Ostermündingen

## Commission de suivi EP5

### Président

Tony Bühler, Implenia Suisse SA, Satigny

### Membres

Thomas Arn, Lombardi SA, Minusio

Hans-Peter Beyeler, Office Fédéral des Routes OFROU, Ittigen

Andrea Bieder, Ammann Schweiz AG, Langenthal

Markus Grieder, Tiefbauamt Basel-Landschaft, Liestal

Martin Horat, Tiefbauamt Zürich, Zürich

Daniel Kästli, Kästli AG, Ostermündingen

Alex Nellen, Implenia Schweiz AG, Bern

## 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

<b>Impressum</b> .....	<b>4</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>7</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>9</b>
<b>Summary</b> .....	<b>11</b>
<b>1 Introduction</b> .....	<b>13</b>
1.1 Paquet de recherche .....	13
1.2 Contexte & objectifs du projet .....	13
1.3 Méthodologie .....	14
1.4 Conventions .....	14
<b>2 Mise à jour des connaissances</b> .....	<b>15</b>
2.1 Analyse de littérature .....	15
2.2 Bilan de la mise à jour des connaissances et besoins en terme de recherche .....	18
<b>3 Paramètres de base et essais de caractérisation</b> .....	<b>19</b>
3.1 Recette de référence .....	19
3.2 Exigences normatives .....	20
3.3 Essais de caractérisation .....	20
3.4 Essais sur liants .....	20
3.4.1 Essais sur granulats .....	24
3.4.2 Essais étendus sur fraisat et granulats d'apport .....	27
3.4.3 Homogénéité du fraisat .....	29
<b>4 Formulation analytique</b> .....	<b>33</b>
4.1 Méthode belge de formulation.....	33
4.2 Démarche de formulation .....	35
4.3 Paramètres et hypothèses de base .....	36
4.4 Discussion des résultats .....	39
4.4.1 Reconstitution de la recette de référence .....	40
4.4.2 Optimisation de la formulation.....	41
4.4.3 Analyse de sensibilité.....	45
4.5 Enseignements de la formulation analytique .....	46
<b>5 Etude en laboratoire</b> .....	<b>47</b>
5.1 Méthodologie en laboratoire.....	47
5.1.1 Adaptations du plan de recherche .....	49
5.2 Essais de caractérisation étendus .....	50
5.2.1 Résistance aux déformations permanentes.....	50
5.2.2 Préparation et fabrication des enrobés en laboratoire .....	53
5.3 Essais sur la recette de référence .....	53
5.3.1 Vue générale des essais.....	54
5.3.2 Analyses granulométriques et teneur en liant.....	55
5.3.3 Analyse du liant.....	56
5.3.4 Essais Marshall .....	57
5.3.5 Compactibilité des enrobés.....	60
5.3.6 Sensibilité à l'eau des mélanges.....	61
5.3.7 Rigidité des enrobés .....	63
5.3.8 Sensibilité à l'orniérage .....	64
5.3.9 Bilan des essais sur la formule de référence .....	67
5.4 Optimisation de la formulation.....	67
5.4.1 Résultats d'essais et analyse.....	68
5.5 Effet de la méthode de fabrication / réchauffage .....	71
5.5.1 Résultats d'essais et analyse.....	71

5.6	Validation sur un enrobé AC EME 22 C2 .....	74
<b>6</b>	<b>Conclusions et recommandations .....</b>	<b>79</b>
6.1	Bilan de la formulation .....	79
6.1.1	Paramètres affectant le comportement de l'enrobé .....	79
6.1.2	Contrôle et analyse des enrobés .....	80
6.1.3	Apport de la formulation analytique .....	81
6.2	Perspectives et besoins de recherche .....	81
6.3	Apport pour la normalisation .....	81
	<b>Annexes .....</b>	<b>83</b>
	<b>Glossaire .....</b>	<b>95</b>
	<b>Bibliographie .....</b>	<b>97</b>
	<b>Clôture du projet .....</b>	<b>99</b>
	<b>Index des rapports de recherche en matière de route .....</b>	<b>103</b>

## Résumé

La recherche EP-5 du paquet de recherches relatif au recyclage à chaud des enrobés bitumineux a pour objectif l'étude de la formulation de ces enrobés ainsi que la mise en évidence des paramètres déterminants en vue d'une optimisation de la recette. Des considérations relatives aux essais et mesures à réaliser sont également fournies.

De manière générale, les différentes investigations menées indiquent que, comparative-ment à un mélange à chaud ne contenant pas de fraisat d'enrobé (RAP), la formulation ne sera pas ou très peu affectée lorsque la teneur en RAP est faible (< 20%). Dans le cas de teneur en RAP plus élevée (>25%), l'analyse de la littérature et les résultats en laboratoire mettent en évidence la complexité de la formulation ainsi que les diverses incidences sur les caractéristiques et performances de l'enrobé.

Dans un premier temps, une formulation analytique a été réalisée avec la méthode développée par le CRR (Belgique). Ce type de formulation permet de diminuer sensiblement le nombre d'essais et mesures à réaliser en laboratoire et apporte des éléments importants en vue de la compréhension du comportement mécanique des enrobés. Des analyses de sensibilité peuvent également être menées. Les différents calculs réalisés sont consistants avec les essais ponctuels de contrôle en laboratoire. Les résultats permettent notamment de quantifier l'impact de la qualité des granulats sur le comportement mécanique et sur les caractéristiques volumétriques du mélange.

Suite à la formulation analytique, une large campagne d'essais en laboratoire a été réalisée afin d'identifier les essais et paramètres critiques pour la formulation des enrobés avec fraisat d'enrobé. Les essais ont principalement été réalisés sur un enrobé AC 11 S avec 40% de RAP ; une série limitée d'investigations étant menées sur un enrobé à module élevé (40% RAP). Les paramètres suivants ont été identifiés comme déterminants dans le cadre de la formulation de mélange contenant du fraisat d'enrobé :

- Homogénéité du fraisat d'enrobé : maîtrise du stock de RAP.
- Qualité du RAP (pourcentage de surfaces cassées, état des arêtes, pétrographie).
- Caractéristiques du bitume du RAP.
- Conditions de fabrication en centrale d'enrobage.
- Choix du liant d'apport.

Les différents essais et mesures réalisés ont également permis de proposer des recommandations en vue du contrôle et de l'analyse des enrobés contenant une forte teneur en fraisat d'enrobé. Il apparaît notamment que la réalisation d'essais d'orniérage et de sensibilité à l'eau sont des indicateurs pertinents mettant en évidence des différences de comportement entre les mélanges. Les résultats obtenus mettent également en évidence l'impact de la méthode de fabrication ainsi que du vieillissement des enrobés sur les caractéristiques et performances mesurées en laboratoire.

Les différentes considérations faites permettent d'envisager une mise à jour de la normalisation notamment au niveau des essais et mesures en fonction de la teneur en matériaux recyclés ; un contrôle adapté permettant d'augmenter la teneur en RAP tout en garantissant des performances satisfaisantes. Le choix de la teneur en RAP et les caractéristiques intrinsèques requises pour le fraisat doivent également être fixées en fonction de la couche et des sollicitations prévues de la chaussée. La nécessité d'harmonisation des méthodes de laboratoire (fabrication, vieillissement, réchauffage) a également été mise en évidence, permettant ainsi de mieux apprécier les épreuves types de formulation.





## Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit, Einzelprojekt 5 (EP5) des Forschungspakets „Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut“ ist die Mischgutoptimierung bei der Zugabe von Ausbauasphalt und das Ermitteln der massgebenden Parameter zur Verbesserung und Optimierung des Rezeptes. Die Beurteilung von zielführenden Versuchen und Messungen sind ebenfalls inhaltlicher Teil des EP5.

Allgemein konnte festgestellt werden, dass die verschiedenen Mischgutuntersuchungen wie sie aktuell für die Optimierung von Mischgut bei Verwendung von Primärmaterial ohne Recyclingmaterial (RAP) verwendet werden nur sehr gering oder überhaupt nicht von kleinen Anteilen an RAP (weniger als 20%) beeinflusst werden. Bei Mischungen mit mehr als ca. 25% RAP-Anteil zeigt die Analyse der wissenschaftlichen Literatur und die im Rahmen des vorliegenden Forschungsauftrages durchgeführten Untersuchungen eine recht hohe Komplexität verschiedener Parameter und deren Einfluss auf die Mischgutmerkmale und mechanischen Eigenschaften des Ausbauasphaltes.

Anfänglich wurden Untersuchungen mit der Methode der analytischen Rezeptierung nach der am CRR (Centre de Recherche Routier) in Belgien entwickelten Methode durchgeführt. Dieses Vorgehen mit der CRR-Methode, erlaubt eine erhebliche Reduktion von Laborversuchen und Messungen an Mischgutproben und fördert das Verständnis des mechanischen Verhaltens von Ausbauasphalt. In diesem Zusammenhang wurden auch Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Die verschiedenen analytischen Berechnungen wurden mit den im Labor gemessenen Prüfungsergebnissen kalibriert. Die Ergebnisse ermöglichen insbesondere, die Wirkung der Gesteinsqualität auf das mechanische Verhalten und auf die volumetrischen Charakteristiken der Mischung zu quantifizieren.

Folgend auf die analytischen Eignungsprüfungen wurde eine vertiefte Kampagne von Laborversuchen realisiert, um die Eigenheiten und die kritischen Parameter zur Rezeptierung von Asphaltmischgut mit verschiedenen Anteilen an Ausbauasphalt (RAP) zu erheben. Die Untersuchungen wurden an Proben mit vorwiegend 40% RAP Anteil in einem AC 11 S Mischgut durchgeführt. Eine begrenzte Anzahl Proben wurde mit 40% RAP Anteil mit einem Hochmodul-Asphaltbeton hergestellt und untersucht. Die Resultate zeigen, dass die nachstehend aufgeführten Parameter einen entscheidenden Einfluss auf die Eignungsprüfungen und den Anteil RAP ausüben:

- Homogenität des Ausbauasphaltes: Beherrschung des RAP-Stock
- RAP-Qualität (Prozentanteil der gebrochenen Oberfläche der Gesteine, Zustand der Gesteine, Kantigkeit, Gesteinskunde
- Eigenschaften der Bindemittel des Ausbauasphaltes
- Bedingungen der Fabrikation in der Asphaltanlage
- Wahl des Zusatzbindemittels

Die unterschiedlichen Versuche und Messungen haben ebenfalls ermöglicht, Empfehlungen für die Kontrolle und die Analyse der Asphaltmischgute mit einem hohen Ausbauasphalt Anteil vorzuschlagen. Es wurde auch festgestellt, dass die Durchführung von Spurbildungsversuchen und Versuche zur Wasserempfindlichkeit der Mischgutproben sachbezogene Indikatoren sind, welche die Verhaltensunterschiede zwischen den Mischungen anzeigen. Die erhobenen Ergebnisse zeigen ebenfalls den Einfluss der Herstellungsmethode sowie der Alterung des Asphaltmischgutes auf die im Labor gemessenen Merkmale und mechanischen Eigenschaften.

Die verschiedenen Betrachtungen ermöglichen Empfehlungen für die Aktualisierung der Normierung vorzuschlagen. Insbesondere zeigen die Untersuchungen die Möglichkeiten von Versuchen und Messungen zum Vorschlag von adaptierten Prüfungen für die mögliche Erhöhung des RAP Anteiles unter Beibehaltung des Verhaltens des Mischgutes. Die Wahl des RAP Anteiles und die erforderlichen intrinsischen Merkmale des verwendeten RAP Anteiles müssen in Abhängigkeit von der Schicht in welcher das Mischgut eingesetzt wird und den vorgesehenen Beanspruchungen bestimmt werden. Auf ein Harmonisierungsbedürfnis der Labormethoden (Produktion, Alterung, Vorwärmung) wurde auch hingewiesen. Dies ermöglicht die typischen Eignungsprüfungen besser zu bewerten.



## Summary

The specific project EP-5 of the research project dealing with hot recycling of bituminous asphalt mixtures aims at analyzing the mix design method as well as highlighting the major parameters governing a mix design optimization procedure. Some considerations related to the tests and measurements to be performed are also proposed.

In general, the various investigations performed indicate that, in comparison with a reference hot mix asphalt without reclaimed asphalt (RAP), the mix design will not (or very little) be affected when the RAP content is low (< 20%). In case of higher RAP content (> 25%), literature analysis and laboratory results both highlight the complexity of the mix design procedure as well as the various consequences on the final mixture characteristics and performances.

In a first phase, an analytical mix design has been performed by applying the method developed by BRRC (Belgium). This type of mix design allows decreasing the amount of testing and measurements in laboratory, and also brings some important elements for the comprehension of the mechanical behavior of asphalt mixtures. Besides, the method permits to perform some sensitivity analyses. The results of the calculations performed are consistent with the punctual laboratory testing carried out. The results permit in particular to quantify the impact of aggregates quality on the mixture mechanical behavior and on the volumetric characteristics.

In a second phase, an extensive laboratory study has been carried out, this in order to identify the tests methods and critical parameters governing the mix design of asphalt mixtures containing reclaimed asphalt. The laboratory tests have been mainly performed on an AC 11 S with 40% RAP; while some limited investigations have been carried out on a high modulus asphalt (40% RAP). Following parameters have been found important in the framework of a mix design of mixture containing RAP:

- RAP homogeneity: stock pile management.
- RAP quality (percentage of crushed and broken surfaces in coarse aggregate particles, edge sharpness, petrography).
- RAP bitumen characteristics.
- Mixture production conditions in plant.
- Choice of new binder.

The various tests and measurements performed also permitted to propose some recommendations for the control and analysis of asphalt mixtures containing a high RAP content. One can mention that rutting test and water sensitivity testing are pertinent indicators allowing identifying some differences in the mechanical behavior of the mixtures. The obtained results also highlight the impacts of the fabrication method and ageing on the characteristics and performances measured in laboratory.

The various observations finally permit to propose a standardization update, this especially for the tests and measurements in function of the reclaimed asphalt content. An optimized control procedure will permit to further increase the RAP content while maintaining satisfactory performances. The choice of the RAP content and the required intrinsic RAP characteristics should also be defined in function of the layer and foreseen solicitations. A need to harmonize the laboratory methods (fabrication, ageing, re-heating) has also been identified, this in order to better assess the various recipes and mix design results.



# 1 Introduction

## 1.1 Paquet de recherche

Le paquet de recherche « Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut » a pour objectif de fournir une évaluation globale du recyclage des enrobés bitumineux à chaud ceci afin de mettre en évidence les principaux enjeux et établir des recommandations permettant de favoriser leur utilisation à plus large échelle dans le cadre de construction des chaussées. Le paquet de recherche est composé de 5 projets menés de manière indépendante, mais avec certains éléments communs nécessitant une coordination suivie :

- EP1 (Responsable : M. Seeberger, Tecnotest) : Teneur optimale en matériaux recyclés (RAP).
- EP2 (Responsable : M. Hugener, EMPA) : Recyclage multiple des chaussées routières.
- EP3 (Responsable : S. Dünner, Walo Bertschinger) : Analyse des flux de substances et considérations relatives au développement durable.
- EP4 (Responsable : L. Poulidakos, EMPA) : Durabilité des enrobés bitumineux avec granulats d'enrobé.
- EP5 (Responsables : M. Pittet & N. Bueche, EPFL-LAVOC): Formulation des enrobés avec matériaux recyclés.

## 1.2 Contexte & objectifs du projet

La technique routière s'efforce de réutiliser au maximum les matériaux de recyclage provenant du fraisage des chaussées. Les raisons de la réutilisation des enrobés bitumineux sont diverses, mais cela permet notamment d'effectuer des économies substantielles de matière première (granulats et bitume). L'utilisation accrue de matériaux recyclés se veut également en adéquation avec les considérations actuelles relatives au développement durable et à l'utilisation de matériaux à faibles impacts énergétiques et écologiques.

Il est admis et vérifié que l'introduction d'un taux de matériaux de 10-15% n'influence que peu les caractéristiques et performances des mélanges ; les effets sur la durée de vie n'étant à ce jour pas quantifiables. La normalisation actuellement en vigueur (SN 640 431-1-NA) autorise une teneur en matériaux recyclés (introduction à chaud) allant jusqu'à 60% pour les couches de base (AC T) et 70% pour les couches de fondation (AC F), couches dont le rôle pour la résistance à la fatigue et à l'orniérage de la chaussée est important. Cette augmentation continue de la teneur en matériaux recyclés n'est pas sans conséquences sur les enrobés bitumineux et leurs performances. Cela a notamment été illustré dans le cadre du projet européen « New Roads Construction Concepts - NR2C » [1] où des chaussées à forte teneur en fraisat d'enrobé ont été testées en conditions contrôlées (halle fosse EPFL-LAVOC). Partant de ce constat, le projet de recherche EP5 « Formulation des enrobés bitumineux avec matériaux recyclés » a pour objectifs de:

- Mettre en évidence les paramètres dominants lors de la formulation d'un enrobé avec matériaux recyclés, et quantifier l'influence de ces paramètres sur les caractéristiques et performances de l'enrobé.
- Fournir les recommandations nécessaires pour la réalisation de la formulation d'un enrobé avec granulats d'enrobés recyclés.

Le projet doit donc notamment permettre de répondre aux questions suivantes :

- A partir de quelle quantité de fraisat une optimisation du mélange devient-elle nécessaire ?
- Comment prendre en compte l'homogénéité du fraisat ?
- Comment le type et les propriétés du liant d'apport doivent-ils être définis ?
- Quels sont les paramètres à prendre en compte pour le choix du minéral d'apport ?

- Avec quelle(s) méthode(s) en laboratoire, le mélange réalisé en centrale peut-il être simulé ?
- Est-ce que des essais supplémentaires à ceux de la norme EN 13108-20 sont nécessaires dans la cadre d'une forte teneur en fraisat ?
- Les paramètres d'essais donnés dans les normes sont-ils adaptés au cas de mélanges avec forte teneur en fraisat d'enrobé ?

Cette recherche n'a donc pas pour objet la détermination de la teneur maximale en matériau recyclés ; cet aspect étant traité dans le cadre de la recherche EP1.

## 1.3 Méthodologie

Une méthodologie bien définie a été proposée dans les documents d'appel d'offre du paquet de recherche, cette méthodologie définissant les types d'enrobés à évaluer en laboratoire, la teneur en fraisat, l'humidité du fraisat, les granulats et le bitume de référence. Certains essais de base ont également été définis dans les documents d'appel d'offre.

Le plan de recherche proposé est donc basé sur les documents d'appel d'offre et sa méthodologie. Pour la recherche relative à la formulation des enrobés avec matériaux recyclés nous pouvons identifier deux phases principales :

- Formulation analytique : Evaluation et application d'une méthode reconnue de formulation puis analyse de sa pertinence pour le cas de l'utilisation de matériaux recyclés. Cette phase est discutée au chapitre 1.
- Analyse en laboratoire : Réalisation d'essais étendus en laboratoire pour mise en évidence et quantification des paramètres déterminants dans le cadre d'une formulation d'enrobé avec matériaux recyclés. Cette phase est discutée au chapitre 5.

La méthodologie détaillée de chacune de ces deux phases sera décrite au début du chapitre concerné. Les éventuelles déviations ou adaptations par rapport au plan de recherche initial y sont également discutés.

## 1.4 Conventions

On comprendra sous la dénomination « matériau recyclé », « fraisat » ou « fraisat d'enrobé » des agrégats d'enrobé bitumineux ou RAP (reclaimed asphalt pavement).

Sauf mention spécifique, il est admis que le fraisat d'enrobé est inséré à chaud lors des différentes fabrications.

Il est également utile de rappeler que le projet de recherche se concentre sur la production d'enrobés à chaud, sans considérations relatives à leur utilisation dans le cadre de la production d'enrobés tièdes ou froids. Certaines considérations relatives aux enrobés tièdes peuvent être trouvées dans le cadre du projet VSS-OFROU « PLANET - Potentiel et Analyse des Enrobés Tièdes, 2011-2014 ».

Différentes sortes de granulats sont utilisés dans le cadre de cette recherche. De manière générale, nous utiliserons la nomenclature suivante :

- Granulats BERAG : granulats provenant de la société BERAG Rübigen AG dans la région de Berne (<http://www.beragrubigen.ch>)
- Granulats Bourgeoisie de Sion : granulats provenant de la « Gravière de la Bourgeoisie de Sion » (<http://www.graviere-bourgeoisiedesion.ch>)
- Granulats Famsa : granulats provenant de la carrière de Choëx – Massongex (<http://www.famsa.ch/>)
- Granulats Balmholz : granulats provenant de la carrière Ringgenberg en bordure du lac de Thoune (<http://www.balmholz.ch/>)

## 2 Mise à jour des connaissances

Une brève mise à jour des connaissances est proposée dans ce chapitre avec tout d'abord quelques éléments généraux relatifs à l'utilisation de matériaux recyclés, avant de concentrer l'analyse sur les recherches et projets relatifs à la formulation des enrobés avec fraisat d'enrobé (chap. 2.1).

Dans une deuxième phase (chap. 2.2), une synthèse est effectuée ainsi que des premières considérations relatives aux besoins en termes de recherche dans le domaine.

### 2.1 Analyse de littérature

De nombreuses recherches et projets traitant de l'ajout de fraisat d'enrobé dans les matériaux bitumineux peuvent être trouvées. Nous abordons ici, de manière non exhaustive, quelques publications et projets représentatifs.

Au début des années 2000, le projet européen PARAMIX (Road Pavement Rehabilitation Techniques Using Enhanced Asphalt Mixtures, 2001-2004) s'est intéressé au recyclage à chaud et à froid des enrobés, avec pour objectif d'optimiser les procédures de recyclage des enrobés tout en garantissant des performances élevées. Pour cela, de nombreux aspects ont été abordés, allant du fraisage de la chaussée à la construction de la nouvelle route. Un second projet européen appelé SAMARIS (Sustainable and Advanced Materials for Roads and Infrastructures, 2002-2006) et initié par le FEHRL (Forum of European Highway Research Laboratories) avait pour objectif principal d'encourager l'utilisation efficiente de matériaux recyclés dans les chaussées.

Plus récemment, les travaux [2] menés en 2013 par la RILEM (International union of laboratories and experts in construction materials, systems and structures) fournissent un état de l'art exhaustif sur la situation relative au recyclage à chaud des enrobés dans les différents pays européens. La mise en place d'une procédure de vieillissement en laboratoire des enrobés est également discutée dans ces travaux, ceci afin d'homogénéiser les différentes méthodes nationales et « produire » un fraisat d'enrobé le plus représentatif possible de la réalité.

Les résultats de la RILEM peuvent être complétés par les projets européens Re-Road (End of Life Strategies of Asphalt Pavements, 2009-2012) et Direct-MAT (Dismantling and recycling techniques for road materials – sharing knowledge and practices, 2009-2011) qui ont également contribué de manière substantielle à la recherche dans le domaine de l'utilisation de matériaux recyclés, et plus particulièrement l'utilisation de fraisat d'enrobé. On recommandera notamment les rapports [3] et [4].

Aux Etats-Unis, le rapport [5] de la Federal Highway Administration (FHWA), publié en 2011, fourni un état de l'art à l'attention des praticiens afin de favoriser l'utilisation de fraisat d'enrobé dans le pays. Cette recherche propose également des recommandations en vue d'augmenter la teneur en matériaux recyclés. Selon les auteurs du projet, les performances mécaniques et la durée de service d'une chaussée contenant jusqu'à 30% de fraisat d'enrobé sont similaires à celles d'une chaussée ne contenant pas de fraisat d'enrobé. Au-delà de cette teneur en RAP, la nécessité de mise en place d'un cadre pour la formulation, la production et le contrôle des enrobés est mise en évidence.

De nombreux auteurs traitent la formulation des enrobés bitumineux avec ajout de fraisat de manière empirique, par l'évaluation des performances et des caractéristiques de l'enrobé bitumineux produit. Nous pouvons par exemple mentionner les travaux suivants :

- Dans ses travaux, E. Haji [6] discute des performances *in situ* de sections construites avec fraisat d'enrobé. Les auteurs ont notamment réalisé des essais sur liant provenant du fraisat selon la méthodologie Superpave PG (performance grade) soit BBR (fluage en flexion à basse température) et DSR (rhéomètre à cisaillement dynamique)

avec différents taux de vieillissement. Pour la formulation, les recommandations du rapport de recherche NCHRP 9-12 [7] qui sera discuté plus loin ont été en partie appliquées.

- Dans [8], les auteurs présentent les résultats d'une étude expérimentale d'enrobés contenant respectivement 40% et 60% de RAP, utilisés dans le cadre de la réhabilitation d'une section du réseau autoroutier espagnol. Cette étude démontre qu'il est possible de produire des enrobés avec teneur élevée en fraisat, ceci tout en garantissant des performances satisfaisantes. Les auteurs mettent également en exergue le rôle déterminant de la maîtrise de l'homogénéité du fraisat.
- Les travaux de [9], réalisés en laboratoire, indiquent notamment que la production d'un enrobé avec RAP (10%, 30% et 50%) peut être réalisée tout en garantissant des performances globalement au moins équivalentes à celles du mélange de référence (sans RAP), ceci pour autant que la formulation soit optimisée.
- La recherche [10] propose des considérations relatives à l'analyse du liant récupéré de 28 différentes productions d'enrobé contenant jusqu'à 25% de fraisat. L'impact de la teneur en fraisat sur les caractéristiques et performances a été étudié par l'évaluation des caractéristiques PG (performance grade) du liant et l'établissement de la température critique. Ces observations ont notamment permis la mise à jour des exigences locales pour l'utilisation de matériaux recyclés dans le cadre de projets routiers.

Une optimisation de la formulation d'un enrobé contenant du fraisat requiert notamment une meilleure compréhension des mécanismes d'interaction entre les granulats d'apport et les granulats recyclés ; tout particulièrement l'interaction (mélange) entre le bitume d'apport et le bitume provenant du RAP. Cette problématique très complexe fait l'objet de différents travaux de recherches terminés ou en cours. Nous pouvons notamment mentionner une thèse de doctorat en cours au LAVOC (candidate : S. Bressi) dans laquelle la candidate s'intéresse à l'effet de l'hétérogénéité du RAP sur les caractéristiques et performances de l'enrobé.

Nous pouvons mettre en évidence les éléments ci-dessous qui apportent une contribution à la compréhension de l'interaction entre matériaux neufs (ou d'apport) et matériaux recyclés (RAP) :

- D'un point de vue normatif, les normes SN/EN ne proposent pas de prise en compte spécifique du fraisat d'enrobé dans la cadre d'une procédure de formulation. Aux Etats-Unis, la norme AASHTO M323 « Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design » contient des recommandations pour la formulation Superpave avec RAP. Cette norme propose entre autre un tableau contenant des recommandations pour le choix du liant d'apport, ceci en fonction de la teneur en RAP (3 catégories : < 15%, 15-25% et >25%).
- La recherche NCHRP 9-12 « Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method » [7], publiée en 2000 dans le cadre du NCHRP (National Cooperative Highway Research Program), TRB (Transportation Research Board) et NRC (National Research Council) contient les fondements de la prise en compte du fraisat d'enrobé dans une procédure de formulation Superpave. Les auteurs ont étudié trois aspects spécifiques : 1) « black rock effect » - détermination du mélange entre liant du fraisat et liant neuf 2) essais sur liant du fraisat d'enrobé incluant l'évaluation des méthodes d'extraction 3) analyse de l'effet de l'ajout de RAP sur les performances finales de l'enrobé. Une des conclusions principales de la recherche [7] est la mise en évidence de l'interaction entre liant neuf et ancien; le mélange réel entre les liants étant visiblement partiel. Ces résultats justifient le recours à des « diagrammes de mélange » appelés « blending chart » qui assistent dans la détermination de la teneur optimale en RAP ou le choix du liant d'apport. La recherche met également en évidence la présence d'une teneur minimale en fraisat d'enrobé (entre 10% et 20% selon la rigidité du liant du fraisat) en-deçà de laquelle l'effet sur les performances du mélange final est négligeable. Ce projet NCHRP 9-12 est fréquemment cité comme base de réflexion pour la formulation des enrobés avec matériaux recyclés.



- La procédure de choix du liant (classification PG), en fonction de la teneur en RAP est également reprise dans [11] qui rapporte que dans le cas d'une teneur en fraisat de plus de 25%, des diagrammes relatifs au mélanges doivent être utilisés. Relevons que les différents diagrammes de mélanges proposés sont des relations linéaires, ce qui est discuté par différents auteurs (*i.e.* comportement réel non linéaire).
- L'établissement de diagrammes de mélange permettant d'assister dans la formulation et ainsi choisir la teneur optimale en matériaux recyclés est également l'objet des travaux de [12]. La méthodologie développée est basée sur des essais de fluage en flexion à basse température (Bending Beam Rheometer BBR) réalisés sur des petits barreaux d'enrobés, permettant ainsi de déterminer par calcul inverse la rigidité du bitume.
- Une contribution intéressante est fournie par les travaux de L. El Bèze [13]. Les résultats indiquent que le mélange entre bitume vieilli et bitume neuf d'apport dans l'enrobé a lieu, mais pas de façon homogène. La loi des mélanges parfaits n'est donc pas respectée dans la réalité. Par conséquent, la méthode actuelle du diagramme des mélanges semble peu fiable dans la plupart des cas réels étudiés, même pour des faibles teneurs en granulats recyclés d'environ 15%.
- La problématique du mélange entre liant d'apport et liant provenant du fraisat d'enrobé a également été discutée en 2013 par [14] qui applique une procédure expérimentale permettant de déterminer le degré de diffusion du bitume entre liant neuf et ancien, tout en variant les paramètres de température et durée de contact (exposition). Des essais rhéologiques en laboratoire ont été menés et confrontés avec des calculs de diffusion issus de différents modèles provenant de la littérature.
- Les travaux de Shirodkar [15], publiés en 2010, s'intéressent également au degré de mélange entre les liants, proposant notamment une méthodologie de détermination du taux de mélange entre liant d'apport et liant du RAP.
- La recherche [16] décrit une méthode de calcul inverse permettant de déterminer la rigidité « effective » du liant ( $G^*$ ) d'un enrobé contenant du RAP, ceci sur la base de mesures de rigidité de l'enrobé ( $E^*$ ) et de divers modèles analytiques. Les données ainsi obtenues présentent un intérêt notamment dans le cadre de procédures de dimensionnement.
- Dans le cas de fortes teneurs en matériaux recyclés, il est probable que l'utilisation d'un agent réjuvenateur soit nécessaire, ceci afin de « remobiliser » le liant provenant du fraisat d'enrobé. Une étude très complète est proposée par Karlsson [17] qui a notamment appliqué des essais FTIR (spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier) ainsi que divers essais rhéologiques permettant d'évaluer le processus de diffusion de l'agent réjuvenateur. Les résultats ont montré que le processus de diffusion est principalement gouverné par les maltènes du bitume et que le taux de vieillissement du bitume n'a pas d'effet significatif sur le processus de diffusion.
- Les impacts de l'utilisation d'agents réjuvenateurs sur les performances d'un enrobé à chaud avec forte teneur en RAP (jusqu'à 50%) sont également discutés dans [18]. Les auteurs proposent entre autre des recommandations pour la détermination de la teneur optimale en agent réjuvenateur ; les résultats indiquant l'effet bénéfique de l'agent réjuvenateur sur la résistance à la fissuration, sans ceci affecter la sensibilité à l'eau et la résistance à l'orniérage.
- La recherche [19] propose également la mise en évidence de l'impact de l'utilisation d'agent réjuvenateur sur les performances du liant et de l'enrobé, permettant ainsi de déterminer la teneur optimale en réjuvenateur.
- Des considérations relatives à l'homogénéité du matériau et à la représentativité des procédures de laboratoire dans le cas d'utilisation de matériaux recyclés sont proposées dans les travaux de Nguyen [20]. L'auteur discute également la problématique du mélange des liants d'apport et liant provenant du fraisat d'enrobé.
- Ces aspects sont également abordés dans des précédents travaux menés au LAVOC [21] dans lesquels il est mis en évidence qu'après fabrication en laboratoire ou au poste d'enrobage, l'enrobé foisonné (conservé en cartons) vieilli de manière significative au cours des premiers mois. Cette étude sur la récupération des liants a mis en évidence cette problématique qui peut générer des situations de résultats divergents où les produits testés sont d'âge différent.

- Dans une perspective de « contrôle » de formulation, relevons finalement la méthode innovante de détection de la présence de RAP dans un enrobé décrite par Dave & Buttlar [22]. Cette méthode propose un passage progressif des granulats dans différents solvants, permettant ainsi d'identifier les éléments provenant de fraisat d'enrobé.

## 2.2 Bilan de la mise à jour des connaissances et besoins en terme de recherche

L'utilisation de fraisat d'enrobé dans un enrobé bitumineux est une technique largement répandue et ceci depuis de nombreuses années. Les multiples projets et recherches, terminés ou en cours, attestent cependant de la complexité du processus. De manière générale, les différents auteurs s'accordent sur le fait que dans le cas de faibles teneurs en matériaux recyclés (< ~20%), l'effet sur les caractéristiques et performances de l'enrobé sont négligeables comparativement à un mélange ne contenant pas de fraisat. Lorsque la teneur en fraisat d'enrobé est plus élevée, des études spécifiques de formulation sont alors requises, ceci afin d'ajuster le choix des différents composants et garantir des performances finales « au moins équivalentes » à celles d'un l'enrobé sans matériau recyclé.

Bien que largement pratiqué, le recyclage à chaud est une technologie particulière qui n'est pas encore totalement maîtrisée. Cela peut avoir pour conséquence une limitation de la teneur maximale en fraisat d'enrobé, un matériau aux performances non optimisées ou alors la production de mélanges aux performances mécaniques et caractéristiques non satisfaisantes. Les besoins en termes de recherche sont variés. Nous pouvons citer de manière non exhaustive :

- La compréhension du mélange réel entre liant d'apport et liant du fraisat fait l'objet de nombreuses recherches. Au-delà de la compréhension du phénomène, ces recherches doivent permettre d'évaluer les incidences sur la formulation et le dimensionnement de l'hypothèse actuelle qui considère un mélange total des liants. De plus, des diagrammes de mélanges doivent être élaborés en prenant en considération la non-linéarité du phénomène, ceci afin d'assister dans la procédure de formulation.
- Dans le cadre de teneur en fraisat « élevée », soit plus de 25% environ, la définition d'essais et mesures à réaliser pour le contrôle de la fourniture et de la pose est nécessaire. Ces éléments pourraient ensuite être intégrés dans la normalisation SN.
- L'homogénéité du fraisat est un paramètre déterminant. Son effet sur les performances et caractéristiques de l'enrobé doit être évalué, de même que les éventuelles incidences sur le dimensionnement de la chaussée. Ces aspects sont notamment abordés dans le cadre de travaux de thèse en cours au LAVOC.
- Mise en place d'un guide de bonne pratique pour l'utilisation de fraisat d'enrobé dans le cadre de la production suisse d'enrobés bitumineux avec matériaux recyclés.
- Représentativité des méthodes de production, conditionnement et compactage en laboratoire.

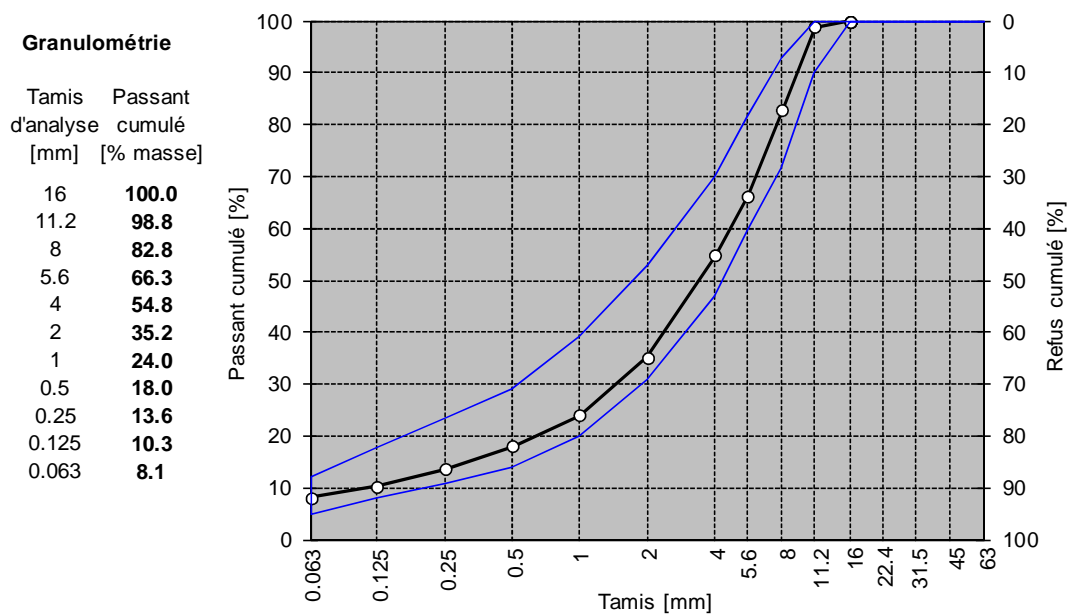
La présente recherche relative à la formulation des enrobés contenant des matériaux recyclés ne peut adresser de manière complète l'ensemble des points mentionnés ci-dessus. C'est pourquoi un certain nombre de paramètres ont été fixés, les résultats de la recherche devant être directement exploitables par les acteurs du domaine.

