



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Paquet de recherche PLANET : RS-3: Formulation et optimisation des performances

**Forschungspaket PLANET : EP-3: Rezeptur und
Optimierung des Leistungsumfangs**

**Research Package PLANET : WP-3: Mix design and
performance optimisation**

**Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
Laboratoire des voies de circulation (LAVOC)
A.-G. Dumont, professeur EPF
N. Bueche, Dr. ès. sc EPF
M. Ould Henia, Dr. ès. sc EPF**

**Projet de recherche VSS 2010/543 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)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Paquet de recherche PLANET : RS-3: Formulation et optimisation des performances

**Forschungspaket PLANET : EP-3: Rezeptur und
Optimierung des Leistungsumfangs**

**Research Package PLANET : WP-3: Mix design and
performance**

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
Laboratoire des voies de circulation (LAVOC)
A.-G. Dumont, professeur EPF
N. Bueche, Dr. ès. sc EPF
M. Ould Henia, Dr. ès. sc EPF

Projet de recherche VSS 2010/543 sur demande de 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

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

Membres

N. Bueche, Dr. ès sc. EPF, EPFL-LAVOC

M. Ould Henia, Dr. ès sc. EPF, EPFL-LAVOC

Commission d'experts responsable

Commission d'experts FK3: Matériaux

Commission de suivi

Président

Heinz Aeschlimann

Membres

Hans-Peter Beyeler

Sandra Dünner

Martin Horat

Felix Solcà

Hansruedi Eberhard

Adrian Zippo

Direction paquet de recherche PLANET

Thomas Arn

Auteur de la demande

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

Source

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

Table des matières

Impressum	4
Résumé	7
Zusammenfassung	9
Summary	11
1 Introduction	13
1.1 Contexte – paquet de recherche PLANET	13
1.2 Objectifs et contenu de la recherche	14
1.3 Les enrobés tièdes	17
2 Etude bibliographique	21
2.1 Expériences en laboratoires	21
2.1.1 Enrobés tièdes avec cire	23
2.1.2 Enrobés tièdes avec ajout ou maîtrise de la teneur en eau	24
2.1.3 Enrobés avec additif chimique	24
2.2 Expériences in situ	25
3 Données de base et essais de caractérisation	27
3.1 Choix des technologies d'enrobés tièdes	27
3.2 Recettes de référence	28
3.3 Matériaux de référence	29
3.3.1 Essais sur granulats	30
3.3.2 Essais sur filler	30
3.3.3 Essais sur bitume brut	31
3.4 Procédure de réchauffage en laboratoire	32
3.5 Procédure de fabrication en laboratoire	37
4 Essais sur la recette de référence	39
4.1 Analyse des enrobés	39
4.2 Sensibilité à l'eau	40
4.3 Résistance aux déformations permanentes	41
4.4 Rigidité	42
4.5 Résistance à la fatigue	43
4.6 Résistance mécanique (compression diamétrale)	45
4.7 Essais complémentaires sur AC T 22S	48
5 Maîtrise de la viscosité	51
5.1 Essais sur liants	51
5.1.1 Essais de caractérisation et viscosité dynamique	51
5.1.2 Essais étendus de viscosité (DSR)	53
5.2 Essais sur mastic	55
5.3 Essais sur enrobés	57
5.3.1 Compactage PCG	58
5.3.2 Maniabilimètre	59
5.3.3 Autres systèmes pour évaluation de la maniabilité	62
6 Analyses spécifiques: Optimisation de la formulation	65
6.1 Considérations relatives à la formulation	65
6.1.1 Méthode française de formulation	65
6.1.2 Méthode belge de formulation	66
6.1.3 Approche suisse de formulation	67
6.1.4 Commentaires relatifs à la formulation des enrobés tièdes	67

6.2	Fabrications en laboratoire de la recette de référence	68
6.3	Effet du type de liant sur les performances	69
6.4	Sensibilité à l'eau des enrobés tièdes.....	71
6.5	Effet de la pétrographie sur les performances.....	73
6.6	Optimisation par modification de la teneur en liant.....	74
6.6.1	Cas 1: Enrobé PA-PACK	74
6.6.2	Cas 2: Enrobés FR-ZEO et PA-PACK.....	75
6.7	Considérations relatives à l'ajout de matériaux recyclés	76
7	Evaluation de la montée en performance des enrobés	79
7.1	Etude sur enrobé AC T 22S.....	79
7.1.1	Essais sur liant récupéré.....	79
7.1.2	Essais de compression diamétrale	81
7.1.3	Résistance aux déformations permanentes	84
7.1.4	Sensibilité à l'eau	86
7.1.5	Module complexe.....	87
7.2	Etude sur enrobé AC B 16S	89
8	Conclusions et recommandations	95
8.1	Conclusions	95
8.2	Perspectives de recherche, apport pour la normalisation	97
	Glossaire.....	99
	Bibliographie	101
	Clôture du projet	105
	Index des rapports de recherche en matière de route	109

Résumé

Le projet PLANET (Potentiel et ANalyse des Enrobés Tièdes) a pour objectif principal d'améliorer les connaissances dans le domaine de ces enrobés à faibles impacts énergétiques et écologiques. Pour cela, il est nécessaire de quantifier les aspects relatifs aux performances mécaniques, au potentiel énergétique et écologique, à l'hygiène au travail ainsi qu'à la fabrication et au contrôle qualité. L'identification du potentiel et des limitations doivent finalement permettre de promouvoir la bonne pratique relative aux enrobés tièdes en Suisse.

La présente recherche « RS-3 : Formulation et optimisation des performances » a pour but d'identifier les paramètres déterminants lors de la formulation et déterminer si les méthodes et concepts utilisés traditionnellement pour les mélanges à chaud sont également applicables aux enrobés tièdes. Une analyse des caractéristiques potentiellement critiques ainsi que l'étude du processus de montée en performance sont également attendus.

Après une mise à jour des connaissances et l'étude de différentes expériences nationales et internationales, l'essentiel de la recherche a consisté en la réalisation d'essais de caractérisation et essais performantiels en laboratoire. Pour cela, différentes études spécifiques ont été menées d'une part sur la recette utilisée pour les planches d'essais (AC B 16S) et d'autre part sur une recette d'enrobé AC T 22S.

En plus d'un enrobé de référence à chaud (REF-HOT), différents procédés et produits pour enrobés tièdes ont été étudiés dans le cadre de la recherche RS-3 : Additifs chimiques avec agent tensio-actif (FR-PACK) ou lubrifiant/dope d'adhésivité (PA-PACK), zéolithe synthétique (FR-ZEO), cire Fischer-Tropsch (FR-WAX) et enrobé semi-tiède avec ajout de sable humide (PA-HWAM).

L'analyse performantielle en laboratoire amène les constatations suivantes :

- De manière globale, les enrobés tièdes peuvent présenter une susceptibilité à l'eau plus élevée que les enrobés à chaud. Cette sensibilité à l'eau est fortement dépendante des caractéristiques du liant et de son vieillissement. L'utilisation de dope d'adhésivité et de granulats à performances élevées, de même qu'un choix optimal du liant permettront de lutter contre cette faiblesse potentielle.
- A l'exception de la sensibilité à l'eau, les enrobés tièdes testés présentent des performances mécaniques s'avérant le plus souvent légèrement inférieures, mais parfois également supérieures à celles des enrobés à chaud. Les écarts observés comparativement à la référence à chaud restent acceptables pour la majorité des enrobés tièdes, ce qui entraîne généralement un respect des exigences normatives. Les enrobés tièdes constituent donc une alternative crédible aux enrobés à chaud.
- Parmi les procédés tièdes testés, les enrobés avec ajout de cire (FR-WAX) présentent une résistance très élevée à l'orniérage. Pour cela, ces enrobés sont fréquemment utilisés dans le cas de surfaces à fortes sollicitations telles que les chaussées d'aéroports ou voies de bus. Corollaire de cette résistance élevée à l'orniérage, l'ajout de cire peut rendre le matériau davantage sensible aux basses températures.
- Les enrobés avec additif chimique (agent tensio-actif) FR-PACK présentent des valeurs de résistance mécanique (traction indirecte) globalement comparables à celles de l'enrobé à chaud de référence (REF-HOT).
- Pour les investigations effectuées, les enrobés avec zéolithe tendent quant à eux à montrer une susceptibilité accrue à l'orniérage (enrobés des planches d'essais) et surtout une sensibilité à l'eau plus élevée que les autres mélanges tièdes évalués. Ces enrobés sont, pour les cas testés, moins performants que la référence à chaud.
- Les enrobés tièdes avec additif chimique, cire, ou ajout de zéolithe présentent une rigidité (module complexe 2PB-TR à 15 °C, 10 Hz) globalement comparable à celle de l'enrobé de référence à chaud.

- Les performances en fatigue des enrobés tièdes testés sont globalement équivalentes à celles de l'enrobé de référence à chaud.
- L'ajout de fraisat dans les enrobés tièdes est assurément une piste prometteuse. Outre les aspects environnementaux et énergétiques, cette combinaison permet dans certains cas d'augmenter significativement la résistance à l'orniérage ainsi que les performances en fatigue tout en réduisant la sensibilité à l'eau du mélange.

La potentielle montée en performance (ou mûrissement) des enrobés tièdes a été évaluée par la réalisation d'essais en laboratoire jusqu'à 12 semaines après la fabrication. Pour l'ensemble des enrobés testés (FR-WAX, FR-PACK, PA-HWAM, FR-ZEO, PA-PACK), aucun processus de montée en performance n'a été mis en évidence. Le mécanisme est globalement identique à celui de l'enrobé de référence à chaud.

En ce qui concerne la formulation des enrobés tièdes, les résultats principaux sont les suivants :

- Etant donné que chaque procédé ou produit engendre un mécanisme d'action spécifique, il est nécessaire de quantifier ce mécanisme par une étude de la viscosité et de la maniabilité. Pour cela, des essais sur liants ainsi que sur enrobé sont à privilégier.
- En raison des aspects relatifs à la variation de viscosité des enrobés en fonction de la gamme de température considérée, les méthodes analytiques/volumétriques de formulation semblent, en l'état actuel des connaissances, pas nécessairement adaptées au cas des enrobés tièdes.
- Comme pour les enrobés à chaud, les caractéristiques intrinsèques des granulats et des liants ont un impact prépondérant sur la formulation et son optimisation.
- Selon le type d'enrobé tiède, une modification du grade de bitume pourrait être recommandée comparativement au même mélange à chaud. Cela est par exemple le cas pour les enrobés avec ajout de cire ou enrobés semi-tièdes.

Les résultats de cette recherche mettent également en évidence la nécessité d'investigations complémentaires parmi lesquelles on relèvera :

- Une méthode de formulation spécifique aux enrobés tièdes doit être proposée, cette méthode pouvant le cas échéant être également appliquée aux enrobés à chaud.
- Comme mentionné, la maîtrise de la viscosité est un aspect déterminant des enrobés tièdes. Alors que la viscosité des liants, voire des mastics, est relativement bien définie et mesurée, des approches de quantification de la viscosité des enrobés restent à développer davantage. Une étude exploratoire avec un maniabilimètre est proposée dans cette recherche; approche pouvant être intégrée à la réflexion relative à la formulation.
- Pour les technologies recourant à l'ajout ou la maîtrise de la teneur en eau, il est indispensable d'évaluer l'incidence de l'humidité résiduelle sur le comportement mécanique.
- Des valeurs limites (exigences normatives) et codes de bonne pratique doivent être proposés afin de garantir un comportement mécanique et une durée de service satisfaisant aux exigences.
- L'intégration des enrobés tièdes dans un cadre normatif doit, sans délai, faire l'objet de réflexions. Des pistes sont discutées dans le cadre de ce projet PLANET parmi lesquelles la définition des conditions d'essais.

Nous pouvons finalement affirmer que les enrobés tièdes constituent assurément une alternative crédible aux enrobés à chaud. Comme expliqué précédemment, ces enrobés peuvent présenter des performances au moins équivalentes à celles d'un mélange à chaud, ceci pour autant que la formulation, la fabrication et la pose fassent l'objet d'une réflexion.

Zusammenfassung

Das Projekt PLANET (Potentiel et Analyse des Enrobés Tièdes; Potential und Analyse von Niedertemperatur-Asphalten) hat als Hauptzweck, die Kenntnisse über diese ökologischen (Strassen-) Beläge zu verbessern. Dies erfordert eine Qualifizierung der mechanischen Eigenschaften, des wirtschaftlichen und energetischen Potentials, der arbeitsplatzhygienischen Aspekte sowie des Fabrikationsprozesses und der Qualitätskontrolle. Die Identifikation der Möglichkeiten und Einschränkungen müssten letztlich die bestmögliche Verwendung von Niedertemperaturasphalten in der Schweiz ermöglichen.

Die hier beschriebene Forschungsarbeit «EP-3: Rezeptur und Optimierung des Leistungsumfangs» hat als Ziel, die entscheidenden Parameter während der Rezeptur zu identifizieren und zu ermitteln, ob die üblicherweise für Heissmischgüter verwendeten Methoden und Konzepte auch für Niedertemperaturasphalte anwendbar sind. Eine Analyse der potentiellen kritischen Eigenschaften sowie eine Studie des Prozesses der Leistungserhöhung werden ebenfalls erwartet.

Nach einer Aktualisierung der Kenntnisse und dem Studium von verschiedenen nationalen und internationalen Erfahrungen besteht das Wesentliche der Forschung aus Laborversuchen von Eigenschaften und Leistungen. Dafür wurden unterschiedliche Studien durchgeführt, einerseits mit dem Rezept, das für die PLANET Teststrecken (AC B 16S) benutzt wurde und andererseits mit einem Rezept für das Mischgut AC T 22S.

Zusätzlich zum Referenzheissasphalt (REF-HOT) wurden im Rahmen des Forschungsprojekts EP-3 verschiedene Verfahren und Produkte für Niedertemperaturasphalt untersucht: Chemische Zusatzstoffe mit Tensiden (FR-PACK) oder mit Schmier-/Netzhaftmittel (PA-PACK), mit synthetischem Zeolith (FR-ZEO), mit Fischer-Tropsch-Wachs (FR-WAX) sowie mit Nass-Sand hergestellter Niedertemperaturasphalt (PA-HWAM).

Die Leistungsanalyse im Labor ergibt die folgenden Feststellungen:

- Global zeigen Niedertemperaturasphalte eine höhere Empfindlichkeit gegenüber Wasser als Heissasphalte. Diese Wasserempfindlichkeit ist stark abhängig von den Eigenschaften des Bindemittels und dessen Alterungszustand. Die Verwendung von Netzhaftmittel und von Granulat mit hohem Leistungsniveau sowie eine optimale Wahl des Bindemittels erlauben diese potentielle Schwäche zu vermeiden.
- Mit Ausnahme der Wasserempfindlichkeit haben die Niedertemperaturasphalte ein mechanische Leistungseigenschaften, die oft etwas niedriger sind als diejenigen von Heissmischgut; manchmal sind sie jedoch auch höher. Diese Abweichung gegenüber der Heiss-Referenz bleiben bei der Mehrzahl akzeptabel, sodass sie die normativen Anforderungen einhalten. Die Niedertemperaturasphalte sind deshalb eine glaubwürdige Alternative zu Heissasphalt.
- Unter den getesteten Verfahren beweisen die Mischgüter mit Wachszusatz (FR-WAX) einen hohen Widerstand gegenüber Spurrinnenbildung. Aus diesem Grund werden diese oft für hoch beanspruchte Oberflächen sowie für Flugfelder/-pisten oder Busfahrbahnen benutzt. Als Folge dieser Widerstandserhöhung durch Wachszusatz kann das Material jedoch anfälliger auf niedrige Temperaturen sein.
- Mischgüter mit chemischen Zusatzstoffen (Tensiden) FR-PACK zeigen einen vergleichbaren Widerstand beim indirekten Zugversuch im Vergleich zum heissen Referenzmischgut (REF-HOT).
- Bei den durchgeführten Untersuchungen mit Asphalt mit synthetischen Zeolith resultierte, dass diese eine höhere Empfindlichkeit zur Spurrinnenbildung und besonders eine höhere Wasserempfindlichkeit haben als die anderen getesteten Niedertemperaturasphalte. Die untersuchten Mischgüter waren weniger leistungsfähig als die Heissreferenz.
- Die Niedertemperaturasphalte mit chemischen Zusatzstoffen, Wachs oder Zeolith zeigen eine Steifigkeit (komplexer Elastizitätsmodul 2PB-TP bei 5°C, 10 Hz), die insgesamt vergleichbar mit dem Referenzmischgut ist.

- Die Ermüdungsleistungen der getesteten Niedertemperaturasphalte sind generell gleichwertig zur Heissreferenz.
- Die Zugabe von Recyclingasphalt (RA) ist zweifellos ein vielversprechender Weg. Ausser den ökonomischen und ökologischen Aspekten ermöglicht diese Kombination in bestimmten Fällen nicht nur, die Spurrinnenresistenz bedeutsam zu steigern, sondern auch die Ermüdungseigenschaften zu verbessern, dies sogar bei Minderung der Wasserempfindlichkeit.

Die potentielle Leistungssteigerung (oder Reifung) der Niedertemperaturasphalte wurde durch einen Laborversuch 12 Wochen nach der Herstellung bewertet. Für alle getesteten Mischgüter (FR-WAX, FR-PACK, PA-HWAM, FR-ZEO, PA-PACK) wurde kein Prozess von Leistungssteigerung festgestellt. Der Mechanismus ist generell identisch mit demjenigen des heissen Referenzmischguts.

Betreffend die Rezeptur sind die Hauptergebnisse:

- Weil jedes Verfahren und jedes Produkt einen spezifischen Mechanismus auslöst, wird eine Quantifizierung des Mechanismus durch die Viskosität und der Handbarkeit benötigt. Dafür sollten bevorzugt Versuche mit Bindemitteln sowie mit Asphaltmischgut durchgeführt werden.
- Wegen der Aspekte bezüglich der Viskositätsvariationen in Abhängigkeit des betrachteten Temperaturbereichs scheinen mit heutigem Kenntnisstand die analytischen und volumetrischen Rezepturverfahren nicht notwendigerweise an die Niedertemperaturasphalte angepasst zu sein.
- Wie für den Heissasphalt haben die Wesensmerkmale des Granulats und des Bindemittels einen überwiegenden Einfluss auf die Rezeptur und deren Optimierung.
- Je nach Typ des Niedertemperaturasphalts könnte im Vergleich zu Heissmischgut eine Änderung der Bitumenklasse empfohlen werden. Dies ist beispielsweise der Fall für Mischgüter mit Wachs oder Niedertemperaturasphalt unter 100 °C.

Die Resultate der Forschung zeigen eine Notwendigkeit für zusätzliche Untersuchungen auf, wovon speziell diese hervorgehoben werden:

- Eine spezifische Rezepturmethode für Niedertemperaturasphalt muss entwickelt werden, gegebenenfalls kann diese Methodik auch für Heissasphalt angewendet werden.
- Wie bereits erwähnt ist die Beherrschung der Viskosität ein entscheidender Aspekt der Niedertemperaturasphalte. Während die Zähflüssigkeit der Bindemitteln bzw. der Asphaltmastix relativ gut bestimmt und vermessen ist, sollte ein Ansatz für die Quantifizierung der Viskosität der Mischgüter weiter entwickelt werden. Eine explorative Studie mit einem ‚Gerät zur Messung der Verarbeitbarkeit‘ (Maniabilimeter) wird in dieser Forschungsarbeit vorgeschlagen. Dieser Ansatz könnte mit den Überlegungen bezüglich Rezeptur kombiniert werden.
- Für Technologien mit Verwendung von Zusätzen oder der Beeinflussung des Wassergehalts ist es notwendig, die Wirkung der Restfeuchtigkeit auf das mechanische Verhalten zu bewerten.
- Grenzwerte (normative Bedingungen) und Verhaltenskodexe müssen vorgeschlagen werden, sodass zufriedenstellendes mechanisches Verhalten und Lebensdauer garantiert werden können.
- Die Integrierung der Niedertemperaturasphalte in den normativen Rahmen muss unverzüglich Gegenstand von Überlegungen werden.

Letztlich kann bestätigt werden, dass Niedertemperaturasphalte zweifellos eine glaubwürdige Alternative zu Heissasphalten sind. Wie gezeigt weisen diese Mischgüter mindestens gleichwertige Eigenschaften wie die heissen Mischgüter auf, sofern dies bei Rezeptur, Herstellung und Einbau berücksichtigt wird.

Summary

The principal objective of the PLANET project (Potential and analysis of warm mix asphalts) is to provide a better understanding in the domain of asphalt mixtures with low energy and environmental impacts. In order to do this, it is necessary to quantify the different aspects regarding the mechanical performance, energetic and economical potentials, occupational hygiene as well as the production and the quality control. Identification of potentials and limitations should eventually leads to endorsement of a best practice regarding the warm mix asphalt technology in Switzerland.

The main goal of the current research “WP-3: Formulation and optimisation of the performance” is to identify the main parameters in the formulation and determining if the methods and the concepts currently used for the hot mixtures are equally applicable to the warm mixtures. Analyses of the potentially critical characteristics as well as the study of the improvement of the performance are expected.

After an update in the knowledge of the different national and international experiences, the essential of the research is consisted in characterising and conducting performance tests in the laboratory. In order to do this, different specific studies has been conducted in one part on the recipe of the mixture used in the test sections (AC B 16 S), and on the part, on a recipe of the AC T 22S mixture.

In additional to a reference hot mix asphalt (REF-HOT), different processes and products for warm mix asphalt have been studied in the framework of the RS-3 research: surface active chemical additives (FR-PACK) or lubricating of adhesiveness (PA-PACK), synthetic zeolite (FR-ZEO), Fischer-Tropsch wax (FR-WAX) and semi-warm mixture with wet sand (PA-HWAM).