### 3 Paramètres de base et essais de caractérisation

Les différents paramètres de base discutés ici servent de référence pour la formulation analytique (chap. 1) ainsi que l'ensemble des essais réalisés en laboratoire (chap. 5).

#### 3.1 Recette de référence

La recette de référence de l'enrobé AC 11 S, 40% RAP est représentée dans la Fig. 1. Nous pouvons relever que la courbe se situe en milieu-bas de fuseau avec également une teneur en filler intermédiaire ce qui semble globalement cohérent. La teneur en liant cible est de 6.10% sur enrobé (6.50% sur granulats). Le module de richesse est de 3.9 ce qui est relativement élevé (rapport filler/bitume 1.25).



**Fig. 1** Recette de référence (AC 11 S, 40% RAP).

Cette recette de référence constitue donc la cible en termes de courbe granulométrique pour l'ensemble des fabrications qui seront réalisées en laboratoire. L'analyse d'un enrobé fabriqué en centrale d'enrobage est présentée dans le Tab. 1 où l'on peut observer une bonne adéquation avec la recette de référence (cible théorique) présentée ci-dessus.

**Tab. 1** Analyse de la recette cible (fab. centrale).

Teneur liant/E [%]	LAVOC	EMPA	TECNOTEST	BERAG
	5.87	6.10	5.87	5.87
<b>Module richesse</b>	3.75	-	3.75	3.75
<b>Granulométrie [passant %]</b>				
<b>16</b>	100.0	100.0	100	100
<b>11.2</b>	98.7	99.5	98.2	98.4
<b>8</b>	80.1	85.5	82.9	83.0
<b>4</b>	53.5	55.8	55.1	54.9
<b>2</b>	34.8	35.9	34.9	35.7
<b>1</b>	24.2	24.4	23.7	24.1
<b>0.063</b>	7.8	8.4	8.2	8.1

## 3.2 Exigences normatives

Bien que la recherche n'ait pas pour objet l'analyse systématique de la conformité à la normalisation, nous pouvons rappeler les exigences normatives suivantes pour les enrobés AC 11 S (SN 640 431-1b-NA, EN 13108-1 :2006) :

- Teneur en agrégats d'enrobés : 0%
- Teneur en vides Marshall : 3.0 ... 6.0 %vol.
- Sensibilité à l'eau ITSr :  $\geq 70\%$
- Teneur minimale en liant dosé :  $\geq 5.4\%$
- Valeurs Marshall (S&F): Pas d'exigences
- Résistance aux déformations permanentes :  $\leq 10.0\%$  (plaque 50 mm, 60°C, 10'000 cycles)

## 3.3 Essais de caractérisation

La réalisation des essais de caractérisation est une phase essentielle de tout projet de laboratoire, ceci car elle permet de définir les bases en vue de l'analyse des résultats d'essais réalisés ultérieurement sur l'enrobé bitumineux.

## 3.4 Essais sur liants

Le Tab. 2 contient les résultats de différentes analyses de liant avec d'une part les liants bruts et d'autre part les liants récupérés en centrale d'enrobage et vieilli ou non selon la méthode AASHTO (120 heures à 85 °C, simulant le vieillissement à court et long terme sur une durée de service de 15 ans). Nous pouvons ajouter que le point Fraass du liant modifié aux polymères est de -22 °C.

Concernant le liant récupéré de la fabrication en centrale, puis vieilli en laboratoire, il est probable que ce dernier ait subi un taux de vieillissement significatif, ceci en fonction de la date de fabrication. La représentativité de cet « état zéro » est donc à considérer avec précaution ; le vieillissement de l'enrobé foisonné étant important au cours de la première année suivant la fabrication [21].

**Tab. 2** Evaluation des liants.

	Pen 25°C [10 <sup>-1</sup> mm]	Temp. A&B [°C]	IP [-]
<b>Brut 160/220</b>	192	39.6	-0.4
<b>Brut 70/100</b>	74	48.1	-0.7
<b>PmB Styrelf C85</b>	74	54.1	0.8
<b>Récupéré fab. centrale</b>	52	52.2	-0.6
<b>Récupéré fab. centrale, vieilli</b>	50	53.2	-0.4

Les résultats de la mesure de viscosité (cône et plaque) sont consignés dans le Tab. 3. Les mesures sont globalement cohérentes, avec une augmentation de la viscosité en fonction du vieillissement du liant. Si l'on considère la température d'équiviscosité à  $2 \cdot 10^{-1}$  Pa·s (température d'enrobage), nous pouvons relever une température de 135 °C dans le cas du liant 160/220, cette température étant logiquement plus élevée pour le bitume 70/100 (150 °C) et les liants récupérés suite à la fabrication en centrale d'enrobage (153 °C, 154 °C). Le liant récupéré du fraizat possède une température d'équiviscosité sensiblement plus élevée (166 °C) en raison du vieillissement lors de sa « première vie ».

**Tab. 3** Viscosité dynamique des liants (cône et plaque Epprecht).

	Viscosité [10 <sup>-1</sup> Pa.s]				
	60 °C	90 °C	110 °C	130 °C	150 °C
<b>Base 160/220</b>	422	27.2	7.2	2.6	1.0
<b>Base 70/100</b>	1587	80.0	17.6	5.2	2.0
<b>PmB Styrelf C85*</b>	5079	188	40.6	13.1	5.7
<b>Récupéré fab. centrale</b>	2560	106	21.6	6.0	2.3
<b>Récupéré fab. centrale, vieilli</b>	3072	122	23.2	6.2	2.5
<b>Récupéré RAP 0/11</b>	-	320	51.2	13.6	4.2

\* : Mesures avec Rheomat.

Une analyse spécifique du liant récupéré du RAP 0/11 a également été menée, avec pour objectif d'évaluer l'incidence des paramètres de réchauffage sur le vieillissement du bitume. Les résultats sont consignés dans le Tab. 4 où :

- 1) Désenrobage à froid
- 2) Désenrobage à froid
- 3) Réchauffage au micro-onde et stabilisation 50 min en étuve à 160 °C
- 4) Réchauffage au micro-onde et stabilisation 50 min en étuve à 135 °C
- 5) Réchauffage 16 heures en étuve à 135 °C
- 6) Conservation 24 h à température ambiante puis 16 heures en étuve à 40 °C
- 7) Réchauffage 16 heures en étuve à 160 °C (liant carbonisé)

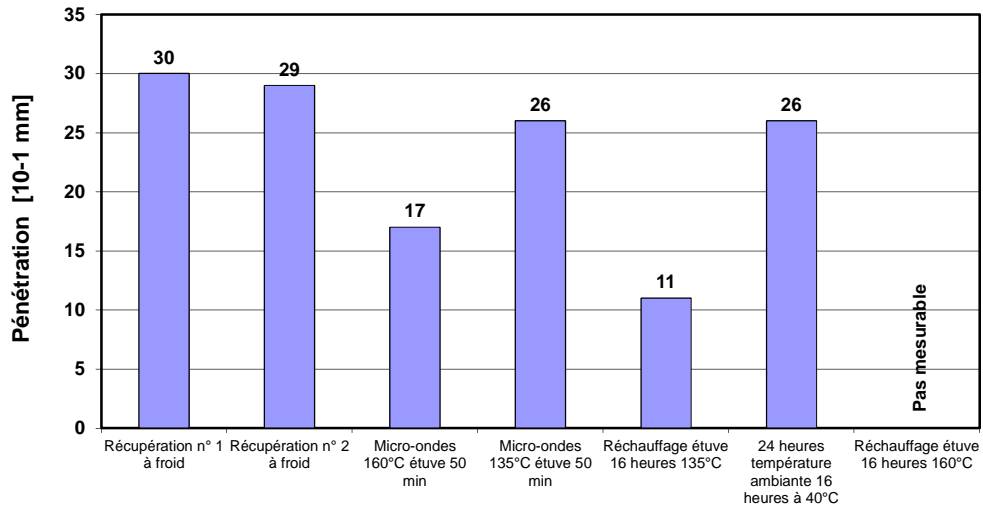
**Tab. 4** Evaluation du liant récupéré du RAP 0/11.

	Pen 25°C [10-1 mm]	Temp. A&B [°C]	IP [-]
Récupéré RAP 0/11, cas 1)	30	60.3	-0.1
Récupéré RAP 0/11, cas 2)	29	61.5	0.1
Récupéré RAP 0/11, cas 3)	17	76.8	1.5
Récupéré RAP 0/11, cas 4)	26	64.1	0.3
Récupéré RAP 0/11, cas 5)	11	97.6	3.1
Récupéré RAP 0/11, cas 6)	26	63.0	0.2
Récupéré RAP 0/11, cas 7)	-	-	-

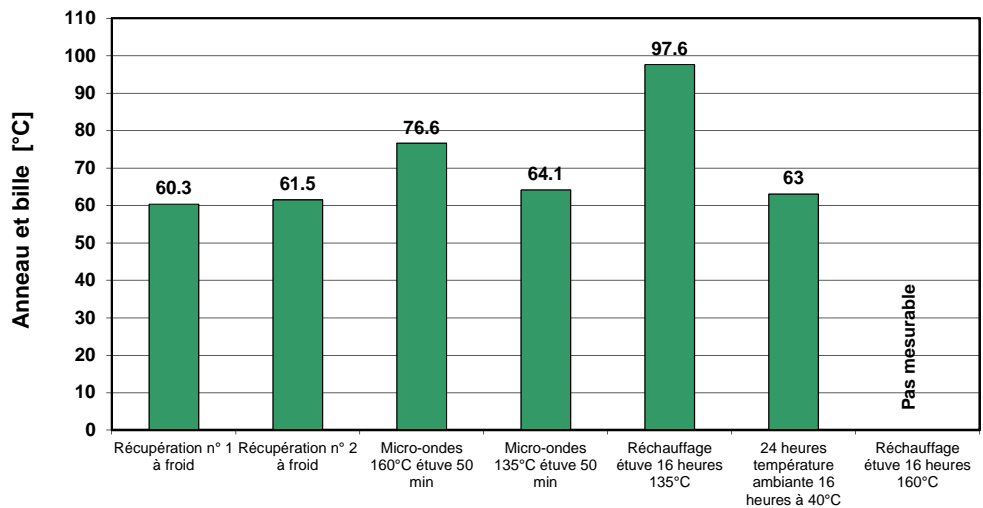
Les résultats ci-dessus mettent clairement en évidence l'effet du mode de préparation sur les caractéristiques du liant récupéré. Sans réchauffage, les caractéristiques du liant récupéré provenant du RAP montrent des valeurs moyennes de pénétration de  $30 \cdot 10^{-1}$  mm et un point de ramollissement anneau & bille de 60.9°C. Les résultats des deux essais sont homogènes.

La sensibilité du liant aux sollicitations thermiques a été testée au moyen de différentes méthodes comprenant un four traditionnel (étuve), un four à micro-ondes ainsi que différentes températures et durées de conditionnement :

- La durée de réchauffage au micro-onde dépend de la masse d'enrobé à réchauffer et de la puissance du four. Il faut compter environ 10 à 15 min. pour le réchauffage de 15 à 18 kg d'enrobé (four 3300 W).
- La stabilisation en étuve est réalisée à la température de fabrication +5 °C.
- Les résultats obtenus montrent la susceptibilité thermique du bitume contenu dans le RAP ainsi que la nécessité de maîtriser et d'harmoniser les conditions de fabrication de l'enrobé. Le réchauffage au micro-onde permet visiblement de diminuer le vieillissement du liant et ainsi se rapprocher des caractéristiques du liant récupéré selon un désenrobage à froid en sortie de poste.
- Un cas additionnel de conditionnement en étuve durant 16h à 160 °C a été testé. Le bitume est alors carbonisé en fin de conditionnement, ne permettant pas de réaliser les mesures.
- Ces résultats seront bien évidemment influencés par la composition chimique du bitume.
- Davantage de détails peuvent être trouvés dans le rapport de recherche relatif au vieillissement thermique des enrobés [21].



**Fig. 2** Caractéristique du liant récupéré (RAP 0/11) – Sensibilité selon l'histoire thermique (Pen).



**Fig. 3** Caractéristique du liant récupéré (RAP 0/11) – Sensibilité selon l'histoire thermique (A&B).

Une image du liant récupéré du fraisat 0/11 est également proposée dans la Fig. 4.



**Fig. 4** Photo du liant récupéré du RAP 0/11 réchauffé 16 h à 160°C.

Sur la base des résultats ci-dessus, nous pouvons également analyser la validité de la formule bi-logarithmique traditionnellement utilisée pour le calcul de la pénétration finale du liant (EN 13108-1 : 2006, Annexe A2) :

$$a \cdot \log(\text{pen}_1) + b \cdot \log(\text{pen}_2) = (a+b) \cdot \log(\text{pen}_{\text{mix}})$$

où

pen <sub>mix</sub>	valeur de pénétration calculée du mélange contenant des agrégats d'enrobé ;
pen <sub>1</sub>	valeur de pénétrabilité du liant récupéré à partir des agrégats d'enrobé ;
pen <sub>2</sub>	valeur de pénétrabilité du liant ajouté ;
a et b	proportion en masse du liant issu des agrégats d'enrobés (a) et du liant ajouté (b) dans le mélange ; a+b=1.

Sur la base des mesures effectuées, il vient les calculs consignés dans le Tab. 5. Les valeurs de pénétration mesurées (74 et 43 10<sup>-1</sup> mm) sur le liant récupéré sont sans stabilisation en étuve. La différence entre les valeurs mesurées et calculées est donc de 28% (liant 160/220) et 23% (liant 70/100) pour les deux cas analysés. De plus amples investigations seraient nécessaires afin d'évaluer l'applicabilité de cette relation dans le cas de taux de recyclés plus importants notamment.

**Tab. 5** Evaluation de la pénétration du liant final.

RAP		Liant apport			Pen 25°C [10-1 mm]	
Teneur [%]	Pen 25°C [10-1 mm]	Type	Teneur [%]	Pen 25°C [10-1 mm]	Mesurée	Calculée
40	30	160/220	60	192	74	95
40	30	70/100	60	74	43	53

Nous pouvons encore relever que la norme SN 670 202-NA, EN 12591 :2009 indique les valeurs résiduelles de pénétration d'un liant récupéré après vieillissement RTFOT (simulation du durcissement après malaxage en centrale).

### 3.4.1 Essais sur granulats

La seconde partie des essais de caractérisation concerne les granulats d'apport et le fraisat. Ces informations sont utiles afin de vérifier la conformité des différentes fractions, mais aussi pour la réalisation de calculs analytiques de formulation.

Pour les différentes fractions granulaires BERAG, une analyse granulométrique ainsi que détermination de la masse volumique (SN 670 903-6, EN 1097-6 :2000) ont été menées. Cela concerne les fractions suivantes :

- Filler (63 microns)
- Sable 0/2 et 2/4
- Granulats 4/8, 8/11, 11/16 et 16/22
- Fraisat 0/11

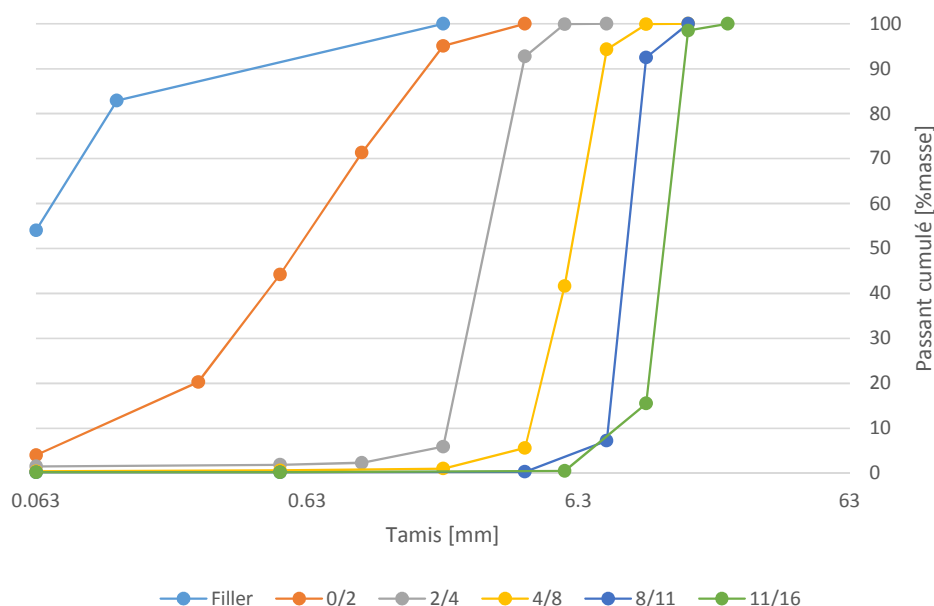
Nous proposons ici une synthèse ; les résultats détaillés étant disponibles en Annexe au rapport. La masse volumique du filler est déterminée avec du toluène comme solvant (SN EN 670 903-7a, EN 1097-7).



**Tab. 6** Masse volumique des fractions granulaires (BERAG).

	MVR [Mg/m <sup>3</sup> ]
Filler	2.670
Sable 0/2	2.65
Sable 2/4	2.70
Granulats 4/8	2.71
Granulats 8/11	2.70
Granulats 11/16	2.70
Granulats 16/22	2.69
RAP 0/11	2.474

L'analyse granulométrique consiste en la moyenne de 2 ou 3 essais, ceci selon la fraction granulométrique concernée.



**Fig. 5** Analyse granulométrique des fractions BERAG.

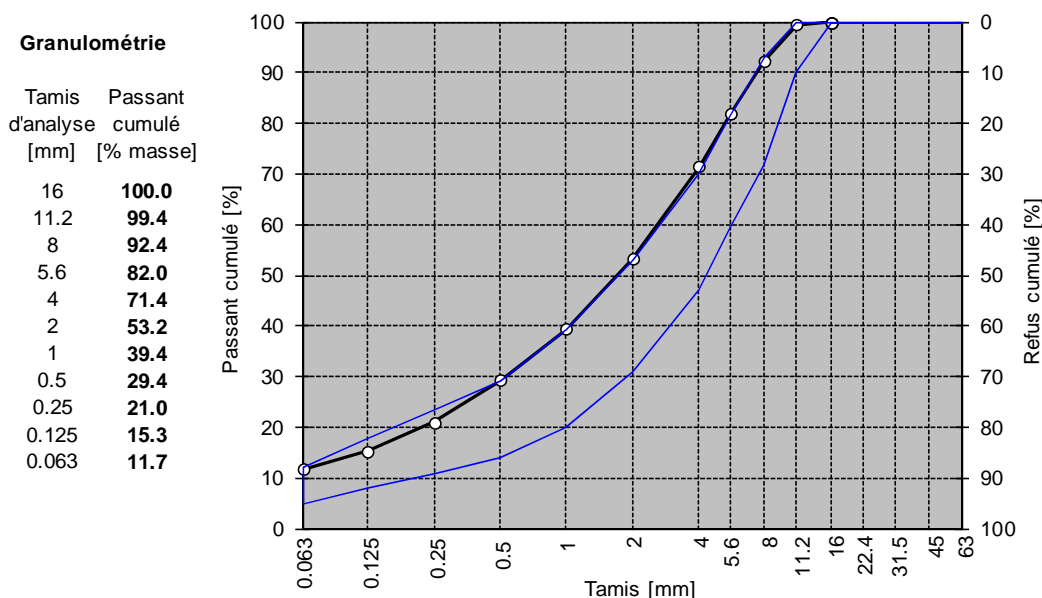
Des nouvelles fractions de sables ont dû être commandées en cours de recherche. Avant poursuite des essais, la conformité de ces fractions à l'analyse granulométrique réalisée en début de projet a été vérifiée.

L'analyse des autres granulats d'apport soit Bourgeoise de Sion, Famsa et Balmholz sont disponibles en annexe au présent rapport.

Des essais additionnels ont également été réalisés sur le filler. Les résultats sont les suivants :

- Essai bille-anneau (SN 670 906-1, EN 13179-1)
  - Proportion filler/bitume [% vol.] : 37.5 / 62.5
  - Delta A&B : 11.6 °C
- Porosité du filler sec compacté (SN 670 903-4a, EN 1097-6) : 30%

Une analyse spécifique du fraisat (0/11) a également été menée. La Fig. 6 représente la granulométrie du fraisat 0/11 (moyenne de deux essais). La teneur en liant sur enrobé est de 5.70% (6.04% sur granulat) et le module de richesse du fraisat est de 3.37. L'importante teneur en filler du fraisat peut être mise en évidence, ce qui n'est pas sans incidence sur les futures performances mécaniques de l'enrobé. Etant donné le rôle important du fraisat d'enrobé dans le comportement mécanique du mélange final, des analyses complémentaires du fraisat ont été nécessaires. Ces résultats seront discutés au chapitre 5.2.



**Fig. 6** Analyse granulométrique du RAP 0/11.

Nous pouvons encore relever qu'une différence significative existe entre le fraisat 0/11 désenrobé au toluène et tamisé, et le fraisat 0/11 tamisé à sec et par voie humide. Cette différence, représentée dans la Fig. 7, illustre la problématique liée à la surface spécifique accessible du RAP et donc de l'épaisseur du film de liant (surface accessible). Nous pouvons effectuer les commentaires suivants :

- Le RAP contient environ 11.7% de filler (< 0.063 mm) selon la détermination par extraction au toluène. Une analyse granulométrique du RAP tamisé à sec et par voie humide (donc avec liant) indique que la teneur en filler brut enrobée de liant est inférieure à 1%.
- Dans le cas du RAP, le filler est constitué en agglomérat ce qui réduit fortement la surface spécifique et l'accessibilité à une bonne répartition du nouveau bitume. Cela a pour conséquence une épaisseur de film de liant significativement plus élevée que ce qui a été prévu théoriquement. L'énergie développée lors du malaxage doit certainement augmenter cette surface spécifique accessible. La problématique de la surface spécifique accessible, du filler du RAP, est directement liée à la teneur en RAP et génère une faible incidence pour des teneurs en RAP faibles et une forte incidence pour des teneurs en RAP élevées.
- L'effet de la surface spécifique accessible sur les mélanges peut être significatif par exemple dans le cas de modules de richesse théoriques semblables, mais avec des épaisseurs de film de liant réelles différentes ce qui aura pour conséquences des performances mécaniques probablement différentes.
- Pour une teneur en RAP de 40%, avec 6.1% de liant total, le module de richesse théorique de l'enrobé AC 11 est de 3.9 avec une teneur en filler "accessible" de 8.1%. Dans le cas de RAP à faible teneur en liant et de recette d'enrobé à teneur en liant élevée, il est probable que le mélange final ne soit pas totalement homogène (épaisseur du film de liant différente entre RAP et granulats neufs), avec probablement des conséquences sur le comportement mécanique due à cette hétérogénéité).

La problématique de la surface réellement accessible du RAP est cependant une thématique complexe qui occupe aujourd'hui encore de nombreux chercheurs. Davantage d'investigations seraient donc nécessaires afin de traiter ce sujet de manière exhaustive.

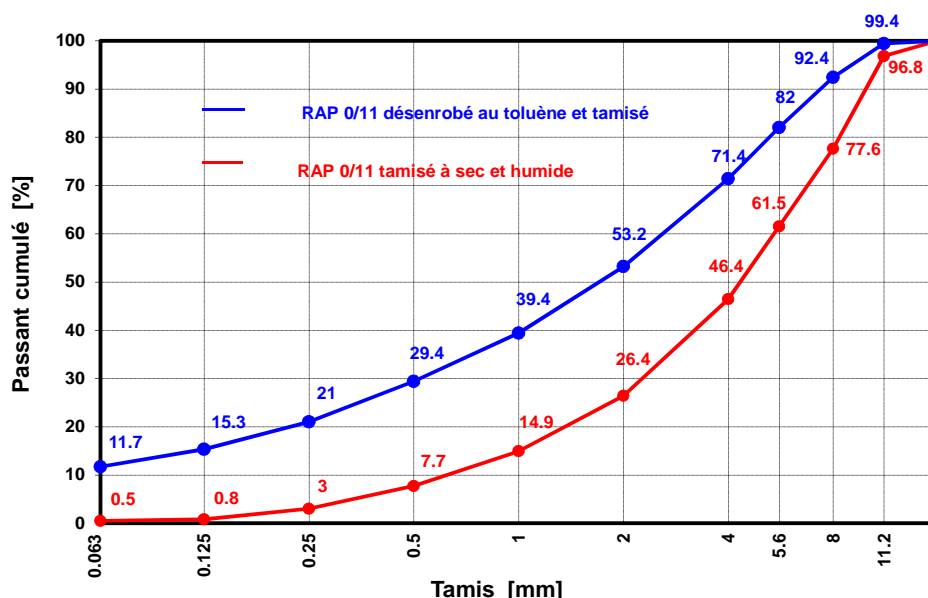


Fig. 7 Granulométrie « théorique et réelle » du RAP 0/11.

### 3.4.2 Essais étendus sur fraisat et granulats d'apport

Les premiers essais de caractérisation et analyses d'enrobés ainsi que l'expérience acquise dans le cadre de différents projets ont mis en évidence le rôle important joué par les caractéristiques intrinsèques des granulats, et tout particulièrement le fraisat d'enrobé. Pour cette raison, une série d'essais complémentaires ont été réalisés au LA-VOC.

Les essais complémentaires suivants ont été menés sur le fraisat d'enrobé et les granulats d'apport BERAG :

- RAP 0/11 et 11/22 : Pourcentage de surfaces cassées selon SN 670 103b-NA, EN 13043:2002.
- Sable (0.063/2 et 0.063/4) et gravillons 4/11 des granulats d'apport et du RAP : Essai d'écoulement selon SN 670 902-64, EN 933-6.

Les résultats sont consignés dans le Tab. 7 (RAP 0/11) et le Tab. 8 (RAP 11/22). Rappelons que dans le cadre de cette recherche, seul le RAP 0/11 est utilisé, à l'exception de l'étude menée sur l'enrobé à module élevé EME 22 (chap. 5.6) qui requiert également la fraction 11/22..

Les fraisats utilisés satisfont aux normes suisses. Il est utile de mettre en évidence que la normalisation suisse est relativement peu exigeante au sujet de la qualité des granulats recyclés. Elle autorise en effet une part élevée de granulats roulés. Les exigences normatives pour couche de roulement AC (SN 640 431-8A-NA) concernent uniquement les enrobés de type N et L, avec une catégorie de  $C_{50/10}$  pour les grains  $\geq 4$  mm. L'applicabilité de tel granulats, tel que défini dans ce projet, au cas d'enrobés AC de type S (fortement sollicité) avec un taux élevé de RAP est discutable (et non normalisé). Il est probable que l'utilisation de granulats avec une proportion relativement élevée en granulats roulés génère, dans certains cas, une certaine susceptibilité accrue aux déformations permanentes.

Il est par conséquent important de prêter attention à la qualité des granulats RAP, ceci tout particulièrement dans le cas d'utilisation pour des couches nobles comme une couche de roulement AC 11 S.

**Tab. 7** Pourcentage de surfaces cassées dans le RAP 0/11.

Classe granulaire d/D	Entièrement concassés	Semi concassés	Semi concassés y.c. entièrement concassés	Semi roulés	Entièrement roulés	Semi roulés y.c. entièrement roulés	Catégorie selon SN 670 103b-NA
[mm]	tc [%]	c [%]	tc+c [%]	r [%]	tr [%]	r+tr [%]	
8/11	42.5	30.5	73.0	14.3	12.7	27.0	C50/30
4/8	61.6	16.9	78.5	14.0	7.5	21.5	C70/10

**Tab. 8** Pourcentage de surfaces cassées dans le RAP 11/22.

Classe granulaire d/D	Entièrement concassés	Semi concassés	Semi concassés y.c. entièrement concassés	Semi roulés	Entièrement roulés	Semi roulés y.c. entièrement roulés	Catégorie selon SN 670 103b-NA
[mm]	tc [%]	c [%]	tc+c [%]	r [%]	tr [%]	r+tr [%]	
16/22	36.5	29.0	65.5	28.9	5.6	34.5	C50/10
11/16	45.5	30.8	76.3	15.8	7.9	23.7	C70/10
8/11	62.8	26.0	88.8	8.5	2.7	11.2	C70/10
4/8	78.2	9.8	88.0	4.0	8.0	12.0	C70/10

**Tab. 9** Pourcentage de surfaces cassées dans les granulats BERAG.

Classe granulaire d/D	Entièrement concassés	Semi concassés	Semi concassés y.c. entièrement concassés	Semi roulés	Entièrement roulés	Semi roulés y.c. entièrement roulés	Catégorie selon SN 670 103b-NA
[mm]	tc [%]	c [%]	tc+c [%]	r [%]	tr [%]	r+tr [%]	
16/22	42.3	45.9	88.2	11.9	0	11.9	C70/10
11/16	56.5	38.0	94.5	5.5	0	5.5	C90/1
8/11	85.2	14.0	99.2	0.8	0	0.8	C90/1
4/8	96.4	3.6	100.0	0	0	0	C90/1

Les granulats BERAG sont conformes à la normalisation SN actuelle. Il est utile de mentionner que la normalisation actuelle (SN 670 710, SN 670 130) ne considère plus les aspects relatifs à la qualité des arêtes produites ou à la pétrographie des granulats. Dans le cas du matériau d'apport utilisé pour cette recherche (BERAG), nous pouvons constater une quantité importante d'arêtes émoussées ainsi que de grains à la microrugosité insuffisante. Ces caractéristiques peuvent générer un comportement proche de celui de matériaux roulés. Les normes actuelles présentent certains « manques » à cet égard. Les résultats de compactibilité à la presse à cisaillement giratoire et de résistance à l'orniérage qui seront discutés plus loin mettent bien en évidence l'effet de ces paramètres sur le comportant mécanique de l'enrobé.

Les résultats de détermination du coefficient d'écoulement sont indiqués dans le Tab. 10. Chaque valeur de coefficient d'écoulement  $E_s$  est la moyenne de 5 essais. Pour les gravillons 4/11, la courbe reconstituée correspond à celle de la recette de référence (AC

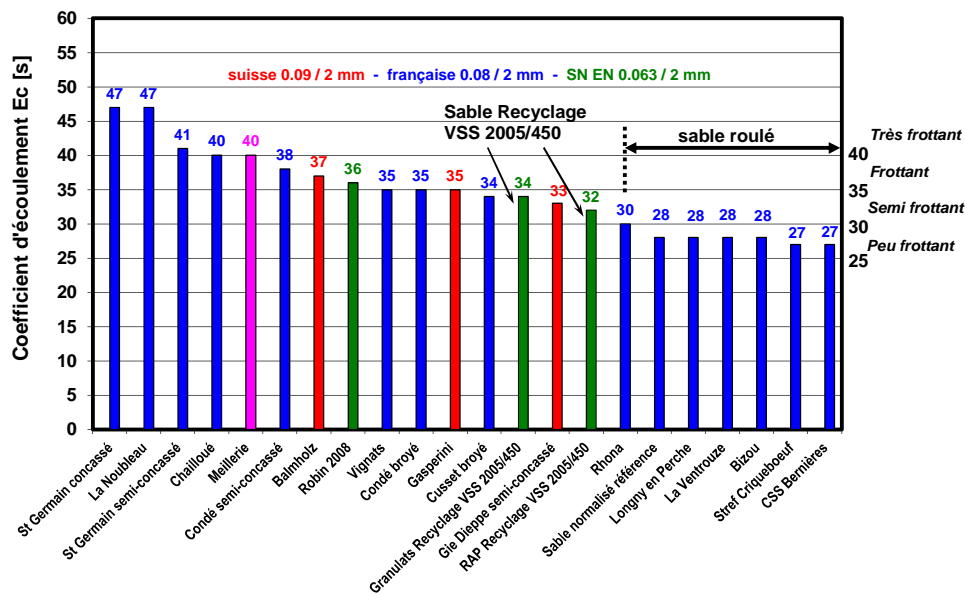
11 S, 40% RAP) soit 57.1% de granulats 4/8 et 42.9% de granulats 8/11. Le sable 0.063/4 est également une fraction reconstituée selon une proportion 59%/41%.

Les normes ne spécifient aucune exigence concernant l'essai d'écoulement et les résultats sont *a priori* relatifs. Les résultats obtenus pour l'essai d'écoulement ont donc été évalués sur la base de l'expérience acquise avec d'autres granulats /origines pétrographiques. Ceci est illustré dans la Fig. 8 pour le sable 0.063/2. Les matériaux testés ont des propriétés de type semi-frottant ce qui traduit des performances moyennes à faibles. Pour les deux essais réalisés, le fraisat d'enrobé montre un comportement moins bon que celui des granulats d'apport. Les résultats sont du même ordre que ceux obtenus dans le cadre du projet VSS 0/94 "Influence de la forme des granulats sur les caractéristiques d'un béton bitumineux", avec un écart comparable à celui obtenu avec des matériaux élaborés avec un concasseur à marteau (peu sensible à l'orniérage) et un concasseur à sole tournante (très sensible à l'orniérage). Le sable provenant du RAP a un comportement proche de celui généré par le sable roulé de Rhona.

Ces différents résultats (pourcentage de surface cassée, coefficient d'écoulement) semblent confirmer l'augmentation de la sensibilité aux déformations permanentes liée à la qualité du RAP.

**Tab. 10** Essais d'écoulement sur RAP et granulats.

	Granulats d'apport Temps d'écoulement [s]	Granulats RAP désenrobés Temps d'écoulement [s]
Sable 0.063/2 mm	34	32
Sable 0.063/4 mm	18	16
Gravillons 4/11 mm	112	108



**Fig. 8** Evaluation de l'essai d'écoulement pour différents sables (ouverture diaphragme Ø=12 mm).

### 3.4.3 Homogénéité du fraisat

Les caractéristiques et l'homogénéité du fraisat jouent un rôle très important sur les performances mécaniques de l'enrobé. Afin de mieux évaluer cet aspect, quelques investigations ont été menées dans le cadre des essais 2013 de l'association Robin (association suisse des laboratoires accrédités d'essais des matériaux pour la construction rou-

tière). Chaque laboratoire partenaire a reçu et analysé un échantillon de fraisat BERAG utilisé dans cette recherche.

Les résultats d'analyse de la teneur en liant du RAP sont indiqués dans la Fig. 9. La teneur en liant (SN 670 401 EN 12697-1) peut être, selon les laboratoires, déterminée au trichloréthylène (chaud ou froid), au toluène (chaud ou froid) ou au perchloréthylène (chaud ou froid). Pour l'échantillon concerné, la teneur en liant moyenne est de 5.11%. Les valeurs à plus ou moins un écart-type se situent à 5.41% et respectivement 4.81%. Il faut par ailleurs considérer le fait que les résultats d'essais ci-dessous comprennent également le biais lié à la reproductibilité de la mesure. Dans le cas de la mesure de teneur en liant, la norme EN 12697-1 reporte une reproductibilité située entre 0.3 et 0.5% environ, ceci selon la méthode utilisée. Les différents résultats ci-dessous peuvent donc être jugés comme comparables ; les échantillons sont homogènes pour ce qui concerne leur teneur en liant.