The performance analyses in the laboratory bring the following outcomes:

- In general, the warm mixtures can represent a higher susceptibility to water in comparison with hot mixtures. This sensitivity to water is strongly dependent to the binder characteristics and aging. The utilisation of the adhesiveness chemical and the high performance aggregates as well as the optimal choice of the binder allows reducing the risks of the water damages.
- Except the sensitivity to water, the tested warm asphalt mixtures represent mechanical performances slightly lower, or sometimes even higher than the hot mixtures. The observed differences as compared to the reference hot mixture remain in an acceptable range for the majority of the warm mixtures which usually results in a compliance with the standard requirements. Therefore it can be said that the warm mixtures are a credible alternative to hot mixtures.
- Between the different warm mixing processes, the mixture with the wax (FR-WAX) represent a very high resistance to rutting. For this reason, these mixtures are usually used in the surfaces with sever loading conditions such as airports or the bus lanes. As a consequence of this high resistance to rutting, the addition of the wax can be a disadvantage to the low-temperature strength of the mixture.
- The mixture with surface active chemicals (FR-PACK), presented the values of mechanical resistance (indirect tensile) comparable to the values of the reference hot asphalt mixture.
- Within the performed investigations, the mixtures with zeolite showed a tendency to have a higher susceptibility to rutting (the mixture in the test section) and especially a higher water sensitivity in comparison with other evaluated warm mixtures. These mixtures, for the tested cases, showed a lower performance as compared to the reference hot mixture.
- The warm mixtures with chemical additive, wax, or the addition of the zeolite represent a stiffness modulus (complex modulus 2PR-TR at 15°C, 10 Hz) globally comparative to the reference hot mix asphalt.
- The fatigue performances of the tested warm mix asphalts are globally equivalent to the values from reference hot mix asphalt.
- The addition of the milled asphalt materials to the warm mixture is surely promising.

Beside the environmental and energetic aspects, this combination allows in certain cases a significant improvement in the resistance to rutting as well as the fatigue performance while reducing the water sensitivity of the mixtures.

The improved potentials in the performance (or curing) of the warm mixtures has been evaluated by the laboratory tests up to 12 weeks after the production. For all of the tested mixtures (FR-WAX, FR-PACK, PA-HWAM, FR-ZEO, PA-PACK) no improvement in the performance has been shown. The mechanism is globally identical to the one of the reference hot mixtures.

Regarding the formulation of the warm mixtures, the main results are as follows:

- Since each process or product generates a specific mechanism of action, it is necessary to quantify this mechanism by a study of the viscosity and workability. For this purpose, the tests on the binders as well as the mixtures are preferred.
- For the reason of relative aspects to the variation of the viscosity of the mixtures depending on the considered temperature, the analytical/volumetric methods of the formulation do not seem to be necessarily adapted to the case of the warm mix asphalts, in the present state of knowledge.
- As for the hot mix asphalts, the characteristics of the aggregates and the binders have a strong impact on the formulation and its optimisation.
- Depending on the warm mix asphalts, a modification of the bitumen grade can be recommended as compared to the same mixture but hot mixed. This is for example the case for the mixtures with wax or the semi-warm mixtures.

The results of this research also highlights the need for additional investigations among which we can report:

- A method of the specific formulation of the warm mix asphalts should be proposed. This method can optionally be applied to Hot mix asphalts.
- As mentioned before, the viscosity is an important aspect for the warm mixtures. While the viscosity of the binder or the mastic is relatively well defined, the approach to quantifying the viscosity of the mixtures has to be further developed. An exploratory study with a workability test is proposed in this research where the approach can be integrated with the reflection of the formulation.
- For technologies using addition or control of water content, it is essential to assess the impact of the residual moisture on the mechanical behavior of the mixture.
- The limit values (standard requirements) and the best practice codes should be proposed in order to guaranty a mechanical behavior and a satisfying service life according to the requirements.
- The integration of the warm mix asphalts in a standardized framework should be immediately considered. Different ways have been discussed in the PLANET project including the definition of the test conditions.

We can finally mention that the warm mixtures are certainly a credible alternative to hot asphalt mixtures. As explained above, these mixtures can have a performance at least equivalent to the hot mixtures, as far as the formulation, production and the laying are the subject of a reflection.

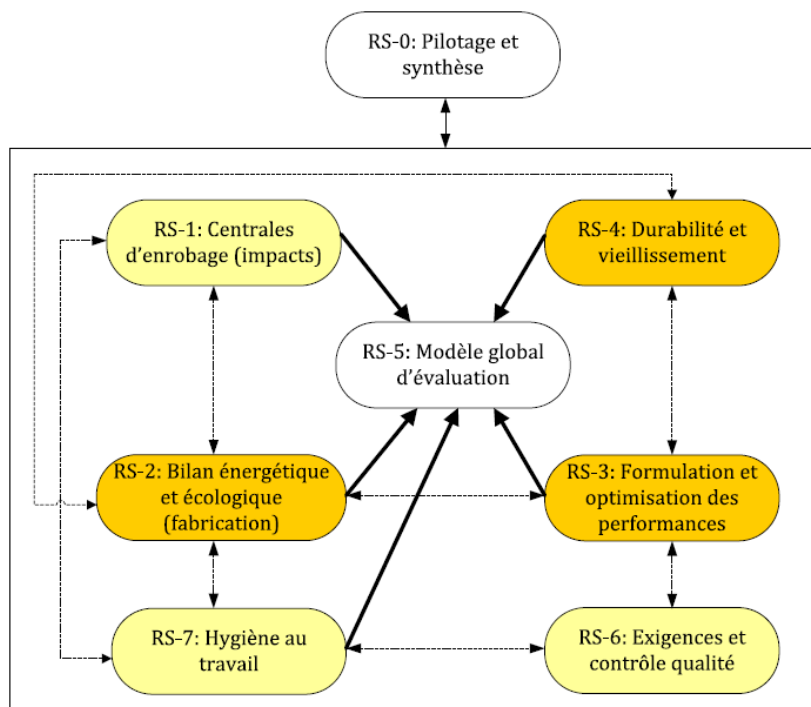
1 Introduction

1.1 Contexte – paquet de recherche PLANET

Le paquet de recherche PLANET, dont l'acronyme signifie "Potentiel et Analyse des Enrobés Tièdes" est un vaste paquet de recherches lancé par l'Office Fédéral des Routes, sur recommandation de la VSS. Les bases du projet ont été définies et détaillées dans le cadre du projet initial relatif aux enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques [28]. Outre le descriptif détaillé du paquet de recherches, ce projet initial contient également un descriptif exhaustif des enrobés tièdes que l'on pourra consulter pour de plus amples détails relatifs à ces technologies.

L'organigramme général du paquet de recherche PLANET est présenté dans la Figure 1 où l'on peut voir les différentes interactions entre les recherches spécifiques (RS), chacune pouvant être menée de manière indépendante. Concernant la RS-3, des liens spécifiques ont été établis avec la recherche relative à la durabilité et au vieillissement (RS-4), la recherche relative aux exigences et contrôle qualité (RS-6) ainsi que la recherche relative au bilan énergétique et écologique (RS-2). Cette recherche spécifique fournira finalement d'importantes informations nécessaires à la validation du modèle d'analyse multicritère développé dans le cadre de la RS-5.

Cette recherche est, comme détaillé précédemment, en charge de l'organisation des fabrications en centrale. Ceci nécessite donc une très bonne coordination avec les différentes recherches spécifiques concernées par des mesures ou alors par les mélanges produits en centrale. Ceci concerne en particulier les recherches RS-1, RS-2, RS-4, RS-6, RS-7. L'organisation des fabrications en centrale sera également faite avec le support de la RS-0 relative au pilotage et à la synthèse du projet.



Légende:

Procédés: Fil rouge et procédés additionnels

Procédés: Fil rouge uniquement

Coordination / Coopération

Input

Fig. 1 Organigramme paquet de recherche PLANET [28]

Un point central du paquet de recherche a consisté en la réalisation de planches d'essais avec différentes technologies, planches qui ont été construites à Wohlen bei Bern. L'ensemble des détails relatifs à ces planches d'essais sont disponibles dans le rapport relatif à la recherche RS-6, certains éléments étant cependant repris dans le présent rapport.

La réalisation du paquet de recherche PLANET doit finalement permettre de:

- Fournir un bilan exhaustif sur l'expérience avec les enrobés tièdes et analyser de manière détaillée certains aspects jugés déterminants conformément au projet initial [28].
- Identifier les avantages et inconvénients des enrobés tièdes.
- Mettre en évidence les domaines d'utilisation recommandés pour ces enrobés.
- Fournir un apport substantiel à la normalisation, ceci afin de promouvoir la bonne pratique avec cette famille d'enrobés bitumineux.

1.2 Objectifs et contenu de la recherche

Comme il le sera développé plus loin, Les enrobés tièdes ne sont appliqués que depuis une dizaine d'année pour les plus anciennes technologies. Ils sont de plus en continuel développement. Ainsi, le recul sur ces technologies est encore faible et les performances sur l'ensemble du cycle de vie se doivent d'être analysées.

Au niveau de la formulation, de l'optimisation de la formulation et des performances mécaniques à court terme des analyses sont encore nécessaires. Il s'agit d'apporter des informations quant aux problématiques suivantes:

- Quels sont les paramètres à considérer lors de la formulation?
- Comment optimiser les performances?
- Les outils de formulation classique peuvent-ils sans autres être adaptés aux enrobés tièdes?
- Quelles sont les caractéristiques critiques lors du processus de montée en performance?

La méthodologie est relativement complète et elle comprend différents aspects soit:

- Recherche bibliographique et mise à jour des connaissances (littérature nationale et internationale).
- Contacts avec différents experts du domaine.
- Essais performantiels en laboratoire sur liant, mastic et enrobés. L'analyse approfondie en laboratoire des caractéristiques mécaniques constitue le cœur de la présente recherche. Elle se distingue également de la recherche RS-4 qui considère quant à elle les performances à long terme des différents enrobés.

Le principe général de cette recherche spécifique consiste à analyser la méthodologie de formulation des enrobés tièdes ainsi que l'optimisation des performances à court terme, ceci comparativement aux enrobés à chaud traditionnels. L'organisation générale de la recherche est représentée dans la figure 2 qui indique également les chapitres concernés par chacun des étapes du projet de recherche, les différentes étapes étant détaillées par la suite.

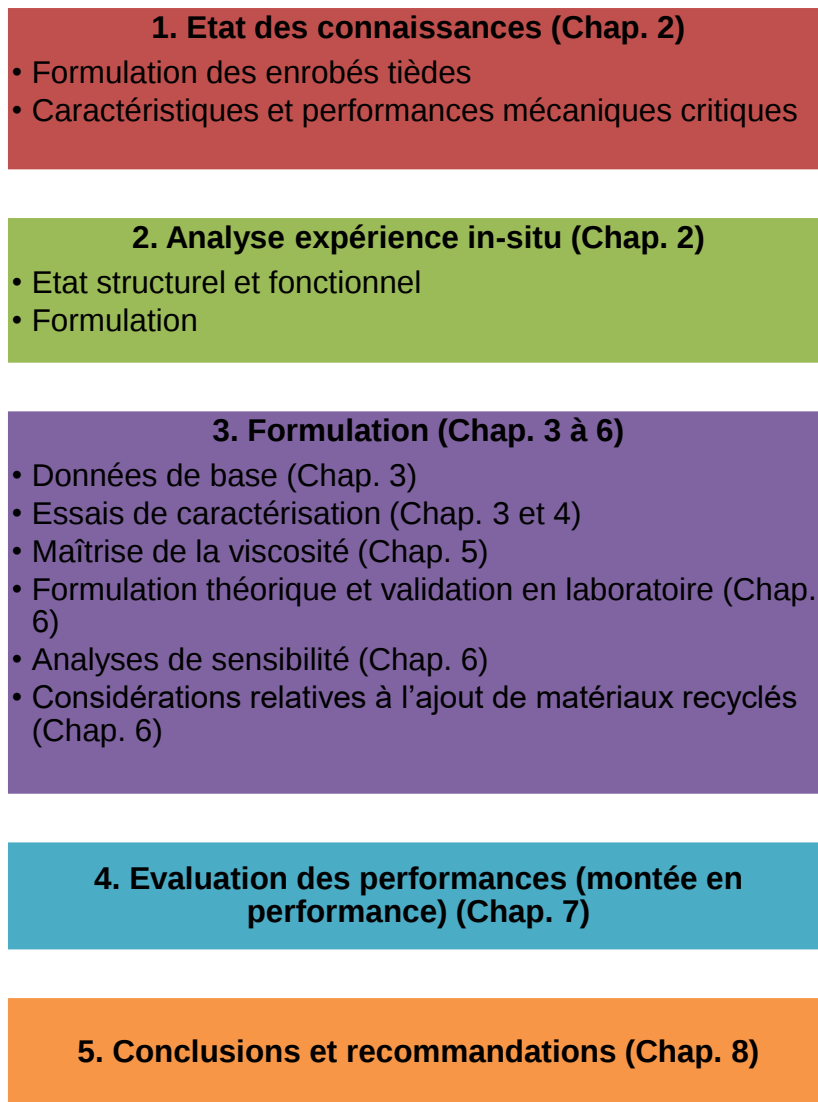


Fig. 2 Vue générale RS-3

Etat des connaissances

Une mise à jour des connaissances dans le domaine et une analyse critique de l'état des connaissances est nécessaire dans une première phase. L'état des connaissances sera principalement axé sur les deux aspects qui sont:

- Formulation des enrobés tièdes
- Caractéristiques et performances mécanique critiques

Il est à relever que tant la formulation (et optimisation des performances) que les caractéristiques mécaniques critiques ne peuvent être généralisées à tous les procédés tièdes et semi-tièdes. Des considérations relatives aux différentes familles de procédés devront être faites séparément.

Analyse expériences in-situ

Une analyse de différentes expériences in-situ sera menée, ceci en essayant également de trouver des expériences suisses de pose d'enrobés tièdes. Des informations seront également recueillies à l'étranger, notamment au-travers du FEHRL dont le LAVOC est représentant suisse. Par ailleurs, des informations seront également fournies par des essais menés en conditions contrôlées (halle-fosse, 2010) sur un enrobé tiède avec ajout de cire.

L'analyse des expériences in-situ sera réalisée en prenant tout particulièrement en considération les aspects relatifs à l'état structurel et fonctionnel de la chaussée ainsi que la formulation des enrobés testés.

Formulation

La phase de formulation et optimisation des performances constitue la partie centrale de cette recherche.

Pour la formulation, il a été choisi de procéder dans un premier temps avec la méthode de formulation classique suisse (optimisation Marshall), mais également d'utiliser une méthode de formulation volumique dans la mesure du possible. Les aspects suivants ont été spécifiquement réalisés:

- **Essais de caractérisation :** Cette première phase consiste en l'identification des caractéristiques des différents composants. Cela concerne tout particulièrement les granulats, le bitume ainsi que les éventuels additifs. Dans cette phase, les éléments fixes pour toute la durée de la recherche ainsi que les différents éléments variables seront identifiés.
- **Maîtrise de la viscosité :** La viscosité est un élément déterminant lorsque l'on parle des enrobés tièdes. En effet, le principe à la base de ces mélanges consiste à garantir une viscosité suffisamment basse ceci avec un abaissement des températures de production, pose et compactage. Pour cela, des considérations relatives à la maîtrise de la viscosité sont attendues, ceci avec une analyse à différents niveaux soit liant, mastic et enrobé.
- **Formulation théorique et validation en laboratoire :** Une analyse de la méthode de formulation est attendue, ceci notamment avec l'évaluation de l'applicabilité de méthodes couramment appliquées pour les enrobés à chaud.
- **Analyses de sensibilité :** L'analyse de sensibilité sera conduite au gré des résultats de formulation et optimisation des performances. Cette analyse aura également pour objectif de mettre en exergue les différences entre les différents types de procédés tièdes ainsi que les paramètres relatifs à la formulation selon chacun de ces procédés. Il est notamment attendu une analyse des performances potentiellement critiques pour lesquelles on pourra *a priori* mentionner le comportement aux basses températures, la sensibilité à l'eau, l'impact du type de liant ou encore l'adhésivité liant-granat.
- **Considérations relatives à l'ajout de matériaux recyclés :** Les considérations relatives à l'ajout de matériaux recyclés seront notamment basées sur les essais réalisés sur une planche d'essai additionnelle, non prévue dans le descriptif initial du projet PLANET.

Evaluation des performances (montée en performance)

Pour les différents enrobés tièdes ainsi que l'enrobé de référence à chaud, l'évolution des performances à court terme est à évaluer dans le cadre de cette recherche spécifique.

Dans un premier temps, il est important de définir tout d'abord ce qui est compris par la dénomination de « montée en performance » ou performance à "court terme". Pour cette recherche spécifique, nous proposons d'associer la montée en performance au temps nécessaire jusqu'à obtention des performances maximales du mélange, ceci en fixant une durée maximale arbitraire de 12 semaines. Ainsi, dans une première étape, la montée en performance sera analysée en effectuant des essais à différents pas de temps. Cette notion de montée en performance est également à mettre en parallèle avec la notion de "durabilité et vieillissement" relative aux performances de l'enrobé sur le long terme (durée de vie) et traitée dans la RS-4.

Conclusions et recommandations

Les différentes conclusions et recommandations ont pour objectif de répondre aux résultats attendus, sur la base de la recherche qui aura été menée. Il est notamment attendu des considérations relatives à :

- La formulation et l'optimisation des performances mécaniques.
- La montée en performances (phénomène de « mûrissement »)
- L'ajout de matériaux recyclés
- L'apport de la recherche pour la normalisation

Comparativement au plan de base du projet de recherche, nous pouvons relever les adaptations suivantes:

- L'organisation des fabrications en centrale a été faite de manière conjointe, principalement entre la RS-6 et RS-3.
- Mesures approfondies de la maniabilité et mise en place maniabilimètre.
- Réalisation d'analyses de sensibilité spécifiques (effet granulométrie, sensibilité à l'eau).

Nous pouvons finalement relever que la présente RS-3 a également contribué largement à l'organisation des fabrications en centrale d'enrobage, ceci dans le but de la construction des planches d'essais et du prélèvement de différents enrobés par les recherches spécifiques concernées en vue de la réalisation des essais de laboratoire. Les éléments suivants ont été réalisés dans le cadre des fabrications en centrale d'enrobage, ces aspects n'étant pas davantage discutés dans le présent projet :

- Mise au point d'un protocole de collaboration avec la centrale.
- Prélèvements de matériaux bruts pour les différentes recherches spécifiques intéressées.
- Proposition d'une formulation pour fabrications à la centrale d'enrobage, sur la base de discussions avec les gestionnaires du poste d'enrobage.
- Recueil des quantités d'enrobés nécessaires aux différentes recherches spécifiques.
- Organisation de la fabrication de gâchées tests.
- Suivi des fabrications et recueil des protocoles de fabrication auprès de la centrale.
- Acheminement des mélanges chez les différents laboratoires partenaires.
- Vérification des productions à la centrale par des analyses de l'enrobé en laboratoire.

1.3 Les enrobés tièdes

Nous proposons ici un très bref descriptif relatif aux enrobés tièdes. On pourra suggérer de consulter les références [28, 29] pour davantage d'informations.

De manière générale, nous pouvons définir les enrobés à faibles impacts comme des mélanges bitumineux dont la température de fabrication est inférieure à celle des enrobés à chaud traditionnels (Hot Mix Asphalt – HMA) qui se situe habituellement entre 150 et 180 °C selon le grade de bitume utilisé. La température de pose et compactage des enrobés à chaud est habituellement compris entre 130 et 160 °C.

Nous comprendrons sous la dénomination d' « enrobés à faibles impacts » les enrobés tièdes (Warm Mix Asphalt - WMA, Niedertemperaturasphalt - NTA), les enrobés semi-tièdes (Half-Warm Mix Asphalt - HWMA) qui tous deux se confondent volontiers sous le vocable général d'enrobé tiède, ainsi que les enrobés à froid (Cold Mix Asphalt – CMA, Kaltmischgut). Notons que d'autres dénominations peuvent être utilisées, telle que par exemple « enrobé tiédi » en lieu et place d'enrobé tiède. Ces différents enrobés (tièdes, froids) ont pour objectif d'abaisser la température d'enrobage, tout en conservant une maniabilité suffisante pour la mise en œuvre et le compactage. Le principe de base consiste donc à trouver une méthode, avec ou sans ajout, permettant de maintenir artificiellement une bonne viscosité de l'enrobé durant la période de fabrication, de pose et de compactage et ceci tout en garantissant un comportement mécanique et une durée de vie satisfaisant aux exigences.

Différentes méthodes de classification des enrobés tièdes peuvent exister, par exemple selon la température de fabrication, la consommation énergétique ou encore les émissions. En Europe, il est fréquemment admis qu'un enrobé est « tiède » lorsque sa température de production est au moins 20 °C inférieure à celle d'un enrobé à chaud. Un exemple de classification des enrobés est donné dans la figure 3, cette figure indiquant les ordres de grandeur de consommation de fioul et d'émissions de CO₂ en fonction du type d'enrobé.

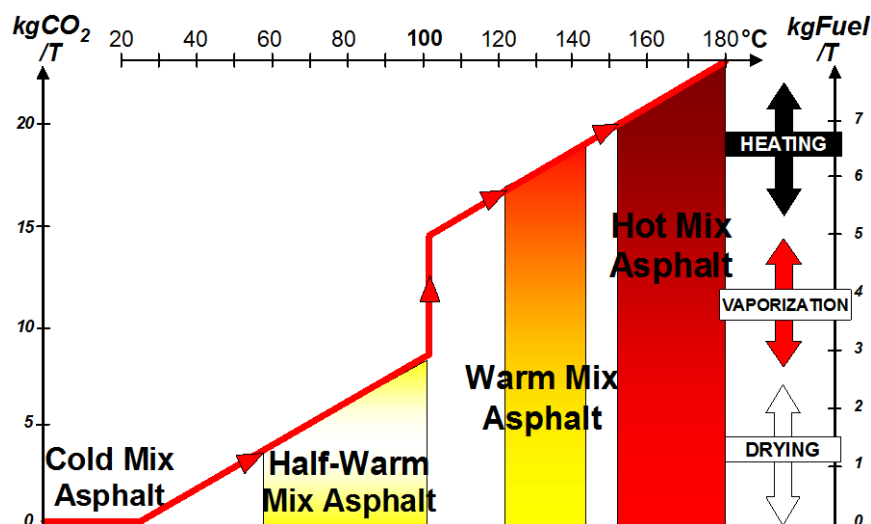


Fig. 3 Classification des différents types d'enrobés tièdes (Source : LEA-Co, Eiffage T. P.)

Sur la base de la température de fabrication, nous pouvons proposer la classification suivante :

- Enrobés à chaud : 150 à 180 °C
- Enrobés tièdes: 100 à 140 °C
- Enrobés semi-tièdes: 60 à 100 °C
- Enrobés à froid: 20 à 60 °C

Nous pouvons également observer l'importante différence de consommation énergétique (et des émissions) entre les enrobés tièdes et semi-tièdes. Le passage du palier de température de 100 °C est en effet crucial d'un point de vue énergétique, la chaleur latente de vaporisation de l'eau étant très élevée comparativement à la chaleur massique de l'eau.

Le postulat de base des enrobés tièdes consiste à abaisser la température de fabrication ceci afin de diminuer la consommation d'énergie et (si possible) la charge environnementale. La température étant moins élevée, il est cependant indispensable de garantir une faible viscosité pour une bonne diffusion du bitume (enrobage suffisant) et une bonne maniabilité du mélange. Différents procédés permettent de maintenir la viscosité du liant suffisamment basse durant toute la période de fabrication, de pose et de compactage. La classification entre les principes peut varier selon les auteurs ; nous proposons ici une classification issue de [28, 29] :

- Catégorie A. Procédés recourant à une modification de la séquence d'enrobage ou enrobage séquentiel; sans modification des éléments du mélange.
- Catégorie B. Procédés basés sur l'introduction d'eau ou la maîtrise de la teneur en eau afin d'obtenir un moussage in-situ du bitume (appelé effet de "soupe" ou "moussabilité").
- Catégorie C. Procédés basés sur la chimie en agissant sur le liant ou la tension superficielle entre liant et granulats. Ceci comprend l'addition de substances chimiques ou naturelles ainsi que l'utilisation d'un liant de synthèse ou végétal.

Le développement d'enrobés tièdes fera appel à au moins un des principes ci-dessus. Pour chaque procédé mentionné, différents produits existent. Une liste non-exhaustive de produits peut être trouvée dans [29] ainsi que dans [31].

De manière générale, les enrobés tièdes ont pour objectif de proposer une alternative aux enrobés à chaud, ce qui demande alors des performances au moins équivalentes à celles des mélanges à chaud.

Dans le cas d'enrobés à froid, le concept général est différent puisqu'il consiste à mélanger à température ambiante les granulats avec un bitume préalablement fluidifié, soit par solubilisation dans un solvant ou une huile légère, ou par mise en émulsion dans l'eau. Ces procédés concernent cependant un domaine d'application différent, les enrobés à froid présentant des caractéristiques et performances mécaniques généralement moins élevées que celles d'un enrobé à chaud traditionnel.

2 Etude bibliographique

Un état de la recherche complet a été effectué dans le cadre du "Projet initial – Enrobés à faibles impacts énergétiques et écologiques" [28].

Les enrobés tièdes font l'objet de multiples investigations depuis la fin des années 1990s [68] et d'importants projets ont été lancés au niveau national dans différents pays ceci afin de répondre à la demande locale et favoriser l'implémentation de ces techniques. Le projet PLANET fait donc finalement écho à une démarche également appliquée dans de nombreux autres pays. Les techniques les plus couramment utilisées pour la production des enrobés tièdes sont : additifs organiques ; additifs chimiques et la technique de moussage du bitume. La majorité de la littérature rapporte comme avantages principaux de ces technologies [28, 69] la diminution des émissions et de la consommation énergétique ainsi que l'amélioration des conditions pour les ouvriers sur le site de production et de pose. Le principal inconvénient mis en évidence concerne la possible augmentation des coûts de production ainsi que, selon les technologies, une diminution de certaines performances mécaniques (sensibilité à l'eau notamment).

Les enrobés tièdes ne sont pas encore appliqués de manière généralisée, mais des efforts sont engagés particulièrement en France, en Belgique et en Allemagne. L'Union Européenne conduit également des recherches sur cette thématique avec par exemple le projet DIRECT-MAT du 7^{ème} Programme Cadre de recherches. Les associations AIPCR et l'IRF effectuent également des travaux sur la thématique, respectivement par l'intermédiaire de groupes de travail ou du développement de calculateurs de gaz à effet de serre. Aux Etats-Unis, le "National Center for Asphalt Technology-NCAT", la "Federal Highway Administration – FHWA" ainsi que la "National Asphalt Pavement Association-NAPA" consacrent des efforts à cette problématique en produisant différents rapports de recherche. De plus, un groupe technique de travail "Warm Mix Asphalt Technical Working Group (WMA TWG)" a été créé aux Etats Unis avec pour mission d'évaluer et valider les technologies d'enrobés à basse température ainsi qu'implémenter une politique qui soit proactive.

Nous pouvons encore relever que plusieurs conférences traitant des thématiques de l'environnement et du développement durable (Eurasphalt & Eurobitume, International Symposium on Asphalt Pavements and Environment, IRF 2nd Roads & Environment Conference 2008,...) ont été effectuées au cours des dernières années. La première conférence spécifiquement dédiée aux enrobés tièdes (International Conference on Warm-Mix Asphalt) a par ailleurs été organisée à Nashville (USA) par la NAPA, en novembre 2008. En Suisse, nous pouvons par exemple citer la journée technique "Forum Strasse 09: Temperaturabsenkung im Strassenbau" et la journée technique LAVOC 2010 "Routes et énergie".

Dans la suite de ce chapitre, quelques éléments relatifs aux expériences en laboratoire avec la formulation ainsi qu'au suivi de planches d'essais *in situ* seront proposés.

2.1 Expériences en laboratoires

La formulation des enrobés tièdes et les potentielles différences avec les enrobés traditionnels à chaud ne sont que peu traitées dans la littérature [28]. Nous pouvons mettre en évidence les recherches ci-après.

Dans [46], l'auteur propose une analyse de trois enrobés tièdes (Evotherm®, Sasobit® et Aspha-min®) pour lesquels un essai de traction indirecte est utilisé afin de déterminer la résistance mécanique ainsi que le coefficient de Poisson. Ces essais réalisés à basse température (0 °C, -10 °C, -20 °C) mettent en évidence le meilleur comportement de l'enrobé à l'Aspha-min® qui présente le risque de fissuration le moins important. L'enrobé avec additif Evotherm® montre quant à lui des performances proches du mélange de référence à chaud alors que l'enrobé avec cire Sasobit® obtient la rigidité la plus élevée

et le fluage le plus faible. Au regard des différents essais réalisés ainsi que d'essais en vraie grandeur, l'auteur identifie l'Evotherm® et l'enrobé à l'Aspha-min® comme les plus proches du mélange de référence à chaud pour ce qui est des performances mécaniques évaluées.

Dans ses travaux [47] effectuée une analyse en laboratoire de différents enrobés tièdes soit le Cecabase RT® (agent tensio-actif), Advera® et Aspha-min®. Sur la base des essais réalisés (traction indirecte, orniérage, module), l'auteur obtient des performances globalement comparables à la référence à chaud avec l'additif Aspha-min®, les autres enrobés tièdes montrant des performances moins élevées. Nous pouvons relever que pour la sensibilité à l'eau les différents enrobés tièdes présentent un ratio ITSR inférieur à 50% ; ce résultat très faible est à relativiser car le mélange de référence à chaud obtient également des résultats que peu satisfaisants (ratio ITSR de 72%). Dans une étude comparable [70] menée par Shun et al., les performances d'enrobés tièdes avec forte teneur en fraisat d'enrobé (RAP) produits selon une technique de moussage du bitume sont étudiées. Contrairement aux observations faites dans [47], les auteurs de la recherche indiquent que les enrobés avec moussage du bitume fabriqués en poste d'enrobage ont une résistance à l'humidité comparable à celle du mélange de référence à chaud. Des essais de module dynamique à 10 °C et avec un balayage en fréquence de 0.1 à 50 Hz ont quant à eux indiqué des valeurs plus élevées pour le mélange de référence à chaud que pour l'enrobé tiède testé. Les auteurs ont également montré dans cette étude l'effet bénéfique de l'ajout de fraisat d'enrobé avec une amélioration de la résistance à l'orniérage et diminution de la susceptibilité à l'eau, ceci tant pour les enrobés à chaud que les enrobés tièdes. La résistance à l'humidité est donc améliorée par l'ajout de RAP.

Zaumanis a effectué différentes recherches relatives aux enrobés tièdes et recyclés. Dans [48], des essais sur bitume et enrobé avec cire Sasobit® et agent tensio-actif Rediset WMX® ont été réalisés. Les résultats d'essais sur liants (pénétration, température anneau et bille T_{AB} , viscosité dynamique, indice de pénétration) indiquent un effet modéré de l'ajout de Rediset WMX® sur les caractéristiques de base du liant, contrairement à la cire qui modifie significativement les propriétés. Les mesures rhéologiques (rhéomètre à cisaillement dynamique - DSR) confirment l'effet de la cire avec une augmentation significative du module de cisaillement complexe G^* et diminution de l'angle de déphasage du liant une fois la cire cristallisée. L'auteur réalise également des essais sur enrobé (module de rigidité, fluage dynamique) après un temps de cure de 2 h et 4 h. Les résultats montrent pour l'ensemble des mélanges (y-compris la référence à chaud) une augmentation du module de rigidité lors des quatre premières heures. L'ampleur de cette augmentation de rigidité est fonction du type d'enrobé et de sa température de fabrication. Dans ses conclusions, l'auteur recommande des essais sur le long terme afin d'analyser l'éventuelle évolution des performances, ainsi qu'une évaluation plus approfondie de la sensibilité à l'eau et des performances à basses températures. Ces aspects seront notamment traités dans le présent projet.

L'augmentation de la susceptibilité à l'eau dans les enrobés tièdes (avec enrobé recyclé) est illustrée par la réalisation d'essais d'orniérage en conditions humides (Hamburg Wheel Tracking Device - HWTD) sur enrobés avec Sasobit® et Advera® (zéolithe) [49]. Dans le cas étudié, les enrobés avec cire Sasobit® présentent une meilleure résistance à l'humidité que les enrobés avec Advera®. Des mesures de viscosité (105 °C à 165 °C) et de classification Superpave des liants (Performance Grade - PG) indiquent également que l'ajout d'Advera® ne modifie pas significativement le liant de base.

Le National Center for Asphalt Technology (NCAT) de l'université d'Auburn a effectué différentes études sur des enrobés tièdes. Une analyse des enrobés avec ajout de cire Sasobit® indique une meilleure compactibilité des enrobés tièdes (jusqu'à 88 °C) comparativement à la référence à chaud, ce qui selon les auteurs pourrait éventuellement permettre de diminuer la teneur en liant dans une optique d'optimisation de la formulation. Les résultats indiquent une diminution de la température d'équiviscosité de compactage de 18 °C par rapport à la référence à chaud. Par ailleurs, la susceptibilité à l'orniérage (APA) et le module résilient mesuré à 23 °C ne semblent pas affectés par l'ajout de cire. L'augmentation potentielle de la susceptibilité à l'orniérage et une

éventuelle sensibilité à l'humidité en raison de la diminution de la température de fabrication (séchage incomplet) et du vieillissement plus faible du liant sont cependant soulevés. D'autres essais sur enrobés avec ajout de zéolithe [51] amènent à des conclusions semblables et ne mettent pas en évidence un temps spécifique de cure avant réouverture au trafic.

Une étude de l'effet sur le liant (Performance Grade – PG) de la cire Sasobit® et de sa teneur est proposée par [52], les auteurs mettant en évidence les limites d'utilisation de la cire pour les climats froids. Les auteurs évaluent également la combinaison du procédé semi-tiède LEA® avec l'ajout de cire Sasobit®, dans le but de réduire davantage la température de fabrication et compactage. L'analyse de compactibilité à la presse à cisaillement giratoire (PCG) indique que le mélange LEA®/Sasobit® peut être compacté jusqu'à une température de 80 °C, tout en respectant les exigences de teneur en vides.

La résistance à l'orniérage et à la fatigue d'enrobés tièdes produits avec différentes sortes d'additifs (tensio-actifs, cires, zéolithe) a été étudiée par [74]. Les résultats des essais d'orniérage indiquent que la profondeur d'ornière diminue avec la diminution de la température des mélanges, ceci car la teneur en vides augmente lorsque les mélanges sont produits à des températures plus faibles. A notre sens, ce résultat doit être considéré avec précautions, ceci car la résistance à l'orniérage dépend passablement de la gamme de vides des échantillons testés (relation non linéaire). Les essais de fatigue réalisés par [46] indiquent des performances comparables pour l'enrobé tiède avec ajout de zéolithe, alors que l'enrobé tiède avec agent tensio-actif se montre moins performant à la fatigue.

2.1.1 Enrobés tièdes avec cire

De nombreux types de cires existent : naturelles, artificielles ou partiellement artificielles. Dans son travail de doctorat, [54] effectue une analyse en laboratoire de trois cires (Fischer-Tropsch - FT, amide, Montan) et différents dosages. Six liants de base sont analysés, la moitié étant des bitumes de distillation directe et l'autre moitié des liants modifiés aux polymères. Les essais sur liants montrent pour les différentes cires une nette diminution de la pénétration (25 °C) ainsi qu'une augmentation de T_{AB} . Le durcissement le plus important est obtenu avec la cire Fischer-Tropsch. L'ampleur de la modification de comportement n'est pas directement proportionnelle à la teneur en cire, le dosage idéal se situant entre 2% et 4%. La diminution de viscosité lors de la fusion de la cire est également observée, ceci particulièrement pour la cire FT. Cette diminution de viscosité se fait à des températures plus élevées pour la cire amide (120-130 °C) en raison de sa haute température de fusion (141 °C), ce qui peut engendrer des problèmes lors de la pose et du compactage (rigidification du mélange). Le comportement à basse température des liants avec cire est altéré par une capacité de relaxation plus faible, en particulier pour les cires FT et montan. Cependant, la perte au niveau du comportement à « basse » température est moins importante que le gain au niveau du comportement à « haute » température. Les essais sur enrobés corroborent les résultats obtenus sur liants, avec entre autre une amélioration de la résistance à l'orniérage (en particulier avec cire FT) et un accroissement du risque de fissuration à basses températures. Les cires amides présentent le comportement le moins affecté à basse température.

Parmi les études relatives à l'utilisation de cires, nous pourrions encore recommander les travaux de [28] qui propose l'investigation de 10 différents cires commerciales ainsi que les travaux de Y. Edwards (KTH, Suède) relatifs à l'utilisation de cires dans les enrobés [29, 30].

La cire Sasobit® est probablement la plus répandue des cires utilisées à ce jour en construction routière, cette cire étant produite selon un procédé de Fischer-Tropsch. De manière générale, l'ajout de cette cire permet d'augmenter le module complexe en cisaillement dans le domaine des températures de service de même que le point de ramollissement anneau et bille et la force-ductilité, ceci alors que le fluage est diminué de même que la pénétration et point Fraass des liants [71, 72].

2.1.2 Enrobés tièdes avec ajout ou maîtrise de la teneur en eau

De nombreuses recherches ont été menées, analysant la zéolithe sous ses différentes formes. Dans [58, 59], les auteurs évaluent l'ajout de différents types et quantités de zéolithe dans un enrobé (AC 0/10). Les zéolithes se distinguent par leur capacité à stocker de l'eau (structure cristalline) ainsi que leur granulométrie. Une étude à la presse à cisaillement giratoire (PCG) met en évidence la diminution de compacité avec la diminution de la température de compactage, permettant d'évaluer la réduction de température de compactage pouvant être atteinte. Pour les enrobés avec zéolithe synthétique spécifique pour chaussées routières (teneur 0.3%), cette température peut être réduite à 120 °C. L'analyse du comportement à basse température (TSRST) ainsi que la sensibilité à l'orniérage ne mettent pas en évidence de comportement altéré des enrobés tièdes. Les essais réalisés illustrent également l'effet de l'humidité initiale des granulats (0.3 à 0.9%) sur les performances de l'enrobé. La résistance à la traction indirecte ainsi que la sensibilité à l'eau (ratio ITSR) sont affectés par l'utilisation de granulats humide comparativement à des granulats totalement secs tel qu'utilisés traditionnellement en laboratoire.

Nous pouvons encore mentionner les travaux de K. J. Jenkins [64] qui s'intéresse au moussage du bitume par une étude détaillée du phénomène et notamment la proposition d'un indice de caractérisation de la mousse (Foam Index). L'auteur considère principalement les enrobés à froid ainsi que certains enrobés semi-tièdes (température de fabrication entre 40 °C et 90 °C). Il effectue également une analyse relative à la formulation des mélanges avec moussage du bitume.

Le mécanisme de compactage d'enrobés tièdes avec addition de zéolithe synthétique a été étudié par [73] dans le cadre de différents essais en laboratoire. Le "temps de moussage" a également été étudié par les auteurs, ceci afin d'évaluer si l'additif ajouté nécessitait un certain temps de réaction avant de maximiser l'effet de moussage. L'étude a démontré l'effet positif de la zéolithe sur la compactibilité de l'enrobé, ceci lorsque la durée de stockage n'excède pas une heure. L'effet de la zéolithe semble "disparaître" après une durée de deux heures environ. Les auteurs mettent également en évidence que dans la phase ultime du compactage lorsque le degré de "verrouillage" entre les granulats est élevé, alors le comportement de l'enrobé tiède est comparable à celui d'un mélange à chaud.

2.1.3 Enrobés avec additif chimique

Le développement des additifs chimiques pour la production d'enrobé tiède a démarré plus tard que les procédés avec eau ou ajout de cire, mais le nombre d'additifs existants a très rapidement augmenté.

L'additif Cecabase RT® est analysé dans [66] qui effectue des mesures rhéologiques sur bitume illustrant l'absence de modification du PG par l'ajout de l'additif. La compacité (PCG), teneur à l'eau et sensibilité à l'orniérage montrent des performances de l'enrobé tiède comparables à la référence à chaud. Différentes expériences in-situ sont également mentionnées afin d'illustrer les domaines d'applicabilité (matériaux recyclés, types de liants).

Dans une étude comparable [75], l'effet de la température de mélange et de la teneur en Cecabase RT® sont étudiés. Les résultats indiquent que la température de production et variation de la teneur en Cecabase RT® n'affectent pas de manière significative le module complexe, la durée de vie en fatigue et la résistance mécanique des enrobés. De plus, la même étude indique que les enrobés tièdes testés ont une plus grande susceptibilité à l'orniérage que l'enrobé de référence à chaud. Cette susceptibilité à l'orniérage augmente par ailleurs avec l'augmentation de la teneur en additif ainsi qu'avec la diminution de la température de production des enrobés.

2.2 Expériences in situ

Dans les travaux de [53] 7 sections tests (Sasobit®, Licomont®, Asphaltan B®, Aspha-min®) ayant une durée de service comprise entre 3 et 6 ans ont été suivies. Par rapport aux références, les différentes sections montrent des performances identiques voire légèrement plus faibles pour la résistance à l'orniérage et le post-compactage. Le comportement à basse température, le vieillissement du liant et la résistance à l'humidité sont également comparables voire légèrement supérieurs pour les sections d'enrobé tiède ; la résistance aux hautes températures étant améliorée.

Dans [60], les auteurs rapportent les résultats d'une expérience in-situ avec utilisation de zéolithe synthétique (Aspha-min®) à un taux de 0.3%. L'enrobé fabriqué à 130-145 °C a ensuite été compacté jusqu'à une température de 100 °C, tout en maintenant une bonne maniabilité et une compacité comparable à la référence à chaud, voire meilleure. Les auteurs présentent de nouveaux résultats en laboratoire et in-situ dans [61].

Une expérience avec le procédé Double Green Barrel®, consistant en une unité de moussage, est discutée par [62]. L'enrobé posé *in situ* a été produit à une température de 130-135 °C, des mélanges tièdes avec granulats d'enrobé recyclé à des taux de 15% et 50% étant également évalués. Les résultats indiquent pour les enrobés tièdes un vieillissement plus faible du liant récupéré que le vieillissement RTFOT utilisé traditionnellement. Les différents mélanges ne présentent pas de susceptibilité accrue à l'orniérage (APA). L'ajout de 15% de RAP n'affecte pas le module résilient mesuré (5 °C, 25 °C, 40 °C), alors que la sensibilité à l'eau est améliorée par l'addition de RAP.

Les résultats de diverses productions in-situ de WAM-Foam® sont discutés dans [63]. Ces expériences indiquent globalement une compacité et résistance à l'orniérage similaires aux sections de contrôle. Le module de rigidité, la fatigue (Nottingham Asphalt Tester-NAT) et la planéité longitudinale sont également comparables à l'enrobé de référence.

Des essais réalisés *in situ* en 2005 avec ajout de Cecabase RT® sont discutés dans [65]. Les résultats indiquent une teneur en vides légèrement supérieure à l'enrobé de référence à chaud (1.2%), des mesures de macro-texture (technique volumétrique à la tache) ne mettant pas en évidence de différences significatives entre les enrobés. Les essais de compression simple en laboratoire montrent une résistance plus faibles des enrobés tièdes, avec une diminution de la force à la rupture.