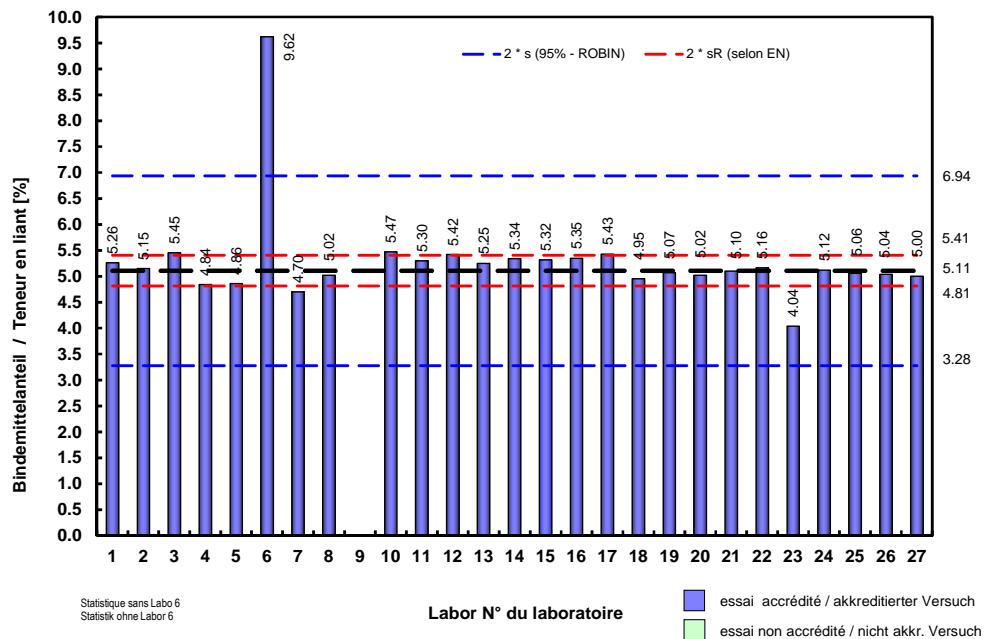


Fig. 9 Analyse de la teneur en liant sur RAP 0/11.

La Fig. 10 illustre la teneur en filler des différents échantillons de RAP 0/11. La valeur moyenne est de 11.15%, avec un intervalle à plus ou moins un écart-type allant de 9.94% à 12.35%. Nous pouvons observer une variabilité sensiblement plus élevée que dans le cas de la teneur en liant. La norme EN 12697-2 :2002 indique un écart-type en reproductibilité de 0.6%. Nous pouvons donc supposer que le fraisat d'enrobé est davantage variable du point de vue de sa teneur en filler. La teneur en filler du fraisat, et principalement sa part mobilisable lors de la fabrication d'un enrobé auront une incidence importante sur les performances finales de l'enrobé.

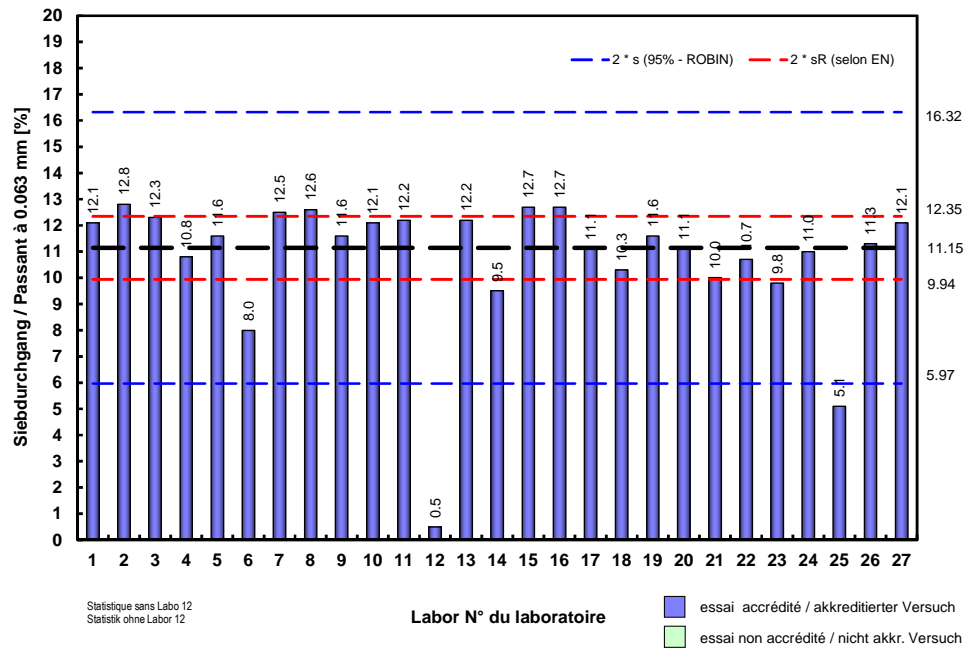


Fig. 10 Analyse de la teneur en filler sur RAP 0/11.

Il apparaît finalement que la variabilité du RAP, sensiblement plus élevée que celle des matériaux blancs, a un effet considérable sur l'enrobé. Davantage d'investigations seraient nécessaires afin de quantifier les impacts de la variabilité du fraisat sur les performances mécaniques de l'enrobé.





## 4 Formulation analytique

La formulation a pour objectif de déterminer la composition (optimale) des constituants de l'enrobé, permettant de résister aux sollicitations prévues au cours de sa durée de service. Selon le type de couche bitumineuse, différentes propriétés seront recherchées. De manière générale, les paramètres suivants seront particulièrement analysés afin de garantir un comportement mécanique satisfaisant de l'enrobé :

- Teneur en vides
- Teneur en liant
- Qualité des matériaux de base (arêtes notamment)
- Fractions granulométriques fines
- Rigidité du mastic (souvent représenté par le module de richesse ou le coefficient K représentant le ratio entre filler et bitume)

Abstraction faite de considérations économiques, le cas idéal comprend un module de richesse relativement élevé (i.e. bonne lubrification du mélange), une teneur en bitume élevée et un module de rigidité également élevé. Une augmentation de la teneur en liant de l'enrobé augmente la durabilité du mélange, mais diminue son module d'élasticité. Le principe de la formulation consiste donc à effectuer un compromis entre ces paramètres. De plus amples considérations relatives aux méthodes de formulation pourront être trouvées dans [23] [24].

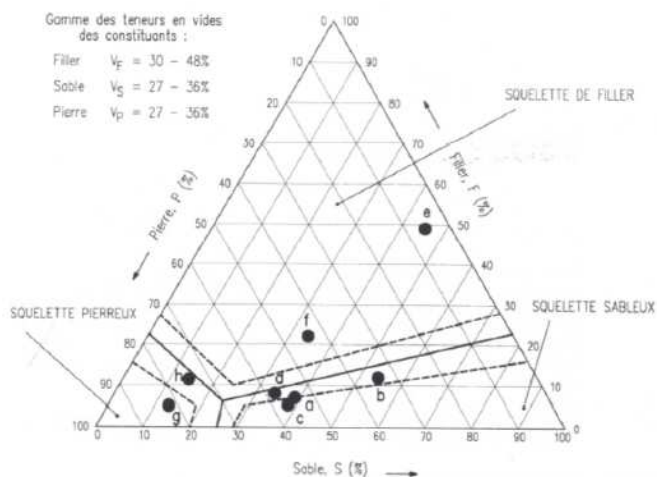
Dans le cadre de cette étude, il a été choisi d'utiliser la méthode belge de formulation qui est une méthode analytique largement reconnue (voir chapitre 4.1). Les objectifs de l'application d'une méthode analytique de formulation sont les suivants :

- Optimisation (réduction) du nombre d'essais à réaliser en laboratoire.
- Evaluation de la faisabilité des différentes recettes avant passage en laboratoire (teneur en vides et/ou liant).
- Effectuer une analyse de sensibilité sur certains paramètres spécifiques.
- Première estimation des performances mécaniques sur la base de modèles issus de la littérature.

### 4.1 Méthode belge de formulation

Nous décrivons dans cette section le principe de base de la méthode belge de formulation des enrobés bitumineux. Ces développements sont issus de synthèses disponibles dans [23] [25]. Le lecteur intéressé pourra également consulter [26] [27] notamment pour les détails de calculs volumiques.

La méthode de formulation analytique a été développée en Belgique par le Centre de Recherches Routières (CRR). Cette méthode classe les mélanges en trois familles selon leur teneur en filler ( $< 63 \mu\text{m}$ ), sable ( $63 \mu\text{m}$  à  $2 \text{mm}$ ) et pierres ( $> 2 \text{mm}$ ) selon un diagramme triangulaire spécifique (Fig. 11). La méthode développée s'adresse aux mélanges à squelette sableux et aux mélanges à squelette pierreux.



**Fig. 11** Diagramme triangulaire de distinction des mélanges [26].

La méthode a pour spécificité de reposer à la fois sur un nombre très élevé d'observations expérimentales ainsi que sur des essais en laboratoire. Ces différentes données ont permis de caler les modèles de calculs utilisés, le principe consistant à effectuer une formulation volumétrique analytique. La procédure volumétrique est déterminante et elle permet d'éviter un sur-remplissage des vides du squelette minéral par le mastic, condition indispensable mais non suffisante à de bonnes performances de l'enrobé. La formulation étant volumétrique, les résultats sont convertis dans une ultime phase en valeurs massiques traditionnellement utilisées. Dans cette méthode, les essais de laboratoire sont donc utilisés comme moyen de vérification des valeurs obtenues par la formulation volumétrique.

De manière globale, la procédure de formulation peut être décomposée en trois phases illustrées dans la Fig. 12.

- Phase 1 – Choix et caractérisation des matériaux de base.
- Phase 2 – Formulation, soit définition de la courbe granulométrique cible et calcul du pourcentage de vides ou de la teneur en liant (selon choix de l'utilisateur). La composition en volume puis en masse est ensuite calculée (pierre, sable, filler, bitume).
- Phase 3 – Essais : L'utilisation d'essais en laboratoire permet de vérifier les résultats obtenus lors de la formulation analytique. Si nécessaire, la formulation (composition et/ou matériaux) sera corrigée jusqu'à l'obtention d'une composition en adéquation avec les exigences. Cette troisième phase fait l'objet du chapitre 4.4 du présent rapport.

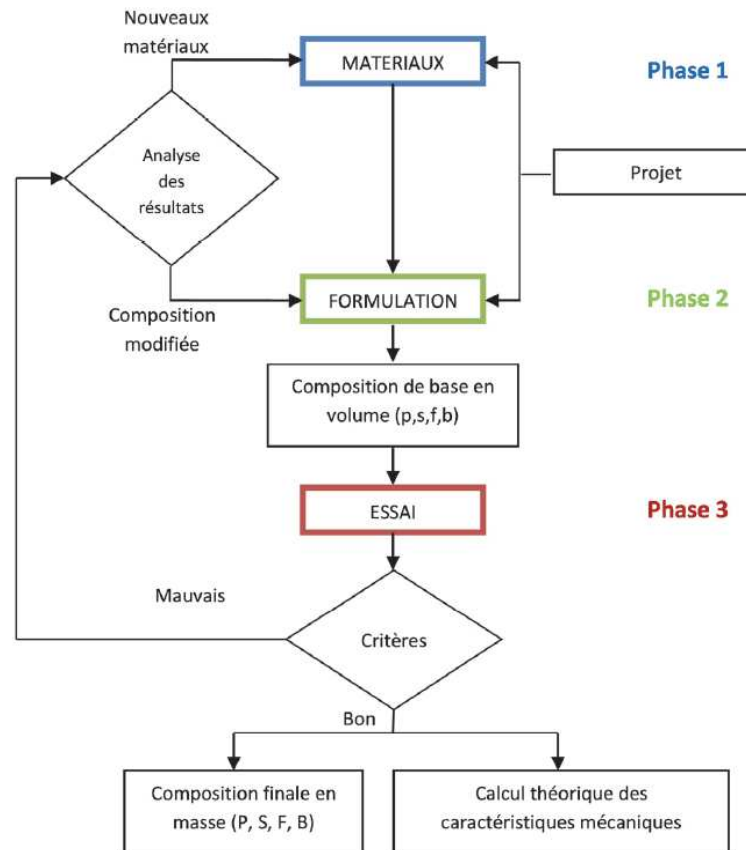


Fig. 12 Structure de la méthode belge de formulation selon [26] repris de [23].

Nous pouvons finalement relever que la méthode a été développée sur la base d'observations et matériaux belges. Il est donc possible que certains biais existent, mais les tendances générales de comportement des matériaux restent tout de même valables.

Initialement développée sous environnement DOS, nous utilisons ici le logiciel PradoWin 1.3, la première version datant de 2002. Le logiciel dispose par ailleurs d'un module additionnel de prévision des performances mécaniques et caractéristiques sur la base de modèles issus de la littérature. Ce module sera utilisé afin d'estimer le comportement mécanique des différents mélanges formulés.

## 4.2 Démarche de formulation

La démarche de formulation appliquée dans le cadre de cette recherche est concentrée sur le cas relatif aux granulats BERAG qui constituent par ailleurs l'essentiel des essais de laboratoire. D'autres origines pétrographiques n'ont donc pas été considérées.

La démarche suivante est appliquée pour la formulation :

- Reconstitution de la recette de base (chap. 4.4.1)  
La recette de base est reconstituée pour les enrobés AC 11 S 40% RAP et AC 11 S 0% RAP. Les différents types de liants sont également considérés. Les variantes consignées dans le Tab. 11 sont finalement calculées.

**Tab. 11** Variantes pour calcul volumétrique recette de base

N°	Recette	Granulats	Liant
2-L	AC 11S, 40% RAP	BERAG	160/220
6-L	AC 11S, 40% RAP	BERAG	70/100
7-L	AC 11S, 40% RAP	BERAG	PmB
9-L	AC 11S, 0% RAP	BERAG	PmB
10-L	AC 11S, 0% RAP	BERAG	70/100

Comme discuté au chapitre 3, les granulats présentent des qualités variables au niveau des arêtes. Cela n'est pas sans incidence sur la formulation volumétrique (et massique) de l'enrobé. Afin de caler au mieux la modélisation, la formulation analytique de la recette de base a été comparée aux résultats obtenus en laboratoire (vides, teneur en liant), ceci afin de déterminer les caractéristiques de base à considérer pour l'état des arêtes des différentes fractions granulométrique. Ceci sera davantage détaillé plus loin.

La démarche finalement appliquée dans cette recherche est globalement comparable à une approche traditionnelle, le nombre de points de comparaison entre laboratoire et formulation analytique étant cependant sensiblement plus important (*i.e.* davantage d'essais en laboratoire ont été réalisés).

- Optimisation de la formulation (chap. 4.4.2)  
 Considérant la recette de base comme référence, différentes variantes de formulation sont calculées afin de déterminer le potentiel d'optimisation ainsi que les facteurs sur lesquels il est pertinent d'agir. Les facteurs suivants sont considérés :
  - Variation de la teneur en liant et calcul des vides
  - Variation de la teneur en vides et calcul de la teneur en liant
  - Modifications de la courbe granulométrique
 Pour chaque cas, le module de prévision des performances mécaniques est également utilisé afin d'évaluer l'ordre de grandeur des incidences de la formulation sur le comportement de l'enrobé.
- Analyses de sensibilité (chap. 4.4.3)  
 Le recours à une méthode analytique présente notamment pour avantage la possibilité de multiplier les itérations, ce qui n'est généralement pas admissible en laboratoire. Etant donné les différences de qualité au niveau de l'angularité des granulats, cet aspect sera davantage étudié par une analyse de sensibilité.

## 4.3 Paramètres et hypothèses de base

Les paramètres et hypothèses de base pour la réalisation du calcul selon PradoWin sont consignés dans le présent chapitre.

### 1. Insertion des composants de base et de leurs caractéristiques

Les données à insérer concernent les éléments suivants :

- Filler : densité, vides Rigden, granulométrie.
- Sable 0/2 : densité, angularité (rond/anguleux), granulométrie
- Granulats 2/4, 4/8 et 8/11 : densité, angularité (rond/anguleux), granulométrie
- RAP 0/11 : densité, angularité (0 à 1, dft=0 soit roulé), teneur en liant, caractéristiques du liant (Pen, A&B, densité), granulométrie
- Bitumes : Pénétration à 25 °C, température anneau & bille, IP, densité, viscosité dynamique, Fraass (si disponible)

Les différentes informations nécessaires sont issues des essais de caractérisation (chap. 3) ; les courbes granulométriques des différentes fractions granulaires étant disponibles en Annexe au présent rapport.

Comme il le sera illustré dans la suite, l'angularité des granulats a un impact prépondérant sur l'arrangement du squelette granulaire et par conséquent sur la teneur en vides / teneur en liant de l'enrobé. Pour la modélisation des granulats, l'utilisateur a le choix entre un granulat anguleux (i.e. concassé) ou rond, sans valeur intermédiaire possible. Pour la modélisation du fraisat d'enrobé, l'angularité peut être renseignée par une valeur située entre 0 (rond) et 1 (anguleux ou concassé). Sur la base des essais de caractérisation étendus et après différentes itérations de calage entre les mesures en laboratoire et le calcul analytique, les conditions de base suivantes ont été définies, conditions d'angularité permettant d'obtenir des résultats de modélisation (teneur en liant et teneur en vides) comparables aux mesures effectuées en laboratoire :

- Sable 0/2 : rond (=0)
- Granulats 2/4 : rond (=0)
- 4/8, 8/11 : anguleux (=1)
- RAP : anguleux (=1)

Rappelons finalement qu'une analyse de sensibilité de l'angularité des granulats sera menée au chapitre 4.4.3.

## 2. Spécifications

Les spécifications concernent les valeurs limites normatives pour les différents composants (bitume, granulat, filler). Il n'est pas indispensable de renseigner les spécifications pour les composants de base.

La spécification relative au mélange concerne la courbe granulométrique cible. Nous insérons ici la courbe granulométrique de base (AC 11 S, 40% RAP) selon la Fig. 1, ainsi que les limites de fuseau selon la normalisation.

## 3. Calcul des différents cas

Chaque formulation est un cas spécifique à calculer par l'utilisateur. Les étapes successives suivantes doivent être réalisées :

- Choix du liant
- Choix du sable et éventuel mélange de sables
- Définition de la granulométrie et calcul de la composition du mélange sec. La proportion des différentes fractions granulométrique est calculée par le logiciel, seule la teneur en RAP étant imposée (40% resp. 0%).

Un exemple de composition du mélange sec est présenté dans la Fig. 13.

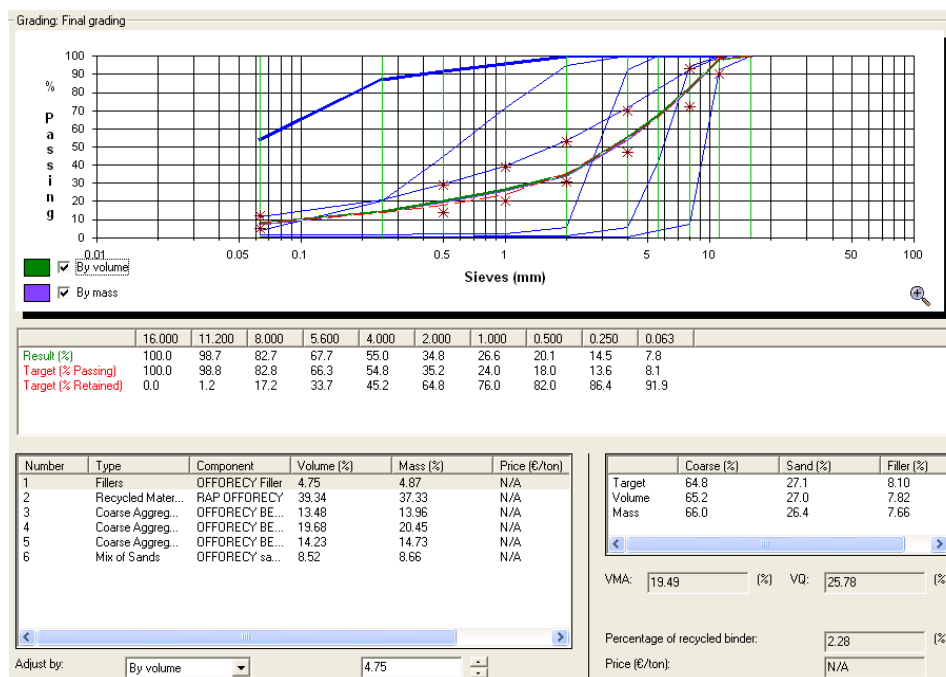


Fig. 13 Exemple de composition du mélange sec (Source : PradoWin 1.3).

Nous postulons ici qu'il n'y a pas de pertes de fines durant la production. Cette hypothèse permet d'éviter un facteur additionnel influant sur les résultats. Elle semble par ailleurs réaliste si l'on suppose que la perte de fines (parois du malaxeur) pourrait être compensée par la production de fines lors du malaxage des granulats.

- Formulation volumétrique : partie analytique de l'étude avec détermination de la teneur en liant ou de la teneur en vides (un des deux paramètres doit être imposé par l'utilisateur). La formulation analytique est réalisée itérativement selon 5 étapes successives :
  - Choix du type de mélange (courbe granulométrique, réalisé dans l'étape précédente).
  - Evaluation des vides du squelette minéral.
  - Détermination du volume disponible pour le mastic. Si le volume disponible est insuffisant, retour à l'étape 1.
  - Détermination de la composition du mastic, en fonction de la nature du bitume et du filler.
  - Détermination de la composition finale en masse, vérification des critères de remplissage volumique.

Les trois premières étapes ont donc pour objectif d'éviter un sur-remplissage du mastic, l'étape 4 permettant d'assurer un mastic suffisant au niveau de sa consistance.

Le mélange finalement déterminé est calculé avec un taux de compaction de 100%, ce qui correspond aux échantillons Marshall 50/50 ou alors à la compacité théorique obtenue in-situ en fin de compactage.

- Module de prévision des performances mécaniques : ce module comprend différentes performances et caractéristiques, calculées sur la base de relations issues de la littérature. A titre indicatif, il est choisi d'intégrer un calcul des paramètres suivants :
  - Fatigue : Nous proposons les valeurs  $\epsilon_6$  proposées par le modèle SHELL-Ugé qui semble relativement cohérent (contrôle contrainte). Relevons que le modèle BRRC aurait également pu être proposé, ce modèle étant utilisé également pour la méthode française de formulation (basée sur des essais avec éprouvettes trapézoïdales).

- Module complexe : Le module complexe est calculé à (15 °C, 10 Hz) selon le modèle Huet-Sayegh.

Nous mettons en évidence que les valeurs calculées sont indicatives et doivent être utilisées comme ordre de grandeur permettant d'estimer les tendances en fonction de la formulation réalisée. Le logiciel propose par ailleurs d'autres performances ou caractéristiques (module en fonction de la vitesse des véhicules, vieillissement de l'enrobé, expansion thermique...) qui ne sont pas considérées dans le présent projet.

## 4.4 Discussion des résultats

Comme expliqué précédemment, la démarche de formulation est principalement appliquée afin de déterminer les caractéristiques volumétriques soit la teneur en liant ou la teneur en bitume (un des paramètres doit être renseigné). Cette procédure permet d'évaluer la faisabilité ou non d'une recette donnée.

La partie relative aux performances mécaniques est utilisée en complément, ceci afin de déterminer les tendances principales gouvernant le comportement des enrobés. Ces informations doivent être considérées comme des estimations de la caractéristique respectivement performance du mélange final.

Nous pouvons mettre en évidence les éléments suivants, valables pour l'ensemble des analyses.

- Les valeurs (vides, teneur en liant) ne respectant pas les exigences normatives sont indiquées en rouge dans les différents tableaux.
- Certains tableaux sont complétés par les valeurs mesurées en laboratoire. Ces données, issues du chapitre 5, sont indiquées entre parenthèses.
- Les différents numéros de recette indiqués dans les tableaux de résultats correspondent aux références également utilisées au chapitre 5.

La consistance du mastic d'un enrobé a un impact élevé sur ses performances mécaniques (fatigue, orniérage) ainsi que sur certaines de ses caractéristiques (module complexe). Une rigidité trop faible du mastic aura pour conséquence des problèmes de stabilité alors qu'une rigidité trop élevée entraînera des problèmes de maniabilité et des faiblesses de cohésion au niveau de l'enrobé (enrobage insuffisant).

L'approche française utilisée pour caractériser le film de bitume est celle du module de richesse. La méthode belge de formulation recourt à deux indicateurs spécifiques permettant de caractériser la rigidité du mastic, indicateurs qui seront intégrés dans la suite des analyses :

- MSI : Mastic Stiffness Indicator. Cet indicateur peut être globalement assimilé au Delta A&B obtenu dans le cadre d'un essai bille-anneau sur filler. La méthode belge de formulation indique cependant que certaines déviations au niveau de l'indicateur MSI peuvent apparaître dans le cas de mélanges à forte teneur en matériaux recyclés.
- Facteur  $K=f/b$  (volumique) représentant le ratio des proportions entre filler (f) et bitume (b).

Les deux paramètres principaux guidant la rigidité du mastic sont donc le pouvoir rigidifiant du filler (exprimé par les vides Rigden) et les proportions volumétriques des constituants (K). Dans Prado, il est généralement attendu une valeur MSI située entre 12 °C et 16 °C pour un mastic adéquat. Cette relation est valable pour les liants de distillation directe et les PmB. Un exemple de résultat PradoWin est indiqué dans la Fig. 14.

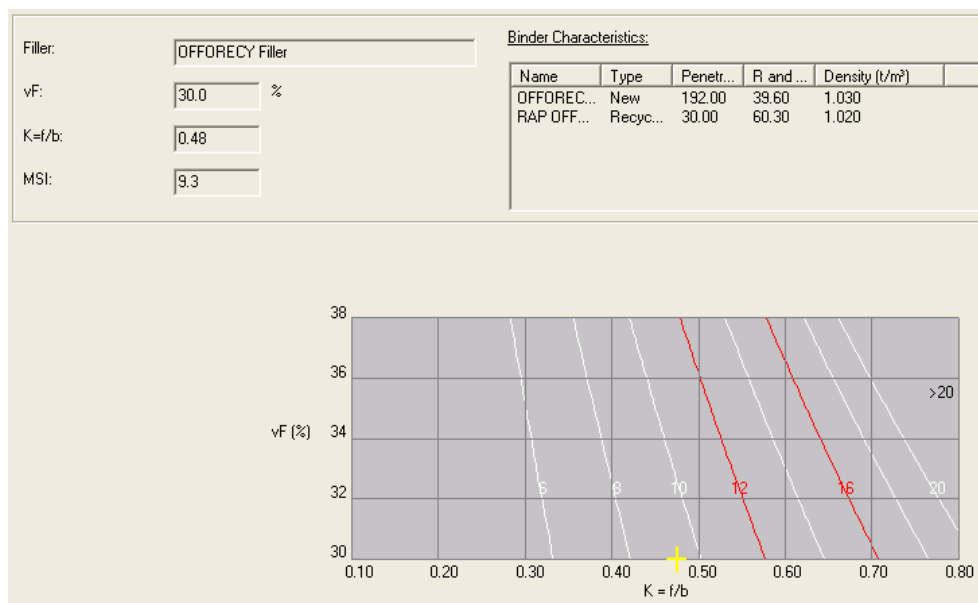


Fig. 14 Exemple de calcul MSI et facteur K (source : PradoWin 1.3).

#### 4.4.1 Reconstitution de la recette de référence

La première phase consiste à reconstituer la recette de référence afin d'en évaluer les caractéristiques volumétriques de l'enrobé. Les différents résultats sont présentés dans le Tab. 12, la Fig. 15 représentant la différence entre les vides calculés et mesurés pour les différents enrobés. Nous pouvons commenter :

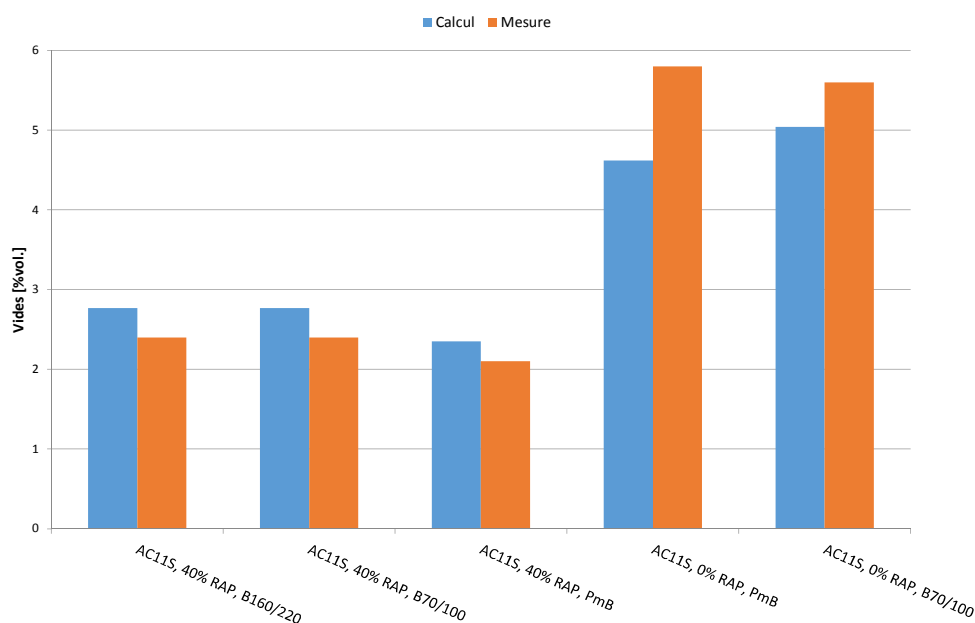
- La teneur en liant (6.10%/E) est imposée selon la recette de référence. Connaissant ce paramètre, la teneur en vides est calculée pour les différentes formulations.
- La comparaison des valeurs calculées (vides) et des valeurs mesurées est globalement consistante (Fig. 15). Les tendances observées sont comparables et l'ordre de grandeur des vides également.
- La recette de base avec 40% de matériaux recyclés est globalement très compacte. Les résultats des calculs, de même que les mesures en laboratoire indiquent une teneur en vides Marshall inférieure aux exigences normatives (min 3%). La granulométrie des différents composants, de même que la qualité des arêtes jouent assurément un rôle. Ces résultats laissent penser que la teneur en liant est pourrait éventuellement être diminuée.
- La recette sans matériaux recyclés présente quant-à-elle une teneur en vides plus importante, voire proche de la limite supérieure selon les exigences normatives (max. 6%)
- L'indicateur de rigidité du mastic K est relativement bas. Cela indique un mastic trop « riche » et donc une teneur en liant probablement trop élevée pour être optimale. Une diminution de la teneur en liant permettrait d'augmenter le facteur K, de même que l'indicateur MSI qui est actuellement en-dehors de la zone dite optimale selon la méthode belge de formulation.
- Le calcul des performances et caractéristiques mécaniques doit être considérée avec précaution.
- Les performances en fatigue des différents enrobés sont globalement élevées compte-tenu du type de couche considérée. Cela est lié à la présence élevée de mastic. Dans un massif de chaussée, une couche d'enrobé AC 11 S ne travaillera pas (ou peu) en fatigue. Il est cependant utile de mentionner que de bonnes performances en fatigue laissent supposer une bonne résistance aux contraintes thermiques.
- Les valeurs de module obtenues sont globalement relativement basses, ceci étant notamment lié à la quantité importante de bitume. A titre de comparaison, la méthode française de dimensionnement suppose un module de 5'400 MPa (15 °C, 10 Hz) pour ce type de couche.



- Pour une même granulométrie, l'effet du type de liant est également visible sur les performances mécaniques du mélange.
- Les résultats obtenus avec la méthode volumétrique sont globalement satisfaisants et cohérents.
- La reconstitution de la recette de base laisse supposer un certain potentiel d'optimisation de la recette.

**Tab. 12** Formulation théorique – recette de base.

	Liant	N°	Teneur liant [%/E]	K=f/b	MSI [°C]	Vides [% vol.]	E* (15°C, 10Hz) [MPa]	ε <sub>6</sub> [μm]
AC 11S, 40% RAP	160/220	2-L	6.10	0.48	9.3	2.77 (2.40)	4'376 (7'108)	111
AC 11S, 40% RAP	70/100	6-L	6.10	0.48	9.3	2.77 (2.40)	7'474	93
AC 11S, 40% RAP	PmB	7-L	6.10	0.46	9.0	2.35 (2.10)	5'924	113
AC 11S, 0% RAP	PmB	9-L	6.10	0.44	8.5	4.62 (5.80)	3'490	135
AC 11S, 0% RAP	70/100	10-L	6.10	0.45	8.8	5.04 (5.60)	5'241	100



**Fig. 15** Recette de base : comparaison entre calcul analytique et mesures en laboratoire.

#### 4.4.2 Optimisation de la formulation

La reconstitution de la recette de référence (i.e. teneur 6.10%/E) a mis en évidence un éventuel potentiel d'optimisation (chap. 4.4.1). Dans un premier temps, une variation de la teneur en liant est effectuée pour ensuite vérifier si la composition volumique obtenue est admissible. Les résultats sont présentés dans le Tab. 13. Nous pouvons relever :

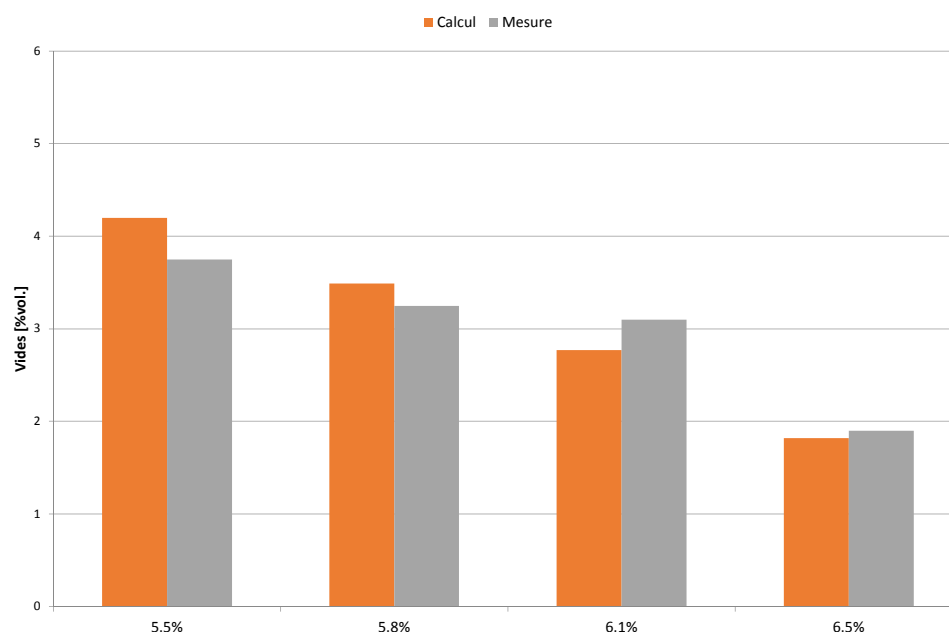
- La teneur en liant de référence est indiquée en gras.
- Pour les deux recettes (40% RAP et 0% RAP), une diminution de la teneur en liant a pour conséquence une augmentation de la teneur en vides ainsi qu'une réduction du film de mastic (augmentation facteur K et MSI). Cette diminution de la richesse du mastic est, comme détaillé précédemment, souhaitable dans l'optique d'une optimisation de la formulation. Comme attendu, les performances en fatigue diminuent alors légèrement alors que le module complexe tend à augmenter.

- Une comparaison entre les valeurs mesurées et calculées est proposée dans la Fig. 16 (40% RAP) et la Fig. 17 (0% RAP). Nous pouvons relever la bonne correspondance pour ce qui est du domaine de vides ainsi que les tendances similaires observées en fonction de la variation de teneur en liant.
- Il apparaît globalement que la teneur en liant optimale est sensiblement inférieure à la teneur en liant de référence pour le cas de l'enrobé avec 40% de matériaux recyclés. Une teneur en liant de 5.5%-5.8% semble davantage indiquée, ceci étant à valider lors des essais en laboratoire.
- La teneur en liant peut également être diminuée dans le cas du mélange sans matériaux recyclés. Il semble cependant qu'une teneur en liant  $\geq 5.8\%$  soit bénéfique, ceci afin de respecter les exigences normatives relatives à la teneur en vides (max 6%).

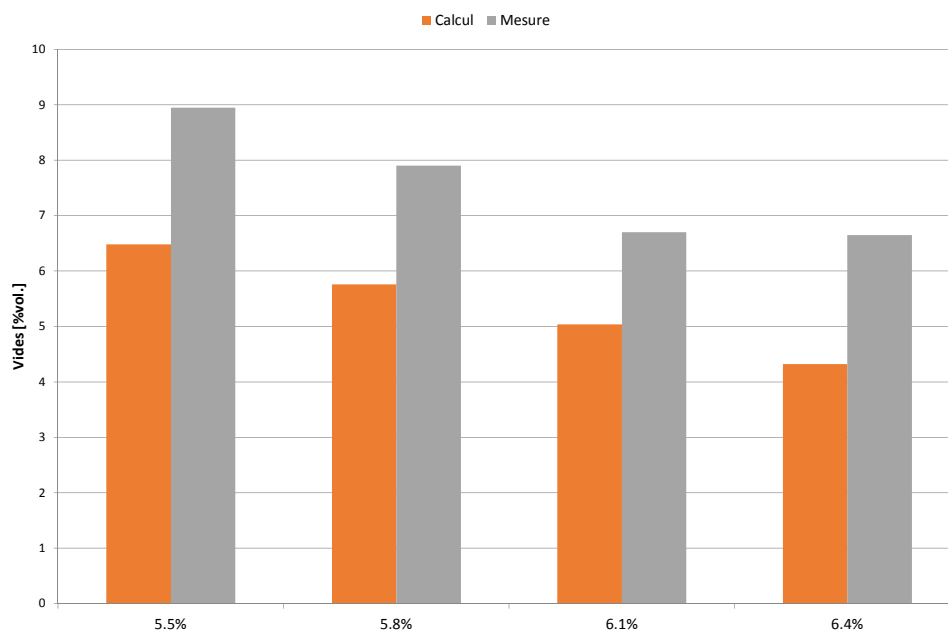
**Tab. 13** Formulation théorique – optimisation de la formulation : Teneur en liant imposée.

	Liant	N°	Teneur liant [%/E]	K=f/b	MSI [°C]	Vides [% vol.]	E* (15°C, 10Hz) [MPa]	$\epsilon_6$ [ $\mu\text{m}$ ]
<b>AC 11S, 40% RAP</b>	160/220	O-1	5.50	0.53	10.7	4.20 (3.75*)	5'751	89
		O-2	5.80	0.50	10.0	3.49 (3.25*)	5'124	99
		O-3	<b>6.10</b>	0.48	9.3	<b>2.77 (3.10*)</b>	4'376	111
		O-4	6.50	0.44	8.5	<b>1.82 (1.90)</b>	3'830	126
<b>AC 11S, 0% RAP</b>	70/100	O-5	5.50	0.51	10.1	<b>6.48 (8.95)</b>	6'113	81
		O-6	5.80	0.48	9.4	5.76 (7.90)	5'653	90
		O-7	<b>6.10</b>	0.45	8.8	5.04 (6.70)	5'241	100
		O-8	6.40	0.43	8.2	4.32 (6.65)	4'924	110

\* : moyenne de 4 mesures selon résultats chapitre 5.



**Fig. 16** Optimisation de la formulation : calcul analytique et mesures avec différentes teneurs en liants (AC 11 S, 40% RAP, B160/220).



**Fig. 17** Optimisation de la formulation : calcul analytique et mesures avec différents teneurs en liants (AC 11 S, 0% RAP, B70/100).

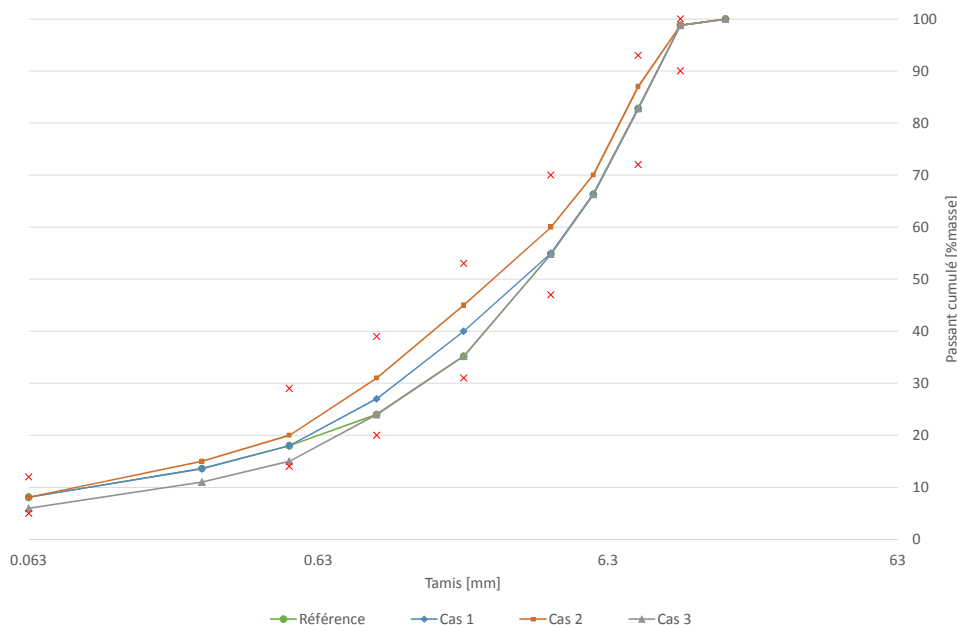
Une démarche comparable d'optimisation est proposée dans le Tab. 14 où la teneur en vides est variée dans le domaine des limites normatives, et la teneur en liant calculée à l'aide de la méthode de formulation analytique. Nous pouvons ajouter :

- Des mesures en laboratoire ne sont pas disponibles pour les cas étudiés.
- Les tendances sont globalement analogues à celles observées précédemment.
- La variation de rigidité entre les valeurs limites de teneur en vides est de respectivement 72% (mélange avec 40% RAP) et 30% (mélange sans fraisat).
- L'effet sur la résistance en fatigue est inverse à celui observé pour le module de rigidité. La diminution de résistance en fatigue (paramètre  $\epsilon_6$ , déformation provoquant la rupture à  $10^6$  cycles) est de 62% (mélange 40% RAP) et respectivement 47% (mélange sans RAP). Cette diminution du facteur  $\epsilon_6$  aura pour conséquence une importante diminution au niveau de la durée de service de la chaussée de la chaussée.

**Tab. 14** Formulation théorique – optimisation de la formulation : Teneur en vides imposée.

	Liant	Vides [% vol.]	K=f/b	MSI [°C]	Teneur liant [%/E]	E* (15°C, 10Hz) [MPa]	$\epsilon_6$ [µm]
<b>AC 11S, 40% RAP</b>	160/220	3.0	0.48	9.5	6.39	4'617	107
		4.0	0.52	10.5	5.92	5'571	92
		<b>5.0</b>	0.57	11.7	5.44	6'597	78
		6.0	0.62	13.3	<b>4.97</b>	7'969	66
<b>AC 11S, 0% RAP</b>	70/100	3.0	0.40	7.4	7.46	4'431	128
		4.0	0.42	8.0	6.99	4'795	114
		<b>5.0</b>	0.45	8.7	6.52	5'224	101
		6.0	0.49	9.6	6.05	5'800	87

Comme indiqué précédemment, l'optimisation est réalisée au niveau de l'arrangement volumique de l'enrobé (teneur en liant, vides) ; les performances mécaniques étant utilisées à titre indicatif. Une optimisation pourrait également être réalisée par variation de la courbe granulométrique. Pour cela, trois différentes variantes sont calculées soit une courbe milieu de fuseau (cas 1), une courbe haut de fuseau (cas 2) et une courbe bas de fuseau mais avec diminution des fractions fines comparativement à la référence (cas 3). Les différentes courbes étudiées sont présentées dans la Fig. 18 qui contient également la courbe de référence positionnée plutôt en bas de fuseau.



**Fig. 18** Courbes granulométriques pour analyse de sensibilité.

Les différents résultats sont présentés dans le Tab. 15, pour les deux compositions granulométriques (40% RAP et 0% RAP) et la teneur en liant de référence. Nous pouvons commenter :

- Dans le cas du mélange avec 40% de fraisat, une variation de la courbe granulométrique a une incidence modérée sur la teneur en vides (environ 0.5%) et sur la richesse du mastic. Corollaire de cela, les performances et caractéristiques mécaniques ne sont pas (ou peu affectées).
- La variation de courbe granulométrique a un impact plus important sur les caractéristiques (vides, teneur en liant) de l'enrobé ne contenant pas de matériaux recyclés. L'incidence sur le comportement en fatigue semble cependant limitée, la rigidité étant davantage affectée (différence maximale de 23% avec le cas de référence).
- Pour le cas étudié, il semble finalement que la variation de la courbe granulométrique ne soit pas un paramètre dominant dans le cadre d'une optimisation de la formulation. La courbe granulométrique de référence semble globalement satisfaisante. Ce paramètre ne sera pas varié davantage lors des essais en laboratoire.

**Tab. 15** Formulation théorique – optimisation de la formulation : courbe granulométrique.

	Cas	Teneur liant [%/E]	K=f/b	MSI [°C]	Vides [% vol.]	E* (15°C, 10Hz) [MPa]	ε <sub>6</sub> [μm]
<b>AC 11S, 40% RAP, B160/220</b>	Ref.	6.10	0.48	9.3	2.77	4'376	111
	1	6.10	0.46	9.0	2.51	4'449	111
	2	6.10	0.47	9.1	2.83	4'379	111
	3	6.10	0.34	6.1	3.43	4'220	111
<b>AC 11S, 0% RAP, B70/100</b>	Ref.	6.10	0.45	8.8	5.04	5'241	100
	1	6.10	0.46	9.0	1.55	6'440	100
	2	6.10	0.46	9.0	1.90	6'321	99
	3	6.10	0.33	5.9	2.30	6'154	100

#### 4.4.3 Analyse de sensibilité

Comme indiqué en précédemment, l'état des arêtes des différentes fractions granulaires joue un rôle déterminant sur l'arrangement granulaire final de l'enrobé ainsi que ses performances et caractéristiques mécaniques. Cela est illustré par le Tab. 16 qui propose une variation de l'angularité du RAP pour la recette contenant 40% de matériaux recyclés (liant 160/220). Nous pouvons relever :

- Le cas de référence correspond à un fraisat considéré comme anguleux ou concassé (=1), ceci ayant été déterminé lors des différents essais de calage entre modélisation et essais de laboratoire.
- Pour une teneur en liant imposée (6.10%/E), l'effet de la qualité des arêtes sur la teneur en vides est très important. La différence est d'un facteur 3.5 entre granulats roulés et concassés.
- La rigidité du mélange (module complexe) est également sensiblement affectée par la qualité des arêtes du fraisat ; cette caractéristique dépendant notamment de la teneur en vides.
- La résistance en fatigue du mélange reste globalement homogène, la richesse du mastic étant la même pour les différentes variantes.
- Les résultats de l'analyse de sensibilité permettent d'identifier l'ampleur relative des différents paramètres, les valeurs calculées avec la formulation analytique devant être considérées comme indicatives.

**Tab. 16** Formulation théorique – analyse de sensibilité : angularité du RAP.

	Liant	RAP	Teneur liant [%/E]	K=f/b	MSI [°C]	Vides [% vol.]	E* (15°C, 10Hz) [MPa]	ε <sub>6</sub> [μm]
<b>AC 11S, 40% RAP</b>	160/220	0 (rond)	6.10	0.48	9.3	9.86	2'891	113
		0.25	6.10	0.48	9.3	8.10	3'205	113
		0.5	6.10	0.48	9.3	6.33	3'555	112
		0.75	6.10	0.48	9.3	4.55	3'944	112
		1 (angu.)	6.10	0.48	9.3	2.77	4'376	111

## 4.5 Enseignements de la formulation analytique

Le recours à la formulation analytique présente différents avantages parmi lesquels la diminution du nombre d'essais à réaliser en laboratoire ainsi qu'un support important pour la compréhension du comportement mécanique des enrobés et de l'incidence de la variation de différents paramètres.

Sur la base des calculs et analyses réalisées, nous pouvons mettre en évidence les éléments suivants :

- La méthode analytique de formulation doit principalement être appliquée afin de vérifier la composition volumique de l'enrobé et donc sa faisabilité. Le module relatif aux caractéristiques et performances mécaniques fourni des valeurs indicatives sur la base de modèles reconnus ; ces valeurs devant cependant être considérées avec précautions.
- Pour le cas étudié, un important travail de calage a été nécessaire afin que les valeurs calculées (teneur en liant, vides) présentent un ordre de grandeur comparable aux valeurs mesurées en laboratoire. Cela est lié à la grande variabilité dans la qualité des arêtes des différentes fractions granulaires.
- Les calculs sont globalement consistants et les tendances cohérentes. Lorsque disponible, la comparaison avec le résultat de mesures en laboratoire est également satisfaisante.
- La courbe granulométrique de base (mélange sec) semble globalement satisfaisante et il ne semble pas nécessaire de procéder à de plus amples variations de la courbe granulométrique lors des essais en laboratoire.
- La recette de base (6.10% de teneur en liant) peut être optimisée par une diminution de la teneur en liant. Cela est illustré par une (trop) faible teneur en vides de l'enrobé, et un mastic visiblement (trop) riche. Corollaire de cela, les performances en fatigue sont relativement élevées et le module calculé inférieur aux valeurs usuelles utilisées dans une procédure de dimensionnement. La diminution de teneur en liant pour une optimisation de la recette est plus importante dans le cas du mélange avec 40% de fraisat que pour le cas sans ajout de matériaux recyclés.

Sur la base de ces différents éléments, nous pouvons relever l'apport substantiel d'une procédure de formulation analytique. La méthode appliquée fournit des éléments importants en vue d'une optimisation de la formulation. Il est cependant indispensable de procéder dans une seconde phase à des essais en laboratoire, ceci afin de mieux évaluer les caractéristiques et performances mécaniques des enrobés. Cet aspect sera détaillé au chapitre 5.

## 5 Etude en laboratoire

La phase d'étude en laboratoire constitue le noyau central de la recherche. Les objectifs principaux de cette analyse en laboratoire sont :

- Identifier et quantifier les paramètres déterminants pour la formulation des enrobés avec matériaux recyclés.
- Fournir des pistes en vue d'une optimisation de la formule de base produite en centrale d'enrobage.
- Mettre en évidence les incidences des méthodes de conditionnement en laboratoire sur les caractéristiques et performances mécaniques.
- Etablir des exigences et recommandations afin d'optimiser la procédure de fabrication en centrale d'enrobage

Le présent chapitre est décomposé ainsi :

- Description de la méthodologie (chap. 5.1)
- Réalisation d'essais de caractérisation étendus (chap. 5.2)
- Essais sur la recette de référence produite en centrale d'enrobage (chap. 5.3)
- Optimisation en laboratoire de la recette de référence (chap. 5.4)
- Analyse de l'effet de la méthode de conditionnement en laboratoire (chap. 5.5)
- Validation des hypothèses d'optimisation par des essais sur un enrobé à module élevé (chap. 5.6)

### 5.1 Méthodologie en laboratoire

Nous décrivons dans un premier temps la méthodologie telle que définie en début de projet, avant de discuter des éventuelles déviations et adaptations du plan de recherche.

Comme mentionné précédemment, les paramètres de base sont largement définis dans les documents d'appel d'offre. Les paramètres restants (granulats et bitumes additionnels) ont été choisis en accord avec la commission de suivi et les autres partenaires concernés. Les principaux paramètres de cette recherche relative à la formulation des enrobés avec matériaux recyclés sont finalement :

#### 1. Sorte d'enrobé :

- Enrobé AC 11 S pour couche de roulement, défini conformément à la norme SN 640 431-1b-NA. On appellera dans la suite du document « recette de référence » la recette fabriquée en centrale d'enrobage. Pour le besoin de différents essais, cette recette est également reconstituée en laboratoire et cela est précisé le cas échéant (nomenclature spécifique).
- Des essais complémentaires sur un enrobé à module élevé AC EME 22 C2 ont également été réalisés, ceci afin d'effectuer une comparaison avec les résultats obtenus dans les autres paquets de recherche.

#### 2. Bitume d'apport :

- Bitume de distillation directe 160/220 (référence)
- Bitume de distillation directe 70/100
- Bitume modifié aux polymères Styrelf C85 (correspond aux exigences PmB-C 65/105-50 selon la normalisation SN)

Une série réduite d'essais est également prévue avec un bitume 50/70, ceci pour l'analyse de la recette de référence. Le bitume modifié sélectionné contient une teneur raisonnable en polymères et sa classe de pénétration (70/100) semble également indiquée pour ce type de couche. Relevons encore qu'un bitume de type E85 (sensiblement plus cher) aurait été recommandé dans le cas d'enrobés à hautes performances.

### 3. Les granulats utilisés sont :

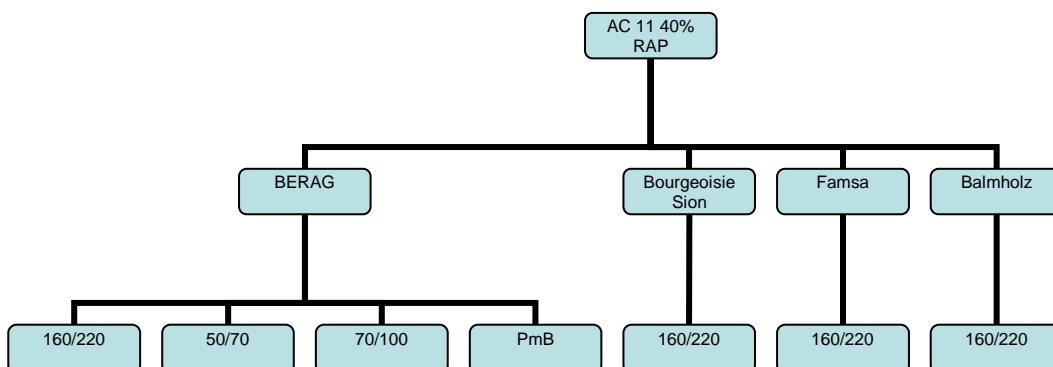
- Granulats BERAG (référence)
- Granulats Bourgeoisie de Sion
- Granulats Famsa
- Granulats Balmholz

Ce choix de granulats permet de considérer différentes origines pétrographiques avec à la fois des granulats provenant de carrière ou de gravière. Ces matériaux permettent également de parcourir un large éventail au niveau de la qualité (arêtes notamment) généralement rencontrée en Suisse.

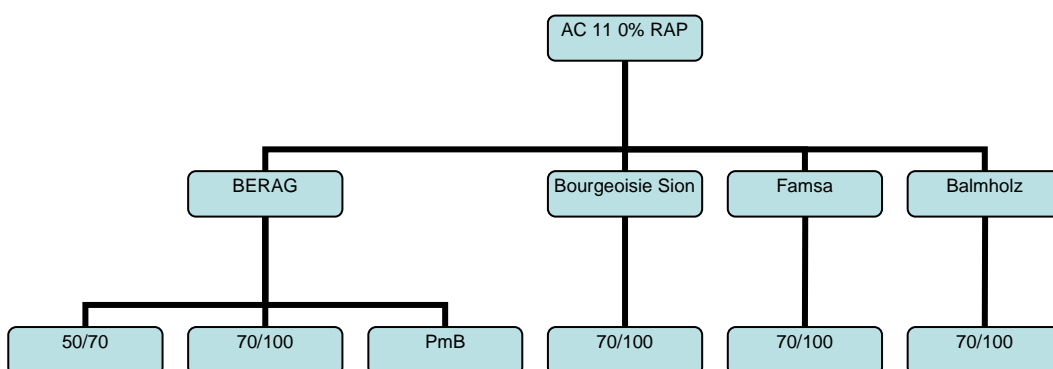
### 4. Fraisat d'enrobé

- Un seul type de fraisat « BERAG » de granulométrie 0/11 et 11/22 pour les essais complémentaires effectués sur l'AC EME 22 C2
- Teneur en matériaux recyclés : 0% ou 40% en masse d'enrobé

La combinaison des différents paramètres mentionnés précédemment fait apparaître un nombre conséquent de variantes. Le plan d'expérience finalement adopté pour les essais sur la recette de référence est décrit dans la Fig. 19 (40% RAP) et la Fig. 20 (0% RAP). Les essais réalisés pour chacune de ces variantes seront détaillés plus loin.



**Fig. 19** Synthèse des recettes testées pour enrobé AC 11 S, 40% RAP.



**Fig. 20** Synthèse des recettes testées pour enrobé AC 11 S, 0% RAP.

Un total de 13 différents mélanges sont initialement retenus, permettant ainsi d'évaluer l'effet du type de granulat, de la teneur en fraisat et du type de bitume. Le même fraisat est considéré pour l'ensemble de la recherche (fraisat BERAG). Les différents essais menés en laboratoire peuvent être décomposés en 4 parties distinctes :

1. Essais de caractérisation et analyse des composants de base : Cette première partie permet de définir toutes les caractéristiques intrinsèques des matériaux, nécessaires à l'évaluation des résultats d'essais sur enrobés. Ses résultats ont été discutés au chapitre 3.
2. Essais sur la recette de référence, selon la formule fabriquée en centrale d'enrobage.



3. Optimisation de la formulation, approche Marshall et méthode analytique (chap. 1).
4. Analyses complémentaires : méthode de réchauffage en laboratoire, validation des observations.

Dans un premier temps, il est prévu d'analyser les caractéristiques et performances suivantes pour l'ensemble des 13 mélanges identifiés précédemment :

- Degré de compactage, stabilité et fluage Marshall
- Sensibilité à l'eau
- Rigidité (module complexe)
- Caractérisation de l'enrobé
- Analyse du liant récupéré

Dans un deuxième temps, des essais complémentaires sont proposés pour une sélection de mélanges. Les essais choisis sont l'évaluation de la résistance à l'orniérage (simulateur de trafic) ainsi que les performances en fatigue (éprouvettes trapézoïdales).

Le programme de recherche prévoit également la réalisation d'une série limitée d'essais sur des enrobés vieillis selon la méthode AASHTO R30. Cette méthode consiste en la simulation en étuve d'un vieillissement à court terme (Short Term Oven Ageing STOA, 135 °C durant 4h) et long terme (Long Term Oven Ageing, 85 °C durant 5 jours). Ce vieillissement correspond théoriquement au vieillissement de la chaussée en service durant 15 ans.

Nous pouvons relever que le projet ne prévoit pas l'analyse du comportement à basses températures des enrobés (Thermal Stress Restrained Specimen Test- TSRST par exemple). Il aurait cependant été pertinent d'évaluer cet aspect, l'ajout de matériaux recyclés étant fréquemment la source de performances moins élevées du mélange à basses températures.

### 5.1.1 Adaptations du plan de recherche

Les premières investigations réalisées ont permis de mettre en évidence certains éléments motivant les ajustements suivants du plan de recherche :

- Le descriptif initial demande la considération de l'humidité des agrégats d'enrobé (< 2%, 2-4%, 4-6%) comme paramètre d'étude. Le fraisat étant inséré à chaud, il apparaît rapidement que ce paramètre n'est pas pertinent. L'humidité du fraisat dans un processus de recyclage à chaud est généralement très basse, en général inférieure à 1%, voire nulle.
- La qualité des granulats et tout particulièrement celle du fraisat ont une incidence importante sur les caractéristiques et performances de l'enrobé fabriqué. Pour cette raison, une étude complémentaire a été menée dans la première phase d'étude en laboratoire. Cette étude complémentaire, décrite au chapitre 5.2, concerne principalement l'identification des matériaux ainsi que la réalisation d'essais performantiels ciblés (simulateur de trafic). Ces résultats constituent un complément aux essais de caractérisation traditionnels présentés au chapitre 3.
- Dans le cas d'un mélange avec une teneur relativement élevée en matériaux recyclés, le recours à un liant d'apport de classe 50/70 ne semble pas optimal. Le liant d'apport est en effet trop « dur » et il sera alors difficile d'obtenir, sans recourir à d'autres additifs (réjuvenateurs par exemple), un mélange satisfaisant. Pour cela, il a été choisi de supprimer les essais avec liant d'apport 50/70.
- Le planning initial d'essais a été élaboré sous forme matricielle avec l'évaluation systématique de certaines caractéristiques/performances. Il est apparu au cours de la recherche qu'une sélection d'essais sont davantage pertinents (résistance à l'orniérage par exemple) pour la mise en évidence de différences de comportement, alors que d'autres essais ne présentent qu'un intérêt limité (essai de fatigue sur AC 11 S par exemple). Pour cela, le programme des essais a été ajusté, conduisant par ailleurs à diverses analyses paramétriques non prévues initialement.

Ces différentes adaptations du plan de recherche ont été validées par la commission de suivi ainsi que la direction du projet.

## 5.2 Essais de caractérisation étendus

Cette étude complémentaire, non prévue dans les documents d'appel d'offre, a pour but de fournir des informations additionnelles nécessaires à la compréhension et l'analyse des résultats. Les résultats ont également permis d'établir une méthodologie de préparation des composants et fabrication de l'enrobé en laboratoire, permettant ainsi de limiter le biais relatif à la fabrication, au réchauffage et au conditionnement des enrobés en laboratoire. L'établissement d'une procédure commune aux différents laboratoires est un élément déterminant pour la cohérence générale du paquet de recherches. Les résultats de ce chapitre ont été discutés et partagés avec l'ensemble des partenaires concernés.

### 5.2.1 Résistance aux déformations permanentes

Les premiers essais de caractérisation réalisés sur les granulats RAP (chap. 3.3) laissent suspecter une sensibilité accrue de l'enrobé aux déformations permanentes. Pour cela, des essais complémentaires ont été réalisés ; ces essais semblant indispensables afin de mieux quantifier l'incidence réelle des granulats recyclés sur le comportement mécanique de l'enrobé. L'incidence de différents facteurs est analysée :

- Temps de mûrissement
- Température des granulats
- Epaisseur de plaque lors de l'essai d'orniérage
- Type de granulats

Le Tab. 17 propose une analyse de la sensibilité du temps de mûrissement des plaques (48 heures, 1 mois, 3 mois), ceci pour l'enrobé AC 11 S 40% RAP et deux différents liants d'apport (160/220 et 70/100). Nous pouvons observer :

- L'enrobé STL-1 a été prélevé à la centrale d'enrobage, enrobé avec teneur en liant de 5.87%/enrobé. Les autres plaques testées ont été confectionnées en laboratoire, avec une teneur en liant de 6.1%/enrobé (valeur cible). On préférera donc la variante STL-2 dans le cas des comparaisons ci-dessous.
- Après fabrication en laboratoire, les différents matériaux sont stabilisés 50 min en étuve à la température de 145 °C (liant d'apport 70/100) ou 135 °C (liant d'apport 160/220), avant confection des plaques.
- Conformément à la normalisation SN, l'essai est réalisé sur des plaques de 50 mm d'épaisseur, à la température de 60 °C.
- Pour un bitume d'apport donné, les différentes plaques testées présentent un domaine de vides comparable.
- Du point de vue des exigences normatives (SN 640 431-1b-NA), les différents enrobés ne respectent pas la normalisation qui demande une profondeur d'ornièrerie  $\leq 10\%$  à 10'000 cycles. Seul l'enrobé fabriqué en centrale d'enrobage (STL-1) est relativement proche de la valeur limite, avec de meilleures performances probablement liées au mécanisme de diffusion accru du liant d'apport dans le liant du RAP, du vieillissement sensiblement plus important du bitume et aussi de l'énergie de malaxage plus importante.
- Pour un bitume d'apport 160/220, les essais sur enrobés fabriqués en laboratoire doivent être arrêtés après 3'000 cycles en raison de la profondeur d'ornièrerie trop importante. Il est relativement difficile de mettre en évidence une incidence significative du mûrissement sur cette seule base, mais il peut être mis en évidence la relation directe entre les caractéristiques du bitume récupéré et la résistance à l'orniérage de l'enrobé.
- Pour un bitume d'apport 70/100, le comportement à l'orniérage est sensiblement meilleur. Il ne peut cependant être dégagé une tendance claire liée au mûrissement de l'enrobé en laboratoire. De plus amples investigations seraient nécessaires afin de mettre en évidence ce phénomène.

- La pente de l'essai d'orniérage semble de manière générale relativement élevée, indiquant une sensibilité accrue du matériau. La pente est davantage élevée pour le cas du bitume d'apport 160/220, moins performant à l'orniérage, que pour le cas d'un bitume d'apport 70/100.
- Une différence significative est observée entre l'enrobé de référence fabriqué en centrale d'enrobage (STL-1) et fabriqué en laboratoire (STL-2). La différence est d'environ 280% à 3'000 cycles, l'enrobé satisfaisant presque aux exigences normatives lorsqu'il est fabriqué en centrale alors que les échantillons fabriqués en laboratoire dépassent les exigences à 3'000 cycles déjà. Il faut préciser que la période de mûrissement de l'enrobé fabriqué en laboratoire est habituellement de 48 h avant essai alors que l'enrobé de référence, fabriqué au poste d'enrobage BERAG a été stocké plusieurs mois avant essai. Ce stockage de longue durée a comme effet, principalement un vieillissement du bitume avec comme corollaire, une diminution de la susceptibilité aux déformations permanentes [21].
- Les propriétés moyennes des granulats contenus dans le mélange (arêtes probablement émoussées), participent de manière importante à la sensibilité mécanique du mélange. Cette hypothèse est mise en évidence par le comportement sensiblement différent obtenu avec le bitume 70/100.

**Tab. 17** Essais d'orniérage : Analyse de sensibilité temps de mûrissement (AC 11 S, 40% RAP).

N°	STL-1	STL-2	STL-3	STL-4	STL-5	STL-6	STL-7
<b>Liant</b>	160/220	160/220	160/220	160/220	70/100	70/100	70/100
<b>Épaisseur [mm]</b>	50	50	50	50	50	50	50
<b>Mûrissement</b>	48h	48h	1 mois	3 mois	48h	1 mois	3 mois
<b>Vides hydro. [%]</b>	4.3	3.4	3.0	3.1	3.9	4.1	4.0
<b>3'000 cycles [%]</b>	7.1	20.1	27.1	23.1	10.5	13.0	8.7
<b>10'000 cycles [%]</b>	10.3	-	-	-	14.9	-	12.4
<b>Pente [-]</b>	0.313	0.401	0.353	0.320	0.292	0.257	0.298
<b>Liant récupéré</b>							
<b>Pen 25°C [10<sup>-1</sup> mm]</b>	52	66	-	72	43	-	43
<b>Temp A&amp;B [°C]</b>	52.2	50.6	-	49.4	54.8	-	55.7

Note : STL-1 prélevé en centrale, les autres enrobés fabriqués en laboratoire

La seconde étude (Tab. 18) complémentaire menée au simulateur de trafic a eu pour objet l'évaluation de l'effet de la température des granulats d'apport (145 °C ou 190 °C) sur les performances de l'enrobé, la température du RAP étant maintenue constante (135 °C). Il est en effet fréquent que les granulats d'apport soient chauffés à des températures relativement élevées en centrale d'enrobage, ceci notamment afin de garantir une température suffisante de l'enrobé lors de son arrivée sur chantier (ce qui est garant d'une meilleure maniabilité). Dans le même temps, l'impact d'une variation de l'épaisseur de plaque (50 mm ou 100 mm) a également été évalué. Rappelons que la normalisation requiert pour ce type d'enrobé une épaisseur de plaque de 50 mm, la profondeur d'ornièrerie étant exprimée proportionnellement à l'épaisseur de la plaque. Nous pouvons observer :

- Dans tous les cas indiqués dans le Tab. 18, les enrobés ne satisfont pas aux exigences normatives pour la résistance à l'orniérage.
- Les différentes plaques testées ont une teneur en vides hydrostatiques relativement basse.
- L'augmentation de la température des granulats d'apport ne semble pas jouer de rôle significatif sur la résistance à l'orniérage de l'enrobé.
- Le recours à une plaque de plus grande épaisseur peut entraîner une profondeur d'ornièrerie plus importante (absolu). Dans le cas de plaques de 50 mm, la pente de

l'essai d'orniérage est également plus faible que pour une plaque de 100 mm. L'épaisseur plus grande de la plaque autorise en effet davantage de déformations au sein du matériau. Nous pouvons également relever que dans certains cas, une épaisseur de plaque plus élevée peut générer un faible biais sur le résultat de l'essai. Après discussions avec d'autres laboratoires spécialisés dans le domaine, il apparaît que l'épaisseur des plaques ne joue pas un rôle déterminant, mais cela dépend tout de même largement de la taille des grains.

**Tab. 18** Essais d'orniérage : Effet température granulats et épaisseur de plaque.

N°	STL-8	STL-9	STL-10	STL-11
Liant	160/220	160/220	160/220	160/220
Temp. RAP [°C]	135	135	135	135
Temp. granulats [°C]	145	145	190	190
Temp. mélange [°C]	140	140	150	150
Temp. Guedu [°C]	150	150	160	160
Epaisseur [mm]	50	100	50	100
Mûrissement	48h	48h	48h	48h
Vides hydro. [%]	2.7	2.9	3.7	3.6
1'000 cycles [%]	13.1	16.7	12.4	13.1
3'000 cycles [%]	-	-	-	-
10'000 cycles [%]	-	-	-	-
Pente [-]	0.295	0.363	0.268	0.440

Une dernière analyse au simulateur de trafic a été réalisée, ceci afin d'évaluer l'incidence des granulats (état des arêtes) sur les performances de l'enrobé. Pour cela, des fabrications 100% RAP ou 100% granulats d'apport ont été testées, tout autre paramètre maintenu identique. Les résultats sont consignés dans le Tab. 19. Nous pouvons observer que les granulats d'apport BERAG (100% semi-concassés) présentent également un état des arêtes ne permettant pas d'être satisfaisants du point de vue de la résistance à l'orniérage.

Les granulats utilisés dans le cadre de cette recherche sont donc de qualité intermédiaire, ce qui permet de mettre en évidence des différences significatives de comportement. Cette analyse sera davantage étayée aux chapitres suivants.

**Tab. 19** Essais d'orniérage : Effet des granulats (0% ou 100% RAP).

N°	STL-12	STL-13
Liant	50/70	160/220
Granulats	100% BERAG semi-concassés	100% RAP
Epaisseur [mm]	50	50
Mûrissement	48 h	48 h
Vides hydro. [%]	4.6	5.8
3'000 cycles [%]	13.6	7.6
10'000 cycles [%]	20.1	11.0
Pente [-]	0.329	0.305

Il apparaît finalement que l'essai d'orniérage est indiqué pour l'évaluation des performances d'enrobés contenant des matériaux recyclés, ceci car il permet de mettre en évidence des différences de comportement entre les variantes testées.

## 5.2.2 Préparation et fabrication des enrobés en laboratoire

Les essais étendus menés lors de cette analyse complémentaire ont notamment mis en évidence l'important effet de la méthode de fabrication et réchauffage des enrobés en laboratoire. Les conditions appliquées en laboratoire sont résumées dans le Tab. 20. Nous pouvons mettre en évidence que le réchauffage en laboratoire du LAVOC d'un enrobé ou de fraisat d'enrobé est de manière générale réalisé au micro-ondes, avant stabilisation des enrobés en étuve. L'application de cette procédure permettant de minimiser le vieillissement du bitume lors de la phase de réchauffage, est basée sur l'expérience acquise lors du mandat de recherche [28].

**Tab. 20** Procédures de réchauffage en laboratoire.

Phase		EMPA/Tecnotest	LAVOC
Réchauffage RAP		Etuve	Micro-ondes
Température étuve	°C	150	~ 135
Température RAP	°C	130	135 ± 5
Durée réchauffage	h / min	3 h.	~ 12 min.
Réchauffage granulats		Etuve	Etuve
Température étuve	°C	200	155
Température granulats	°C	193	145
Durée réchauffage	h	~ 16-20	~ 16-20
Réchauffage liant		Etuve	Etuve
Température étuve	°C	150	145
Température granulats	°C	135	140
Durée réchauffage	h	5.5	~ 4
Fabrication de l'enrobé			
Type de malaxeur	-	Freundl	Guedu
Température malaxeur	°C	160	~ 150
Température enrobé	°C	165	140
Durée malaxage	min	3	4.5
Masse enrobé fabriquée	kg	150	35

## 5.3 Essais sur la recette de référence

Comme mentionné précédemment la recette dite « de référence » est la recette fabriquée en centrale d'enrobage et décrite au chapitre 3.1. Nous effectuons ici une série d'essais sur cette recette de référence, l'optimisation de la formulation étant proposée au chapitre suivant.

Notons que les mesures de masse volumique réelle ne sont pas discutées de manière spécifique, car elles n'amènent pas d'éléments déterminants pour l'analyse.

### 5.3.1 Vue générale des essais

Dans l'ensemble de ce chapitre, la même recette (courbe granulométrique et teneur en liant) est utilisée, mais avec une variation au niveau du liant d'apport et des granulats de base (voir chapitre 5.1). Cela permet de mettre en évidence l'incidence de paramètres spécifiques et les mécanismes de comportement des enrobés avec matériaux recyclés.

Différents essais ont été sélectionnés afin d'évaluer les caractéristiques mécaniques et performances des enrobés. Les essais concernés sont listés dans le Tab. 21 qui contient également la référence normative pour la réalisation de chaque essai.