Quatre planches d'essais en enrobe tiède ont été construites en 2008 au Nebraska (USA), ceci avec des une technique de moussage du bitume et l'utilisation d'une émulsion. [76] Un suivi a ensuite été réalisé sur une période de 3 ans (2009-2011) avec différents indices de performances parmi lesquels l'IRI, l'orniérage et la texture. Les résultats indiquent que la profondeur d'ornière et la valeur d'IRI sont identiques pour les sections en enrobé tiède et les sections de référence à chaud; ces valeurs restant globalement faibles comparativement à des critères habituels de rupture. De plus aucun mode de dégradation particulière ou fissuration spécifique n'ont été observés sur les planches d'essais. Cependant, les auteurs de la recherche indique qu'une poursuite de l'évaluation sur une plus longue période est nécessaire, ceci car deux résultats d'essais en laboratoire indiquent une potentielle susceptibilité à l'eau des enrobés tièdes, les dégâts liés à l'humidité accélérant généralement dès l'apparition d'orniérage ou de fissuration sur une chaussée.

Des essais en vraie grandeur réalisés en Californie [77] ont également permis de réaliser un suivi de la susceptibilité à l'eau et à l'orniérage de planches d'essais en enrobe tièdes. Les résultats obtenus ne mettent pas en évidence de susceptibilité à l'eau des enrobés tièdes testés (Advera®, Evotherm®, Sasobit®), mais il est intéressant de mentionner que des mesures de teneur en eau des enrobés tièdes prélevés au poste d'enrobage indiquent une valeur plus élevée pour les enrobés tièdes que pour le mélange de référence à chaud. Les auteurs indiquent qu'une potentielle susceptibilité à l'eau des

enrobés tièdes peut apparaître, ceci surtout dans le cas où l'humidité des granulats utilisés n'est pas bien maîtrisée.

Trois différentes technologies d'enrobés tièdes (additifs chimiques, cire, moussage du bitume) ont été suivies lors de différents chantiers en Iowa réalisés au cours des années 2009-2010 [80]. Lors de ces projets, des teneurs variables en fraisat d'enrobé ont également été utilisées afin de quantifier leur effet sur les enrobés tièdes. De manière générale, le suivi des performances indiquent un comportement comparable entre les enrobés tièdes et les enrobés à chaud évalués. La teneur en vides des enrobés tièdes est par contre légèrement plus faible dans le cas des enrobés tièdes. L'analyse des liants récupérés a également permis de mettre en évidence une augmentation des performances dans le domaine des basses températures ceci en raison du vieillissement (oxydation) et de l'addition de matériaux recyclés.

Nous pouvons finalement rappeler que des considérations exhaustives relatives aux planches d'essais réalisées dans le cadre du projet PLANET sont proposées dans le rapport RS-6 [30].

3 Données de base et essais de caractérisation

Remarque: Les travaux menés dans la RS-3 sont également liés aux travaux réalisés sur les planches d'essais et décrits dans le rapport RS-6. A des fins de compréhension, certains résultats sont repris dans le présent rapport.

3.1 Choix des technologies d'enrobés tièdes

Comme mentionné précédemment, de nombreux produits existent pour un même procédé de fabrication d'enrobés tièdes. Dans le cadre du projet PLANET, il a été choisi de se focaliser sur les procédés (*i.e.* le mode de fonctionnement pour la fabrication des enrobés tièdes), les produits évoluant selon la situation du marché ainsi que la R&D dans le domaine. Pour chaque famille (procédé), le choix des produits a été effectué en prenant notamment en compte le potentiel de développement de la technique, l'expérience acquise (tonnages produits), les gains énergétiques et environnementaux, les informations relatives au comportement mécanique ainsi que la "volonté" de collaboration des fournisseurs.

Sur le principe, il a été choisi de considérer les techniques suivantes dans le cadre du projet PLANET:

- Fil rouge (FR): Procédés de base, testés dans l'ensemble des recherches spécifiques (RS) du paquet de recherches. Les procédés du fil rouge constituent donc une référence commune à l'ensemble du projet.
- Procédés additionnels (PA): Procédés supplémentaires, testés uniquement dans le cadre de certaines recherches spécifiques où des analyses approfondies sur les mélanges bitumineux sont réalisées.

La formulation étant très largement dépendante du type de procédé (et de produit) appliqué, c'est pourquoi, dans cette recherche spécifique, différents procédés additionnels seront également pris en considération. Les procédés et produits finalement testés dans le cadre de la RS-3 sont consignés dans le Tab. 1 qui contient également la typologie et nomenclature retenue. Le code relatif à chaque procédé sera utilisé dans le cadre de cette recherche, sans mention explicite du nom des produits testés.

Tab. 1 Liste des procédés et produits RS-3

Fil rouge (FR)	Famille (procédé)	Détails
FR-PACK	Enrobé tiède – basé sur chimie (package chimique)	Agent tensio-actif
FR-ZEO	Enrobé tiède – Introduction d'eau (zéolithe)	Zéolithe synthétique
FR-WAX	Enrobé tiède – Basé sur chimie (cire)	Cire Fischer-Tropsch
Procédés additionnels		
PA-HWAM	Semi-tiède – maîtrise de la teneur en eau	Utilisation humidité "naturelle" du sable
PA-PACK	Tiède – Basé sur chimie (package chimique)	Lubrifiant et dope d'adhésivité pour enrobés
Mélange de référence		
REF-HOT	Chaud – Enrobé couche de liaison AC B	-

Nous pouvons ajouter les détails suivants relatifs aux différents produits pour la fabrication d'enrobé tiède utilisés dans le cadre du projet PLANET. Pour de plus amples détails, on pourra recommander de consulter [28, 29] :

- FR-PACK: Additif liquide à température ambiante, à base de polymères et produit par une société leader dans le domaine des émulsions cationiques. Le produit, dosé à

0.4%/bit est un agent tensio-actif dont le principe consiste à modifier la tension superficielle à l'interface entre les granulats et le liant. L'additif agit donc comme un lubrifiant à la friction entre les granulats et non pas par un effet massique rendant ainsi la quantité nécessaire très faible. Différentes variantes existent, parmi lesquelles des variantes "bio".

- **FR-ZEO:** Ce produit consiste à ajouter de la zéolithe synthétique (plus stable que sa forme naturelle), à un dosage de 0.25% de la masse d'enrobé. La zéolithe contient entre 18 et 21% d'eau au sein de sa structure cristalline, eau qui sera libérée lorsque la température dépasse 100 °C soit en contact avec le liant chaud.
- **FR-WAX:** Cire synthétique de type Fischer-Tropsch largement reconnue et utilisée depuis de nombreuses années. Son dosage est de 3% par rapport à la masse de bitume. La cire peut être livrée sous forme de sacs thermo fusibles, des liants directement modifiés pouvant également être achetés.
- **PA-HWAM:** Procédé semi-tièdes dont le principe de base consiste à utiliser l'humidité contenue dans les fractions de sable. Ce procédé ne nécessite donc pas d'injection d'eau dans le bitume, mais mobilise l'humidité de certaines fractions granulaires. Différentes déclinaisons du procédé existent, la variante appliquée dans le cadre de ce projet consistant à sécher une première partie des granulats à la température "habituelle" de 150 C, 30% du sable étant quant à lui introduit humide et froid avant réalisation du malaxage. Lors de la fabrication de l'enrobé PA-HWAM, un additif (fluxant végétal) est ajouté à un dosage de 0.3% de la masse de bitume.
- **PA-PACK:** Additif d'origine végétale et biodégradable dénommé comme "lubrifiant et adhésif pour liant bitumineux" pouvant être utilisé pour la fabrication des enrobés tièdes (dosage 1%/bit), avec également un rôle de dope d'adhésivité. Selon les fiches techniques fournisseurs, les spécificités mentionnent notamment des caractéristiques polyvalentes relatives à l'adhésivité, capacité réjuvenante et agent tensio-actif.

Le procédé FR-WATER était initialement également prévu pour les essais relatifs à la formulation des enrobés tièdes de la présente RS-3. Ce procédé consiste à effectuer un moussage du bitume par l'utilisation de deux bitumes soit un mou (250/330 et un liant plus dur (35/50 ou 70/100 selon les cas) qui sera alors moussé par l'injection d'une quantité spécifique d'eau. Cependant, faute de générateur de mousse permettant de reproduire de manière satisfaisante les résultats en laboratoire, des essais étendus avec ce procédé n'ont pas pu être réalisés. Afin de compenser cela, des analyses de sensibilité additionnelles (effet pétrographie, mesures de maniabilité, etc) ont été menées.

Nous pouvons relever que les procédés FR-PACK, FR-ZEO, REF-HOT et FR-WATER ont fait l'objet d'essais étendu dans le cas des planches d'essais discutées dans la recherche RS-6 [30].

3.2 Recettes de référence

La recette de référence utilisée dans le cadre du projet PLANET est celle issue des planches d'essais sont un enrobé AC B 16 S dont la formulation a été fournie par le poste d'enrobage. La courbe granulométrique de référence est représentée dans la figure 4, avec également les valeurs limites normatives selon SN 640 431-1-NA [1]. Nous pouvons observer que la teneur cible en filler est de 8% et que la courbe est positionnée en milieu de fuseau ce qui est globalement cohérent et consistant avec la bonne pratique au niveau de la formulation des enrobés. Cette même courbe granulométrique cible est utilisée pour l'ensemble des enrobés du projet de recherche.

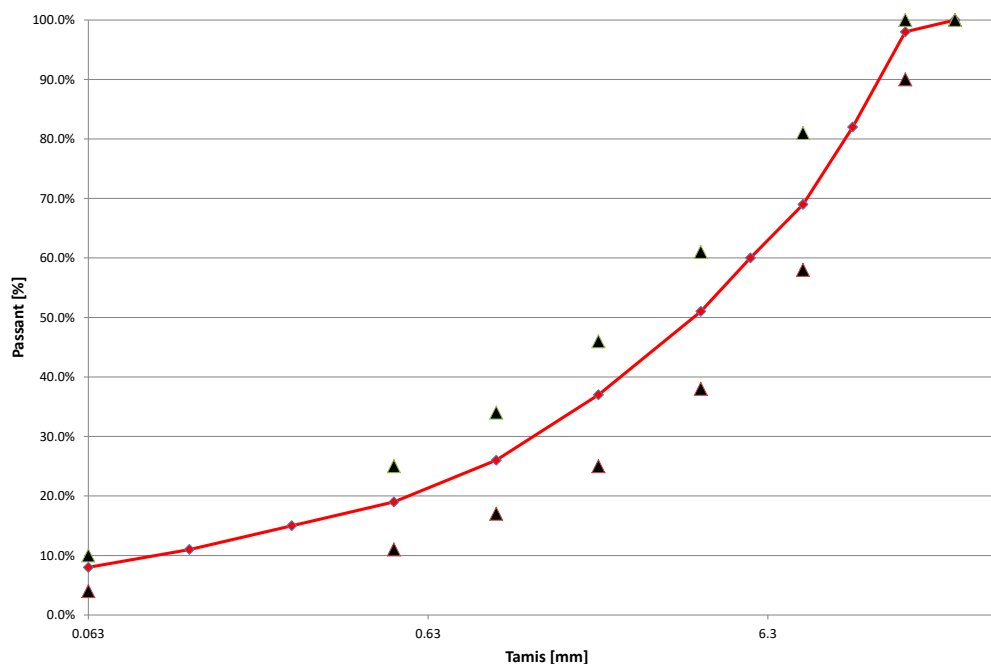
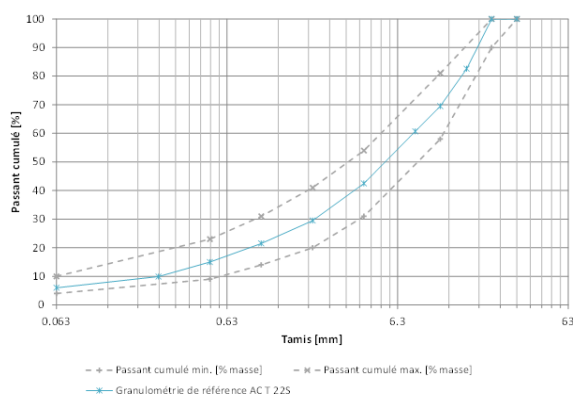


Fig. 4 Courbe granulométrique de référence AC B 16S (Source: Poste enrobage projet PLANET, 29.10.2012)

Nous pouvons ajouter les éléments suivants relatifs à la recette AC B 16 S:

- Liant: 50/70
- Teneur en liant cible : 4.60%/Enrobé
- Module de richesse: 2.9
- Vides Marshall Vm: 4%

Comme il le sera détaillé plus loin, certains résultats relatifs aux enrobés FR-WAX, FR-PACK et PA-HWAM sont issus des travaux menés dans le cadre de la thèse N. Bueche (Evaluation des performances et des impacts des enrobés bitumineux tièdes) [29] dans laquelle un enrobé de type AC T 22S a été considéré. La courbe granulométrique de base est indiquée dans la figure 5, la teneur en liant sur granulat étant de 4.60% et le module de richesse de 2.92.



Tamis [mm]	Passant cumulé [% masse]
22.4	100.00
16.0	82.60
11.2	69.50
8.0	60.70
4.0	42.50
2.0	29.50
1.0	21.50
0.5	15.00
0.063	6.00

Fig. 5 Courbe granulométrique de référence AC T 22S [29]

3.3 Matériaux de référence

Nous discutons ci-dessous les différents résultats d'essais sur matériaux de référence soit granulats filler et bitume; les matériaux de référence provenant de la centrale

d'enrobage Weibel à Oberwangen qui a notamment produit les enrobés des planches d'essais.

Une campagne de prélèvement des différents matériaux au poste d'enrobage a été réalisée lors de la construction des planches d'essais, ces matériaux étant ensuite acheminés aux différents partenaires du projet afin de posséder une base commune.

3.3.1 Essais sur granulats

Sauf mention contraire, les mêmes granulats ont été utilisés dans l'ensemble de la recherche, soit les granulats également utilisés par la centrale d'enrobage ayant produit les enrobés des planches d'essais.

Les analyses granulométriques ont été réalisées sur les fractions granulaires 0-4, 4-8, 8-11 et 11-16 du granulat de Weibel. Les résultats sont donnés au Tab. 2 et correspondent à la moyenne de 2 analyses pour les fractions granulaires 4-8, 8-11 et 11-16, et la moyenne de 3 analyses pour la fraction granulaire 0-4.

Tab. 2 Analyses granulométriques

Passant cumulé [% masse]				
Tamis [mm]	Sable 0-4	Granulat 4-8	Granulat 8-11	Granulat 11-16
22.4	-	-	-	100.0
16	-	-	100.0	94.6
11.2	-	100.0	91.4	27.6
8	-	94.5	7.3	-
5.6	100.0	47.2	-	1.1
4	95.9	8.6	0.4	-
2	65.1	1.3	-	-
1	44.6	-	-	-
0.5	31.8	-	-	-
0.25	22.3	-	-	-
0.063	11.3	0.7	0.3	0.5

3.3.2 Essais sur filler

Sauf mention contraire, le même filler a été utilisé dans l'ensemble de la recherche, soit le filler également utilisé par la centrale d'enrobage ayant produit les enrobés des planches d'essais.

Le filler de base est un filler prélevé chez Weibel et sur lequel ont été réalisés les essais de caractérisation suivants :

- Analyse granulométrique par tamisage dans un jet d'air
- Masse volumique réelle
- Porosité du filler sec compacté (vides selon Rigden)
- Détermination de l'action rigidifiante du filler (Essai bille-anneau sur mélange filler-bitume)

Les résultats obtenus sont donnés dans Tab. 3 et Tab. 4. Les valeurs données correspondent à la moyenne de 2 échantillons pour la détermination de l'action rigidifiante du filler et 3 échantillons pour le reste des essais.

Tab. 3 Analyse granulométrique du filler**Analyse granulométrique par tamisage dans un jet d'air**

Normes / SN EN 670 901-1a [6] EN 932-1 [13], SN EN 670 901-2a [7] EN 932-2 [14],
 Modes opératoires : SN EN 670 902-10a [9] EN 933-10 [16], SN EN 670 902-2a [8] EN 933-2 [15]

Tamis [mm]	Passant cumulé [%]
2	100.0
0.125	81.8
0.063	54.7

Tab. 4 Autres caractéristiques du filler

Paramètre	Valeur	Norme / Mode opératoire
Masse volumique réelle [Mg/m³]	2.670	SN EN 670 903-7a [11] EN 1097-7 [19]
Porosité du filler sec compacté (vides selon Rigden) [%]	30	SN EN 670 903-4a [10] EN 1097-4 [17], EN 1097-6 [18], Méthode G-13 du LAVOC
Action rigidifiante du filler - Delta R&B [°C]	13.1	SN EN 670 906-1 [12], EN 13179-1 [26]

3.3.3 Essais sur bitume brut

Les bitumes utilisés dans le cadre de la recherche sont ceux prélevés lors de la livraison au poste d'enrobage des bitumes nécessaires à la fabrication des enrobés pour les planches d'essais.

Le bitume de base est un 50/70 dont les caractéristiques, données dans le Tab. 5, démontrent sa conformité par rapport aux exigences.

Tab. 5 Caractéristiques du liant 50/70 de base

Procédé	REF-HOT
Liant	50/70
Additif	Non
Dosage additif [%]	-
Pen @ 25°C [10-1]	55.0
Temp. A&B [°C]	51.9
IP [-]	-0.5
Visc. 60°C [10-1 Pa·s]	2662
Visc. 90°C [10-1 Pa·s]	115
Visc. 110°C [10-1 Pa·s]	24
Visc. 130°C [10-1 Pa·s]	6.4
Visc. 150°C [10-1 Pa·s]	2.5

3.4 Procédure de réchauffage en laboratoire

Comme expliqué en introduction, les enrobés tièdes diffèrent des enrobés à chaud par leurs différentes températures (production, pose, compactage) ainsi que la viscosité à ces températures. Ainsi, la procédure de réchauffage en laboratoire des enrobés tièdes doit être clairement définie, ceci afin de garantir que les échantillons compactés correspondent bien à la réalité *in situ* soit aux échantillons récupérés en sortie de poste d'enrobage. Le réchauffage des enrobés tièdes en laboratoire ne peut en effet être réalisé à la même température que pour les mélanges traditionnels à chaud. De plus, cette température de réchauffage peut varier selon les procédés tièdes considérés (ex: cire, ajout d'eau, additif chimique, etc).

Des essais ayant été réalisés sur les enrobés prélevés lors des fabrications en centrale en vue de la construction des planches d'essais, une étude préliminaire relative à la procédure de réchauffage a donc été menée; les résultats étant partagés avec l'ensemble des partenaires du paquet de recherches afin de garantir un mode de fonctionnement identique au sein des différents laboratoires. La procédure mise en place est issue des recommandations d'un guide technique allemand [32] ainsi que de l'expérience acquise par le LAVOC dans le domaine du réchauffage et conditionnement en laboratoire des enrobés bitumineux [33].

Selon les normes en vigueur pour les enrobés à chaud, les éprouvettes Marshall se compactent à 155°C et les éprouvettes PCG se compactent à 150°C. Ces températures se doivent d'être adaptées dans le cas d'enrobés tièdes produits à des températures plus faibles. L'approche inspirée par [32] consiste à effectuer le compactage des échantillons à différentes températures, pour ensuite sélectionner la température permettant de limiter le vieillissement additionnel lors du réchauffage (caractéristiques du liant) et permettant d'atteindre une compacité en adéquation avec celles du mélange de référence à chaud. En d'autres termes, l'enrobé réchauffé en laboratoire doit proposer des caractéristiques (liant) proches de celles de l'enrobé prélevé en sortie de poste d'enrobage et une compacité/teneur en vides comparable à la référence à chaud.

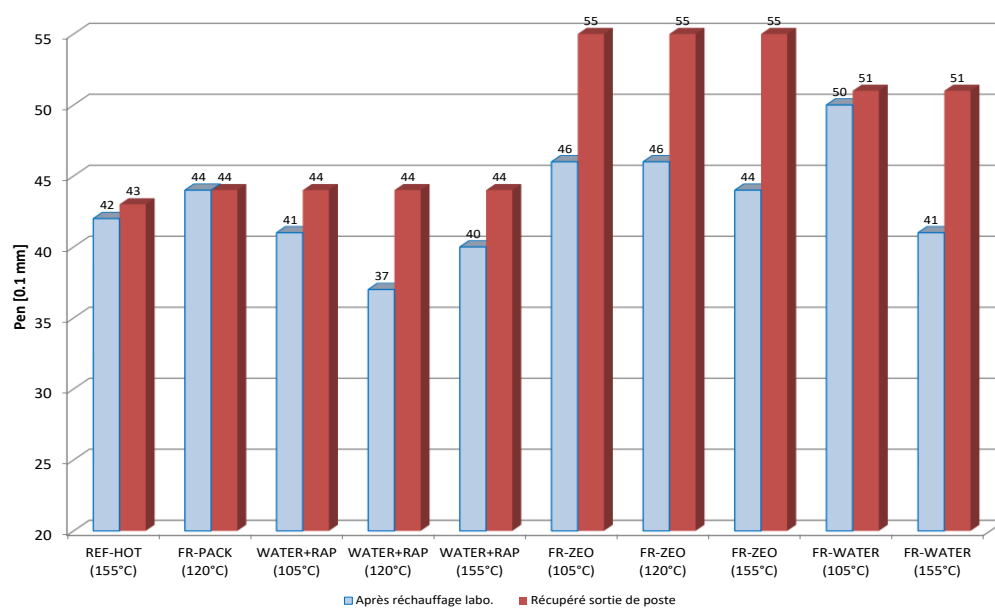
L'analyse a été effectuée pour les cas consignés dans le Tab. 6 pour lequel nous pouvons ajouter:

- L'analyse de la méthode de réchauffage a été menée pour les enrobés des planches d'essais prélevés lors de la fabrication au poste d'enrobage. Les enseignements pourront cependant être également utilisés pour le réchauffage d'enrobés préalablement fabriqués en laboratoire.
- Pour chaque enrobé réchauffé en laboratoire selon le tableau ci-dessous, une mesure a également été effectuée sur l'enrobé récupéré en sortie de poste d'enrobage, valeur considérée comme cible (i.e. pas de vieillissement additionnel lors du réchauffage en laboratoire).
- Bien que pas étudié davantage dans la présente RS-3, les résultats obtenus pour les mélanges FR-WATER (moussage du bitume, deux liants) ainsi que WATER +RAP (procédé additionnel, non prévu initialement dans le cadre du projet mais ajouté lors de la construction des planches d'essais) sont également présentés.
- Une étude comparable a été menée dans le cadre de [29] pour les enrobés FR-PACK, FR-WAX et PA-HWAM, permettant ainsi de récolter les données nécessaires et limiter le nombre d'essais additionnels à réaliser.