**Tab. 21** Liste des essais et références normatives.

Essais	Normes SN/EN
Essai Marshall (S&F)	SN 670 434a, EN 12697-34
Compactibilité PCG	EN 12697-31
Sensibilité à l'eau ITSR	SN 670 412a-NA, EN 12697-12
Module complexe	SN 670426, EN 12697-26
Teneur en liant	SN 670401, EN 12697-1
Analyse liant : Pénétration à 25 °C	SN 670 511a, EN 1426
Analyse liant : Température Anneau & Bille	SN 670 512, EN 1427
Sensibilité à l'orniérage	SN 670 433, EN 12697-33
Fatigue (épr. trapézoïdales)	SN 670424, EN 12697-24

Comme expliqué précédemment, le plan de recherche initial proposait la réalisation d'une analyse factorielle en testant l'ensemble des recettes avec les différents essais proposés. Il est rapidement apparu que certains essais ne permettent pas de mettre en évidence des différences de comportement, alors que d'autres essais se révèlent davantage représentatifs et mériteraient de plus amples investigations. Pour cela, l'ampleur donnée à chaque essai et recette est variable. La synthèse des essais et mesures effectués sur la recette de référence est disponible dans la Fig. 21. Nous pouvons relever :

- Au total 15 différentes variantes ont été testées avec la même recette de base : 2 formules sont issues de fabrications en centrales et 13 de fabrications en laboratoire.
- Comme discuté au chapitre 5.1, le recours à un liant 50/70 pour le mélange 40% RAP n'a pas de sens, le liant étant trop dur pour l'obtention d'un enrobé aux caractéristiques satisfaisantes. Cette variante (1-L) n'est donc pas analysée.
- Des essais de fatigue (éprouvettes trapézoïdales) étaient initialement prévus sur la recette de référence. Les couches de roulement (AC 11) ne sont cependant pas (ou peu) sollicitées en fatigue et un tel essai n'est alors pas représentatif. Pour cette raison, les essais de fatigue ne sont pas menés sur la recette de référence, mais sur un enrobé à module élevé. Cela est discuté au chapitre 5.6.
- Pour certains essais, des mélanges additionnels ont été testés (par exemple 100% RAP). Le cas échéant, cela sera précisé dans le chapitre concerné.
- Les résultats détaillés sont discutés dans la suite du chapitre, avec une analyse selon l'essai réalisé.

N°	Recette	Fabrication	Granulats	Liant	Essai Marshall (S&F)	Compacité PCG	Sensibilité à l'eau ITRR	Module complexe	Analyse granulométrique et teneur en liant	Récupération et analyse du liant (Pen, A&B, IP)	Sensibilité orniérage
1-C	AC 11S, 40% RAP	Centrale	BERAG	160/220							
2-C	AC 11S, 40% RAP	Centrale vieilli AASHTO	BERAG	160/220							
1-L	AC 11S, 40% RAP	Laboratoire	BERAG	50/70							
2-L	AC 11S, 40% RAP	Laboratoire	BERAG	160/220							
3-L	AC 11S, 40% RAP	Laboratoire	Bour. Sion	160/220							
4-L	AC 11S, 40% RAP	Laboratoire	Famsa	160/220							
5-L	AC 11S, 40% RAP	Laboratoire	Balmholz	160/220							
6-L	AC 11S, 40% RAP	Laboratoire	BERAG	70/100							
7-L	AC 11S, 40% RAP	Laboratoire	BERAG	PmB							
8-L	AC 11S, 0% RAP	Laboratoire	BERAG	50/70							
9-L	AC 11S, 0% RAP	Laboratoire	BERAG	PmB							
10-L	AC 11S, 0% RAP	Laboratoire	BERAG	70/100							
11-L	AC 11S, 0% RAP	Laboratoire	Bour. Sion	70/100							
12-L	AC 11S, 0% RAP	Laboratoire	Famsa	70/100							
13-L	AC 11S, 0% RAP	Laboratoire	Balmholz	70/100							

Fig. 21 Vue générale des essais réalisés sur la recette de référence.

### 5.3.2 Analyses granulométriques et teneur en liant

L'analyse granulométrique et la mesure de la teneur en liant ont pour but la vérification de l'homogénéité de production et validation de la fabrication de la recette théorique. Une évaluation systématique n'a pas été jugée nécessaire pour l'ensemble des enrobés. Les résultats d'analyse disponibles sont consignés dans le Tab. 22 qui contient également, pour rappel, la recette de référence. Nous pouvons relever :

- De manière générale, la variabilité dans les résultats entre laboratoires est d'autant plus élevée que la fraction granulométrique analysée est fine.
- La teneur en liant finale mesurée est systématiquement inférieure à la recette cible. Cela est notamment lié au fait que la recette cible suppose une mobilisation complète de l'ensemble du liant du RAP, ce qui ne correspond pas exactement à la réalité du mélange. La compréhension de ce phénomène de mélange du liant provenant du RAP et liant d'apport fait l'objet de nombreuses recherches terminées ou en cours (voir chapitre 1).
- Le point de filler de la courbe granulométrique est globalement bien maîtrisé, à l'exception de l'enrobé 7-L où la teneur en filler est 1.6% supérieure à la cible et de l'enrobé 9-L où la teneur en filler est 1.4% inférieure à la référence. Ces différences ne semblent cependant pas rédhibitoires. L'enrobé 9-L présente par ailleurs une déviation systématique par rapport à la référence, également observable aux tamis 2 mm et 4 mm.

**Tab. 22** Analyse granulométrique et teneur en liant.

N°	RAP	Granulats	Liant	Teneur liant/E [%]	Passant au tamis [%]		
					0.063 mm	2 mm	4 mm
<b>Cible</b>				6.10	8.1	35.2	54.8
1-C	40%	BERAG	160/220	5.87	7.8	34.8	53.5
2-L	40%	BERAG	160/220	5.89	8.8	38.5	58.8
				5.80	8.3	35.7	56.3
6-L	40%	BERAG	70/100	5.67	8.0	35.5	53.7
7-L	40%	BERAG	PmB	5.53	9.7	36.0	53.9
9-L	0%	BERAG	PmB	5.75	6.7	25.1	44.5
13-L	0%	Balmholz	70/100	5.80	7.9	33.8	53.3

Sauf mention spécifique, la teneur en liant indiquée pour les différents enrobés dans la suite du rapport fait référence à la teneur en liant théorique.

### 5.3.3 Analyse du liant

Le liant de différentes gâchées a été extrait afin de réaliser des essais de pénétration (25 °C) et de température anneau et bille, ainsi que calculer l'indice de pénétration IP. Les résultats sont indiqués dans le Tab. 23. Nous pouvons commenter :

- Dans le cas d'analyses sur liant récupéré de ce type de mélange, les résultats obtenus ne sont pas le reflet exact de la réalité physique ; le mélange des liants étant homogène dans le cas de la récupération.
- Pour le cas de la fabrication en laboratoire de la recette centrale (2-L), différentes variantes ont été testées soit :
  - <sup>1)</sup> Carottes Marshall stabilisées 30 min en étuve
  - <sup>2)</sup> Carottes Marshall stabilisées 90 min en étuve
  - <sup>3)</sup> Récupération de l'enrobé en sortie de Guedu
  - <sup>4)</sup> Mûrissement en laboratoire pendant 3 mois
  - <sup>5)</sup> Température RAP 135°C, granulats 145°C, Guedu 150°C
  - <sup>6)</sup> Température RAP 135°C, granulats 190°C, Guedu 160°C

Comme attendu, l'histoire thermique subie par le liant est clairement identifiable lors des essais de pénétration et d'anneau et bille. Les différents résultats sont consistants. De manière générale, la pénétration mesurée diminue et la température A&B augmente en fonction du vieillissement thermique subi. Nous pouvons relever que les caractéristiques du liant récupéré en sortie de Guedu <sup>3)</sup> sont presque analogues à celles du liant récupéré après une stabilisation de 3 mois en laboratoire <sup>4)</sup>. Comme il le sera également illustré plus loin, l'effet d'une modification de la température des granulats et Guedu est également très faible (<sup>5)</sup> et <sup>6)</sup>). La stabilisation des carottes en étuve a par contre un impact important sur le liant récupéré, la durée de stabilisation devant également être considérée (<sup>1)</sup> et <sup>2)</sup>).

- Comparativement à la fabrication en laboratoire (2-L), le liant récupéré suite à la fabrication en centrale d'enrobage (2-C) est davantage vieilli. Cela est certainement lié aux températures utilisées en centrales d'enrobage qui sont plus élevées qu'en laboratoire où les conditions très bien maîtrisées permettent un chauffage « optimal » des matériaux. Un autre paramètre est lié à la période d'attente entre la fabrication en centrale et la réalisation des essais en laboratoire.
- Pour la recette de référence 40% RAP mais avec liant 70/100, deux cas additionnels sont également analysés :
  - <sup>7)</sup> Récupération de l'enrobé en sortie de Guedu
  - <sup>8)</sup> Mûrissement en laboratoire pendant 3 mois



La différence observée entre la récupération en sortie de Guedu et après 3 mois de conservation au laboratoire est négligeable si l'on se base sur les mesures de pénétration et température Anneau et Bille.

- Dans le cas de mélanges sans fraisat d'enrobé, une différence au niveau de la pétrographie des granulats ne devrait vraisemblablement pas affecter les caractéristiques du liant récupéré. La différence de pénétration observée sur le liant récupéré de la fabrication avec granulats Bourgeoise de Sion (11-L) n'est pas jugée déterminante. Un effet de la pétrographie pourrait éventuellement se poser dans le cas de fillers avec surfaces spécifiques très différentes ou contenant des phyllosilicates. Les vides Rigden entre les différents granulats étant du même ordre de grandeur, ce paramètre ne semble pas jouer de rôle dans la présente étude.
- Un cas additionnel a été calculé avec une fabrication 100% RAP. Les résultats sont comparables à ceux discutés au chapitre 3.4 pour la récupération à froid.

**Tab. 23** Analyse des liants récupérés (AC 11 S).

N°	RAP	Granulats	Liant	Pen 25°C [10 <sup>-1</sup> mm]	Temp. A&B [°C]	IP [-]
2-C	40%	BERAG	160/220	50	53.2	-0.4
2-L	40%	BERAG	160/220	69 <sup>1)</sup>	50.6	-0.2
				66 <sup>2)</sup>	50.8	-0.3
				74 <sup>3)</sup>	51.0	0.0
				72 <sup>4)</sup>	49.4	-0.5
				67 <sup>5)</sup>	50.3	-0.4
				66 <sup>6)</sup>	50.1	-0.5
6-L	40%	BERAG	70/100	20	85.7	2.9
				43 <sup>4)</sup>	54.8	-0.4
				43 <sup>6)</sup>	55.7	-0.3
7-L	40%	BERAG	PmB	35	63.0	0.8
8-L	0%	BERAG	50/70	42	55.6	-0.3
9-L	0%	BERAG	PmB	56	62.0	1.7
11-L	0%	Bour. Sion	70/100	67	50.8	-0.3
12-L	0%	Famsa	70/100	58	52.5	-0.2
13-L	0%	Balmholz	70/100	55	52.1	-0.5
NA	100%	-	RAP 0/11	27	61.9	0.0

### 5.3.4 Essais Marshall

Les résultats de l'essai Marshall sont consignés dans le Tab. 24.

**Tab. 24** Essai Marshall sur les différents enrobés.

N°	RAP	Granulats	Liant	Teneur liant/E [%]	Vides Vm [%]	Stabilité SM [kN]	Fluage F [mm]
1-C	40%	BERAG	160/220	5.87	3.2	9.0	3.5
2-L	40%	BERAG	160/220	5.80 <sup>3)</sup>	2.4	9.1	3.9
				5.80	2.3	8.6	3.2
				6.00 <sup>1)</sup>	2.0	8.7	4.0
				6.00 <sup>2)</sup>	2.0	9.4	3.8
				6.10	1.6	9.0	3.5
3-L	40%	Bour. Sion	160/220	6.10	0.9	-	-
4-L	40%	Famsa	160/220	6.10	1.2	-	-
6-L	40%	BERAG	70/100	5.80	2.4	8.8	3.7
7-L	40%	BERAG	PmB	6.10	2.1	-	-
9-L	0%	BERAG	PmB	6.10	5.8	-	-
10-L	0%	BERAG	70/100	6.10	5.6	6.0	2.9
				6.10	6.9	6.2	2.7
11-L	0%	Bour. Sion	70/100	6.10	1.9	8.9	3.2
12-L	0%	Famsa	70/100	6.10	3.7	9.0	3.5
13-L	0%	Balmholz	70/100	6.10	5.8	6.0	3.3
NA	0%	BERAG	160/220	6.10	6.9	4.5	2.0

Nous pouvons effectuer les commentaires suivants :

- Chaque résultat d'essai Marshall est la moyenne de 4 éprouvettes dont le compactage est effectué à 135 °C.
- De nombreux essais ont été réalisés avec la recette de base, reconstituée en laboratoire (2-L). Pour certains cas, des conditions spécifiques ont été appliquées :
  - <sup>1)</sup> Température RAP de 135 °C, granulats 145 °C et Guedu 150 °C. Compactage des échantillons à 145 °C.
  - <sup>2)</sup> Température RAP de 135 °C, granulats 195 °C et Guedu 160 °C. Compactage des échantillons à 145 °C.
  - <sup>3)</sup> Enrobé stabilisé 30 minutes en étuve avant confection des échantillons.

Les différents essais sur cette recette ne mettent pas en évidence de différences significatives de comportement. Les valeurs de stabilité et fluage sont relativement homogènes. La variation de teneur en liant ne semble pas avoir d'effet significatif sur les performances.
- L'enrobé de référence fabriqué en centrale (1-C) et l'enrobé confectionné en laboratoire (2-L) possèdent des valeurs de stabilité et fluage comparables. La teneur en vides Marshall des échantillons confectionnés à partir de la gâchée en centrale est légèrement plus élevée. Cela peut être lié au réchauffage de l'enrobé ou à un vieillissement accru du liant lors de la fabrication au poste d'enrobage.
- Les enrobés de la recette de référence sont globalement très compacts. L'enrobé prélevé en centrale est conforme aux exigences normatives (3% ... 6%) alors que la reproduction de la recette de référence en laboratoire (2-L) abouti à des mélanges à la teneur en vides trop faible. Afin d'augmenter la teneur en vides, il pourrait être proposé une diminution de la teneur en liant. Ceci sera davantage détaillé plus loin.. Le re-

- cours à des granulats de qualité différente (état des arêtes) permettra également d'augmenter la teneur en vides de l'enrobé.
- Granulats BERAG : L'utilisation d'un liant plus dur de pénétration 70/100 (6-L) ne permet pas d'améliorer significativement les performances lors de l'essai Marshall.
  - L'incidence de la qualité des granulats recyclés peut également être observée. La confection de mélanges 0% RAP entraîne une augmentation substantielle de la teneur en vides ceci avec toujours des granulats d'apport BERAG, ainsi qu'une diminution du fluage et de la stabilité Marshall. Il semble globalement que le fraisat d'enrobé utilisé entraîne une teneur en vides plus faible en raison probablement des arêtes émoussées des granulats RAP.
  - L'utilisation de granulats Bourgeoise de Sion (11-L) ou Famsa (12-L) entraîne une augmentation significative de la stabilité Marshall, le fluage étant plus faible que pour le cas de référence avec granulats BERAG (10-L). La teneur en vides Marshall relativement basse de ces deux variantes (11-L et 12-L) semble également indiquer qu'une optimisation de la recette pourrait être menée, par une diminution éventuelle de la teneur en liant. L'utilisation de granulats Balmholz (13-L) ne met pas en évidence de différence avec l'utilisation de granulats BERAG (10-L) (avec également une similitude dans le comportement insuffisant à l'orniérage).
  - L'effet d'une modification de la classe de pénétrabilité du bitume ne peut être mis en évidence sur la seule base de ces résultats.
  - L'effet d'une modification de la teneur en liant sur les performances mécaniques ne peut être mis en évidence de manière univoque par la réalisation de l'essai Marshall.
  - Un cas additionnel a été testé, soit 0% RAP et bitume 160/220, ceci afin d'évaluer l'incidence du fraisat utilisé dans la recette de référence (2-L). Nous pouvons observer que la teneur en vides Marshall est sensiblement plus élevée sans utilisation de fraisat, ce qui confirme les observations précédentes. La stabilité Marshall du mélange sans RAP est, comme attendu, environ de moitié par rapport au cas de référence 2-L.
  - De manière générale, les observations faites lors de l'essai Marshall corroborent les observations issues des essais de sensibilité à l'orniérage. Il apparaît cependant que l'essai Marshall est moins discriminant pour la mise en évidence de différentes performances mécaniques des enrobés testés dans cette recherche.

Les essais Marshall discutés plus haut ont mis en évidence un certain impact du matériau recyclé sur les performances de l'enrobé. Afin d'obtenir quelques compléments d'information, des essais additionnels ont été réalisés sur un enrobé 100% RAP, avec une teneur en liant totale identique à celle de la recette de référence (6.1%). Le choix de la teneur en liant d'apport est effectué sur la base de la campagne d'essais préliminaires réalisée par les trois laboratoires intervenant dans le projet (5.7%/E pour RAP) et sur une seconde campagne réalisée en 2013 dans le cadre des essais croisés Robin qui indique une teneur en liant du RAP de 5.1%/E. La teneur en liant du RAP est donc 0.6% inférieure après 3 ans (vieillessement du matériau en vrac et/ou plus probablement hétérogénéité liée au stock).

Les résultats sont consignés dans le Tab. 25. Nous pouvons observer :

- Les échantillons Marshall ont été compactés à la température de 125 °C<sup>1</sup>) ou 140 °C<sup>2</sup>). Cette faible différence de température est sans incidence notable sur le comportement mécanique de l'enrobé.
- La stabilité Marshall est plus élevée lorsque la quantité de liant d'apport est réduite (0.4%), une part plus importante du liant total provenant du RAP. Pour la même raison, le fluage est plus faible avec un ajout de 0.4% de liant 160/220 que pour un ajout de 1%. Les tendances observées sont conformes aux attentes.
- Les vides Marshall des éprouvettes sont très (trop) faibles, pour les raisons discutées précédemment. La qualité des granulats RAP (arêtes) et de la teneur en liant jouent donc un rôle important mis en évidence par l'essai Marshall.

**Tab. 25** Essai Marshall sur les différents enrobés 100% RAP.

Liant RAP [%]	Liant 160/220 [%]	Liant total [%]	Vides Vm [%]	Stabilité SM [kN]	Fluage F [mm]
5.7 <sup>2)</sup>	0.4	6.1	2.6	14.2	4.0
5.7 <sup>1)</sup>	0.4	6.1	2.7	14.2	3.9
5.1 <sup>1)</sup>	1.0	6.1	2.1	11.5	5.0
5.1 <sup>1)</sup>	1.0	6.1	2.0	10.6	6.4

### 5.3.5 Compactibilité des enrobés

La compactibilité des enrobés a été évaluée par la réalisation d'essais à la presse à cisaillement giratoire (PCG) dont le mode de compactage est sensiblement différente de celui appliqué pour la confection des éprouvettes Marshall (compactage par impacts). Les différents résultats sont consignés dans le Tab. 26, la recette de référence étant appliquée pour les différents mélanges :

- L'épaisseur recommandée pour un enrobé AC 11 S est de 35 à 50 mm (SN 640 430b), ce qui correspond à environ 40-50 girations à la PCG. De manière générale, la compacité des différentes éprouvettes dans cette gamme de girations est relativement élevée, ce qui tend à penser que le module de richesse pourrait être abaissé dans le cadre d'une optimisation.
- La compacité à 1 giration est une valeur calculée sur la base d'une relation linéaire entre le compactage PCG et le logarithme du nombre de girations. Ce pourcentage de vides donnant une indication relative à l'état du matériau soumis une faible énergie de compactage. Un mélange trop compact après 1 ou 10 girations présentera une maniabilité excessive probablement liée à un faible frottement interne du squelette granulaire. Cela peut être une indication relative à une sensibilité accrue à l'orniérage.
- Pour l'enrobé 13-L, la seconde mesure est réalisée avec les fractions reconstituées <sup>1)</sup>.
- Le mélange prélevé à la centrale (2-C, vieilli AASHTO) est comparable au mélange de référence fabriqué en laboratoire (2-L) en terme de compacité à 40-50 girations. Nous pouvons cependant relever la différence de pente pour la courbe de régression, traduisant une mise en place plus difficile pour le mélange centrale vieilli selon la méthode AASHTO.
- Dans le cas de la recette de référence (40% RAP) et avec liant d'apport 160/220, la compacité est globalement comparable ceci indépendamment du type de granulats d'apport (2-L, 3-L, 4-L et 5-L). La pente de la droite de régression est également comparable, à l'exception du cas avec liant PmB où la pente est plus faible.
- Pour la recette de référence avec granulats BERAG et 40% RAP, le recours à un liant modifié (7-L) améliore légèrement la compacité du mélange (+1.2% à 40 cycles) comparativement à la recette de référence (2-L).
- Pour la recette de référence avec granulats BERAG et 0% RAP, le mélange avec liant d'apport 50/70 (8-L) présente une compacité sensiblement supérieure que celle du même mélange mais avec liant modifié (9-L) ou liant 70/100 (10-L).
- L'effet des granulats d'apport est également évalué sur le mélange ne contenant pas de fraisat et avec bitume 70/100. Les granulats BERAG (10-L) et Balmholz (13-L) montrent une compacité sensiblement inférieure à 40-50 girations que les recettes réalisées avec les granulats Bourgeoisie de Sion (11-L) ou Famsa (12-L).
- Un mélange 100% RAP a été testé (NA1) et il permet de mettre en évidence la grande compacité, liée comme expliqué précédemment à la forme des granulats. La quantité de liant d'apport ajouté ne met pas en évidence de différence significative. Nous pouvons également relever la compacité élevée à 1 giration (valeur calculée), indication d'une potentielle faible résistance à l'orniérage comme discuté précédemment.
- Le mélange 100% BERAG (NA2) avec liant 160/220 peut finalement être comparé au mélange 100% RAP (NA1) et à la recette de référence contenant 40% de RAP (2-L).

La compacité élevée de l'enrobé est principalement liée au fraisat d'enrobé ; la variante NA2 étant moins compacte.

**Tab. 26** Résultats presse à cisaillement giratoire (PCG).

N°	RAP	Granulats	Liant	Liant/E [%]	Pente [-]	Compacité moyenne [%vol] selon nbre girations			Compacité calculée [%vol]	
						5	40	50	C1	C200
2-C	40%	BERAG	160/220	6.10	3.01	87.2	96.1	96.7	83.9	98.1
2-L	40%	BERAG	160/220	6.10	3.71	85.9	94.9	95.9	80.6	98.7
3-L	40%	Bour. Sion	160/220	6.10	3.69	86.2	95.6	96.5	81.2	99.1
4-L	40%	Famsa	160/220	6.10	3.87	85.1	94.4	95.3	79.5	98.6
5-L	40%	Balmholz	160/220	6.10	3.59	86.4	95.3	96.2	81.4	98.8
7-L	40%	BERAG	PmB	6.10	3.01	87.2	96.1	96.7	83.9	98.1
8-L	0%	BERAG	50/70	6.10	3.46	85.9	95.1	95.9	81.5	98.0
9-L	0%	BERAG	PmB	6.10	3.73	81.0	89.0	89.8	75.1	94.3
10-L	0%	BERAG	70/100	6.10	3.91	79.4	87.8	88.7	73.2	93.5
11-L	0%	Bour. Sion	70/100	6.10	3.85	85.1	94.5	95.5	79.7	98.6
12-L	0%	Famsa	70/100	6.10	3.96	83.8	92.9	93.8	77.9	98.0
13-L	0%	Balmholz	70/100	6.10	3.84	81.6	89.9	90.8	75.6	95.4
		1)		6.10	3.87	78.2	86.5	87.4	72.1	92.2
NA1	100%	-	-	6.10	1.85	90.2	97.5	97.6	89.5	98.0
		+0.4%	160/220	6.10	2.33	87.5	89.2	97.3		87.5
		+1%	160/220	6.10	1.27	92.0	91.8	97.3		92.0
NA2	0%	BERAG	160/220	6.10	3.72	72.5	78.5	86.4	87.2	91.9

### 5.3.6 Sensibilité à l'eau des mélanges

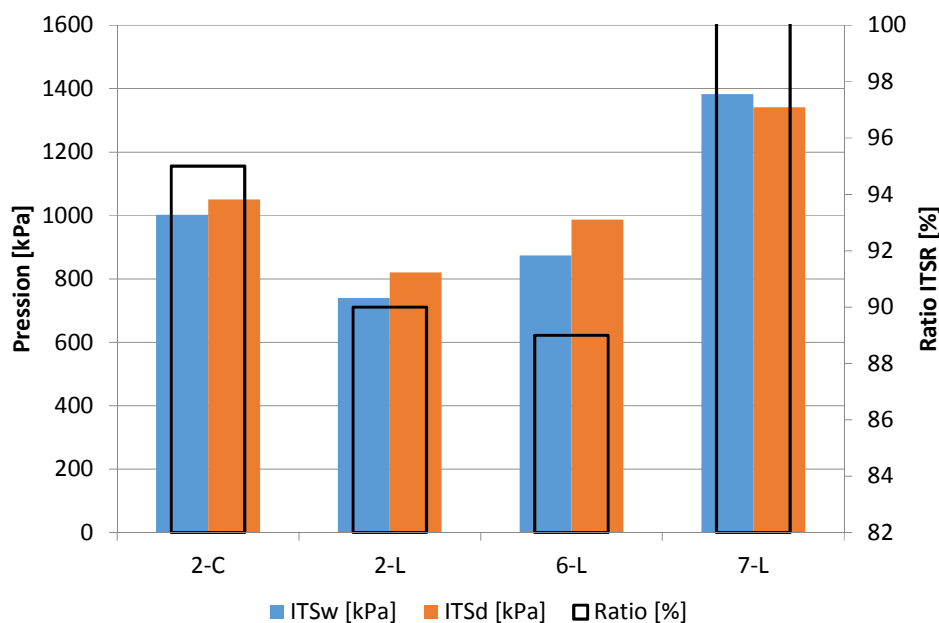
De manière générale, les mélanges contenant une proportion importante de fraisat d'enrobé peuvent présenter une certaine sensibilité à l'eau. Les différents résultats sont indiqués dans le Tab. 27.

- Pour la recette de référence (40% RAP), seules les variantes avec granulats d'apport BERAG sont testées.
- Bien que sa représentativité du point de vue du comportement mécanique de l'enrobé soit discutable, il est possible d'obtenir un ratio ITSR supérieur à 100% (7-L). Cela est lié à la dispersion des résultats lors de la réalisation de l'essai (squelette minéral, vides) et au conditionnement des échantillons.
- Dans le cas de mélanges avec granulats BERAG, 40% RAP (Fig. 22), l'effet du liant d'apport est clairement mis en évidence. La sensibilité à l'eau est plus élevée pour l'enrobé avec liant 160/220 (2-L) que pour le mélange avec liant d'apport 70/100 (6-L). La différence reste cependant modérée. Le recours à un liant modifié permet par contre de sensiblement diminuer la sensibilité à l'eau, les pressions de rupture étant davantage élevées de même que le ratio ITSR (7-L). La recette centrale (2-C) obtient des pressions de rupture (et un ratio ITSR) plus élevées que la variante fabriquée en laboratoire, ceci probablement en raison du vieillissement du liant plus important en centrale d'enrobage.
- L'effet des différents granulats d'apport peut être analysé dans la Fig. 23 (enrobés 10-L, 11-L, 12-L et 13-L). Comme pour les essais de compactibilité et essais Marshall, les

granulats BERAG (10-L) et Balmholz (13-L) présentent un comportement comparable. Le ratio ITSR obtenu pour ces deux enrobés est élevé (> 90%), mais nous pouvons cependant noter des pressions de rupture des échantillons moins élevées que pour les autres granulats. A l’opposé, les enrobés fabriqués avec les granulats Bourgeois de Sion (11-L) et Famsa (12-L) ont des pressions de rupture élevées, mais un ratio ITSR satisfaisant juste aux exigences normatives (> 70%).

**Tab. 27** Sensibilité à l'eau des différents enrobés.

N°	RAP	Granulats	Liant	Teneur liant/E [%]	ITSw [kPa]	ITSd [kPa]	Ratio [%]
2-C	40%	BERAG	160/220	5.87	1'002	1'051	95
2-L	40%	BERAG	160/220	6.10	740	820	90
6-L	40%	BERAG	70/100	6.00	874	987	89
7-L	40%	BERAG	PmB	6.04	1383	1342	103
9-L	0%	BERAG	PmB	-	775	846	92
10-L	0%	BERAG	70/100	6.10	525	569	92
11-L	0%	Bour. Sion	70/100	-	654	889	74
12-L	0%	Famsa	70/100	-	713	913	78
13-L	0%	Balmholz	70/100	-	566	578	98



**Fig. 22** Sensibilité à l'eau – Recette de référence, 40% RAP.

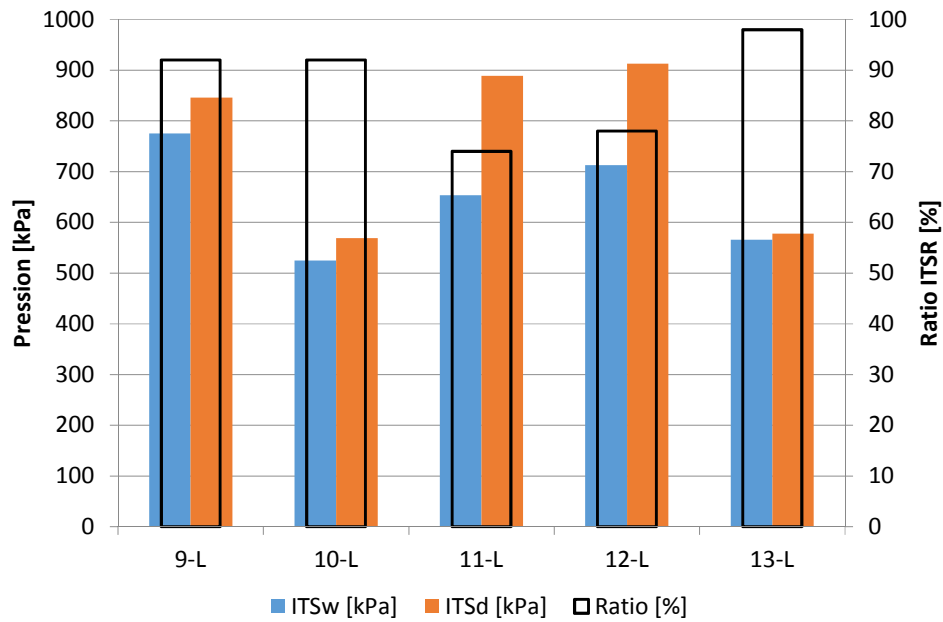


Fig. 23 Sensibilité à l'eau – Recette de référence, 0% RAP.

### 5.3.7 Rigidité des enrobés

Le module complexe (2PB-TR, éprouvettes trapézoïdales) a été déterminé pour les enrobés fabriqués en centrale d'enrobage avec (2-C) et sans (1-C) vieillissement AASHTO, ainsi que pour le mélange de référence reconstitué en laboratoire (2-L). Les essais de rigidité sont donc réalisés sur une recette identique.

- Pour la préparation des essais, les enrobés sont réchauffés au micro-ondes selon la procédure détaillée au chapitre 5.2.2, puis stabilisés en étuve avant compactage des plaques qui seront sciées pour la confection des éprouvettes à tester.
- Dans le cadre d'un dimensionnement, le module complexe généralement utilisé pour un enrobé AC 11 S est d'environ 5'400 MPa (15 °C, 10 Hz). Les valeurs obtenues correspondent donc à ce qui peut être attendu.
- La courbe maîtresse de l'enrobé 1-C (centrale, sans vieillissement) est représentée dans la Fig. 24. La rigidité du matériau augmente lorsque la température diminue et/ou la fréquence augmente. La relation inverse est également valable pour une diminution de la rigidité.
- La comparaison des enrobés prélevés en centrale d'enrobage (1-C) et fabriqués en laboratoire (2-L) met en évidence des différences d'environ 4% (15 °C, 10 Hz) ce qui n'est pas jugé significatif. La rigidité du matériau fabriqué en laboratoire est comparable à celle du matériau fabriqué en centrale.
- La Fig. 25 illustre l'effet du vieillissement AASHTO avec une comparaison entre les courbes maîtresses des essais 1-C (rouge) et 2-C (bleu). L'effet du vieillissement est négligeable à basse température ou haute fréquence (partie droite de la courbe). L'effet du vieillissement est davantage visible dans le domaine des hautes températures ou basses fréquences (partie gauche de la courbe) ; la différence est d'environ 20% entre les deux courbes.

Tab. 28 Module complexe des enrobés.

N°	RAP	Granulats	Liant	Teneur liant/E	Vides géom. [%]	E* (15 °C, 10 Hz)
1-C	40%	BERAG	160/220	5.87	2.9	6809
2-C	40%	BERAG	160/220	5.87	2.9	7304
2-L	40%	BERAG	160/220	6.10	1.9	7108

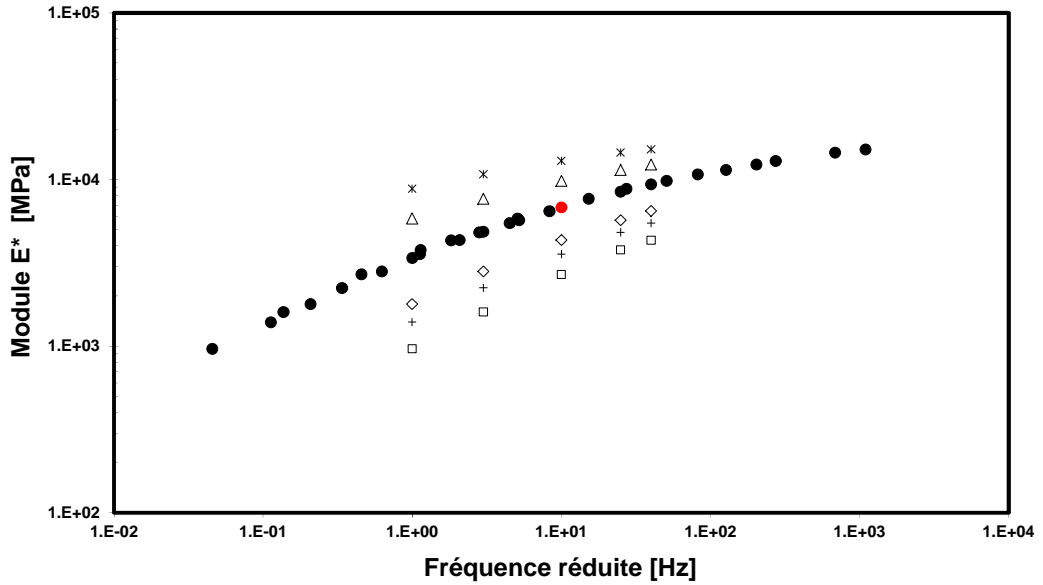


Fig. 24 Courbe maîtresse enrobé 1-C.

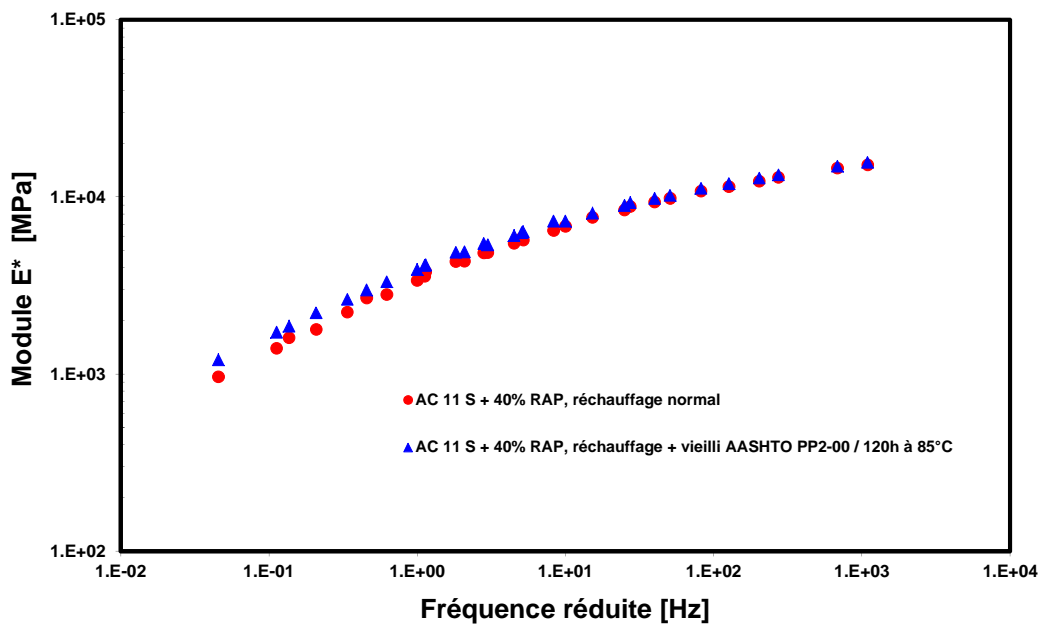


Fig. 25 Courbe maîtresse enrobé 1-C, comparaison de la méthode de vieillissement.

### 5.3.8 Sensibilité à l'orniérage

Comme illustré au chapitre 5.2, l'essai au simulateur de trafic (sensibilité à l'orniérage) semble être un indicateur pertinent permettant de mettre en évidence des différences de comportement entre les enrobés. Les résultats obtenus pour la recette de référence sont résumés dans le Tab. 29 pour les enrobés contenant 40% de RAP et le Tab. 30 pour les enrobés avec 0% RAP. Lorsque disponibles, les résultats d'analyse du liant récupéré, discutés au chapitre 5.3.3, sont également indiqués.

De manière générale, nous pouvons relever :

- La pente correspond à la droite représentée dans la relation entre le nombre de cycles (logarithmique) et la profondeur d'ornièr (pourcentage de la hauteur). Cette pente



traduit donc la propension du matériau à former des ornières et la vitesse de développement de ces ornières. Une pente faible ( $< 0.2$ ) indique un matériau stable dont le post-compactage est réduit. A l'inverse, une pente élevée ( $> 0.3$ ) va fournir des renseignements importants quant au développement probable d'ornières.

- L'ornière indiquée dans les tableaux ci-dessous correspond à la profondeur d'ornière calculée (base pour exigences normatives). Une différence peut apparaître entre l'ornière calculée et mesurée, ceci principalement lors des premiers cycles (post-compactage).
- Nous considérons que l'épaisseur des plaques ne joue pas un rôle déterminant sur la profondeur d'ornière mesurée lors de l'essai (pourcentage de la hauteur de plaque). De plus amples discussions à ce sujet sont disponibles au chapitre 5.2.
- Pour rappel, les exigences normatives demandent une profondeur d'ornière  $\leq 10.0\%$  (plaque 50 mm, 60°C) à 10'000 cycles (SN 640 431-1b-NA, EN 13108-1 :2006). Conformément à ces mêmes exigences normatives, l'essai est réalisé en imposant un temps de cure minimale de 48 heures après confection des plaques.
- L'essai au simulateur de trafic est un essai relativement discriminant qui peut s'avérer davantage sévère que la réalité observée *in situ*. Il permet donc de positionner l'analyse du côté de la sécurité.

Les essais réalisés sur l'enrobé avec 40% de matériaux recyclés amènent l'analyse suivante :

- Le domaine de vides des différents échantillons testés est comparable.
- Les différents enrobés ne permettent pas de satisfaire aux exigences normatives, ceci indépendamment des granulats d'apport et du liant d'apport. Ces résultats sont, comme discutés précédemment, probablement liés à la qualité des arêtes du fraisat d'enrobé.
- La pente de la droite de corrélation est relativement élevée, ce qui traduit la sensibilité à l'orniérage des matériaux testés.
- Le matériau fabriqué en centrale (1-C) est le plus résistant à l'orniérage, ceci probablement en raison du vieillissement important lié à la fabrication. La recette identique, fabriquée en laboratoire (2-L) est en effet largement insuffisante vis-à-vis de l'orniérage ; l'essai devant être arrêté après 3'000 cycles.
- Avec un même liant d'apport 160/220, mais différents granulats d'apport, la résistance à l'orniérage peut être sensiblement améliorée. Les granulats Famsa (4-L) et Balmholz (5-L) sont sensiblement plus performants que le granulats BERAG (2-L), les granulats Bourgeois de Sion (3-L) amenant une résistance intermédiaire. Malgré les relatives faibles performances du fraisat d'enrobé, le rôle des granulats d'apport peut donc être mis en évidence.
- Par rapport à la recette de référence (2-L), la modification du type de liant d'apport (6-L, 7-L) permet d'améliorer la résistance à l'orniérage de l'enrobé, la profondeur d'ornière calculée à 3'000 cycles diminuant de moitié. Cela peut être observé par les résultats d'analyse du liant récupéré dont la pénétration est sensiblement plus faible pour les enrobés 6-L et 7-L que pour le cas de référence 2-L.
- Ces différents résultats illustrent que la recette ne semble pas optimisée du point de vue de la résistance à l'orniérage. Les granulats (RAP et apport) jouent un rôle significatif qui a pu être mis en évidence. Il apparaît également qu'une optimisation au niveau du module de richesse pourrait être faite. Cela sera détaillé dans le chapitre 5.4.

**Tab. 29** Essais d'orniérage sur la formule de référence, 40% RAP.

N°	1-C	2-L	3-L	4-L	5-L	6-L	7-L
<b>Teneur RAP</b>	40%	40%	40%	40%	40%	40%	40%
<b>Fabrication</b>	Cent.	Labo.	Labo.	Labo.	Labo.	Labo.	Labo.
<b>Granulats</b>	BERAG	BERAG	Bourg.	Famsa	Balmh.	BERAG	BERAG
<b>Liant</b>	160/220	160/220	160/220	160/220	160/220	70/100	PmB
<b>Epaisseur</b>	50	50	50	50	50	50	50
<b>Vides hydro. [%]</b>	4.3	3.4	4.0	-	4.5	3.9	3.7
<b>3'000 cycles [%]</b>	7.1	20.1	12.6	8.6	8.0	10.5	9.5
<b>10'000 cycles [%]</b>	10.3	-	17.5	12.6	12.8	14.9	13.0
<b>Pente</b>	0.313	0.401	0.273	0.317	0.427	0.292	0.265
<b>Liant récupéré</b>							
<b>Pen 25°C [10<sup>-1</sup> mm]</b>	-	67				20	35
<b>Temp A&amp;B [°C]</b>	-	51.3				85.7	63.0

Les résultats de l'essai d'orniérage menés sur la recette de référence, mais sans matériaux recyclés, sont détaillés dans le Tab. 30. Il vient :

- Le domaine de vide des différentes plaques testées présente une plus grande variabilité que l'analyse des enrobés avec 40% RAP. Cela est particulièrement le cas pour les enrobés 9-L et 13-L dont la teneur en vides hydrostatiques est plus élevée avec pour conséquence éventuelle une différence de résistance à l'orniérage.
- Les pentes des droites de régression sont globalement plus faibles que pour le cas 40% RAP, ce qui est positif pour la résistance à l'orniérage des différents matériaux. Nous pouvons illustrer cela par la profondeur d'ornière calculée après 30'000 cycles qui est de 12.1% pour l'enrobé 9-L, 12.7% pour l'enrobé 10-L, 12.6% pour l'enrobé 11-L et 9.6% pour l'enrobé 12-L qui s'avère être le plus performant de l'ensemble des mélanges testés.
- De manière générale, les enrobés sans RAP s'avèrent davantage résistants à l'orniérage que les mêmes enrobés avec 40% de RAP. La pétrographie et les caractéristiques intrinsèques des granulats jouent un rôle prépondérant sur le comportement mécanique des enrobés.
- La réalisation de l'essai avec uniquement des granulats d'apport permet de sensiblement améliorer la résistance à l'orniérage. Pour le granulat BERAG et liant 70/100 (10-L), l'ornière calculée à 10'000 cycles est proche des exigences normatives (10.8%), ce qui n'était pas le cas avec l'utilisation de 40% de RAP (6-L) où une profondeur d'ornière de 14.9% a été calculée. Cela démontre à nouveau l'incidence de la qualité du RAP sur la résistance à l'orniérage de l'enrobé.
- L'utilisation de granulats d'apport différents peut permettre d'améliorer la résistance à l'orniérage. Les essais menés avec les granulats bourgeoisie de Sion (11-L) et Famsa (12-L) satisfont aux exigences normatives.

**Tab. 30** Essais d'orniérage sur la formule de référence, 0% RAP.

N°	8-L	9-L	10-L	11-L	12-L	13-L
<b>Teneur RAP</b>	0%	0%	0%	0%	0%	0%
<b>Fabrication</b>	Labo.	Labo.	Labo.	Labo.	Labo.	Labo.
<b>Granulats</b>	BERAG	BERAG	BERAG	Bourg.	Famsa	Balmh.
<b>Liant</b>	50/70	PmB	70/100	70/100	70/100	70/100
<b>Epaisseur [mm]</b>	50	50	50	50	50	50
<b>Vides hydro. [%]</b>	4.9	8.1	5.8	5.5	6.7	8.6
<b>3'000 cycles [%]</b>	13.6	7.8	9.1	7.6	6.1	10.8
<b>10'000 cycles [%]</b>	20.1	9.8	10.8	9.9	7.7	15.5
<b>Pente</b>	0.329	0.193	0.147	0.223	0.194	0.301
<b>Liant récupéré</b>						
<b>Pen 25°C [10<sup>-1</sup> mm]</b>	42	56	-	67	58	55
<b>Temp A&amp;B [°C]</b>	55.6	62	-	50.8	52.5	52.1

### 5.3.9 Bilan des essais sur la formule de référence

Les principaux enseignements issus des essais sur la formule de référence (AC 11 S, 40% RAP) sont les suivants :

- Bien que des tendances générales puissent être déduites, certains essais (Marshall par exemple) ne permettent pas de mettre en évidence de manière significative des différences de comportement. L'essai d'orniérage semble par contre plus indiqué ; cet essai étant davantage discriminant.
- L'effet du type de liant d'apport peut être quantifié au-travers de différents essais.
- Il apparaît clairement que les granulats (origine pétrographique et caractéristiques liées au mode de production) jouent un rôle déterminant sur le comportement mécanique de l'enrobé. Le fraisat utilisé dans le cadre de cette recherche comporte une proportion significative de grains à arêtes émoussées ainsi que de grains arrondis, ce qui péjore sensiblement la résistance à l'orniérage des enrobés. De même, les essais réalisés avec différents types de granulats d'apport ont permis de mieux quantifier la qualité des granulats BERAG et leur impact sur les caractéristiques et performances de l'enrobé.
- De manière générale, les performances mécaniques et caractéristiques de la recette de référence semblent devoir être optimisée. Certaines exigences normatives ne sont en effet pas respectées (résistance à l'orniérage et compacité trop élevée)
- Considérant que les granulats d'apport (BERAG) et le fraisat (RAP) sont conservés, l'optimisation doit être menée notamment par une réflexion au niveau du mastic présent dans l'enrobé. La compacité élevée et les performances mécaniques observées lors des essais sur la recette de référence laissent penser que le mélange final est probablement trop riche en mastic. Cela sera approfondi au chapitre suivant.

## 5.4 Optimisation de la formulation

Les essais réalisés sur la recette de référence ont notamment mis en évidence le potentiel d'optimisation de la formulation. Considérant une courbe granulométrique identique à celle de la recette de référence, ainsi que les mêmes granulats d'apport (BERAG) et fraisat d'enrobé (RAP), l'optimisation a été menée au-travers de la variation de la teneur en liant (cible) et donc du module de richesse (mastic). Les différents enrobés testés sont consignés dans le Tab. 31 où l'on pourra relever qu'un liant d'apport 160/220 est utilisé dans le cas d'un enrobé avec 40% de RAP, le liant d'apport 70/100 étant plus indiqué pour le mélange ne comportant pas de RAP. Comme discuté précédemment, il semble

que la formulation de référence (6.1% liant) soit trop riche en mastic ; l'optimisation est donc principalement concentrée sur une diminution de la teneur en liant.

**Tab. 31** Mélanges testés selon la formule de référence.

N°	Recette	Fabrication	Granulats	Liant	Teneur en liant/E
O-1	AC 11S, 40% RAP	Laboratoire	BERAG	160/220	5.5% (-0.6%)
O-2	AC 11S, 40% RAP	Laboratoire	BERAG	160/220	5.8% (-0.3%)
O-3	AC 11S, 40% RAP	Laboratoire	BERAG	160/220	6.1% (REF)
O-4	AC 11S, 40% RAP	Laboratoire	BERAG	160/220	6.5% (+0.4%)
O-5	AC 11S, 0% RAP	Laboratoire	BERAG	70/100	5.5% (-0.6%)
O-6	AC 11S, 0% RAP	Laboratoire	BERAG	70/100	5.8% (-0.3%)
O-7	AC 11S, 0% RAP	Laboratoire	BERAG	70/100	6.1% (REF)
O-8	AC 11S, 0% RAP	Laboratoire	BERAG	70/100	6.4% (+0.3%)

Pour les différents enrobes mentionnés ci-dessus, les essais suivants sont réalisés :

- Essai Marshall (stabilité et fluage)
- Compactibilité PCG
- Sensibilité à l'eau ITSR
- Résistance à l'orniérage

Comme lors des essais sur la recette de référence, les différents paramètres n'ont pas été systématiquement évalués pour l'ensemble des enrobés. Certains aspects ont donc été plus ou moins approfondis, ceci selon la représentativité de l'essai et les résultats obtenus.

#### 5.4.1 Résultats d'essais et analyse

Nous discutons dans le présent chapitre les différents résultats d'essais menés dans le cadre de l'optimisation de la formulation selon l'approche Marshall (*i.e.* variation de la teneur en liant).

Les résultats de l'essai Marshall sont consignés dans le Tab. 32. Comme observé précédemment, l'essai Marshall peut ne pas être adapté afin de mettre en évidence des tendances univoques entre les variantes testées. Nous pouvons tout de même effectuer les commentaires suivants :

- Les différents échantillons sont compactés à la température de 130 °C (0% RAP) ou 135 °C (40% RAP).
- Enrobé avec 40% RAP : La diminution de la teneur en liant permet globalement d'augmenter la teneur en vides Marshall, ce qui est bénéfique car le mélange de référence (6.1% liant) est proche voire inférieur à la valeur normative minimale (3%). A l'inverse, une augmentation de la teneur en liant (6.4%) a pour conséquence une teneur en vides Marshall trop faible (1.9%).
- Pour le cas de l'enrobé contenant 0% RAP, nous pouvons également observer l'augmentation des vides Marshall avec la diminution de la teneur en liant. Rappelons cependant que la gamme de vides des échantillons sans RAP est davantage élevée que celle des échantillons contenant 40% de RAP, ceci en raison des caractéristiques des granulats.
- Une diminution de la teneur en liant n'est pas nécessairement garante de meilleur comportement mécanique. Une diminution de la teneur en liant engendre une augmentation de la teneur en vides ; une teneur en vides trop élevée du matériau pouvant engendrer une péjoration des performances mécaniques (durabilité), la rigidité pouvant quant à elle s'avérer augmentée.

- L'effet d'une modification de la teneur en liant sur la stabilité et fluage Marshall n'est que modéré. Pour le cas avec 40% RAP, une teneur en liant de 5.5% (O-1) semble cependant permettre de diminuer le fluage d'environ 0.5-0.6 mm comparativement au cas de référence (O-3), tout en conservant une stabilité comparable.
- La comparaison entre les mélanges 40% RAP et 0% RAP met clairement en évidence l'effet du RAP sur la teneur en vides Marshall qui diminue de manière importante. Cela a été également discuté précédemment.
- Dans le cas d'une formulation avec 40% RAP, et étant donné la qualité du RAP, il semble opportun de diminuer la teneur en liant. Pour rappel, la normalisation demande une teneur en liant dosé minimale de 5.4% pour ce type de mélange.

**Tab. 32** Optimisation de la formulation - Essai Marshall.

N°	RAP	Liant	Teneur cible liant /E [%]	Vides Vm [%]	Stabilité SM [kN]	Fluage F [mm]	Fluage tangentiel Ft [mm]
O-1	40%	160/220	5.5%	2.8	9.9	2.7	1.5
			5.5%	4.5	7.7	2.6	1.5
O-2	40%	160/220	5.8%	3.0	7.9	2.7	1.6
O-3	40%	160/220	6.1%	3.0	9.9	3.2	1.5
O-4	40%	160/220	6.4%	1.9	7.5	3.6	1.9
O-5	0%	70/100	5.5%	8.8	5.1	2.5	1.4
O-6	0%	70/100	5.8%	7.7	5.8	2.8	1.8
O-7	0%	70/100	6.1%	6.5	6.2	2.7	1.7
O-8	0%	70/100	6.4%	6.5	5.6	2.1	1.3

Les résultats de l'essai de compactibilité PCG, pour différentes teneurs en liant et en RAP, sont consignés dans le Tab. 33 :

- De manière générale, une diminution de la teneur en liant a pour conséquence une diminution de la compacité moyenne et donc augmentation de la teneur en vides de l'enrobé. Selon le même principe, une augmentation de la teneur en liant diminue les vides de l'éprouvette. Ces tendances sont particulièrement observables pour les mélanges ne contenant pas de RAP.
- Dans le cas du mélange contenant 40% de fraisat, le choix d'une teneur en liant de 5.5% (O-1) ne semble pas péjorer la compacité du mélange comparativement au cas de référence contenant 6.1% de liant. Par contre, le choix d'une augmentation de la teneur en liant ne semble pas indiqué, la compacité s'avérant trop élevée.
- Pour les mélanges ne contenant pas de fraisat, une diminution de la teneur en liant de 0.6% a pour conséquence une diminution de la compacité d'environ 2.5% (comparaison O-5 et O-7).
- Comme observé lors des essais Marshall, les mélanges comportant 40% de RAP présentent globalement une compacité supérieure aux mélanges sans fraisat d'enrobé. Ceci est lié à l'utilisation du RAP et à ses caractéristiques physiques (état des arêtes). Dans le cas d'un mélange comportant 40% de RAP, il semble donc opportun de diminuer la teneur en liant (par exemple 5.5%) par rapport au cas de référence (6.1%), ceci afin d'augmenter légèrement la teneur en vides sans péjoration de la compactibilité du mélange. Par contre, dans le cas d'un mélange ne comportant pas de RAP, il peut être proposé de conserver une teneur en liant de 6.1%, ceci afin de conserver une teneur en vides qui reste dans une gamme admissible (vides Marshall 3% ... 6%).

**Tab. 33** Optimisation de la formulation – Compactibilité PCG.

N°	RAP	Liant	Teneur cible liant /E [%]	Pente [-]	Compacité moyenne [%vol] selon nbre girations			Compacité calculée [%vol]	
					5	40	50	C1	C200
O-1	40%	160/220	5.68%	3.75	85.4	94.5	95.5	80.1	98.4
			5.5%	4.05	83.7	92.5	93.4	77.4	98.2
O-2	40%	160/220	5.8%	3.94	84.2	93.2	94.1	78.3	98.1
O-3	40%	160/220	6.1%	3.80	85.8	94.2	95.2	79.9	98.8
O-4	40%	160/220	6.5%	3.39	86.5	95.6	96.6	82.2	98.3
O-5	0%	70/100	5.5%	3.79	77.3	85.4	86.3	71.3	91.0
O-6	0%	70/100	5.8%	3.86	78.2	86.5	87.4	72.1	92.1
O-7	0%	70/100	6.1%	3.91	79.4	87.7	88.6	73.2	93.5
O-8	0%	70/100	6.4%	3.95	78.9	87.3	88.2	72.6	93.1

Des essais réduits de sensibilité à l'eau ont été réalisés. Les résultats, consignés dans le Tab. 34 mettent en évidence les éléments suivants :

- Dans le cas d'un mélange comportant 40% de RAP, la diminution de la teneur en liant a un effet positif sur la résistance à l'humidité de l'enrobé. En effet, bien que le ratio ITSR reste globalement comparable (90% pour O-3, 92% pour O-1), les pressions de rupture sont sensiblement augmentées dans le cas du mélange comportant 5.5% d'enrobé. Cette augmentation est de 27% pour les échantillons humides et de 25% pour les échantillons secs.
- L'enrobé sans fraisat (O-7) a un ratio ITSR comparable à celui de l'enrobé comportant 40% de RAP (O-3), mais les pressions de rupture sont 5 à 8% inférieures. L'ajout de fraisat d'enrobé a généralement pour conséquence une augmentation de la pression de rupture, cela étant notamment lié au processus de vieillissement du liant.

**Tab. 34** Optimisation de la formulation – Sensibilité à l'eau.

N°	RAP	Liant	Teneur cible liant /E [%]	ITSw [kPa]	ITSd [kPa]	Ratio [%]
O-1	40%	160/220	5.5%	943	1026	92
O-3	40%	160/220	6.1%	740	820	90
O-7	0%	70/100	6.1%	683	781	88

Les résultats d'essais d'orniérage sont indiqués dans le Tab. 35 :

- L'enrobé O-1 est performant d'un point de vue de l'orniérage, la profondeur d'ornière est de 10% à 30'000 cycles et 13% à 100'000 cycles.
- Dans le cas du mélange avec 40% de matériaux recyclés, une diminution de la teneur en liant permet de notablement améliorer la résistance à l'orniérage. La diminution de profondeur d'ornière est de près de 50%, ce qui permet à l'enrobé comportant 5.5% de liant (O-1) d'être conforme aux exigences normatives alors que la recette de base ne satisfait pas à ces mêmes exigences.
- Ces résultats confirment que le module de richesse de la recette de référence est trop élevé, ce qui ne permet pas d'atteindre les performances mécaniques requises. En raison d'un accès partiel aux fines, le bitume est probablement réparti de manière hétérogène dans le mélange de base avec un film de liant d'épaisseur variable. L'accessibilité des fines du RAP est en effet rendu plus difficile en raison des nodules de sable-mastic ce qui pousse le bitume d'apport à se répartir sur des gros grains et non pas sur des particules fines.

- Une diminution de la teneur en liant pour le mélange comportant 40% de RAP semble donc nécessaire.
- L'essai d'orniérage (simulateur de trafic) est, pour le cas testé, un indicateur pertinent permettant de mettre en évidence des différences significatives de comportement entre les enrobés.

**Tab. 35** Optimisation de la formulation – Essai d'orniérage.

N°	O-1	O-3	O-7
Teneur RAP	40%	40%	0%
Liant	160/220	160/220	70/100
Liant cible /E [%]	5.5	6.1	6.1
Epaisseur [mm]	50	50	50
Vides hydro. [%]	3.5	4.6	5.8
3'000 cycles [%]	6.0	11.6	9.1
10'000 cycles [%]	7.9	17.8	10.8
Pente [-]	0.218	0.359	0.147

## 5.5 Effet de la méthode de fabrication / réchauffage

Il est apparu en cours de recherche que les laboratoires travaillant dans le projet appliquent des procédures en laboratoire pouvant parfois différer. Cela concerne principalement la méthode de confection des échantillons pour laquelle les détails sont fournis au chapitre 5.2.2. Sur le principe, les méthodes suivantes ont été appliquées :

- LAVOC : Confection immédiate des échantillons après vieillissement maîtrisé lors de la fabrication.
- EMPA : Fabrication de l'enrobé, répartition en cartons puis stockage (parfois plusieurs mois). L'enrobé est ensuite réchauffé selon les besoins.

Afin d'analyser l'incidence de ces deux méthodes de confection des échantillons, une série limitée d'essais a été réalisée au LAVOC, ceci selon les deux procédures ci-dessus. Les essais réalisés sont :

- Récupération et analyse du liant
- Essai Marshall (stabilité et fluage)
- Résistance à l'orniérage
- Sensibilité à l'eau ITSR
- Rigidité (module complexe 2PB-TR)

Relevons encore que l'enrobé pour la méthode de vieillissement dite « EMPA » a été fabriqué au laboratoire du LAVOC puis stocké en cartons, conservé à température ambiante puis finalement réchauffé selon la procédure EMPA après un stockage de 5 mois.

### 5.5.1 Résultats d'essais et analyse

L'objectif principal de cette analyse est d'évaluer si une différence significative pourrait exister selon la méthode de confection des échantillons.

L'analyse du liant récupéré (Tab. 36) indique une différence au niveau de la pénétration du liant récupéré, ceci en fonction de la méthode de réchauffage appliquée. La pénétration résiduelle pour la méthode de vieillissement « EMPA » indique un vieillissement plus élevé de 10% environ. Pour rappel, le liant récupéré de la centrale d'enrobage puis vieilli selon la méthode AASHTO indique une pénétration de 50 [10<sup>-1</sup> mm]. La température anneau et bille et l'indice de pénétration (IP) sont par contre comparables.

Nous pouvons relever que le vieillissement du liant est intimement lié au module de richesse et à la composition générique du bitume, les fractions légères s'évaporant davantage dans le cas de réchauffage sévère. De plus amples informations peuvent être trouvées dans [21].

**Tab. 36** Effet de la méthode de vieillissement – Liant récupéré.

Vieillessement	Pen 25°C [10-1 mm]	Temp. A&B [°C]	IP [-]
LAVOC	67	51.3	-0.2
EMPA	60	51.3	-0.4

Les résultats de l'essai Marshall (Tab. 37) pour les deux méthodes de vieillissement sont analogues, aucun impact spécifique ne pouvant être mis en évidence. Nous rappelons tout de même que, comme discuté précédemment, l'essai Marshall n'est pas nécessairement discriminant pour ce type d'analyse.

**Tab. 37** Effet de la méthode de vieillissement – Essai Marshall.

	Vieillessement	RAP	Granulats	Liant	Teneur liant/E [%]	Vides Vm [%]	Stabilité SM [kN]	Fluage F [mm]
LAVOC	40%	BERAG	160/220	6.10	1.6	9.0	3.5	
EMPA	40%	BERAG	160/220	6.10	1.7	9.3	3.4	

De même que pour l'essai Marshall, les essais de compactibilité PCG ne mettent pas en évidence de différences significatives entre les deux méthodes de vieillissement (Tab. 38). La différence de compacité est de 0.6% à 40 girations et 0.5% à 50 girations ce qui n'est pas significatif. La réalisation de deux essais « EMPA » permet également de démontrer la très bonne répétabilité de l'essai de compactage PCG, en particulier pour les granulométries relativement fines.

**Tab. 38** Effet de la méthode de vieillissement – Compactibilité PCG.

Vieill.	RAP	Granulats	Liant	Liant/E [%]	Pente [-]	Compacité moyenne [%vol] selon nbre girations			Compacité calculée [%vol]	
						5	40	50	C1	C200
LAVOC	40%	BERAG	160/220	6.10	3.71	85.9	94.9	95.9	80.6	98.7
EMPA	40%	BERAG	160/220	6.10	3.50	86.6	95.5	96.4	81.8	98.7

L'essai d'orniérage est, comme mis en évidence précédemment, davantage discriminant (Tab. 39). Une différence significative est obtenue entre les deux méthodes de vieillissement. La valeur d'ornière pour 3'000 cycles est en effet 58% plus faible dans le cas de la méthode de vieillissement EMPA. Cela n'est pas sans incidence car l'enrobé se trouve alors conforme aux exigences normatives, alors qu'il est jugé non-conforme en cas de réalisation de l'essai selon la méthode de préparation et confection des échantillons appliquée au LAVOC. La même différence est observée pour la pente de régression. Ces résultats peuvent en partie être expliqués par la différence de pénétration du liant récupéré (Tab. 36) ; le liant de l'enrobé vieilli selon la méthode « EMPA » étant manifestement davantage vieilli.

Les résultats d'analyse du liant après récupération ne fournissent qu'un éclairage partiel ceci car les liants sont alors mélangés de manière homogène. Dans le cas de la méthode LAVOC, il est supposé que la diffusion du nouveau bitume ne s'effectue que partiellement (cure de 48 h) contrairement à la méthode EMPA lors de laquelle la diffusion est



plus importante (cure beaucoup plus longue). Il est donc fort probable que la différence de comportement selon les deux méthodes de vieillissement soit notamment liée au temps à disposition pour la diffusion du bitume dans l'enrobé.

**Tab. 39** Effet de la méthode de vieillissement – Essai d'orniérage.

Vieillissement	LAVOC	EMPA
<b>Epaisseur plaque</b>	50	50
<b>Teneur RAP</b>	40%	40%
<b>Fabrication</b>	Labo.	Labo.
<b>Granulats</b>	BERAG	BERAG
<b>Liant</b>	160/220	160/220
<b>Teneur liant [%]</b>	6.10	6.10
<b>Vides hydro. [%]</b>	3.4	4.30
<b>3'000 cycles [%]</b>	20.1	8.5
<b>10'000 cycles [%]</b>	-	14.2
<b>Pente [-]</b>	0.401	0.220

Les résultats de l'analyse de sensibilité à l'eau (Tab. 40) corroborent les observations faites précédemment. Bien que le ratio ITSR soit identique pour les deux méthodes de vieillissement, les pressions de rupture des éprouvettes sont plus élevées pour les échantillons vieillis selon la méthode EMPA. La différence de pression est d'environ 12% et elle peut être notamment expliquée par le vieillissement plus important (pénétration plus faible) du liant dans le cas de la méthode de réchauffage EMPA.

**Tab. 40** Effet de la méthode de vieillissement – Sensibilité à l'eau.

Vieillissement	RAP	Granulats	Liant	Teneur liant/E	ITSw [kPa]	ITSd [kPa]	Ratio [-]
<b>LAVOC</b>	40%	BERAG	160/220	6.10	740	820	0.90
<b>EMPA</b>	40%	BERAG	160/220	6.10	834	921	0.91

Des essais de rigidité (module complexe) ont finalement été menés sur le mélange de référence vieilli selon chacun des deux méthodes. L'incidence de la procédure EMPA au niveau des vides peut être observée, la teneur en vides étant de 3.9% alors que la procédure LAVOC engendre une teneur en vides de 1.9%. Une teneur en vides plus élevée aura pour conséquence une diminution du module de rigidité. Le mélange vieilli selon la méthode EMPA présente un module complexe plus faible que le mélange vieilli selon la méthode LAVOC. La différence de rigidité est de 7% à (15 °C, 10 Hz) et 5% à (10 °C, 25 Hz). Nous pouvons également remarquer que dans le cas d'un module de richesse élevé, l'incidence du réchauffage diminue par rapport au cas d'un enrobé avec module de richesse plus faible.

**Tab. 41** Effet de la méthode de vieillissement – Module complexe.

Vieill.	RAP	Granulats	Liant	Teneur liant/E	Vides géom. [%]	E* (15 °C, 10 Hz)	E* (10 °C, 25 Hz)
<b>LAVOC</b>	40%	BERAG	160/220	6.10	1.9	7108	12009
<b>EMPA</b>	40%	BERAG	160/220	6.10	3.9	6621	11408

En conclusion, il semble que la méthode de vieillissement ait un impact sur les caractéristiques et performances de l'enrobé, mais ce dernier est complexe à quantifier sur la base des essais réalisés ici. L'incidence du vieillissement est notamment visible par l'analyse du liant récupéré et des résultats de résistance à l'orniérage ainsi que sensibilité à l'eau (pression de rupture des éprouvettes). L'hétérogénéité du fraisat et son incidence sur le comportement mécanique doivent également être gardés à l'esprit.

De plus amples informations sur le vieillissement thermique des enrobés pourront être trouvées dans [28].

## 5.6 Validation sur un enrobé AC EME 22 C2

La validation des différentes observations est effectuée par la réalisation d'essais sur un enrobé AC EME 22 (couche de base /liaison) de type C2, au liant 10/20. Une comparaison est également faite selon la méthode de réchauffage appliquée (EMPA/LAVOC) telle que décrite au chapitre 5.5.

La recette testée, fournie par les partenaires du EP-1, est indiquée dans la Fig. 26.

Baustelle	Forschungsauftrag VSS 2005/452, EP1 Optimaler Anteil an Ausbauphase	Probenahmedatum	06.08.2012	Zeit			
Objekt / Abschnitt	AC EME 22 C2 + 40% Rap1+Rap2 (2:1)	Probenehmer	EMPA				
Entnahmeort	EMPA - Mx32d	Lieferschein-Nr.					
Probe / Schicht	16380-01	Temperatur (in °C)					
Masse der Laborprobe	1 Gebinde total 35 kg	Laboreingang	14.08.2012				
Zur Zeit der Berichterstattung bekannte Angaben							
<b>Prüfergebnisse</b> Alle Ergebnisse beziehen sich ausschliesslich auf das oben angegebene Probenmaterial							
<b>Bindemittel</b>		<b>Ergeb.</b>	<b>Sollwerte</b>	<b>Bereich der zul. Abw.</b>	<b>unzul. Abw.</b>		
Bindemittelgehalt	SN EN 12697-1	Masse-%	4.95	5.40	4.80 - 6.00		
Nadelpenetration	SN EN 1426	0,1 mm	17				
Erweichungspunkt RuK	SN EN 1427	°C	78.2				
Penetrationsindex	SN EN 12591		+1.7				
Elast. Rückstellung	SN EN 13398	%					
Module de richesse	SN 640 431-1b-NA		3.1				
<b>Marshall-Werte</b>		Verdichtungstemperatur °C	155.0				
SN EN 12697-30 / Stahlamboss 1) bestimmt 2) berechnet 3) Erfahrungswert							
Raumdichte	SN EN 12697-6	kg/m <sup>3</sup>	2416				
Rohdichte Mischgut	1) SN EN 12697-5	kg/m <sup>3</sup>	2481				
Hohlraumgehalt HM	SN EN 12697-8	Vol.-%	2.6	1.0 - 4.0			
Rohdichte Mineral	2) SN EN 12697-5	kg/m <sup>3</sup>	2677				
HMM	SN EN 12697-8	Vol.-%	14.2				
H'füllungsgrad HFB	SN EN 12697-8	%	81.8				
Stabilität S	SN EN 12697-34	kN	24.7				
tan. Fließwert Ft	SN EN 12697-34	mm	1.5				
<b>Korngrößenverteilung</b>		SN EN 12697-2	Sieb	<b>Durchg. M.-%</b>	<b>Sollwerte M.-%</b>	<b>Bereich der zul. Abw. M.-%</b>	<b>unzul. Abw. M.-%</b>
			0.063	8.4	8.5	5.5 - 11.5	
			0.125	10.3	11.5		
			0.25	14.0	14.5		
			0.5	17.5	17.0		
			1.0	21.5	21.0	16.0 - 26.0	
			2.0	26.7	27.0	20.0 - 34.0	
			2.8	30.8	33.0		
			4.0	37.8	39.0		
			5.6	46.8	49.0		
			8.0	58.2	59.0		
			11.2	67.9	72.0	63.0 - 81.0	
			16.0	79.8	83.0		
			22.4	99.0	95.0	86.0 - 100.0	
31.5	100.0	100.0					
45.0							

Fig. 26 Recette AC EME 22 C2.

Les essais suivants sont réalisés sur la recette EME 22 C2, les résultats étant discutés dans la suite du chapitre :

- Récupération et analyse du liant

- Stabilité et fluage Marshall
- Compactibilité PCG
- Sensibilité à l'eau ITSr
- Orniérage
- Module complexe sur éprouvettes trapézoïdales
- Fatigue sur éprouvettes trapézoïdales

Les fabrications ont été effectuées de manière analogue à la procédure appliquée dans le cadre du EP1.

Les différents résultats d'essais sont discutés ci-après. Le Tab. 42 contient les résultats de l'analyse des liants récupérés, ceci selon la méthode de réchauffage. La méthode de réchauffage EMPA est légèrement plus sévère que la méthode de réchauffage LAVOC. La différence est très faible et sur cette base, une incidence particulière sur le comportement mécanique de l'enrobé n'est pas attendue.

Nous pouvons relever que l'analyse du liant du RAP 11/22 indique une pénétration (25°C) de  $25 \cdot 10^{-1}$  mm et une température anneau et bille de 62.6 °C (IP=0.0). Le liant de base 10/20 utilisé a une pénétration (15°C) de  $55 \cdot 10^{-1}$  mm et une température anneau et bille de 69.0 °C (IP=0.1).

**Tab. 42** Analyse des liants récupérés (AC EME 22 C2).

Réch.	RAP	Granulats	Liant	Pen 25°C [10 <sup>-1</sup> mm]	Temp. A&B [°C]	IP [-]
EMPA <sup>1)</sup>	40%	BERAG	10/20	15	73.9	0.9
LAVOC <sup>2)</sup>	40%	BERAG	10/20	17	71.3	0.7

1) Récupéré de plaques simulateur de trafic réchauffé

2) Récupéré des plaques de fatigue

Les résultats de l'essai Marshall sont indiqués dans le Tab. 43. La normalisation suisse ne possède pas d'exigences spécifiques pour l'essai Marshall d'un enrobé de type EME. La teneur en vides Marshall est par contre conforme aux exigences normatives (1.0% ... 4.0%).