Tab. 6 Cas étudiés pour étude de réchauffage

Procédé	Températures	Essais et mesures
REF-HOT	155 °C	Analyse liant, compactage Marshall, PCG
FR-PACK	120 °C	Analyse liant, compactage Marshall, PCG
WATER+RAP	105 °C	Analyse liant, compactage Marshall, PCG
	120 °C	Analyse liant, compactage Marshall, PCG
	155 °C	Analyse liant, compactage Marshall, PCG
FR-ZEO	105 °C	Analyse liant, compactage Marshall, PCG
	120 °C	Analyse liant, compactage Marshall, PCG
	155 °C	Analyse liant, compactage Marshall, PCG
FR-WATER	105 C	Analyse liant, compactage Marshall, PCG
	155 °C	Analyse liant, compactage Marshall, PCG

Une synthèse des résultats est présentée ci-dessous pour l'analyse du liant récupéré; les valeurs cibles (*i.e.* récupération en sortie de poste d'enrobage) étant indiquées en rouge.

**Fig. 6** Analyse de réchauffage des enrobés: Pénétration du liant récupéré

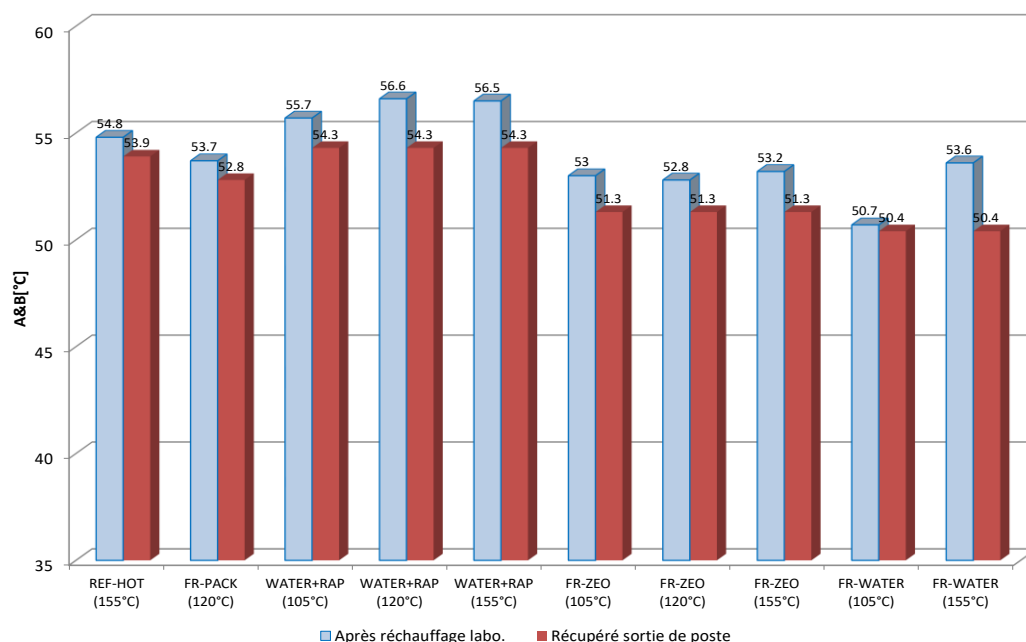


Fig. 7 Analyse de réchauffage des enrobés: Température Anneau & Bille du liant récupéré

Les résultats de l'analyse relative au compactage Marshall sont consignés dans le Tab. 7, une représentation graphique des résultats étant proposée dans la figure 8 (mesure hydrostatique des vides). Nous pouvons par ailleurs relever les éléments suivants:

- Un impact important de la température de réchauffage sur la teneur en vides peut être observé, ceci tout particulièrement pour les enrobés tièdes ne contenant pas de fraisat d'enrobé.
- Une température de réchauffage identique à celle généralement appliquée pour les enrobés à chaud n'est visiblement pas indiquée pour les technologies tièdes, ces conditions de compactage conduisant à un mélange trop compact ne correspondant plus à la réalité mesurée in-situ.

Tab. 7 Analyse réchauffage des enrobés: compactage Marshall 50/50

	Vides [%]		MVA [Mg/m³]	
	Mesure	ΔREF	Mesure	ΔREF
REF-HOT (155°C)	4.7	-	2.387	-
FR-PACK (120 °C)	4.8	0.1	2.385	-0.002
WATER+RAP (105 °C)	4.7	0.0	2.388	0.001
WATER+RAP (120 °C)	4.8	0.1	2.384	-0.003
WATER+RAP (155 °C)	3.9	-0.8	2.407	0.020
FR-ZEO (105°C)	5.5	0.8	2.366	-0.021
FR-ZEO (120°C)	4.5	-0.2	2.393	0.006
FR-ZEO (155°C)	3.6	-1.1	2.416	0.029
FR-WATER (105°C)	4.7	0.0	2.388	0.001
FR-WATER (155°C)	4.4	-0.3	2.396	0.009

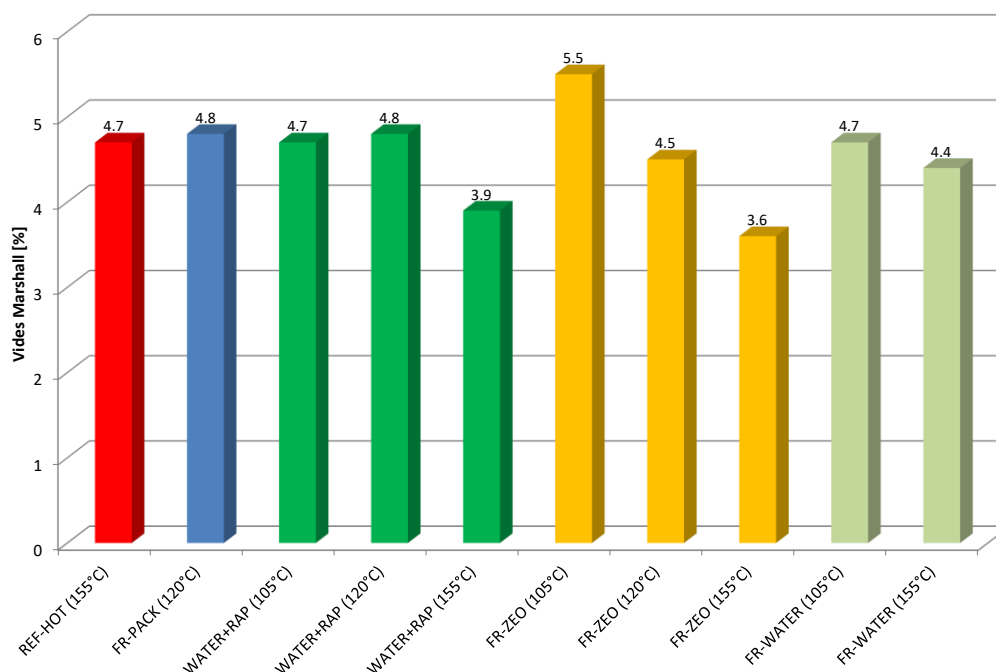


Fig. 8 Analyse de réchauffage des enrobés: Teneur en vides Marshall

Comme mentionné précédemment, une analyse sur la base de la compactibilité PCG a également été menée, l'objectif étant d'obtenir une gamme de vides comparable à celle de l'enrobé de référence à chaud. Les différents résultats obtenus sont disponibles dans le Tab. 8 ainsi que dans la figure 9. Nous pouvons observer:

- De manière analogue au compactage Marshall, les essais PCG mettent en évidence l'impact clair des conditions de compactage sur la teneur en vides (degré de compactage) des échantillons testés.
- Pour l'analyse de la corrélation avec les valeurs *in situ*, il est couramment admis (méthode française de formulation notamment) que 10 girations correspondent à environ 10 mm d'épaisseur de chaussée. Ainsi, les valeurs obtenues entre 60 et 70 girations sont particulièrement intéressantes dans le cas de l'enrobé AC B d'épaisseur 65 mm *in situ* comme utilisé pour les planches d'essais PLANET.
- A 60 girations, les enrobés tièdes présentent un degré de compactage globalement plus élevé que l'enrobé de référence à chaud. Cela indique une mise en place *a priori* satisfaisante sur chantier, mais il faut cependant prêter attention à ce que la teneur en vides ne soit pas trop faible.
- La valeur à 1 giration C1 (valeur calculée) est un indicateur du potentiel de mise en place immédiate de l'enrobé (maniabilité).

Tab. 8 Analyse réchauffage des enrobés: Compactibilité PCG

	C1 [%]	C60 [%]	C200 [%]	Pente reg.	C60ΔREF [%]
REF-HOT (155°C)	80.2	94.8	97.4	3.45	-
FR-PACK (120 °C)	83.7	95.9	97.0	2.79	1.1
WATER+RAP (105 °C)	80.9	95.0	97.4	3.32	0.2
WATER+RAP (120 °C)	81.3	95.1	97.4	3.24	0.3
WATER+RAP (155 °C)	83.6	96.2	97.5	2.89	1.4
FR-ZEO (105°C)	81.9	95.0	96.6	3.02	0.2
FR-ZEO (120°C)	83.1	95.5	97.0	2.87	0.7
FR-ZEO (155°C)	86.0	96.0	96.7	2.27	1.2
FR-WATER (105°C)	82.9	95.3	96.9	2.87	0.5
FR-WATER (155°C)	84.4	96.2	97.5	2.72	1.4

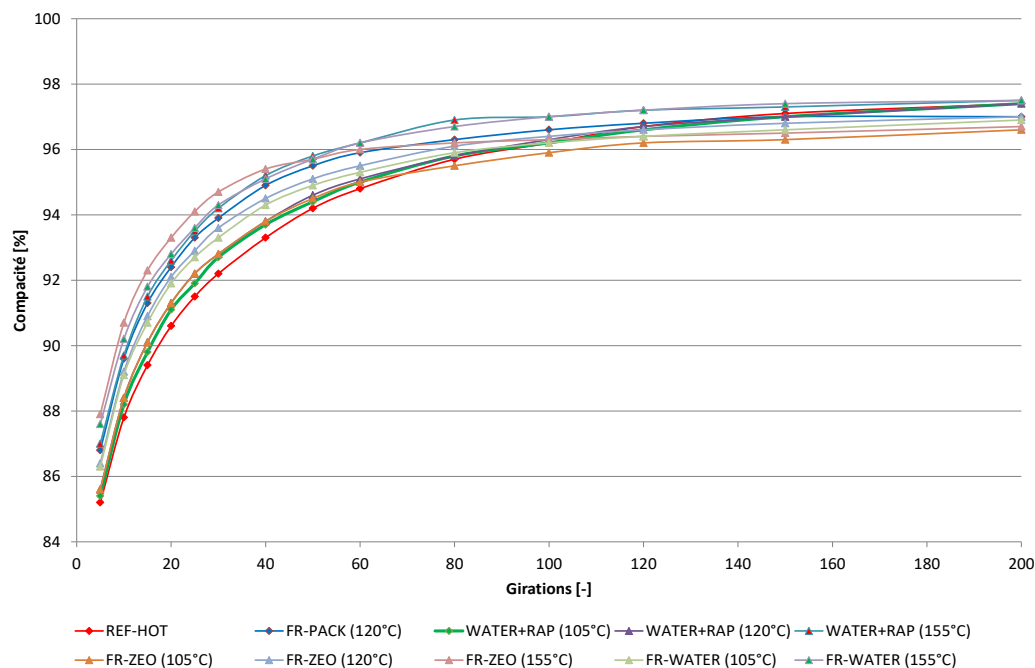


Fig. 9 Analyse de réchauffage des enrobés: Compacité PCG

Sur la base des différentes mesures, nous pouvons observer:

- Enrobé FR-PACK: La température de réchauffage de 120 °C est cohérente et le liant récupéré après réchauffage en laboratoire correspond bien au liant analysé en sortie de poste d'enrobage. La teneur en vides Marshall est également comparable à celle de la référence à chaud.
- Enrobé WATER+RAP: Le liant après réchauffe en laboratoire présente un vieillissement légèrement moins important que celui récupéré en sortie de poste d'enrobage. Selon les teneurs en vides Marshall et caractéristiques du liant, la température de réchauffage adaptée semble être de 105 °C.
- Enrobé FR-ZEO: Là-aussi, les caractéristiques du liant après réchauffage en laboratoire sont légèrement différentes de celles de l'enrobé récupéré en sortie de poste d'enrobage. Cela peut-être lié au mécanisme d'action de la zéolithe. L'analyse des résultats de compactage Marshall semble cependant indiquer que la température optimale de réchauffage est de 120 °C.
- Enrobé FR-WATER: Les différents résultats indiquent clairement que la température optimale de réchauffage est de 105°C.

Au-delà de la température de réchauffage, les différents essais ont permis de recommander la méthode suivante pour la procédure de réchauffage, son application permettant de limiter le vieillissement des matériaux:

- Préchauffage des enrobés en étuve à 120 °C, pour une durée de 20 min.
- Réchauffage par cartons de 10 kg environ dans un micro-onde de puissance 1'500 W.
- Séquence de réchauffage par pas de 2 min. environ. Selon le type d'enrobé, la durée nécessaire au réchauffage varie entre 10 min (température de 105 °C) et 22 min (température de 155 °C).
- Une fois la température cible atteinte, stabilisation des enrobés 50 min en étuve, avant confection des échantillons.

Nous pouvons finalement observer que les différents enseignements issus de cette première analyse contribuent à la meilleure compréhension du comportement et maîtrise de la viscosité des enrobés tièdes qui sera détaillée plus avant dans le rapport.

3.5 Procédure de fabrication en laboratoire

Comme expliqué précédemment, une partie des essais a été réalisée sur des enrobés prélevés au poste d'enrobage ce qui a nécessité la mise en place d'une procédure harmonisée de réchauffage des enrobés. Cette méthodologie, également appliquée pour les enrobés fabriqués en laboratoire, a été discutée au chapitre 3.4.

Cependant, des fabrications d'enrobés tièdes ont également été réalisées en laboratoire. Les conditions pour la fabrication en laboratoire ont ainsi été définies de manière détaillée ceci afin de garantir une homogénéité dans les procédures de laboratoire.

La figure 10 contient une synthèse des températures utilisées pour la fabrication en laboratoire des enrobés utilisés dans la RS-3 (Guedu pour gâchée max. environ 40 kg, hélice verticale).

Nous pouvons relever, que conformément à la procédure appliquée au poste d'enrobage un dope d'adhésivité (Bithaftin, Hydrior), sous forme solide, dosé à 0.1%/bitume est systématiquement ajouté (enrobé AC B 16S).

Procédé	Dosage additifs	Température sortie malaxeur (centrale)	Température sortie malaxeur (laboratoire)	Température de réglage malaxeur laboratoire	Température de compactage en laboratoire (PCG/Marshall)
REF-HOT	-	165 °C	160 °C	165 °C	150°C / 135°C
FR-PACK	0.4% / bitume	130 °C	120 °C	125 °C	120 °C
FR-ZEO	0.25% / enrobé	130 °C	120 °C	125 °C	120 °C
FR-WAX	3% / bitume	-	120 °C	125 °C	120 °C
PA-HWAM	0.4% / bitume	-	100 °C	105 °C	100 °C
PA-PACK	1% / bitume	-	120 °C	125 °C	120 °C

Fig. 10 Synthèse des températures pour les fabrications en laboratoire

Les différentes températures de conditionnement sont finalement consignées dans la figure 11. Nous pouvons ajouter que les différents protocoles de fabrication en laboratoire ont été soumis pour validation aux fournisseurs des produits concernés.

Données générales						
Code	REF-HOT	FR-PACK	FR-ZEO	FR-WAX	PA-HWAM	PA-PACK
Formule	AC B 16S	AC B 16S	AC B 16S	AC B 16S	AC B 16S	AC B 16S
Dosage additif	-	0.4% bitume	0.25% / enrobé	3% / bitume	0.3% / bitume	1% / bitume
Conditions de fabrication et conditionnement						
Température granulats	160 °C	130 °C	130 °C	130 °C	150 °C	130 °C
Température sable	160 °C	130 °C	130 °C	130 °C	150 °C *	130 °C
Température filler	160 °C	130 °C	130 °C	130 °C	150 °C	130 °C
Température bitume	155 °C	130 °C	130 °C	130 °C	150 °C	130 °C
Temp. malaxeur	165 °C	125 °C	125 °C	125 °C	105 °C	125 °C
Temp. cible sortie malax.	160 °C	120 °C	120 °C	120 °C	100 °C	120 °C
Confection des échantillons						
Durée conditionnement	50 mn	50 mn	50 mn	50 mn	50 mn	50 mn
Temp. fabr. PCG	150 °C	120 °C	120 °C	120 °C	105 °C	120 °C
Temp.fabr. Marshall	150 °C	120 °C	120 °C	120 °C	105 °C	120 °C

Fig. 11 Définition des différentes températures de conditionnement pour les fabrications en laboratoire

Lors de chaque gâchée en laboratoire, un protocole exhaustif de fabrication et suivi a été réalisé, ceci afin de garantir une bonne traçabilité des travaux menés.

4 Essais sur la recette de référence

Les résultats présentés dans le présent chapitre 1 correspondent à l'analyse des enrobés appliqués sur les planches d'essais, à l'exception du chapitre 4.7 qui fournit quelques informations complémentaires pour l'enrobé de référence AC T 22S présenté au chapitre 3.2. Nous proposons ici une synthèse, ceci car les résultats obtenus sur les planches d'essais constituent une première référence qui sera par la suite comparée avec les résultats obtenus sur les fabrications en laboratoire. Pour des résultats plus détaillés relatifs aux planches d'essais, on pourra recommander le rapport [30].

Les résultats présentés ci-dessous concernent les enrobés suivants, fabriqués en centrale d'enrobage: REF-HOT, FR-PACK, FR-ZEO, FR-WATER et WATER+RAP. Il est utile de rappeler que les procédés FR-WATER et WATER+RAP ne seront pas davantage considérés dans la suite du rapport (procédés par moussage du bitume non fabriqué en laboratoire).

4.1 Analyse des enrobés

La courbe granulométrique des différents enrobés fabriqués au poste d'enrobage (recette de référence AC B 16S) est représentée dans la figure 12. La courbe granulométrique cible est globalement bien maîtrisée, même si l'on peut observer quelques variations dans le point de filler (0.063 micros) qui oscille entre 6.8% (REF-HOT) et 11.6% (FR-WATER).

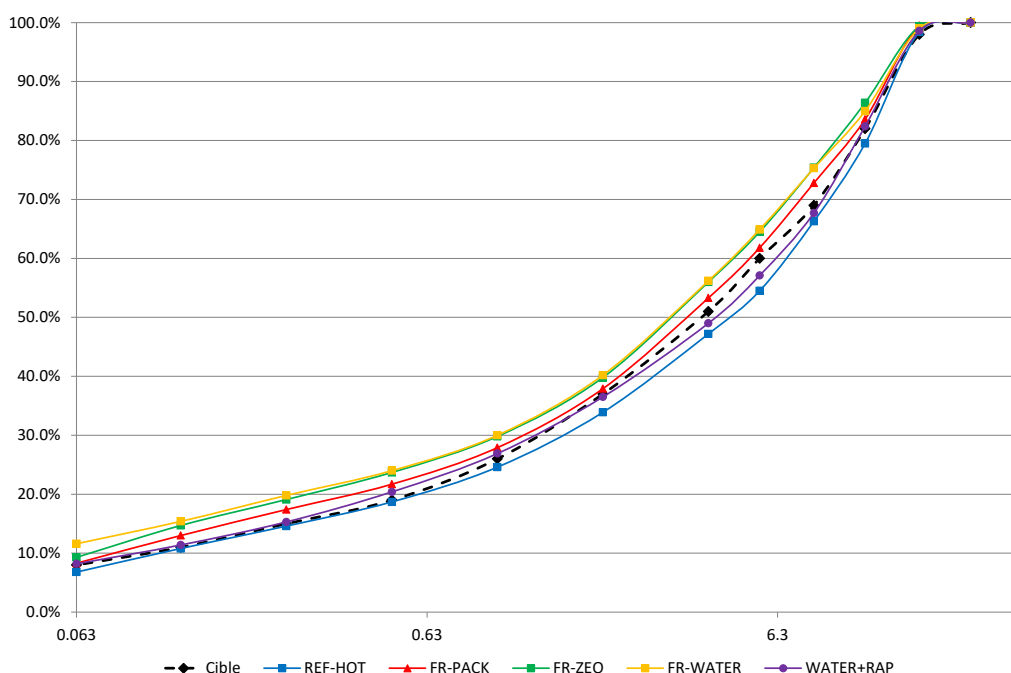


Fig. 12 Enrobés des planches d'essais AC B 16S, fabrication centrale: Courbe granulométrique

Les résultats détaillés de l'analyse des enrobés des planches d'essais sont présentés dans le Tab. 9 pour lequel nous pouvons observer:

- Dans le cas d'enrobés impliquant un moussage du bitume par l'ajout d'eau (FR-ZEO) ou maîtrise de la teneur en eau (PA-HWAM), une teneur en eau finale du mélange peut conduire à une rapide dégradation des propriétés mécaniques et de la durabilité du mélange. Pour cette raison, la teneur en eau des enrobés avec moussage du bitume ainsi que de l'enrobé avec ajout de zéolithe a été mesurée. Selon l'expérience acquise dans [29], l'humidité mesurée dans le cas présent peut être considérée comme négligeable et aucune incidence spécifique sur le comportement mécanique

n'est attendue. En effet, on estimera généralement que l'humidité de l'enrobé devient critique lorsqu'elle atteint environ 0.8%.

- Une certaine variabilité dans les mesures de teneur en liant sur enrobés tièdes a été observée. Après analyse des différentes valeurs et procédures appliquées, les valeurs jugées représentatives sont indiquées en italique.
- Les variations de module de richesse sont inhérentes aux variations de la courbe granulométrique et de teneur en liant comparativement à la valeur cible.
- Le vieillissement du liant avec additif chimique FR-PACK est globalement comparable à celui du liant de l'enrobé à chaud de référence, ce qui avait également été observée dans les travaux [29].
- Les liants récupérés des enrobés FR-ZEO et FR-WATER présentent un vieillissement suite à la pose sensiblement plus faible que pour le cas de l'enrobé de référence (*i.e.* augmentation de la pénétration et diminution de la température Anneau & Bille). Ceci pouvait être attendu compte tenu de la température de production et compactage qui est plus faible pour ces enrobés.
- Les faibles valeurs de l'indice de pénétrabilité indiquent un liant peu sensible aux variations de températures.
- Le cas de l'enrobé avec ajout de fraisat d'enrobé est différent (WATER+RAP). Par l'ajout de RAP (*i.e.* liant "dur") le liant final récupéré est donc également plus dur et correspond à celui de l'enrobé de référence à chaud. Cela montre notamment la cohérence de la recette utilisée au poste d'enrobage. La valeur d'indice IP plus élevée, corollaire d'un liant davantage vieilli, traduit également une susceptibilité aux cycles de température qui sera potentiellement plus élevée.
- L'analyse du comportement à basse température (Fraass) indique que les enrobés tièdes ont globalement une température Fraass plus basse que le liant de récupéré de l'enrobé à chaud. Cela pouvait être attendu compte tenu de la différence de vieillissement entre ces familles d'enrobés (chaud et tiède).

Tab. 9 Enrobés des planches d'essais AC B 16S, fabrication centrale: Analyse des enrobés

	REF-HOT	FR-PACK	FR-ZEO	FR-WATER	WATER+RAP
Teneur en eau [%]	-	-	0.09	0.13	0.14
Teneur en liant/E [%]					
Moyenne	4.50	5.02	5.05	5.00	4.65
Mesure 1	-	4.89	4.83	4.44	4.50
Mesure 2	-	5.15	5.06	5.69	4.81
Mesure 3	-	-	5.26	4.86	4.65
Cible ETF	4.60	4.60	4.60	4.60	4.60
Module de richesse	2.90	3.05	3.12	2.27	1.68
Cible ETF	2.90	2.90	2.90	2.90	2.90
Rapport f/b	1.44	1.62	2.06	2.27	1.68
Liant récupéré					
Pen @ 25°C [10-1]	39	36	45	41	39
Temp A&B [°C]	55.7	54.7	52.7	52.6	55.9
IP [-]	-0.5	-0.8	-0.8	-1.0	-0.4
Fraass [°C]	-7	-9	-10	-10	-12

4.2 Sensibilité à l'eau

Les résultats de sensibilité à l'eau sont présentés dans la figure 13 dans laquelle la valeur du ratio ITSR est également indiquée (barre noire).

Des différences significatives peuvent être observées entre les différents enrobés testés. L'enrobé à chaud (REF-HOT) semble le moins sensible à l'humidité ceci car les valeurs de contraintes à la rupture sont les plus élevées ainsi que le ratio ITSR satisfaisant (89%). Les enrobés FR-PACK, FR-ZEO sont globalement comparables, les contraintes de

rupture étant tout de même sensiblement plus faibles que celles mesurées dans le cas de l'enrobé à chaud. Les enrobés avec eau (FR-WATER, WATER+RAP) semblent finalement être les plus sensibles à l'humidité.

Pour rappel, la normalisation Suisse demande un ratio ITSR > 70% pour les enrobés AC B. Ainsi, à l'exception du mélange FR-WATER qui semble le cas présent clairement insuffisant, les différents enrobés testés respectent cette exigence. L'importante variabilité liée à l'essai ITSR doit également être prise en compte lors de la comparaison des différents mélanges; la normalisation EN 12697-12 [21] estimant la répétabilité à environ 15%.

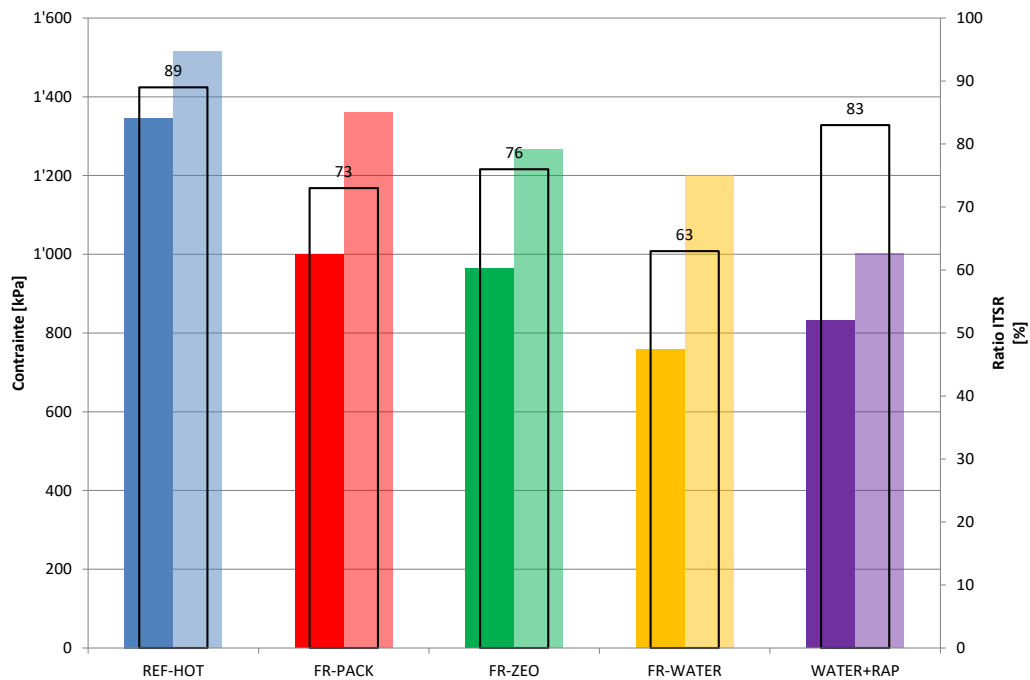


Fig. 13 Enrobés des planches d'essais AC B 16S, fabrication centrale: Essai ITSR de sensibilité à l'eau

4.3 Résistance aux déformations permanentes

Les résultats de l'essai d'orniérage (orniéreur LPC) sont représentés dans la figure 14; l'essai étant réalisé à la température de 60 °C conformément à la normalisation suisse.

Nous pouvons observer que l'enrobé de référence présente une résistance sensiblement plus élevée que les différentes variantes tièdes testées. Les enrobés tièdes FR-PACK, FR-WATER et FR-ZEO (surtout) sont en effet sensiblement moins résistants aux déformations permanentes que la variante de référence à chaud. Pour le cas de l'enrobé WATER+RAP, il semble que l'ajout de RAP permette de sensiblement améliorer le comportement à l'orniérage des enrobés tièdes. La combinaison de fraisat d'enrobé et d'enrobé tiède peut présenter un potentiel intéressant permettant ainsi d'augmenter la teneur en RAP comparativement à un enrobé à chaud classique.

La valeur limite normative selon SN 640-431-1 NA [1] est de 10% d'ornière à 10'000 cycles. Seul l'enrobé FR-ZEO ne respecte pas ce critère, mais nous pouvons tout de même souligner que les enrobés FR-WATER et FR-PACK présentent un comportement potentiellement critique.

Compte tenu d'une formulation identique (liant notamment) pour les différents enrobés des planches d'essais, ces tendances pouvaient légitimement être attendues sur la base des caractéristiques des liants récupérés préalablement discutées.

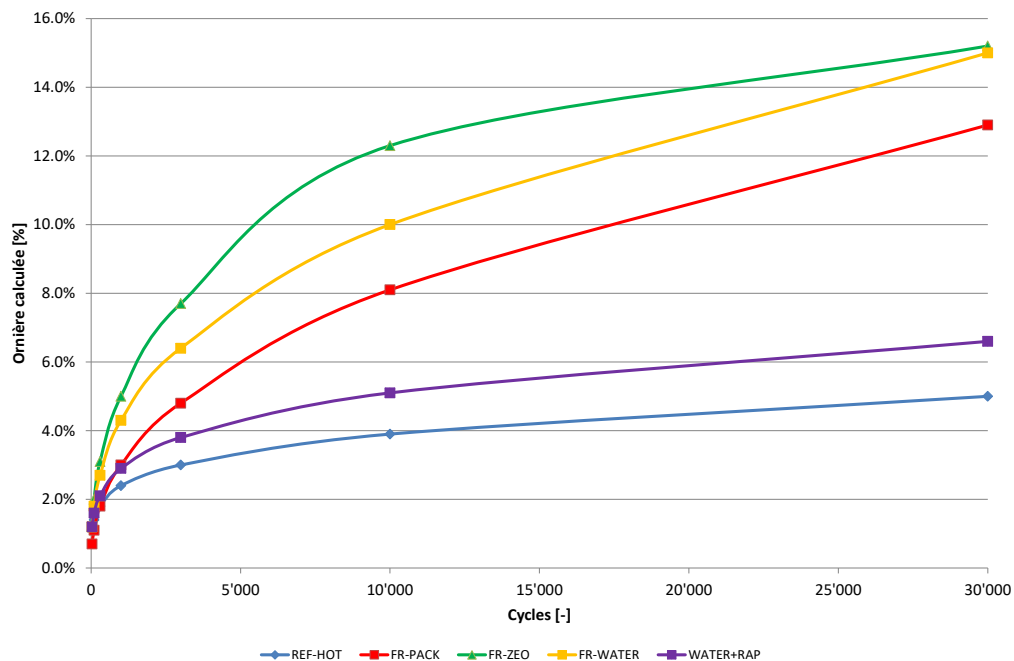


Fig. 14 Enrobés des planches d'essais AC B 16S, fabrication centrale: Essai d'orniérage

4.4 Rigidité

Les résultats des essais de rigidité (module complexe E*) sur les enrobés des planches d'essais sont présentés dans le Tab. 10 et la figure 15.

Tab. 10 Enrobés des planches d'essais AC B 16S, fabrication centrale: Valeurs caractéristiques module complexe (2PB-TR)

	REF-HOT	FR-PACK	FR-ZEO	FR-WATER	WATER+RAP
Vides moyens géom.	3.8%	5.9%	3.7%	5.5%	5.4%
15°C, 10 Hz					
E* [MPa]	10'208	10'358	9'615	9'009	9'622
Phi [°]	18.5	14.6	18.1	13.5	16.7
10 °C, 25 Hz					
E* [MPa]	14'673	14'092	13'934	12'089	13'896
Phi [°]	11.3	9.2	11.1	8.3	10.7

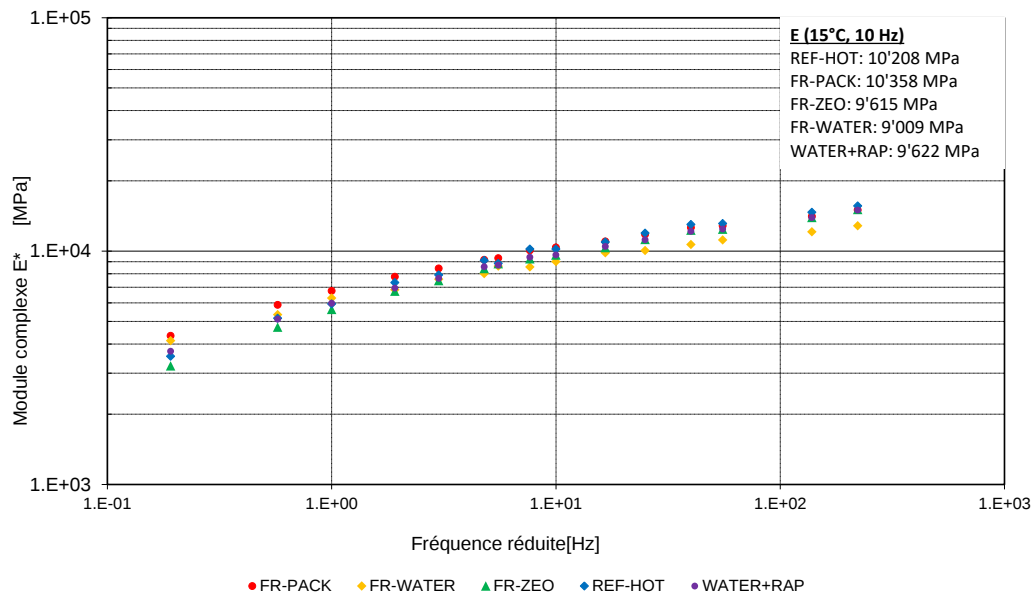


Fig. 15 Enrobés des planches d'essais AC B 16S, fabrication centrale: Essai de rigidité 2PB-TR (courbe maîtresse des modules complexes)

Les résultats ci-dessus indiquent que l'enrobé à chaud REF-HOT et l'enrobé tiède avec additif chimique FR-PACK présentent des valeurs de module complexe comparables, légèrement plus élevées que celles des trois autres enrobés tièdes testés. Ce résultat est en adéquation avec d'autres expériences utilisant cet agent tensio-actif.

Les enrobés tièdes avec ajout de zéolithe (FR-ZEO) et avec moussage du bitume et fraisat d'enrobé (WATER+RAP) ont une rigidité comparable, mais légèrement inférieure au module complexe mesuré pour la référence. La différence reste cependant relativement modeste (environ 7%). L'enrobé avec moussage du bitume FR-WATER est celui qui présente le module complexe le plus faible (environ 13% de moins que la référence à chaud). Ces différentes tendances sont en adéquation avec les observations relatives au vieillissement des liants effectuées précédemment.

L'analyse des angles de phase (décalage dans le temps entre contrainte et déformation) ne met pas en évidence de différence majeure entre les enrobés. Nous pouvons cependant relever que les enrobés REF-HOT et FR-ZEO présentent un angle de phase légèrement supérieur aux autres mélanges ce qui traduit une composante visqueuse plus importante des mélanges.

La normalisation SN actuelle ne contient pas d'exigences relatives au module complexe (à l'exception des EME). Sur la base de l'expérience française, nous pourrions assimiler l'enrobé AC B 16S à un enrobé de type GB2 (grave bitume 2) pour lequel la valeur de dimensionnement généralement considérée est de $E=9'300$ MPa à 15 °C et 10 Hz. Nous pouvons donc considérer les valeurs de module complexe mesurées comme satisfaisantes et réalistes.

4.5 Résistance à la fatigue

Les essais de fatigue (essai 2PB-TR selon EN 12697-25 [24]) sur les enrobés des planches d'essais ont été réalisés sur des éprouvettes découpées dans des plaques prélevées dans la chaussée. Les essais sont menés à une température de 10 °C et fréquence de 25 Hz. Une synthèse des résultats est proposée dans le Tab. 11 où les valeurs de ε_6 (déformation correspondant à la rupture après un million de cycles) et de b (pente de la courbe de Wöhler) sont renseignées.

Nous pouvons observer que les enrobés tièdes FR-PACK, FR-ZEO et FR-WATER possèdent des caractéristiques en fatigue globalement comparables. Nous pouvons

également observer que l'enrobé avec ajout de fraisat d'enrobé (WATER+RAP) est le plus performant à la fatigue. L'ajout de matériaux recyclés dans un enrobé tiède semble donc bénéfique par rapport à son comportement en fatigue.

L'enrobé de référence REF-HOT est le moins performant des mélanges pour ce qui est du comportement à la fatigue. Compte tenu de la différence de teneur en vides avec les enrobés FR-PACK, FR-WATER et WATER+RAP cette différence doit cependant être considérée avec précautions. Relevons tout de même que l'enrobé FR-ZEO dont les vides sont comparables à ceux de la référence à chaud, semble légèrement plus performant en fatigue (6.4% sur ϵ_6)

Les enrobés avec moussage du bitume (FR-WATER et WATER+RAP) présentent une pente plus faible de la courbe de Wöhler ce qui indique que l'augmentation de durée de vie théorique avec la diminution du niveau de déformation est plus importante que pour les autres mélanges testés.

La normalisation suisse ne contient pas d'exigences relatives au comportement en fatigue des enrobés AC B; les seules exigences selon SN 640 431-1-NA [1] concernant les enrobés AC EME C1 (résistant à l'orniérage) et C2 (résistant à la fatigue) et elles sont respectivement de $\epsilon_6 \geq 100 \mu\text{m/m}$ et $\epsilon_6 \geq 130 \mu\text{m/m}$. Par analogie avec la méthode française de dimensionnement, on pourra supposer qu'une valeur cible de $\epsilon_6 = 80 \mu\text{m/m}$ (=GB2 française) est réaliste pour un enrobé AC B. Les différents matériaux testés sont donc largement conformes à ce qui pourrait être légitimement attendu.

Tab. 11 Enrobés des planches d'essais AC B 16S, fabrication centrale: Essais de fatigue (2PB-TR)

	REF-HOT	FR-PACK	FR-ZEO	FR-WATER	WATER+RAP
Vides moyens géom.	3.8%	5.9%	3.7%	5.5%	5.4%
ϵ_6 [10 ⁻⁶]	93	99	99	98	118
Pente -b [-]	-0.201	-0.211	-0.212	-0.168	-0.172

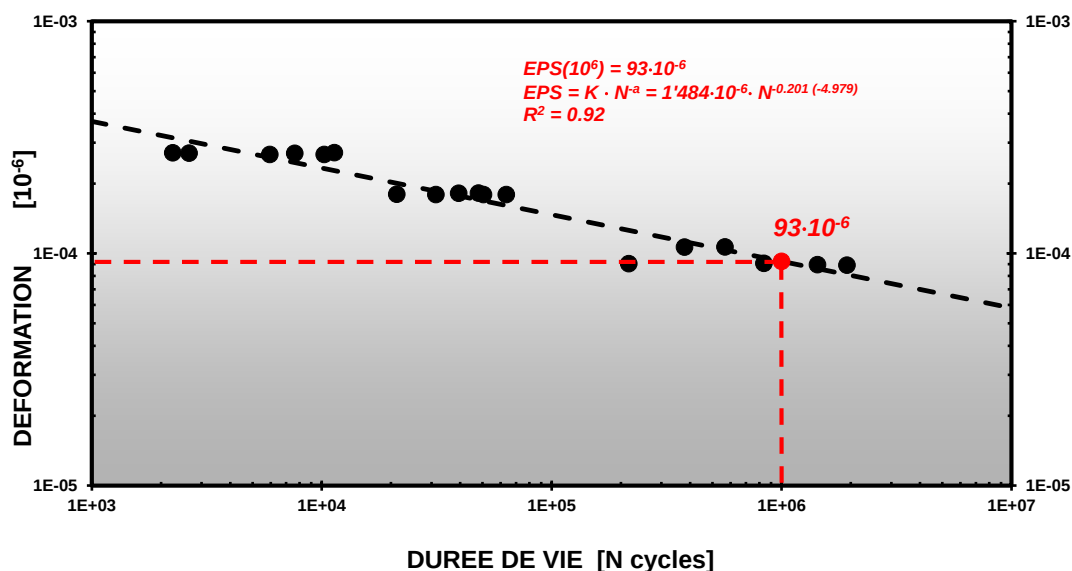


Fig. 16 Enrobés des planches d'essais AC B 16S, fabrication centrale: Essai de fatigue (2PB-TR) sur enrobé REF-HOT

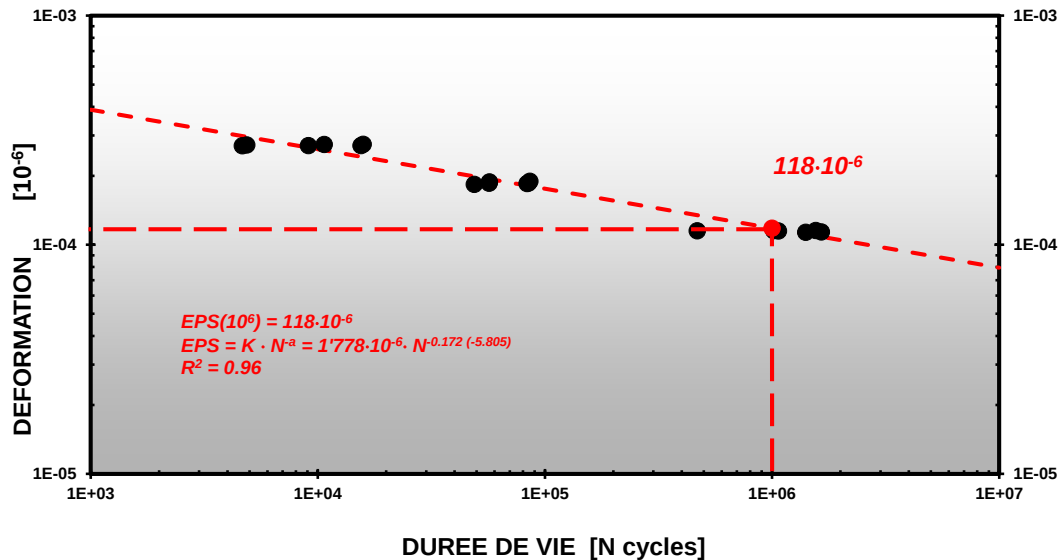


Fig. 17 Enrobés des planches d'essais AC B 16S, fabrication centrale: Essai de fatigue (2PB-TR) sur enrobé WATER+RAP

4.6 Résistance mécanique (compression diamétrale)

La résistance mécanique des enrobés a finalement été évaluée par la réalisation d'essais de compression diamétrale. Selon la normalisation (EN 12697-23 [22]), cet essai est traditionnellement réalisé à une température située entre 5 °C et 25 °C. Cependant, afin d'évaluer le comportement des enrobés aux températures de service potentiellement critiques, l'essai est effectué à -10 °C et 40 °C ainsi qu'à la température de référence de 15 °C. Ce choix de températures est basé sur les valeurs extrêmes couramment attendues dans une couche de liaison. La méthode appliquée pour la réalisation de l'essai est celle proposée par le LAVOC dans [34]. Selon cette recherche, la vitesse de chargement est adaptée en fonction de la température d'essai soit 18 mm/min à -10 °C et 48 mm/min à 15 °C et 40 °C. Le chargement plateau (sans barre de chargement) est également préféré car il permet vraisemblablement de diminuer la dispersion des résultats.