**Tab. 43** Essai Marshall AC EME 22 C2.

RAP	Granulats	Liant	Teneur liant/E [%]	Vides Vm [%]	Stabilité SM [kN]	Fluage F [mm]
40%	BERAG	10/20	5.40	2.1	14.3	3.8

La compactibilité PCG est renseignée dans le Tab. 44. L'épaisseur recommandée d'une couche d'enrobé EME est de 80 à 120 mm, les valeurs de compacité à 80 et 120 girations sont donc consignées dans le tableau. Les vides mesurés (2.1% - 2.2%) sont conformes aux exigences normatives.

**Tab. 44** Presse à cisaillement giratoire (PCG) AC EME 22 C2.

RAP	Granulats	Liant	Liant/E [%]	Pente [-]	Compacité moyenne [% vol.] en fct du nombre de girations				
					C1	5	80	120	C200
40%	BERAG	10/20	4.95	2.63	85.9	88.2	97.8	97.9	98.1

Note : C1 et C200 calculées sur la base d'une régression

Les résultats de sensibilité à l'eau sont indiqués dans le Tab. 45. Ces résultats sont consistants avec les autres performances mécaniques mesurées et les valeurs satisfaisantes.

**Tab. 45** Sensibilité à l'eau AC EME 22 C2.

RAP	Granulats	Liant	Teneur liant/E [%]	ITSw [kPa]	ITSd [kPa]	Ratio [%]
40%	BERAG	10/20	4.95	1'996	2'309	86

Les exigences relatives à l'orniérage d'un enrobé EME 22 C2 sont  $\leq 7.5\%$  (60 °C, 30'000 cycles). Ces exigences ne sont pas respectées pour l'enrobé AC EME 22 C2, ceci pour les deux méthodes de réchauffage (voir Tab. 46). Ces résultats confortent ceux obtenus pour l'enrobé AC 11 S et semblent confirmer l'incidence de la qualité des granulats et du RAP. Nous pouvons par ailleurs relever à nouveau les résultats comparables obtenus pour les deux méthodes de réchauffage.

**Tab. 46** Essai d'orniérage AC EME 22 C2.

Réchauffage	EMPA	LAVOC
Teneur RAP	40%	40%
Temps	10 jours	-
Liant	10/20	10/20
Liant cible /E [%]	5.40	5.40
Epaisseur [mm]	100	100
Vides hydro. [%]	2.5%	2.5%
3'000 cycles [%]	5.2	5.5
10'000 cycles [%]	7.7	8.1
30'000 cycles [%]	10.9	11.4
Pente [-]	0.321	0.313

Les essais de rigidité (module complexe) sont réalisés pour les enrobés AC EME 22 C2 (teneur en liant 5.40%/E, teneur en vides 2.1%), avec une comparaison selon la méthode de réchauffage (EMPA/LAVOC). Les résultats sont présentés dans la Fig. 27. Le module de l'enrobé réchauffé selon la procédure EMPA est très légèrement supérieur à celui mesuré sur les échantillons réchauffés selon la méthode LAVOC. La différence dans les conditions de référence (15 °C, 10 Hz) est de 7.8%. Cette différence au niveau de la rigidité est consistante avec les observations faites sur le liant récupéré soit une pénétration plus faible du liant récupéré de l'enrobé réchauffé selon la procédure EMPA. En conclusion, dans le cas de vides semblables, le module de rigidité est plus élevé dans le cas de la procédure EMPA.

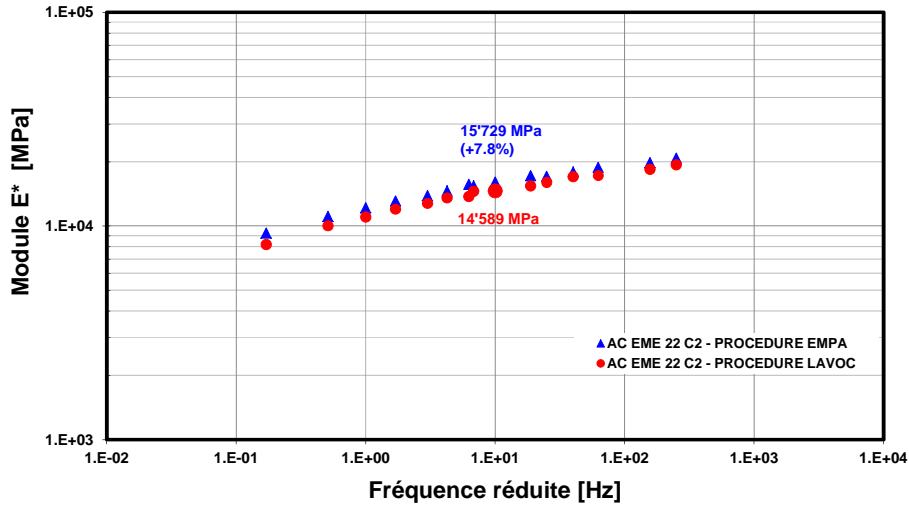


Fig. 27 Courbe maîtresse partielle ( $E^*$ ) à la température de référence de 15 °C.

Etant donné la différence relativement faible observée pour la rigidité ainsi que pour le liant récupéré selon les deux méthodes de réchauffage, il ne semble pas pertinent de réaliser les essais de fatigue complets pour les deux méthodes de réchauffage. Les résultats de fatigue pour l'enrobé réchauffé selon la méthode LAVOC sont indiqués dans la Fig. 28. Les résultats de fatigue respectent largement les exigences normatives.

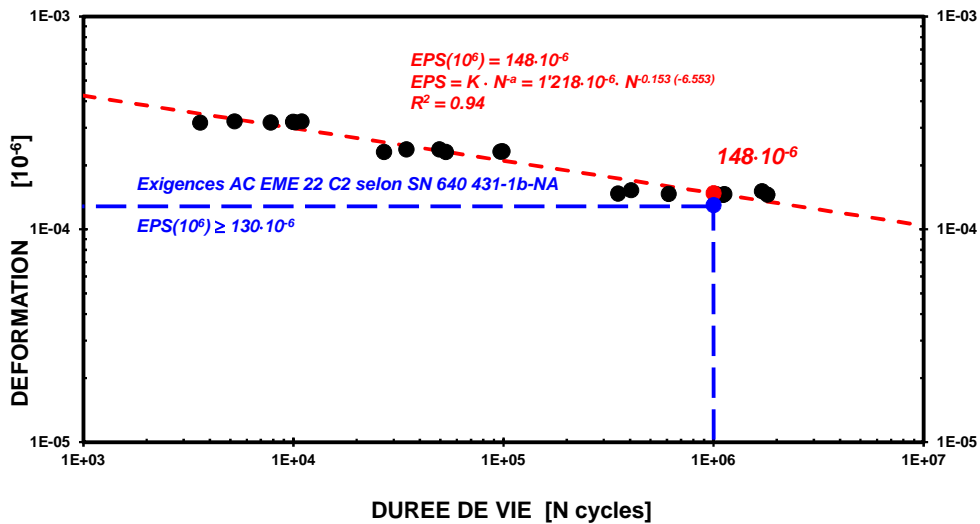


Fig. 28 Essais de fatigue AC EME 22 C2.



## 6 Conclusions et recommandations

La recherche EP-5 du paquet de recherches relatif au recyclage à chaud des enrobés bitumineux a pour objectif l'étude de la formulation des enrobés avec matériaux recyclés et la mise en évidence des paramètres déterminants en vue d'une optimisation de la recette.

De manière générale, le projet a pour objectif de fournir des éléments de réponse aux questions suivantes :

- A partir de quelle quantité de fraisat une optimisation du mélange devient-elle nécessaire ?
- Comment prendre en compte l'homogénéité du fraisat ?
- Comment le type et les propriétés du liant d'apport doivent-ils être définis ?
- Quels sont les paramètres à prendre en compte pour le choix du minéral d'apport ?
- Avec quelles méthodes en laboratoire, le mélange en centrale peut-il être simulé ?
- Est-ce que des essais supplémentaires à ceux de la norme EN 13108-20 sont nécessaires dans la cadre d'une forte teneur en fraisat ?
- Les paramètres d'essais donnés dans les normes sont-ils adaptés au cas de mélanges avec forte teneur en fraisat d'enrobé ?

Le présent chapitre propose un bilan des investigations relatives à la formulation, avant de mettre en évidence des perspectives et besoins de recherche. Des recommandations en vue d'une mise à jour de la normalisation suisse sont finalement émises.

### 6.1 Bilan de la formulation

De manière générale, lorsque la teneur en RAP est faible (< 20%), la formulation ne sera pas (ou très peu) affectée par le recours à des agrégats d'enrobé. Les performances de l'enrobé produit seront alors comparables à celle d'un mélange neuf ne contenant pas de fraisat d'enrobé.

Lorsque le taux de RAP est plus élevé (> 25%), l'analyse de la littérature et les premiers résultats obtenus en laboratoire ont rapidement mis en évidence la complexité de la formulation des enrobés ainsi que les incidences sur les caractéristiques et performances mécaniques du mélange final. Il devient alors indispensable de procéder à une revue complète des paramètres déterminants et, si nécessaire, à la réalisation d'une étude ciblée en laboratoire.

Nous proposons ci-dessous une synthèse des paramètres affectant de manière significative le comportement de l'enrobé avant de discuter la problématique liée au contrôle et analyse des matériaux contenant du fraisat. L'impact d'une méthode incluant de la formulation analytique est également discuté.

#### 6.1.1 Paramètres affectant le comportement de l'enrobé

L'analyse de la formulation selon une méthode analytique, les essais étendus menés en laboratoire ainsi que diverses analyses paramétriques connexes permettent de mettre en évidence les facteurs suivants dont l'impact sur les caractéristiques et performances du mélange final doit être considéré :

- Homogénéité du fraisat d'enrobé. Une meilleure maîtrise du stock de RAP en centrale (type de RAP, granulométrie, état des arêtes et caractéristiques du bitume récupéré) permettra d'optimiser la production d'enrobés avec matériaux recyclés. Il pourrait être envisagé une méthodologie de séparation du fraisat en 2-3 catégories, selon une série de critères à définir.
- Qualité du RAP : Pourcentage de surfaces cassées, état des arêtes, pétrographie.

- Caractéristiques du bitume du RAP.
- Conditions de fabrication en centrale d'enrobage : Les conditions de fabrication font principalement référence au choix des températures (granulats d'apport notamment). L'éventuelle production de fines est également à considérer.
- Mélange filler-bitume et surface accessible des granulats : Le mécanisme de mélange du bitume d'apport avec le film de liant du RAP est complexe et il dépend de multiples facteurs. Le résultat habituellement obtenu sur le liant récupéré du mélange est une valeur moyenne qui masque la réalité physique. Le mécanisme de mélange du nouveau bitume avec l'ancien n'est pas instantané. Une procédure de mûrissement doit certainement intervenir avec un processus de diffusion dépendant également de l'affinité, liée à la composition générique des différents bitumes. Ce mécanisme complexe fait l'objet de différentes études terminées ou en cours et il a probablement un effet sur le mûrissement de l'enrobé et l'évolution de ses propriétés mécaniques. Bien que fournissant des pistes de réflexions, la présente recherche ne peut proposer de solution exhaustive pour ce facteur.
- Choix du liant d'apport : Le choix du liant d'apport doit être effectué selon les caractéristiques du liant récupéré du fraïsat d'enrobé. Bien que critiquable au niveau des relations linéaires utilisées, la procédure américaine de formulation propose des diagrammes de mélange pour le choix des bitumes. Cette procédure permet d'assister le producteur d'enrobé dans sa démarche. Le type et les propriétés du liant d'apport seront également à définir sur la base du processus de fabrication en centrale d'enrobage et plus particulièrement du choix des températures.

### 6.1.2 Contrôle et analyse des enrobés

Pour le contrôle et l'analyse en laboratoire des enrobés contenant du fraïsat d'enrobé, nous pouvons mettre en évidence les aspects suivants sur la base de l'étude réalisée :

- La méthode de fabrication et vieillissement des enrobés en laboratoire doit être préalablement définie de manière rigoureuse. L'impact sur le vieillissement de l'enrobé et par conséquent ses performances mécaniques ne doit pas être négligé. La méthodologie appliquée aura une incidence significative sur les valeurs de référence fixées en laboratoire dans les Epreuves Type de Formulation d'enrobés. (ETF).
- L'énergie développée avec les malaxeurs de laboratoires est sensiblement différente de celle des centrales d'enrobage et a probablement un effet sur l'épaisseur du film de liant et son homogénéité. Pour le cas d'enrobés avec ajout de RAP à chaud, la représentativité de fabrications en laboratoire peut être discutée. Là aussi, l'incidence potentielle sur les valeurs de référence définies par la suite est à relever.
- Bien que demandé de manière systématique dans la normalisation et permettant d'identifier des tendances générales, l'essai Marshall (stabilité et fluage) n'est que peu discriminant.
- Les essais d'orniérage (simulateur de trafic) et sensibilité à l'eau ITSR (en particulier l'analyse des pressions) permettent de mettre en évidence des différences de comportement entre les enrobés.
- Les caractéristiques du liant récupéré (pénétration à 25 °C, température anneau et bille) sont déterminantes pour l'analyse des résultats d'essais, mais elles ne donnent des informations que partielles concernant les phénomènes de double enrobage. En effet, l'étude du liant récupéré considère un mélange parfait des liants anciens et nouveau ce qui ne correspond pas au phénomène réel.
- Selon le type de couche, une évaluation des performances en fatigue est bénéfique et elle permettra par exemple de calculer la durée de vie de la chaussée par l'application d'une méthode rationnelle de calcul. Bien que l'enrobé ne soit pas destiné à une couche travaillant principalement en fatigue (couche de roulement), un bon comportement en fatigue indiquera également une résistance accrue du matériau aux contraintes thermiques.
- Le comportement des enrobés à basse température n'a pas été analysé dans le cadre de ce projet. Il apparaît cependant que, avec l'augmentation de la teneur en fraïsat, les performances à basse température peuvent potentiellement être affectées. La réa-



- lisation d'essais de retrait thermique empêché pourrait par exemple s'avérer pertinente.
- Il est finalement utile de mentionner que, dans le cas de formulation adéquate et de RAP aux caractéristiques satisfaisantes, des performances au moins équivalentes à celles d'enrobés ne contenant pas de matériaux recyclés peuvent être atteintes.

### 6.1.3 Apport de la formulation analytique

Nous pouvons mettre en évidence les éléments suivants relatifs à l'application de la formulation analytique selon la méthode belge (CRR) :

- Le recours à la formulation analytique présente différents avantages parmi lesquels la diminution du nombre d'essais à réaliser ultérieurement en laboratoire ainsi qu'un support important pour la compréhension du comportement mécanique des enrobés et la réalisation d'analyses paramétriques.
- Les différents calculs sont globalement consistants et les tendances cohérentes. Lorsque réalisable, la comparaison avec le résultat de mesures en laboratoire est également satisfaisante.
- La méthode analytique de formulation doit principalement être appliquée afin de vérifier la composition volumique de l'enrobé et donc sa faisabilité. Le module relatif aux performances mécaniques fournit des valeurs indicatives sur la base de modèles reconnus ; ces valeurs devant cependant être considérées avec précautions.

Sur la base de ces différents éléments, nous pouvons relever l'important apport d'une procédure de formulation analytique. La méthode appliquée fournit des éléments importants en vue d'une optimisation de la formulation. Il est cependant indispensable de procéder à des essais en laboratoire dans une seconde phase, ceci afin de mieux évaluer les caractéristiques et performances mécaniques des enrobés. Cela a notamment été détaillé dans [25].

## 6.2 Perspectives et besoins de recherche

Le présent projet n'avait pas pour objet de répondre à l'ensemble des questions relatives aux enrobés avec forte teneur en matériaux recyclés. Sur la base de l'expérience acquise, nous pouvons mettre en évidence les thématiques de recherches suivantes jugées comme importantes :

- Etude du mélange entre liant d'apport et liant provenant du RAP (black rock effect). Problématique de la surface accessible des granulats (effet du mastic).
- Maîtrise de l'homogénéité du fraisat et conséquences sur le dimensionnement ainsi que les performances mécaniques finales de la chaussée.
- Etude du potentiel et des bénéfices de la combinaison de RAP et de technologies à faibles impacts énergétiques et écologiques (enrobés tièdes, enrobés à froid). Au-delà des impacts évidents sur le cycle de vie, les technologies tièdes représentent un domaine intéressant d'application du RAP, ceci car le liant davantage vieilli du fraisat permet de « compenser » un vieillissement plus faible du bitume lors de la fabrication d'un enrobé tiède. Les enrobés tièdes peuvent donc potentiellement contenir une proportion plus élevée de fraisat d'enrobé.

## 6.3 Apport pour la normalisation

Les propositions suivantes peuvent être faites en vue d'une contribution à la normalisation actuelle :

- Dans le cas de faibles teneur en RAP (< 20%), les essais de caractérisation et essais performantiels peuvent être similaires à ceux réalisés pour des enrobés à chaud ne contenant pas de fraisat d'enrobé.
- Dans le cas de teneur en fraisat d'enrobé supérieure à 25%, des essais approfondis sont recommandés. Cela concerne notamment les caractéristiques physiques du liant

ainsi que les caractéristiques des granulats de RAP (homogénéité, état des arêtes, quantité de granulats semi-concassés et roulés ...). Les performances mécaniques de l'enrobé doivent également être évaluées de manière systématique. Cela pourrait notamment comprendre la résistance à l'orniérage, la sensibilité à l'eau ainsi que le comportement de l'enrobé aux basses températures.

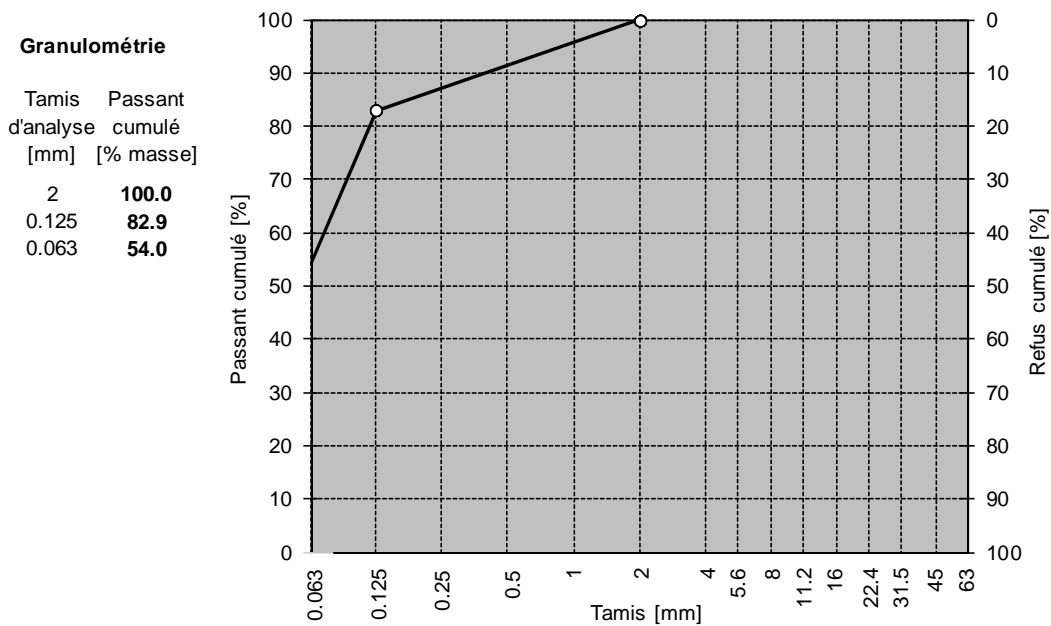
- Les valeurs normatives actuelles relatives à la teneur en fraisat d'enrobé des différentes couches peuvent être revues à la hausse, ceci pour les couches profondes AC T et AC F et ajout de RAP à chaud.
- L'utilisation de fraisat d'enrobé dans les couches de roulement est à réaliser avec précaution. Pour de telles applications, une attention particulière doit être portée à l'utilisation de granulats semi-concassés et à la limitation de la teneur en RAP (établissement d'exigences).
- Afin que les résultats entre différents laboratoires puissent être comparés, une procédure détaillée de fabrication et réchauffage des enrobés en laboratoire doit être définie.

## Annexes

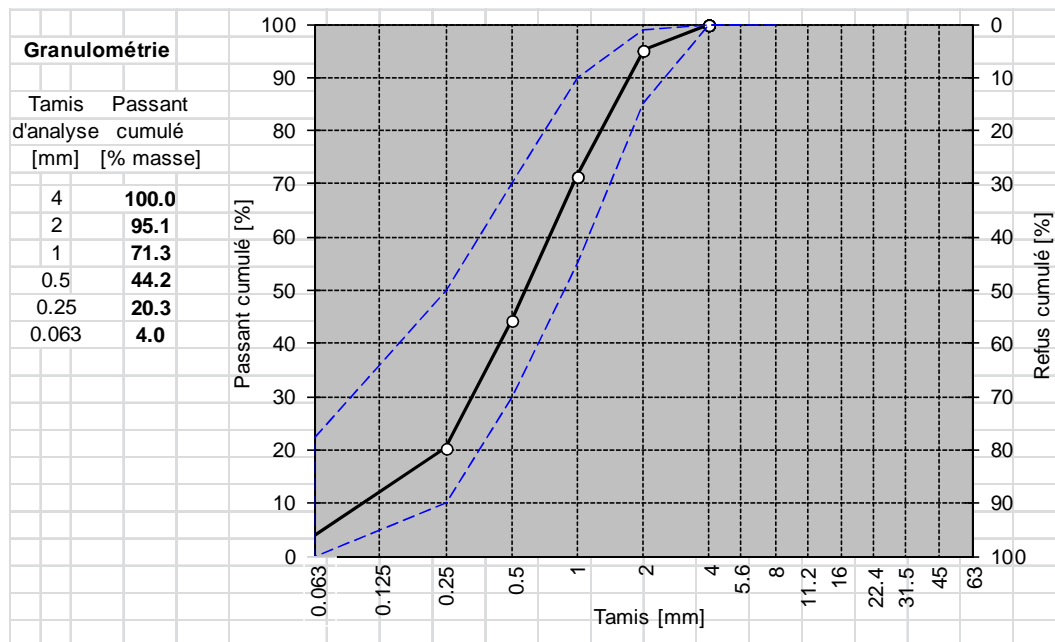
<b>I</b>	<b>Analyses granulométriques (BERAG) .....</b>	<b>85</b>
<b>II</b>	<b>Analyses granulométriques (Famsa) .....</b>	<b>89</b>
<b>III</b>	<b>Analyses granulométriques (Balmholz) .....</b>	<b>91</b>
<b>IV</b>	<b>Analyses granulométriques (Bourgeoisie de Sion).....</b>	<b>93</b>



# I Analyses granulométriques (BERAG)



**Fig. 1** Granulométrie du filler BERAG (moyenne de trois essais).



**Fig. 2** Granulométrie des granulats BERAG 0/2 (moyenne de deux essais).

Note : Un nouvel échantillon de sable a été commandé en cours de projet. La conformité de ce sable avec la courbe granulométrique moyenne ci-dessus a été vérifiée.

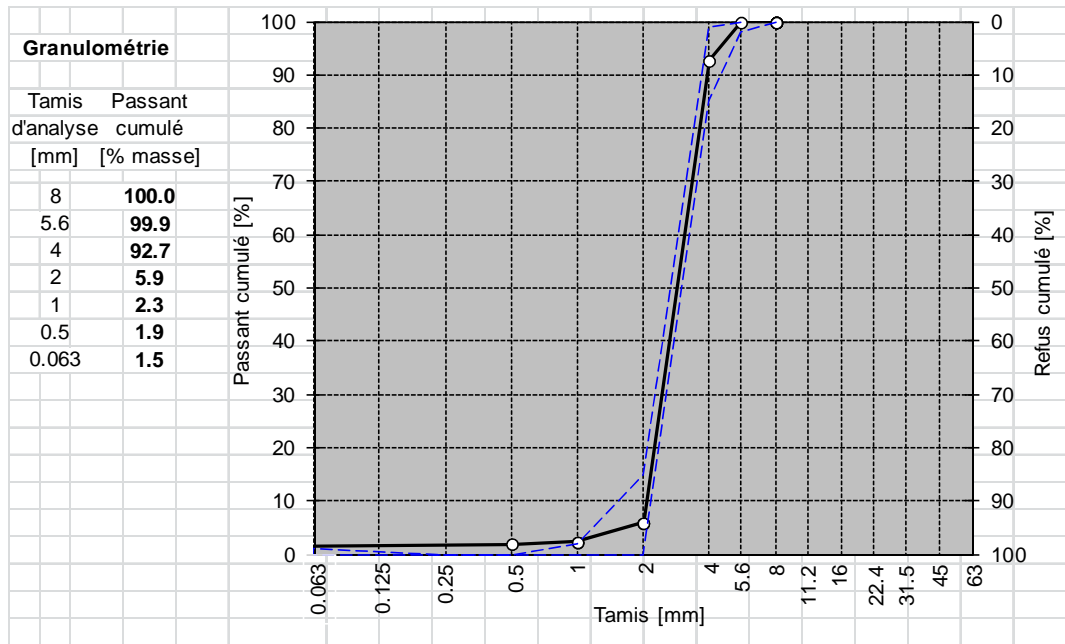


Fig. 3 Granulométrie des granulats BERAG 2/4 (moyenne de deux essais).

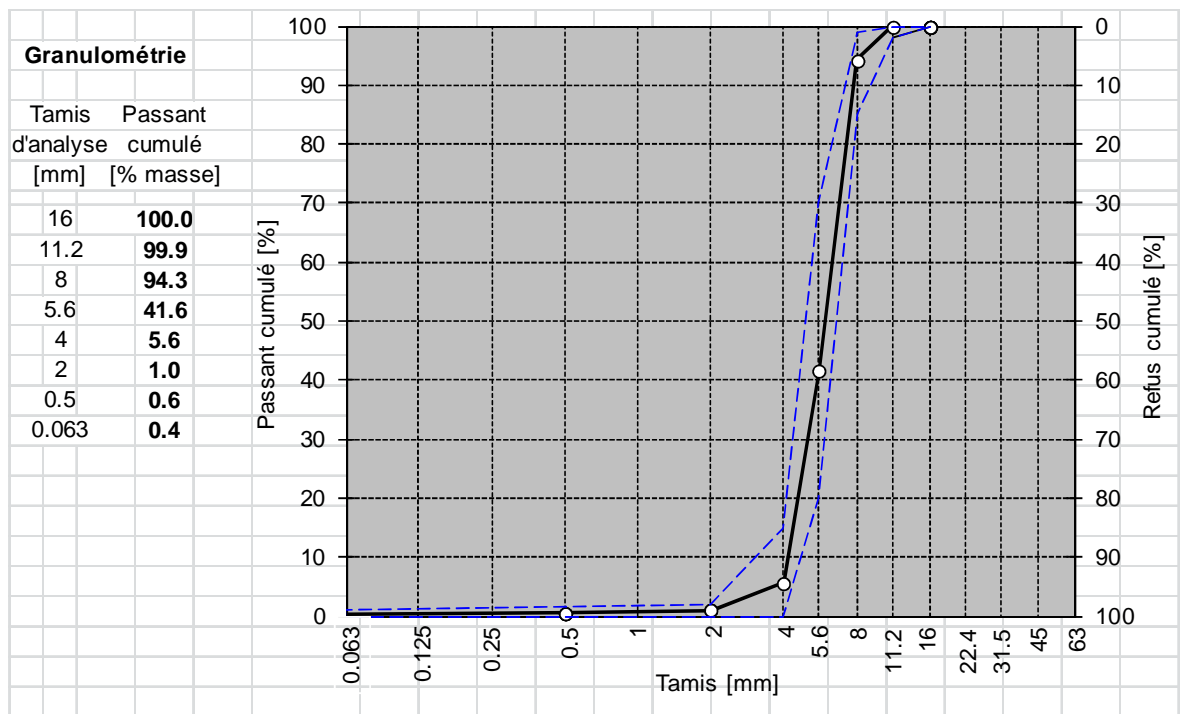


Fig. 4 Granulométrie des granulats BERAG 4/8 (moyenne de deux essais).

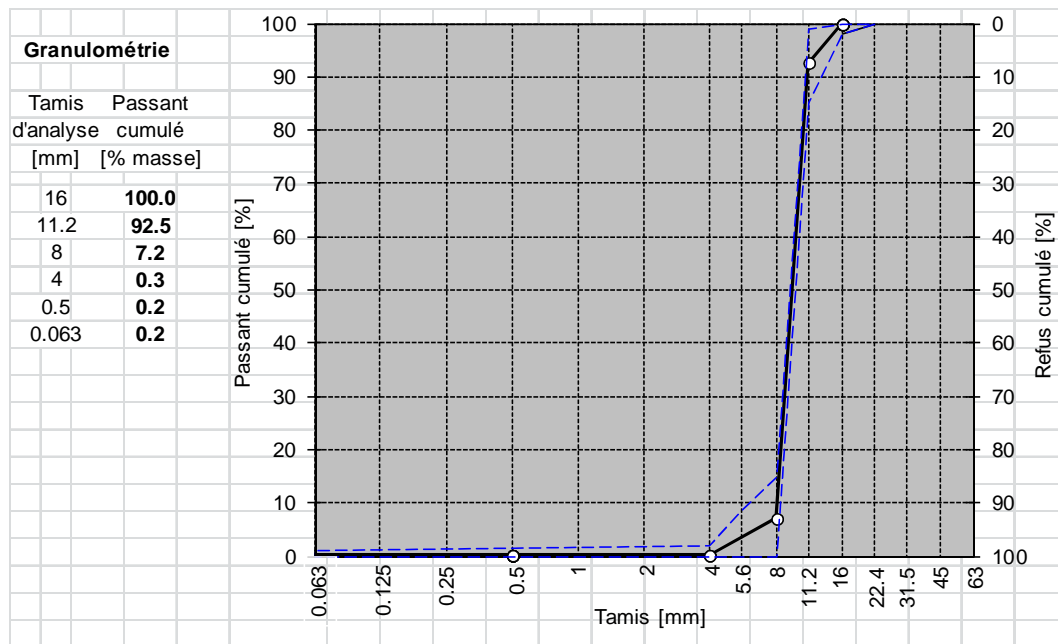


Fig. 5 Granulométrie des granulats BERAG 8/11 (moyenne de deux essais).

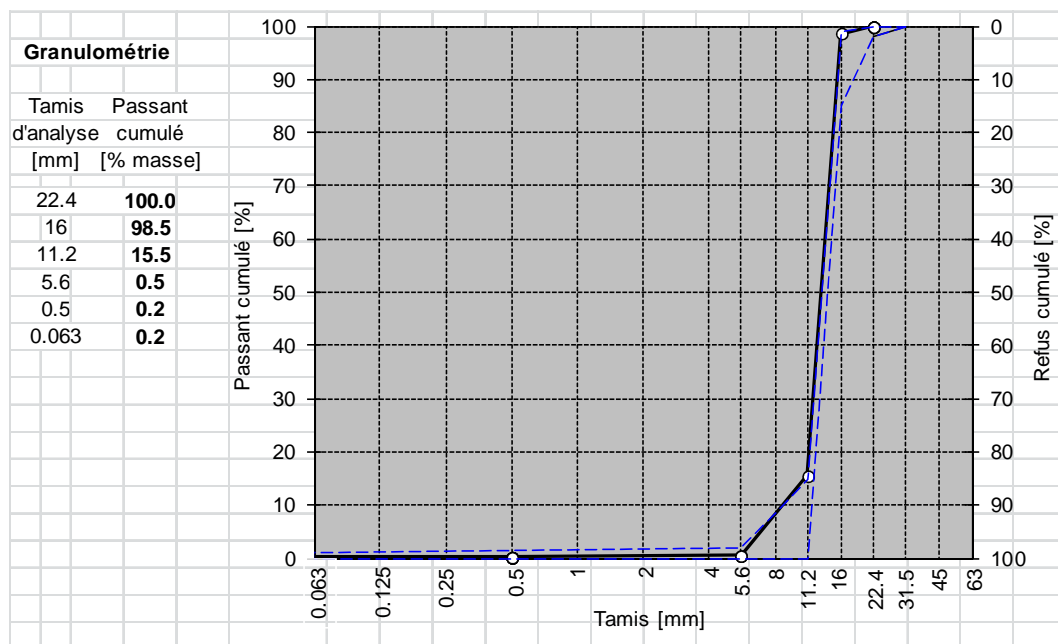
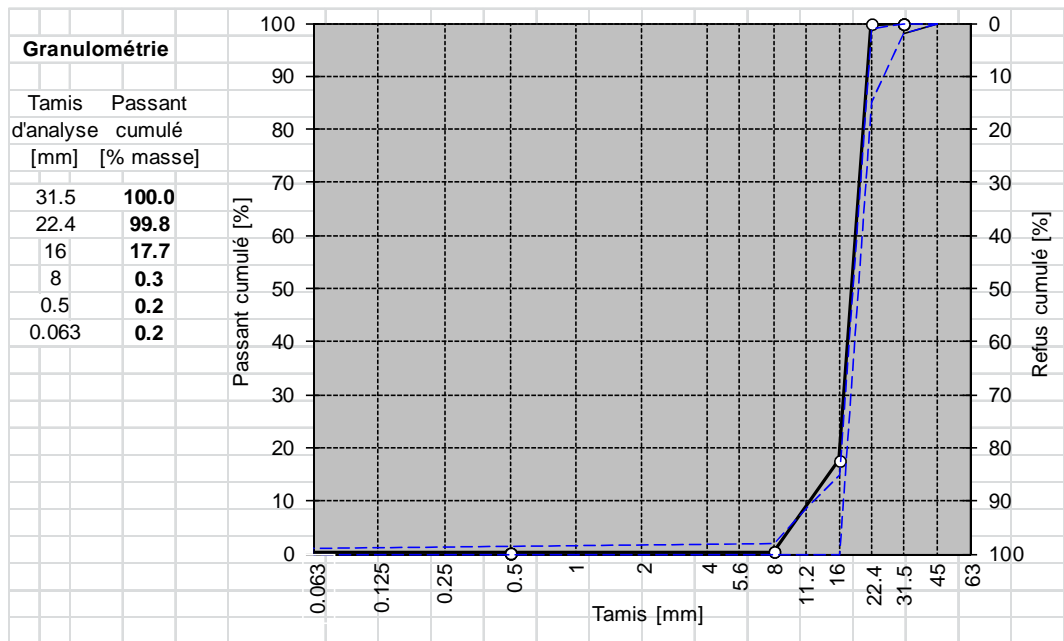


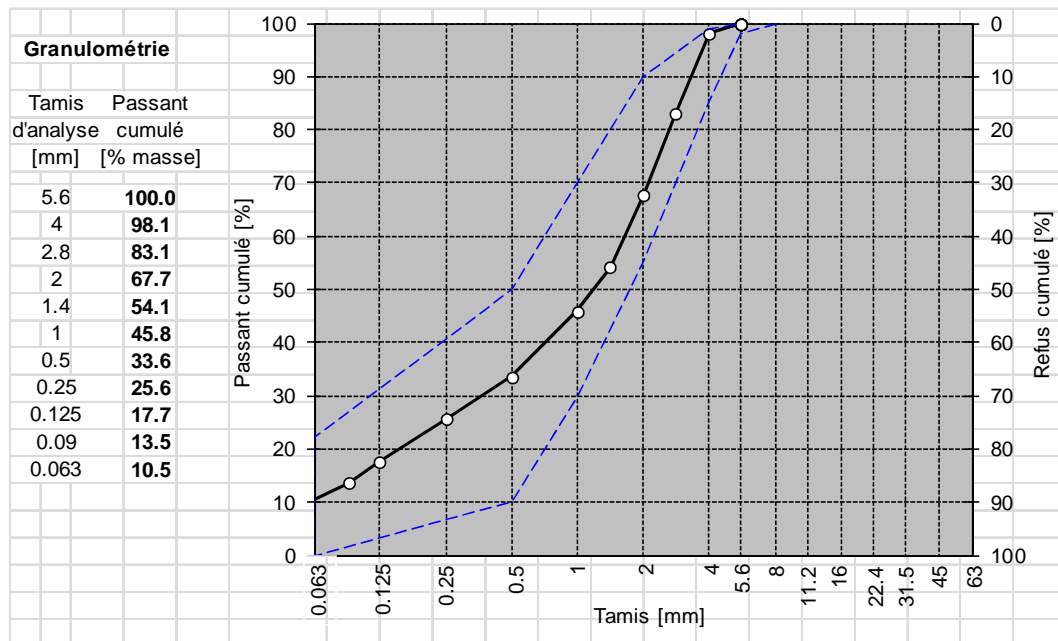
Fig. 6 Granulométrie des granulats BERAG 11/16 (moyenne de deux essais).