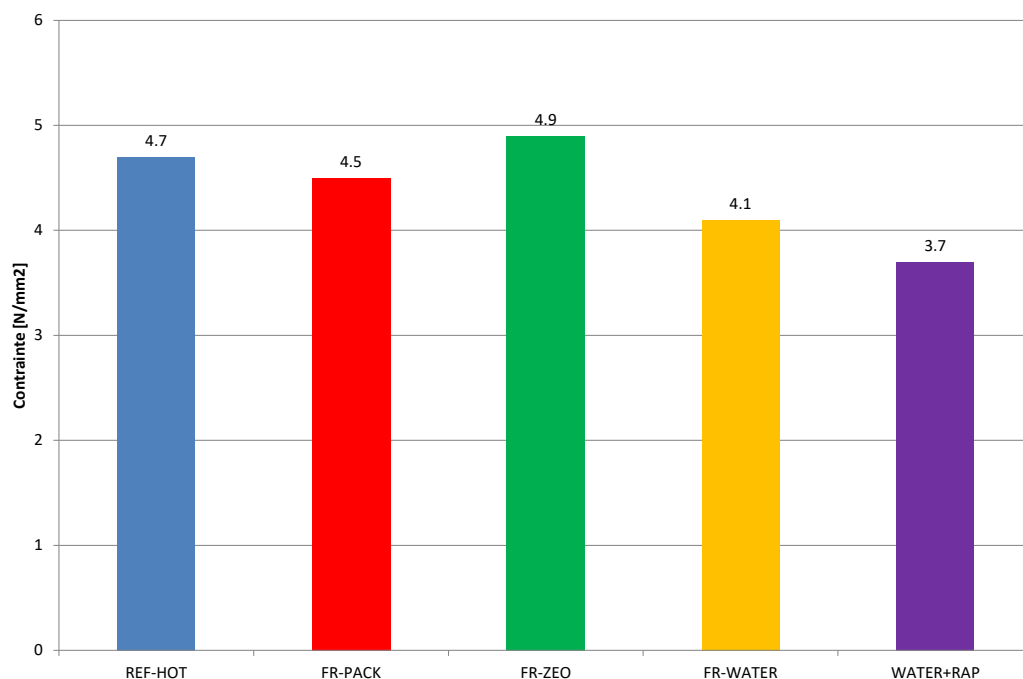
Une synthèse des résultats est présentée dans les tableaux et figures ci-dessous en fonction de la température d'essai où chaque résultat indiqué correspond à la moyenne de 4 échantillons testés.

Les granulats et la recette étant tous identiques, les différences de comportement observées entre les enrobés sont donc principalement liées aux caractéristiques des liants ainsi qu'aux échantillons testés (teneur en vides).

De manière générale, les échantillons pour l'enrobé de référence ont une teneur en vides légèrement plus basse que celle des enrobés tièdes testés. Parmi les enrobés tièdes, les enrobés FR-PACK et FR-ZEO ont une teneur en vides plus basse (compacité plus élevée) que les enrobés avec moussage du bitume (FR-WATER). La différence de près de 3% de vides entre l'enrobé de référence et l'enrobé WATER+RAP peut engendrer des différences au niveau de la résistance mécanique des enrobés, élément à prendre en compte lors de l'analyse.

Tab. 12 Enrobés des planches d'essais AC B 16S, fabrication centrale: Essais de compression diamétrale

T=40°C	REF-HOT	FR-PACK	FR-ZEO	FR-WATER	WATER+RAP
Teneur en vides HM					
Moyenne [%]	3.2	4.4	4.0	5.4	6.1
Min [%]	3.0	4.0	3.8	4.9	5.8
Max [%]	3.3	4.7	4.2	6.2	6.2
Contrainte à rupture					
Moyenne [N/mm ²]	0.45	0.32	0.38	0.39	0.37
Min [N/mm ²]	0.42	0.28	0.36	0.36	0.36
Max [N/mm ²]	0.47	0.34	0.41	0.40	0.39
15 °C					
Teneur en vides HM					
Moyenne [%]	3.2	4.7	4.0	5.4	5.9
Min [%]	3.0	4.4	3.6	4.7	5.4
Max [%]	3.5	4.9	4.2	6.1	6.5
Contrainte à rupture					
Moyenne [N/mm ²]	2.62	2.42	2.41	2.33	1.87
Min [N/mm ²]	2.22	2.21	2.32	2.17	1.76
Max [N/mm ²]	3.30	2.52	2.53	2.43	1.95
-10 °C					
Teneur en vides HM					
Moyenne [%]	3.1	4.7	4.1	5.3	6.0
Min [%]	2.7	4.0	3.5	5.1	5.8
Max [%]	3.5	5.2	4.5	5.6	6.2
Contrainte à rupture					
Moyenne [N/mm ²]	4.7	4.5	4.9	4.1	3.7
Min [N/mm ²]	4.5	4.2	4.3	3.5	3.5
Max [N/mm ²]	5.0	4.9	5.7	4.4	3.8

**Fig. 18** Enrobés des planches d'essais AC B 16S, fabrication centrale: Essai de compression diamétrale à -10 °C

A basse température (-10 °C), l'enrobé tiède WATER+RAP semble sensiblement moins performant que les autres mélanges testés. Cela pouvait être suspecté car il est généralement admis qu'une teneur élevée en fraisat d'enrobé peut avoir pour conséquence une diminution des performances à basse température des enrobés comparativement à un mélange ne contenant pas de RAP. Les enrobés FR-PACK et FR-ZEO semblent par contre globalement comparables à la référence à chaud dans ce domaine de températures.

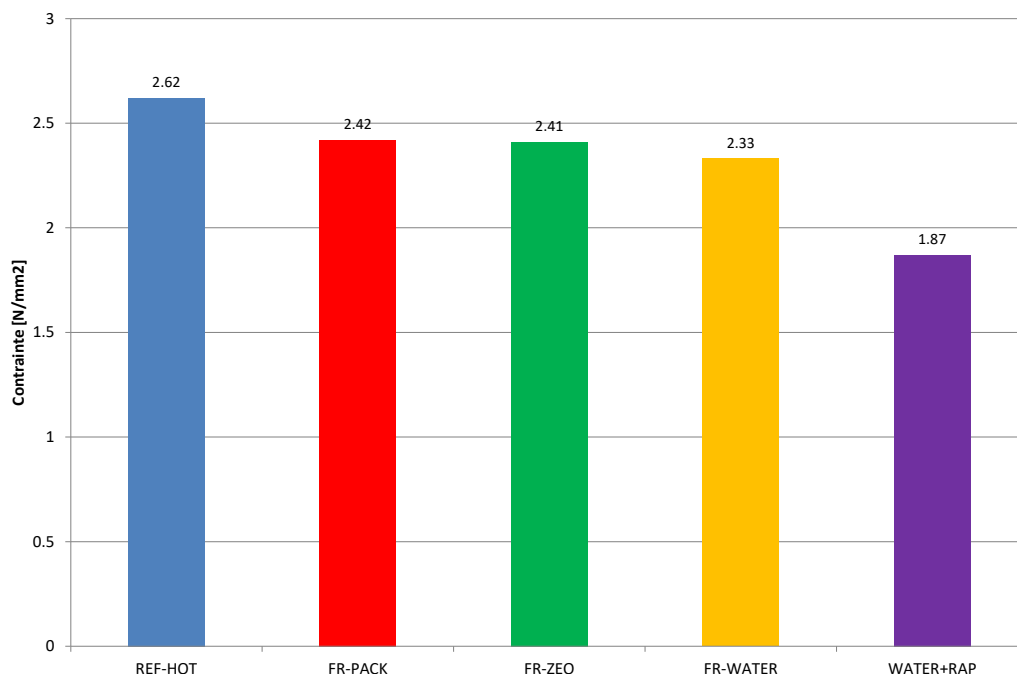


Fig. 19 Enrobés des planches d'essais AC B 16S, fabrication centrale: Essai de compression diamétrale à 15°C

Dans le domaine des températures intermédiaires (15°C), la différence entre l'enrobé à chaud de référence et les enrobés tièdes est moins significative que pour les hautes températures (voir plus loin). Là aussi, l'enrobé de référence à chaud présente la contrainte à la rupture la plus élevée. Les différents enrobés tièdes sont globalement comparables, à l'exception de l'enrobé avec ajout de fraisat d'enrobé qui semble moins performant que les autres mélanges tièdes.

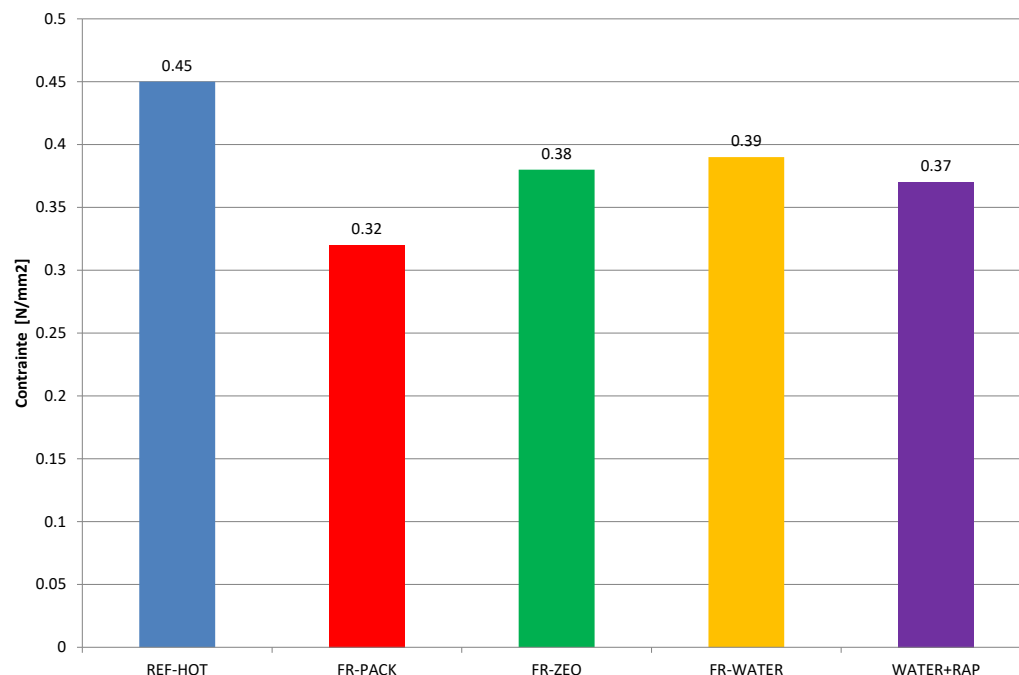


Fig. 20 Enrobés des planches d'essais AC B 16S, fabrication centrale: Essai de compression diamétrale à 40 °C

Dans le domaine des températures élevées (40 °C), l'enrobé de référence à chaud est globalement davantage performant que les mélanges tièdes, sa contrainte à la rupture étant plus élevée. Les enrobés FR-ZEO, FR-WATER et WATER+RAP sont quant à eux comparables, le mélange FR-PACK semblant être le moins performant dans le domaine des températures élevées. Considérant les caractéristiques du bitume récupéré, des performances plus élevées pour le mélange FR-PACK auraient pu être attendues. Cependant, considérant l'ordre de grandeur des contraintes mesurées, il faut garder à l'esprit que ces différences sont tout de même relativement faibles.

Commentaire

Il est finalement utile de rappeler ici que l'ensemble des enrobés des planches d'essais ont été réalisés avec une formulation identique (courbe granulométrique et teneur en liant). Cela explique notamment certaines différences observées dans le comportement mécanique des différents enrobés des planches d'essais. Sur cette base, il semble pertinent de supposer qu'un potentiel d'optimisation de la formulation existe au niveau des enrobés tièdes, l'optimum n'étant pas nécessairement identique à celui des enrobés à chaud. Ces aspects seront étudiés dans la suite du présent rapport.

4.7 Essais complémentaires sur AC T 22S

Comme discuté précédemment, des essais complémentaires ont été réalisés sur l'enrobé de référence AC T 22S dont les caractéristiques principales sont données au chapitre 3.2.

Nous proposons ci-dessous les résultats d'essai Marshall et de fatigue réalisés sur les enrobés REF-HOT, FR-WAX, FR-PACK et PA-HWAM.

L'essai Marshall (figure 21) indique des valeurs comparables de stabilité (60 °C) pour les enrobés REF-HOT ($S_m=8.7$ kN) et FR-WAX ($S_m=8.8$ kN), la stabilité de l'enrobé FR-PACK étant légèrement moins élevée ($S_m=8.3$ kN) et celle de l'enrobé PA-HWAM 26% inférieure ($S_m=6.4$ kN) à celle de l'enrobé de référence à chaud. De manière logique, l'enrobé avec cire présente le fluage Marshall le plus faible ($F=2.4$ mm); le fluage le plus élevé étant pour l'enrobé tiède PA-HWAM ($F=4.4$ mm) qui est 83% plus élevé que celui

de l'enrobé FR-WAX et 47% supérieur à la référence à chaud. Compte tenu des valeurs d'écart-type en répétabilité (0.61 kN sur la stabilité et 0.25 mm pour le fluage selon EN 12697-24 [23]), les différences relevées entre l'enrobé PA-HWAM et les autres mélanges peuvent être jugées comme significatives. Cette différence est notamment liée au vieillissement plus faible du liant dans le cas de l'enrobé PA-HWAM.

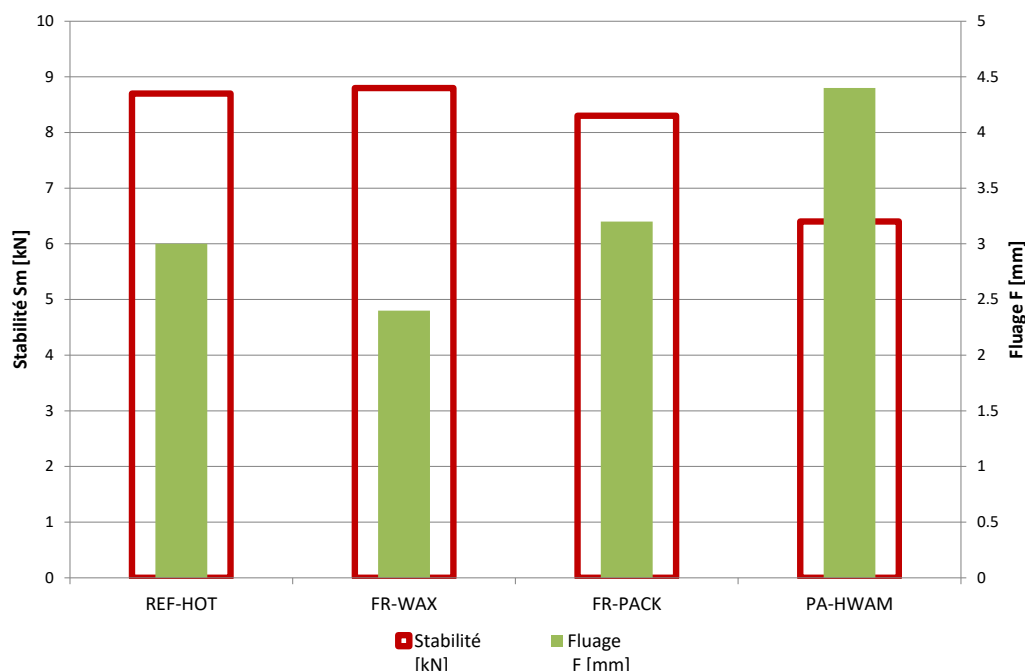


Fig. 21 Enrobé de référence AC T 22S: Essai Marshall

Le comportement en fatigue des enrobés est évalué sur éprouvettes trapézoïdales (essai 2PB-TR), sur un matériau dont les performances sont stables soit des éprouvettes sciées 12 semaines après la fabrication des enrobés. Dans cet essai dit réduit, 6 éprouvettes par type d'enrobé ont été testées, afin de déterminer la déformation ϵ_6 [$\mu\text{m}/\text{m}$] correspondant à rupture après un million de cycles. Les résultats sont présentés dans le Tab. 13 ainsi que dans la figure 22 et la figure 23 pour les deux valeurs extrêmes obtenues.

Les normes ne contiennent pas d'exigences pour les enrobés AC T. Les exigences suisses (SN 640 431-1-NA [1]) pour les enrobés AC EME C1 (résistant à l'orniérage) et C2 (résistance à la fatigue) sont respectivement de $\epsilon_6 \geq 100 \mu\text{m}/\text{m}$ et $\epsilon_6 \geq 130 \mu\text{m}/\text{m}$. Les exigences françaises pour la grave bitume (GB), moins riche en liant que l'AC T 22S, sont de $80 \mu\text{m}/\text{m}$. Une valeur cible de $\epsilon_6 \geq 100 \mu\text{m}/\text{m}$ semble donc réalisée dans le cas présent, sur la base notamment de l'expérience acquise en laboratoire avec ce type de matériau.

Tab. 13 Enrobé de référence AC T 22S: Essais de fatigue (2PB-TR) à 10 °C et 25 Hz

	REF-HOT	FR-WAX	FR-PACK	PA-HWAM
Vides moyens géom.	6.2	6.1	5.4	5.6
ϵ_6 [10 ⁻⁶]	120±5	117±5	111±1	108±2

Le domaine de teneurs en vides des différents matériaux correspond à une même gamme de comportement. Les matériaux présentent tous des performances en fatigue satisfaisantes. Nous pouvons différencier globalement deux types de comportements. La référence présente la meilleure résistance à la fatigue. L'enrobé FR-WAX obtient une déformation à un million de cycles comparable à la référence, la différence n'étant pas significative. Le comportement de l'enrobé FR-PACK et de l'enrobé PA-HWAM est par contre légèrement moins bon que les deux autres enrobés testés.

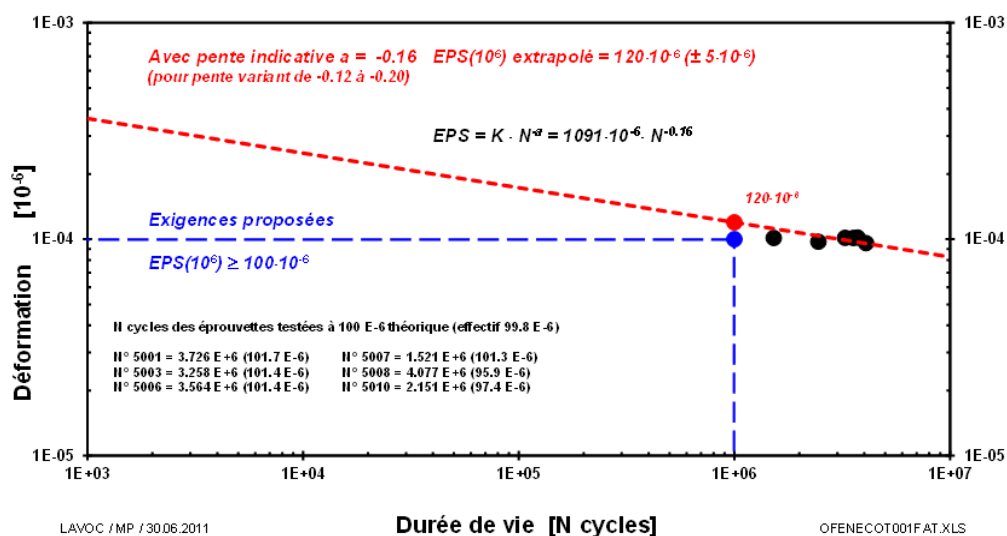


Fig. 22 Enrobé de référence AC T 22S: Essai de fatigue sur enrobé REF-HOT

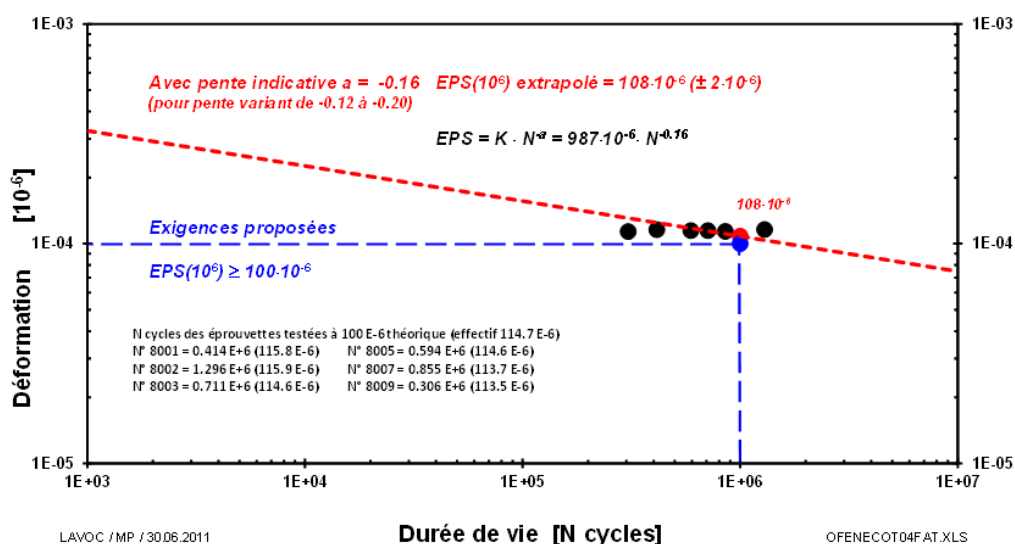


Fig. 23 Enrobé de référence AC T 22S: Essai de fatigue sur enrobé PA-HWAM

5 Maîtrise de la viscosité

Remarque:

Une partie des données présentées dans la suite de ce rapport sont issues des travaux de thèse de Nicolas Bueche, thèse EPFL N° 5169 "Evaluation des performances et des impacts des enrobés bitumineux tièdes". Pour des informations davantage détaillées, on pourra suggérer le rapport de thèse, téléchargeable gratuitement sur le site <http://library.epfl.ch/theses>.