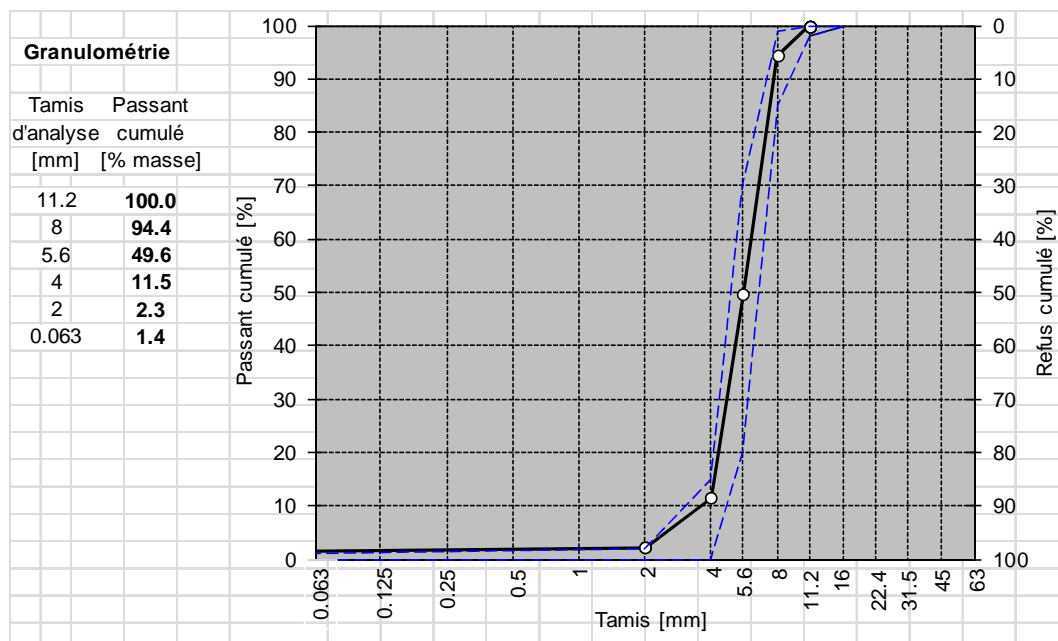
**Fig. 7** *Granulométrie des granulats BERAG 16/22 (moyenne de deux essais).*



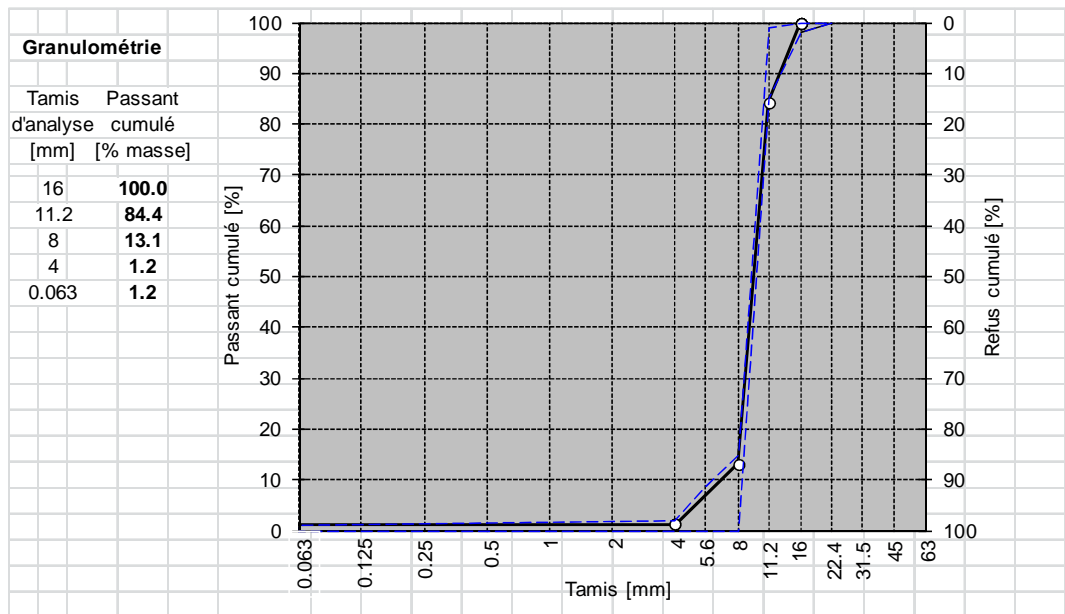
## II Analyses granulométriques (Famsa)



**Fig. 8** Granulométrie des granulats Famsa 0/4 (moyenne de 2 essais).



**Fig. 9** Granulométrie des granulats Famsa 4/8 (moyenne de 2 essais).



**Fig. 10** *Granulométrie des granulats Famsa 8/11 (moyenne de 2 essais).*

### III Analyses granulométriques (Balmholz)

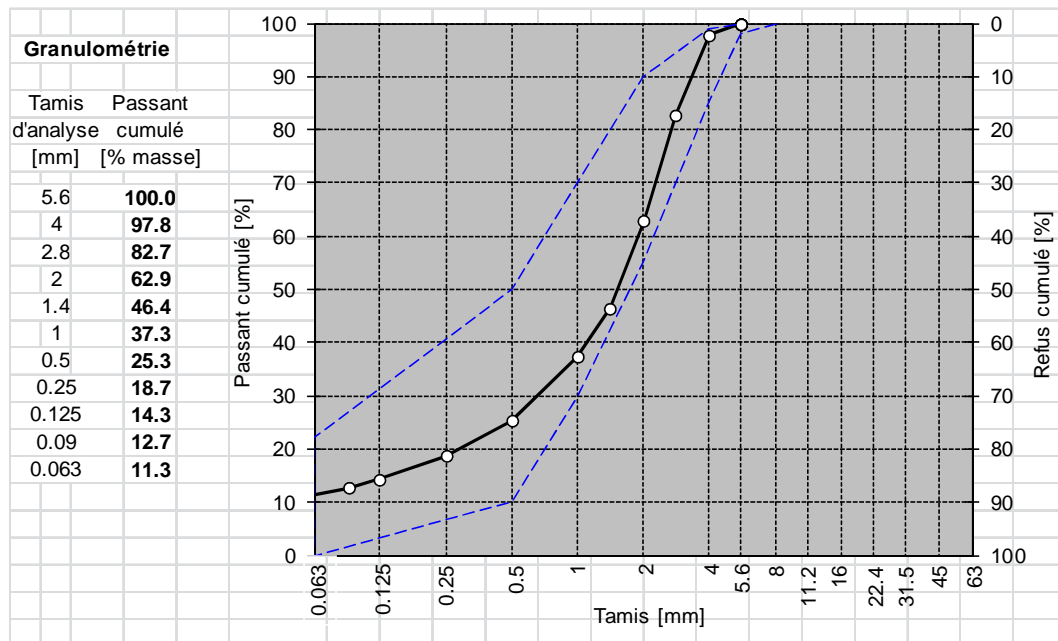


Fig. 11 Granulométrie des granulats Balmholz 0/4 (moyenne de 2 essais).

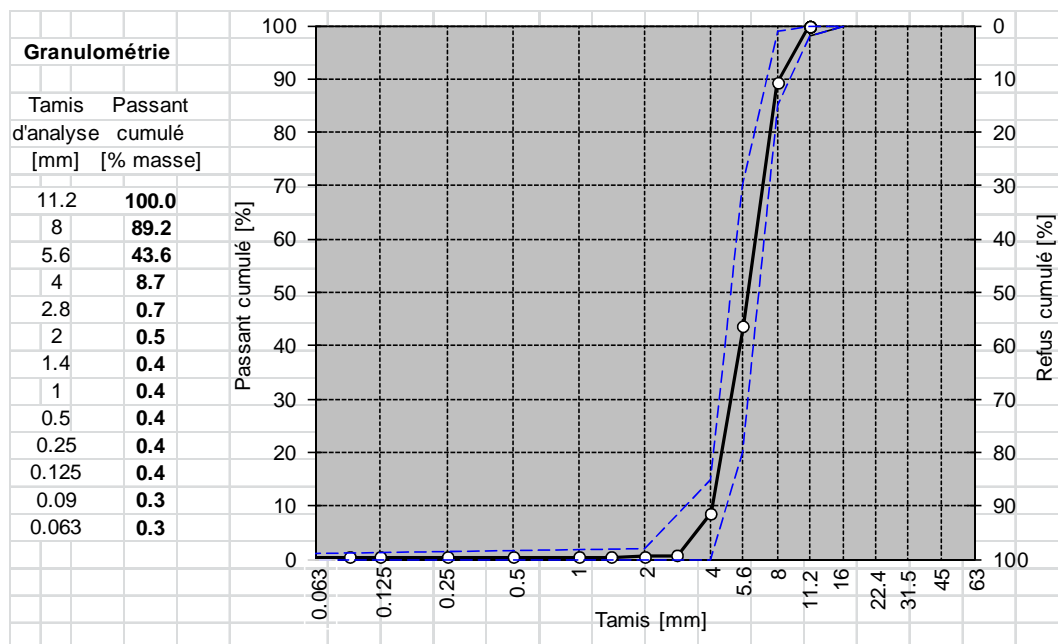
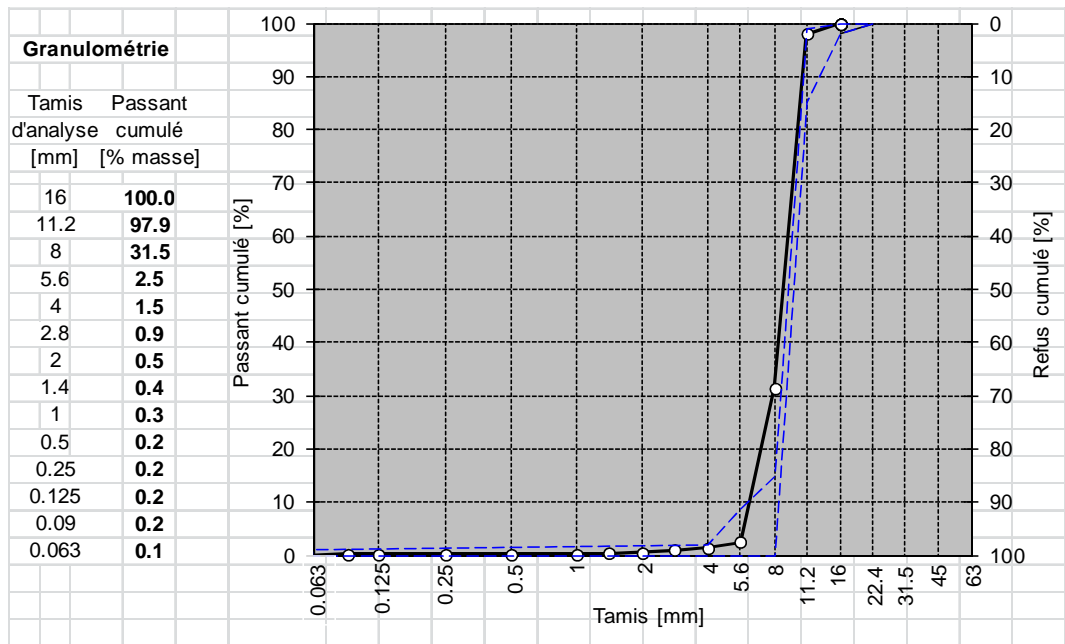
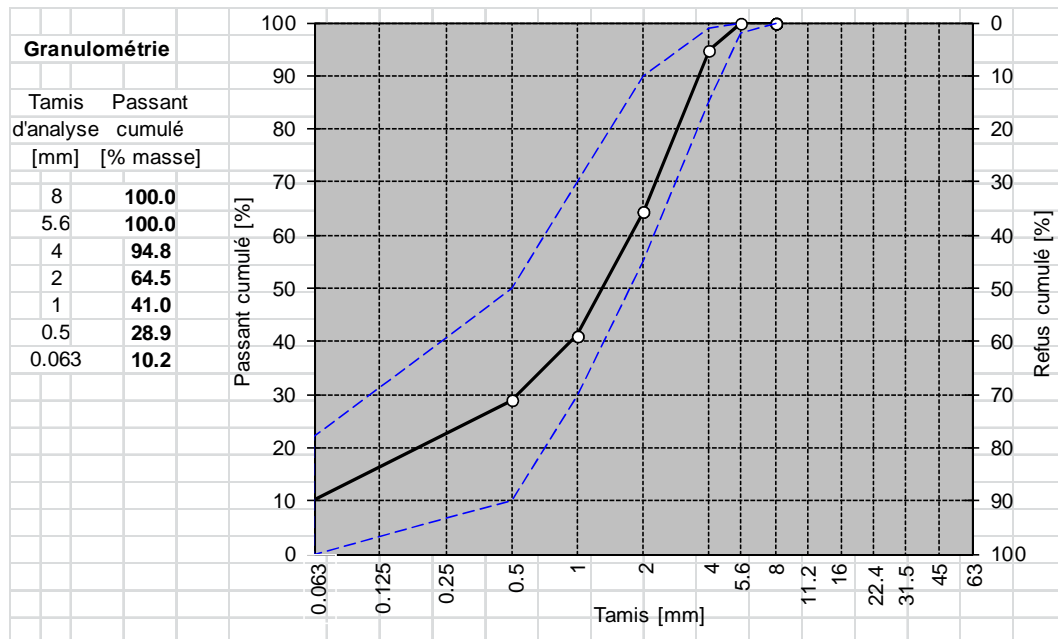


Fig. 12 Granulométrie des granulats Balmholz 4/8 (moyenne de 2 essais).

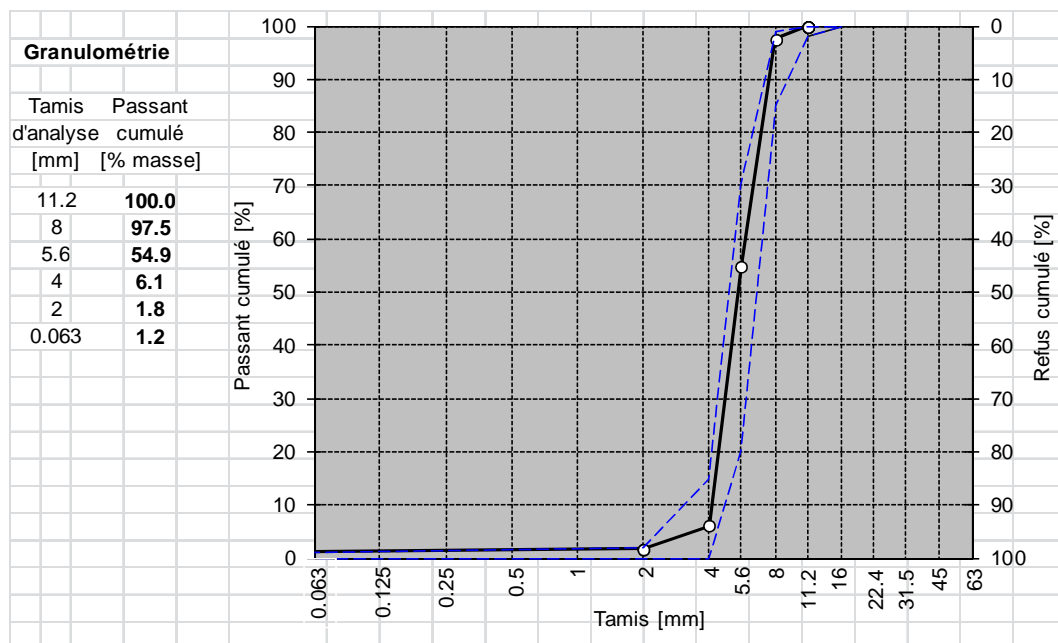


**Fig. 13** *Granulométrie des granulats Balmholz 8/11 (moyenne de 2 essais).*

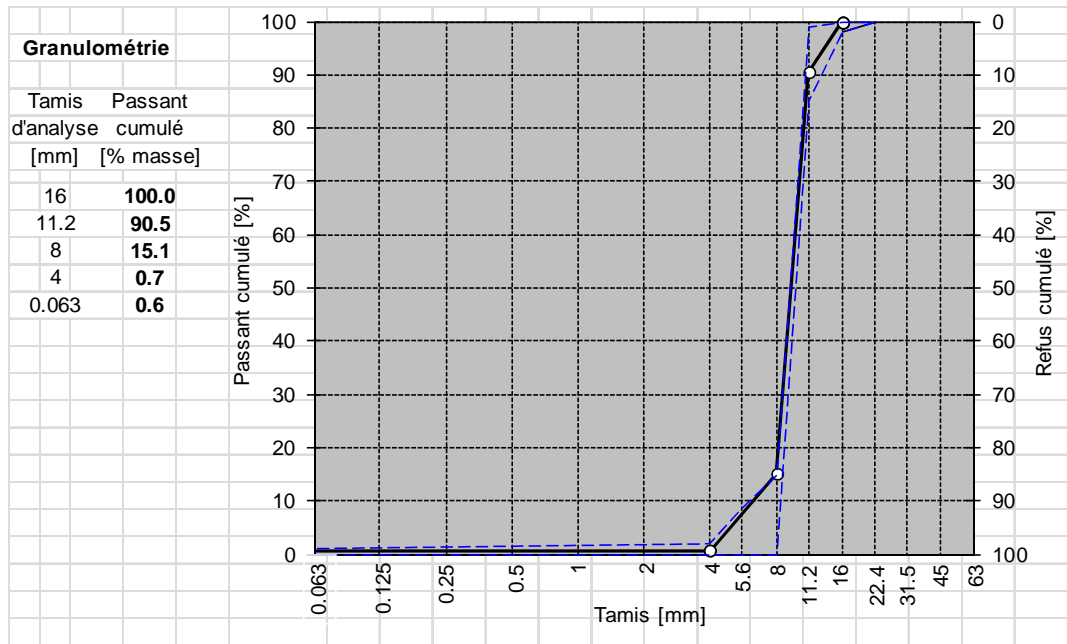
## IV Analyses granulométriques (Bourgeoisie de Sion)



**Fig. 14** Granulométrie des granulats Bourgeoisie de Sion 0/4 (moyenne de 2 essais).



**Fig. 15** Granulométrie des granulats Bourgeoisie de Sion 4/8 (moyenne de 2 essais).



**Fig. 16** Granulométrie des granulats Bourgeois de Sion 8/11 (moyenne de 2 essais).

## Glossaire

Terme	Signification
LAVOC	Laboratoire des Voies de Circulation
EPFL	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
ETHZ	Eidgenössische Technische-Hochschule Zürich
OFROU	Office Fédéral des Routes
VSS	Association suisse des professionnels de la route et des transports
EP	Einzelprojekt - recherche spécifique RS)
EMPA	Institution de recherche et de services interdisciplinaires du domaine des EPF
SN	Norme Suisse
NA	Annexe Nationale
AC	Asphalt Concrete – Enrobé bitumineux
NR2C	New Road Construction Concepts (projet européen)
EN	Norme Européenne
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement – fraïsat d'enrobé
PLANET	Potentiel et Analyse des Enrobés Tièdes (projet de recherche OFROU/VSS)
PARAMIX	Road pavement rehabilitation techniques using enhanced asphalt mixtures (projet européen)
SAMARIS	Sustainable and Advanced Materials for Road InfraStructure
FEHRL	Forum of European Highway Research Laboratories
RILEM	International union of laboratories and experts in construction materials, systems and structures
Re-Road	End of Life Strategies of Asphalt Pavements (projet européen)
Direct-MAT	Dismantling and Recycling Techniques for Road Materials – sharing knowledge and practices (projet européen)
FHWA	Federal Highway Administration
PG	Performance Grading (classification Superpave des bitumes)
DSR	Dynamic Shear Rheometer – Rhéomètre à cisaillement dynamique
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
TRB	Transportation Research Board
NRC	National Research Council
FTIR	Fourier Transform InfraRed spectroscopy – spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier
ITSR	Indirect Tensile Strength Ratio – Ratio essai de traction indirecte
S&F	Stabilité et fluage (essai Marshall)
IP	Indice de pénétrabilité (bitumes)
Pen	Pénétration (essai sur liant)
RTFOT	Rolling Thin Film Oven Test – Essai de vieillissement sous l'effet de la chaleur et de l'air
EME	Enrobé à Module Elevé

<b>Terme</b>	<b>Signification</b>
CRR	Centre de recherches routières (Belgique) pu Belgian Road Research Center (BRRC)
MSI	Mastic Stiffness Indicator – Indicateur de rigidité du mastic
STOA	Short Term Oven Ageing
TSRST	Thermal Stress Retained Specimen Test - Essai de retrait empêché d'une éprouvette sous contrainte thermique
STL	Simulateur de Trafic Léger – Essai d'orniérage
A&B	Anneau et Bille (essai sur liant)
PCG	Presse à Cisaillement Giratoire
ETF	Epreuve Type de Formulation




## Bibliographie

- 
- [1] Bueche N., Vanelstraete A. et al. (2007), « **New Roads Construction Concepts NR2C – Concept and design of selected innovations for interurban infrastructures: Development of high performance underlayers with low cost materials and high percentage of re-use** ». *Projet européen FP7*.
- 
- [2] De la Roche C., Van de Ven M. et al. (2013), « **Hot Recycling of Bituminous Mixtures** ». *RILEM State-of-the-Art Reports Volume 9. Chapter 7*.
- 
- [3] Kalman B. et al. (2013), « **Re-Road – Deliverable 7.3: Project Final Report** ».
- 
- [4] De Visscher J. et al. (2012), « **Re-Road – Mix design and performance of asphalt mixes with RA** ».
- 
- [5] Copeland A. (2011), « **Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures : State of the Practice** ». *Publication No. FHWA-HRT-11-021*.
- 
- [6] Haji E., Sebaaly P. et al. (2012), « **Performance of Hot and Warm Asphalts with Reclaimed Asphalt Pavements – Case studies** ». *ISAP*.
- 
- [7] McDaniel R., Soleymani H. et al. (2000), « **Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method** ». *NCHRP Project 9-12*.
- 
- [8] Valdès Vidal G., Pérez Jiménez F. et al. (2010) « **Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP)** ». *TRN Annual Meeting*.
- 
- [9] Widyatmoko I. (2008), « **Mechanistic-empirical mixture design for hot mix asphalt pavement recycling** ». *Construction and Building Materials 22*.
- 
- [10] Daniel J. S., Pochily L. et al. (2010), « **Can We Add More RAP? A Study of Extracted Binder Properties from Plant Produced Mixtures with up to 25% RAP** ». *TRB Annual Meeting*.
- 
- [11] Al-Qadi I., Elseifi M. et al. (2007) « **Reclaimed Asphalt Pavement – A Literature Review** ». Illinois Center for Transportation.
- 
- [12] Zofka A., Marasteanu M. et al. (2004), « **Development of Simple Asphalt Test for Determination of RAP Blending Charts** ». Minnesota Department of Transportation.
- 
- [13] El Bèze L. (2008), « **Recyclage à chaud des agrégats d'enrobés bitumineux : Identification de traceurs d'homogénéité du mélange entre bitume vieilli et bitume neuf d'apport** ». *Thèse Université Paul Cézanne Aix-Marseille III*.
- 
- [14] Yousefi Rad F. (2013), « **Estimating Blending Level of Fresh and RAP Binders in Recycled Hot Mix Asphalt** ». *Master of Science*. University of Wisconsin Madison.
- 
- [15] Shirodkar P, Mehta Y. et al. (2010), « **A Study to Determine the Degree of Partial Blending of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Binder for High RAP Hot Mix Asphalt** ». *TRB Annual Meeting*.
- 
- [16] Bennert T. & Dongré R. (2010), « **A Backcalculation Method to Determine « Effective » Asphalt Binder Properties of RAP Mixtures** ». *TRB Annual Meeting*.
- 
- [17] Karlsson R. & Isacson U. (2003), « **Investigations on Bitumen Rejuvenator Diffusion and Structural Stability** ». *Asphalt Paving Technology*.
- 
- [18] Tran N. H., Taylor A. et al. (2012) « **Effect of Rejuvenator on Performance Properties of HMA Mixtures With High RAP and RAS Contents** ». *NCAT Report 12-05*.
- 
- [19] Shen J., Amirkhani S. et al. (2007), « **Effects of rejuvenator on performance-based properties of rejuvenated asphalt binder and mixtures** ». *Construction and Building Materials 21*.
- 
- [20] Nguyen V. H. (2009), « **Effects of Laboratory Mixing Methods and RAP Materials on Performances of Hot recycled Asphalt Mixtures** ». *Thesis*. University of Nottingham.
- 
- [21] Pittet M. & Angst C. (2002), « **Récupération du liant bitumineux provenant d'extraction – Mise en application et adaptation de la nouvelle norme européenne vis-à-vis des expériences suisses** ». Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche VSS 1999/122, Rapport VSS No 1044*.
- 
- [22] Dave E.V. & Buttlar W.G. (2008), « **Forensic Methods for Detection of Recycled Asphalt Materials** ». *4<sup>th</sup> Eurasphalt & Eurobitume Congress*. Copenhagen.
- 
- [23] Bueche N. (2011), « **Evaluation des performances et des impacts des enrobés bitumineux tièdes** ». *Thèse EPFL N° 5169*. Lausanne.
- 
- [24] Luminari M. & Fidato A. (1998), « **State of the Art Report on Mix Design** ». *RILEM Report: Bituminous Binders and Mixes*. L. Franken.
- 
- [25] Junod A. & Dumont A.-G. (2005), « **Formulation et optimisation des formules d'enrobés** ». Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche VSS 2000/421-2*.
- 
- [26] Steuperaert J. & Vanelstraete A. (1997), « **Code de bonne pratique pour la formulation des enrobés bitumineux** ». *CRR*. Bruxelles.
- 
- [27] Franken L. & Vanelstraete A. (1993), « **New Developments in Analytical Asphalt Mix Design** ». *5<sup>th</sup> Eurobitume Congress*, Stockholm. Suède.
-

- 
- [28] Dumont A.-G. & Pittet M. (2012), « **Vieillessement thermique des enrobés bitumineux en laboratoire** ». Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche VSS 2000/434, Rapport VSS No 1408*.
- 
- [29] Coffey S., DuBois E. et al. (2013), « **Determining the impact of degree of blending and quality of reclaimed asphalt pavement on predicted pavement performance using pavement ME design** ». *Construction and Building Materials 48*.
-

## Clôture du projet

	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
---	---	---

<b>RECHERCHE DANS LE DOMAINE ROUTIER DU DETEC</b>	Version du 09.10.2013
<b>Formulaire N° 3 : Clôture du projet</b>	

établi / modifié le :	22.10.2014
-----------------------	------------

### Données de base

Projet N° :	VSS 2005/456
Titre du projet :	Recyclage des matériaux bitumineux de démolition des routes dans des enrobés à chaud. EP5: Formulation
Echéance effective :	31.10.2014

### Textes :

Résumé des résultats du projet :

La recherche EP5 a pour objectif l'étude de la formulation de ces enrobés ainsi que la mise en évidence des paramètres déterminants en vue d'une optimisation de la recette.

Les principaux résultats du projet sont les suivants:

- De manière générale, les différentes investigations menées indiquent que, comparativement à un mélange à chaud ne contenant pas de fraisat d'enrobé (RAP), la formulation ne sera pas ou très peu affectée lorsque la teneur en RAP est faible (< 20%). Dans le cas de teneur en RAP plus élevée (>25%), la complexité de la formulation a été mise en évidence ainsi que les incidences sur les caractéristiques et performances.
- La réalisation d'une phase préliminaire de formulation analytique permet de diminuer sensiblement le nombre d'essais et mesures à réaliser en laboratoire et apporte des éléments importants en vue de la compréhension du comportement mécanique des enrobés; des analyses de sensibilité pouvant également être menées. Les différents calculs réalisés sont consistants avec les essais ponctuels de contrôle en laboratoire. Les résultats permettent notamment de quantifier l'impact de la qualité des granulats sur le comportement mécanique et sur les caractéristiques volumétriques du mélange.
- Une très large campagne d'essais en laboratoire a été menée afin d'identifier les essais et paramètres critiques pour la formulation des enrobés avec fraisat d'enrobé. Les paramètres suivants ont été identifiés comme déterminants: homogénéité du fraisat d'enrobé, caractéristiques des granulats et du bitume du RAP, caractéristiques des granulats et du liant d'apport, conditions de fabrication à la centrale d'enrobage.
- Les différents essais et mesures réalisés ont également permis de proposer des recommandations en vue du contrôle et de l'analyse des enrobés contenant une forte teneur en fraisat d'enrobé. Il apparaît notamment que la réalisation d'essais d'orniérage et de sensibilité à l'eau sont des indicateurs pertinents mettant en évidence des différences de comportement entre les mélanges. Les résultats obtenus mettent également en évidence l'impact de la méthode de fabrication ainsi que du vieillissement des enrobés sur les caractéristiques et performances mesurées en laboratoire.

Recherche dans le domaine routier du DETEC : Formulaire 3	Page 1 / 3
---	------------



Atteinte des objectifs :

Les objectifs initiaux de la recherche ont été atteints, à savoir l'étude de la formulation des enrobés contenant du fraisat d'enrobé et la mise en évidence des paramètres déterminants.

La réalisation d'une étude complémentaire (fil rouge) de caractérisation étendue des granulats recyclés a également permis de fournir des éléments déterminants pour l'analyse des résultats obtenus. Ces éléments ont également été utiles à la réalisation des recherches EP1, EP2 et EP4.

Déductions et recommandations :

Les différentes considérations faites permettent d'envisager une mise à jour de la normalisation notamment au niveau des essais et mesures en fonction de la teneur en matériaux recyclés ; un contrôle adapté permettant d'augmenter la teneur en RAP tout en garantissant des performances satisfaisantes.

Le choix de la teneur en RAP et les caractéristiques intrinsèques requises pour le fraisat doivent également être fixées en fonction de la couche et des sollicitations prévues de la chaussée. Un tri sélectif des RAP ainsi qu'une caractérisation plus complète sont recommandés, ceci principalement dans le cas d'utilisation pour des mélanges très performants. La nécessité d'harmonisation des méthodes de laboratoire (fabrication, vieillissement, réchauffage) a également été mise en évidence, permettant ainsi de mieux apprécier les épreuves types de formulation.

Publications :

Bueche N., Dumont A.-G., Pittet M. & Bressi S. Asphalt Mixture with RAP: Mix design optimization. 8th International RILEM Symposium SIB 2015. (Abstract accepted)

Chef/cheffe de projet :

Nom : Dumont

Prénom : André-Gilles

Service, entreprise, institut : EPFL - LAVOC

Signature du chef/de la cheffe de projet :



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

## RECHERCHE DANS LE DOMAINE ROUTIER DU DETEC

### Formulaire N° 3 : Clôture du projet

#### Appréciation de la commission de suivi :

Evaluation :

Les objectifs visés dans ce mandat de recherche ont été atteints et des investigations plus larges que prévues ont été menées. En effet, la réalisation d'une étude complémentaire de caractérisation étendue des granulats recyclés a également permis de fournir des éléments déterminants pour l'analyse des résultats obtenus. Ces éléments ont également été utiles à la réalisation des mandats de recherche EP1, EP2 et EP4.

Les différentes considérations faites permettent par conséquent d'envisager une mise à jour de la normalisation en permettant d'augmenter la teneur en RAP tout en garantissant des performances satisfaisantes. Un tri sélectif des RAP ainsi qu'une caractérisation plus complète sont recommandés, surtout pour des mélanges très performants. La nécessité d'harmonisation des méthodes de laboratoire a également été relevée.

Mise en oeuvre :

Avec les résultats de ce mandat de recherche EP5 "Formulation", l'objectif ambitieux du paquet de recherche "Recyclage des matériaux bitumineux de démolition des routes dans des enrobés à chaud" permet de clairement soutenir l'impérieuse nécessité de réutiliser les granulats d'asphalte (RAP) en plus grande proportion dans les bétons bitumineux.

Besoin supplémentaire en matière de recherche :

- Étude du mélange entre liant d'apport et liant provenant du RAP (black rock effect).
- Maîtrise de l'homogénéité du fraisat et conséquences sur le dimensionnement ainsi que les performances mécaniques finales de la chaussée.
- Étude du potentiel et des bénéfices de la combinaison de RAP et de technologies à faibles impacts énergétiques et écologiques (enrobés tièdes, enrobés à froid).

Influence sur les normes :

Les résultats de ce mandat de recherche EP5, combinés aux résultats des autres mandats de recherche EP1, EP2, EP3 et EP4 du paquet de recherche de recyclage des matériaux bitumineux de démolition des routes dans des enrobés à chaud, doivent permettre de réviser rapidement la norme suisse SN 640 431-1.


Président/Présidente de la commission de suivi :

Nom : Bühler

Prénom : Tony

Service, entreprise, institut : Implenia Suisse SA, Satigny

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

VSS FK3: 

H. Huguenot 18.3.15

Recherche dans le domaine routier du DETEC : Formulaire 3

Page 3 / 3



## Index des rapports de recherche en matière de route

no. de rapport	no. de projet	titre	année
1507	FGU 2007/004	TBM Tunneling in Faulted and Folded Rocks	2015
1505	VSS 2006/509	Abdichtungssysteme und bitumenhaltige Schichten auf Betonbrücken – Initialprojekt	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	Stauproggnoseverfahren 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 Ausbauasphalt in Heissmischgut: EP1: Optimaler Anteil an Ausbauasphalt	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



no. de rapport	no. de projet	titre	année
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
1462	ASTRA 2011/004	Ermittlung der Versagensgrenze eines T2 Norm-Belages mit der mobiles Grossversuchsanlage MLS10	2014
1460	SVI 2007/017	Nutzen der Verkehrsinformation für die Verkehrssicherheit	2014
1459	VSS 2002/501	Leichtes Fallgewichtgerät 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 Ausbauphosphat 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 Ausbauphosphat 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



no. de rapport	no. de projet	titre	année
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 Grossversuchanlage 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
1426	ASTRA 2010/025_OBF	Luftströmungsmessung in Strassentunneln	2013
1425	VSS 2005/401	Résistance à l'altération des granulats et des roches	2013
1424	ASTRA 2006/007	Optimierung der Baustellenplanung an Autobahnen	2013
1423	ASTRA 2010/012	Forschungspaket: Lärmarme Beläge innerorts EP3: Betrieb und Unterhalt lärmarrer Beläge	2013
1422	ASTRA 2011/006_OBF	Fracture processes and in-situ fracture observations in Gipskeuper	2013
1421	VSS 2009/901	Experimenteller Nachweis des vorgeschlagenen Raum- und Topologiemodells für die VM-Anwendungen in der Schweiz (MDATrafo)	2013
1420	SVI 2008/003	Projektorfreiräume bei Strassen und Plätzen	2013
1419	VSS 2001/452	Stabilität der Polymere beim Heisseinbau von PmB-haltigen Strassenbelägen	2013
1418	VSS 2008/402	Anforderungen an hydraulische Eigenschaften von Geokunststoffen	2012
1417	FGU 2009/002	Heat Exchanger Anchors for Thermo-active Tunnels	2013
1416	FGU 2010/001	Sulfatwiderstand von Beton: verbessertes Verfahren basierend auf der Prüfung nach SIA 262/1, Anhang D	2013
1415	VSS 2010/A01	Wissenslücken im Infrastrukturmanagementprozess "Strasse" im Siedlungsgebiet	2013
1414	VSS 2010/201	Passive Sicherheit von Tragkonstruktionen der Strassenausstattung	2013
1413	SVI 2009/003	Güterverkehrsintensive Branchen und Güterverkehrsströme in der Schweiz Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz Teilprojekt B1	2013
1412	ASTRA 2010/020	Werkzeug zur aktuellen Gangliniennorm	2013
1411	VSS 2009/902	Verkehrstelematik für die Unterstützung des Verkehrsmanagements in ausserordentlichen Lagen	2013
1410	VSS 2010/202_OBF	Reduktion von Unfallfolgen bei Bränden in Strassentunneln durch Abschnittsbildung	2013
1409	ASTRA 2010/017_OBF	Regelung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall	2013