Comme décrit en introduction, le principe de base des enrobés tièdes consiste à abaisser la température de production, pose et compactage, ceci afin de diminuer la consommation d'énergie et (si possible) les émissions. Corollaire de cet abaissement de la température, des méthodes permettant d'abaisser la viscosité de l'enrobé pour la pose et le compactage doivent être mises en œuvre. Par contre, cette baisse de viscosité doit être limitée aux températures de service afin de garantir de bonnes performances à l'orniérage notamment. Ainsi, la maîtrise de la viscosité est un élément déterminant des enrobés tièdes. Dans le présent chapitre, une analyse de la viscosité des enrobés tièdes est proposée par la réalisation d'essais à différentes échelles:

- Liant (chapitre 5.1).
- Mastic soit le mélange du bitume et du filler (chapitre 5.2).
- Enrobé (chapitre 5.3).

5.1 Essais sur liants

5.1.1 Essais de caractérisation et viscosité dynamique

Dans un premier temps, une analyse des liants FR-PACK, PA-HWAM et FR-WAX est proposée. Pour cela, le bitume de base 50/70 a été modifié avec différents teneurs en additif chimique (FR-PACK), fluxant végétal (PA-HWAM) ou cire (FR-WAX). Les résultats sont proposés dans le Tab. 14.

Tab. 14 Maîtrise de la viscosité: Essais étendus sur liants

	REF-HOT	FR-PACK	PA-HWAM	FR-WAX	FR-WAX	FR-WAX
Liant	50/70	50/70	50/70	50/70	50/70	50/70
Additif	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Dosage add.	-	0.4%/b	0.4%/b	2%	3%	4%
Pen @ 25°C [10-1]	55	57	62	40	36.5	38
Temp. A&B [°C]	51.9	51.2	52	74.1	79.2	80.1
IP [-]	-0.5	-0.6	-0.2	2.9	3.3	3.6
Visc. 60°C [10-1 Pa·s]	2662	2509	2202	2756	2560	3021
Visc. 90°C [10-1 Pa·s]	115	106	99.2	102	83.2	92.8
Visc. 110°C [10-1 Pa·s]	24	21.2	20.8	19.6	16.8	16
Visc. 130°C [10-1 Pa·s]	6.4	6.4	6	5.8	5	4.8
Visc. 150°C [10-1 Pa·s]	2.5	2.4	2.4	2.3	2	2

Nous pouvons effectuer les commentaires suivants:

- Par rapport au liant de base, la pénétration n'est pas modifiée significativement par l'ajout d'additif chimique (FR-PACK) alors que le fluxant végétal utilisé dans l'enrobé PA-HWAM augmente légèrement la pénétration. L'effet de la cire (3%) est clairement identifiable avec une diminution de la pénétration à 25 °C de $18.5 \cdot 10^{-1}$ mm (33% par rapport à la référence).

- La température anneau et bille est sensiblement affectée par l'ajout de cire (3%), sa valeur augmentant de plus de 52% par rapport au liant de base. Par contre, l'ajout de fluxant ou d'additif chimique ne semble pas affecter la température anneau et bille.
- L'analyse de l'indice de pénétration met également en évidence l'effet de la cire, comparativement au fluxant et à l'agent tensio-actif. En effet, l'indice IP des liants FR-WAX est largement positif ce qui dénote une diminution de la sensibilité aux températures comparativement aux indices IP légèrement négatifs qui traduisent une susceptibilité aux températures plus élevée.
- Les essais avec différents dosages en cire indiquent clairement un optimum au-delà duquel l'ajout de cire n'aura que peu d'effet. Ainsi, un dosage de 3% de cire comme choisi dans ce projet semble cohérent.

Des analyses ont également été réalisées sur le bitume de base modifié avec l'ajout de divers additifs correspondant aux différents procédés mis en œuvre. Les caractéristiques de ces liants sont données dans le Tab. 15 où nous pouvons relever que les valeurs indiquées dans le tableau ci-dessous peuvent légèrement différer de celles proposées précédemment dans le Tab. 14, ceci car certains essais ont été répétés.

Tab. 15 *Caractéristiques des liants avec additifs*

Procédé	REF-HOT	FR-PACK	FR-ZEO	FR-WAX	PA-HWAM	PA-PACK
Liant de base	50/70	50/70	50/70	50/70	50/70	50/70
Additif	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Dosage additif [%]	-	0.4	0.25*	3.0	0.3	1.0
Pen @ 25°C [10-1]	55	55	53	37	56	60
Temp. A&B [°C]	51.2	51.7	52.1	76.4	51.2	50.5
Point Fraass [°C]	-13	-17	-12	-8	-14	-14
IP [-]	-0.7	-0.6	-0.6	3.0	-0.6	-0.6
Visc. 60°C [10-1 Pa·s]	3'072	3'021	3'328	3'226	2'970	2'560
Visc. 90°C [10-1 Pa·s]	134	141	147	128	128	122
Visc. 110°C [10-1 Pa·s]	25.6	24.8	28.8	18.4	22.4	23.2
Visc. 130°C [10-1 Pa·s]	7.6	7.0	8.2	5.8	6.8	6.6
Visc. 150°C [10-1 Pa·s]	2.8	2.7	3.0	2.2	2.6	2.5

* Dosage par rapport à la masse d'enrobé; les autres additifs étant dosés par rapport à la masse de liant

Ces résultats de qualification des liants permettent de mettre en évidence les tendances suivantes :

- Les valeurs de pénétration à 25°C et de températures anneau et bille sont équivalentes pour l'ensemble des procédés à l'exception du FR-WAX qui aboutit à un liant dont la susceptibilité thermique est faible avec un indice de pénétrabilité supérieur à 3.
- Le point Fraass est généralement inférieur à -13°C, mis à part pour le procédé FR-WAX ce qui, même si la valeur est satisfaisante, dénote un comportement un peu plus fragile à basse température que les autres liants. Le procédé FR-PACK se distingue par la température Fraass la plus basse avec un écart de 4°C par rapport au bitume de base
- La viscosité du FR-WAX aux températures de mise en place (110°C et 130°C) est plus faible que pour les autres liants, ce qui confirme bien l'action de la cire sur la rhéologie du liant aux températures de compactage.

Mesures de viscosité sur matériaux des planches d'essais PLANET

Lors de l'analyse des enrobés des planches d'essais, discutées au chapitre 1, des mesures de viscosité dynamique sur les liants récupérés ont également été effectuées. Les résultats sont représentés dans la figure 24. Dans les domaines de températures de pose et de compactage (environ 140°C à 90°C selon les enrobés), nous pouvons observer:

- Le liant récupéré de l'enrobé à chaud (REF-HOT) présente une viscosité globalement plus élevée. La différence se situe entre 30% (150 °C) et 50% (90 °C).
- Les liants des enrobés FR-PACK et WATER+RAP présentent une viscosité réduite comparativement à la référence à chaud permettant ainsi une meilleure maniabilité pour une même température.
- Les enrobés avec zéolithe et WATER+RAP sont ceux dont la viscosité dynamique est la plus faible. La différence à 110 °C entre le liant REF-HOT et WATER+RAP est de 60% environ.

Ces tendances nécessiteraient cependant d'être vérifiées à l'échelle des mastics et des enrobés ce qui sera davantage développé dans la suite du chapitre.

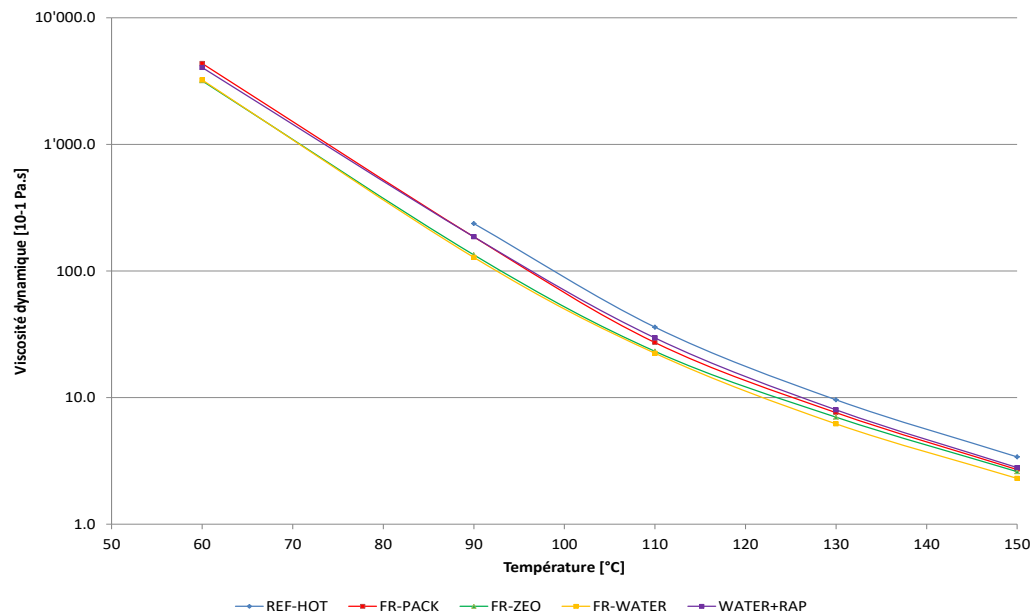


Fig. 24 Planches d'essais PLANET: Mesures de viscosité des liants récupérés

5.1.2 Essais étendus de viscosité (DSR)

Une analyse étendue de viscosité a été menée sur les liants, ceci par la réalisation de mesures rhéologiques dans une large gamme de températures au moyen d'un viscosimètre à plans parallèles ([29] pour plus de détails).

Appareil de mesures

Le rhéomètre utilisé est un rhéomètre TA Instruments de la série AR2000. Cet appareil permet de réaliser des mesures conformément à la norme SN 670 559 [5] et EN 14770 [27] relatives au rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR). Les conditions appliquées ici peuvent cependant légèrement varier des recommandations normatives, ceci notamment en raison des matériaux testés. Le rhéomètre utilisé impose une sollicitation rotationnelle variable pour une fréquence donnée. Ses caractéristiques principales sont les suivantes:

- Système Peltier de régulation en température (système à eau, la plaque inférieure est réglée en température et un temps de stabilisation est observé).
- Diamètre des plaques : 25 mm
- Sollicitation dynamique de 0.5 Hz (3.14 rad/s.)
- Amplitude de déformation fixe
- Entrefer initial : 0.8 à 1.0 mm
- Balayage en température de 155 °C à 15 °C, par incréments de 10 °C
- Gradient de température 5 °C/min
- Palier de stabilisation de la température : 2 mn

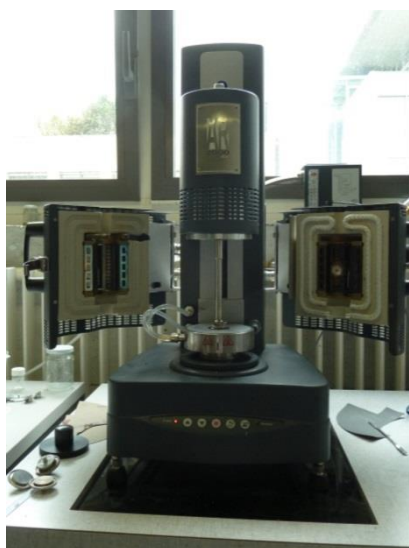


Fig. 25 Essais étendus de viscosité: Rhéomètre AR2000 (EPFL)

Une étude préliminaire a permis de déterminer le domaine de comportement newtonien, soit le domaine dans lequel la viscosité est indépendante du taux de cisaillement. Cette étude permet de définir la déformation à imposer lors des essais soit 0.1% (pulsation de 0.5 Hz).

Les résultats obtenus sont la viscosité dynamique η^* [Pa·s], le module complexe de cisaillement G^* [Pa], le module élastique G' , le module visqueux G'' et le déphasage entre la contrainte et la déformation de cisaillement δ .

Principaux résultats sur liants

Les liants suivants ont été testés:

- REF: Liant 50/70
- FR-PACK: Liant 50/70 + 0.4% additif chimique
- FR-WAX: Liant 50/70 + 3% cire

Les principaux résultats obtenus sont présentés dans la figure 26 (viscosité dynamique) et la figure 27 (angle de déphasage). De manière générale et comme attendu, le module de cisaillement complexe diminue avec l'augmentation de la température et l'angle de déphasage augmente quant à lui.

Tout comme pour les essais de caractérisation sur liants discutés précédemment, il semble que le liant FR-PACK ne présente que peu de différence par rapport au liant de référence non modifié. FR-PACK présente cependant une viscosité légèrement plus basse que la référence; la différence moyenne étant de 17% ce qui est dans la gamme de répétabilité de ce type de mesures (environ 20.-25%). Le comportement rhéologique du liant avec additif chimique n'est donc pas modifié de façon significative par rapport au liant de base 50/70.

Le mécanisme de comportement des liants avec cire est différent. Au-dessous de 90°C, le liant FR-WAX présente une viscosité plus élevée que le liant de base. L'augmentation moyenne de viscosité est d'un facteur 7.5, l'augmentation de viscosité la plus importante se situant entre 45 °C et 75 °C (facteur 13). Cette augmentation de la viscosité est liée à la solidification de la cire rendant ainsi le matériau plus rigide et donc l'enrobé potentiellement moins sensible à l'orniérage. Lorsque la température de fusion de la cire est atteinte, la viscosité diminue. Ainsi, cette diminution de viscosité est de l'ordre de 40% par rapport au liant de base dans la gamme de température 95°C – 135 °C. L'ajout de

cire permet donc de diminuer la viscosité aux températures prévues de fabrication, pose et compactage.

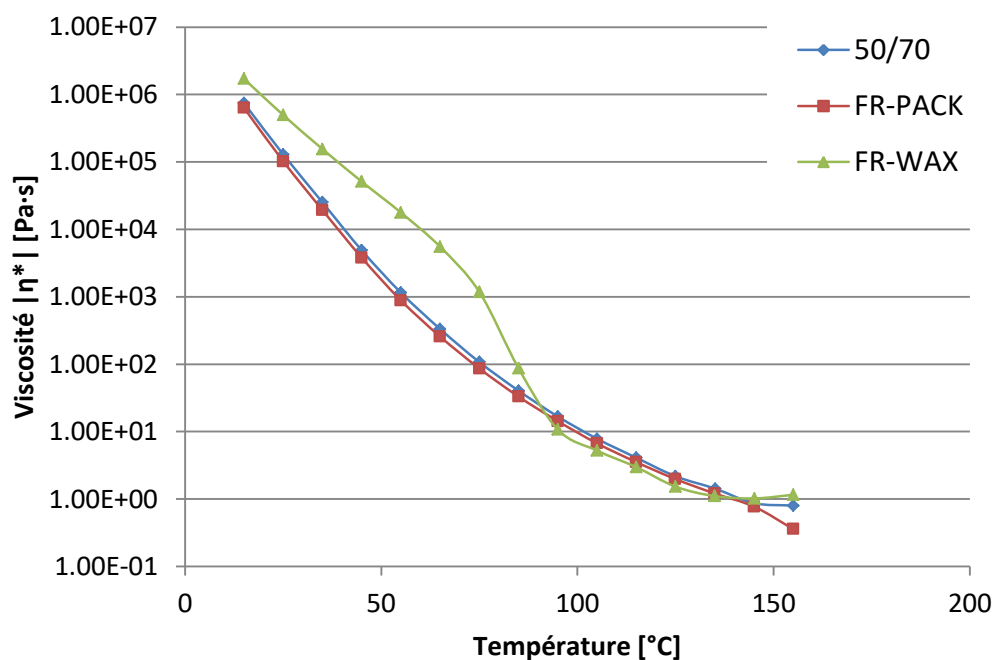


Fig. 26 Essais étendus de viscosité: Viscosité dynamique DSR des liants

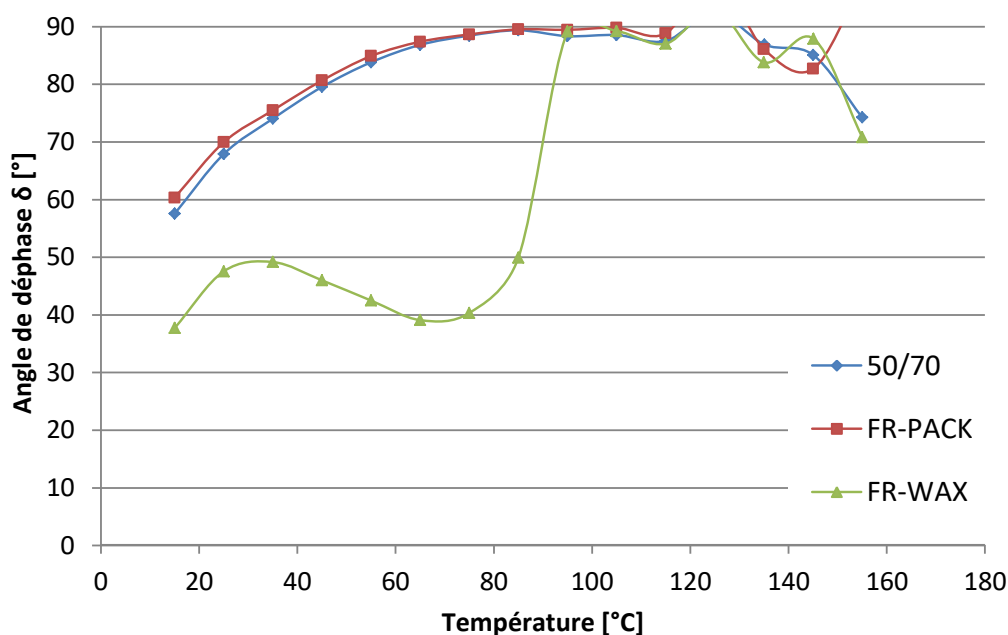


Fig. 27 Essais étendus de viscosité: Angle de déphasage des liants

5.2 Essais sur mastic

Il est unanimement reconnu que le mastic joue un rôle primordial sur les performances futures de l'enrobé bitumineux. L'utilisation du viscosimètre à plans parallèles permet la réalisation de mesures sur mastic, ce qui ne pourrait être réalisé avec un viscosimètre traditionnel cône et plaque. Le même système de mesure est utilisé que pour les essais étendus de viscosité sur liants et on consultera donc le chapitre 5.1.2 pour des informations relatives à l'équipement utilisé.

La mesure sur mastic n'étant pas normalisée, nous effectuons quelques adaptations et modifications de la méthode. L'expérience acquise par [35] lors de mesures précédentes fournit également de précieuses informations qui ont permis d'affiner la procédure à suivre en laboratoire

Les mastics suivants ont été testés:

- REF-HOT
- FR-WAX
- FR-PACK

La composition du mastic a préalablement été calculée sur la base du module de richesse de l'enrobé AC T 22S en supposant un mélange fictif contenant uniquement du filler et du bitume. Les proportions finalement calculées pour le mastic sont de 43% de liant pour 57% de filler. Les essais sont réalisés sur des échantillons de 60 g. de mastic.

Les principaux résultats des essais sur mastic sont présentés dans la figure 28 (viscosité dynamique) et dans la figure 29 (angle de déphasage). De manière globale, les comportements sont comparables à ceux observés sur les liants à savoir un comportement comparable à la référence pour le mastic FR-PACK (différence moyenne de 1%) et une évolution significative de la viscosité obtenue par l'ajout de cires (FR-WAX). Le mastic FR-WAX présente une diminution de la viscosité (environ 40%) dans le domaine de température 95 °C - 135 °C; la chute de viscosité du mastic correspondant à la fusion de la cire. La viscosité augmente d'un facteur 22 aux températures de sensibilité à l'orniérage de l'enrobé entre 45 °C et 75 °C. Le durcissement du bitume par la cristallisation de la cire est donc intimement lié au filler. Pour des mêmes températures, l'angle de déphasage mesuré sur mastic est plus faible que celui mesuré sur liant.

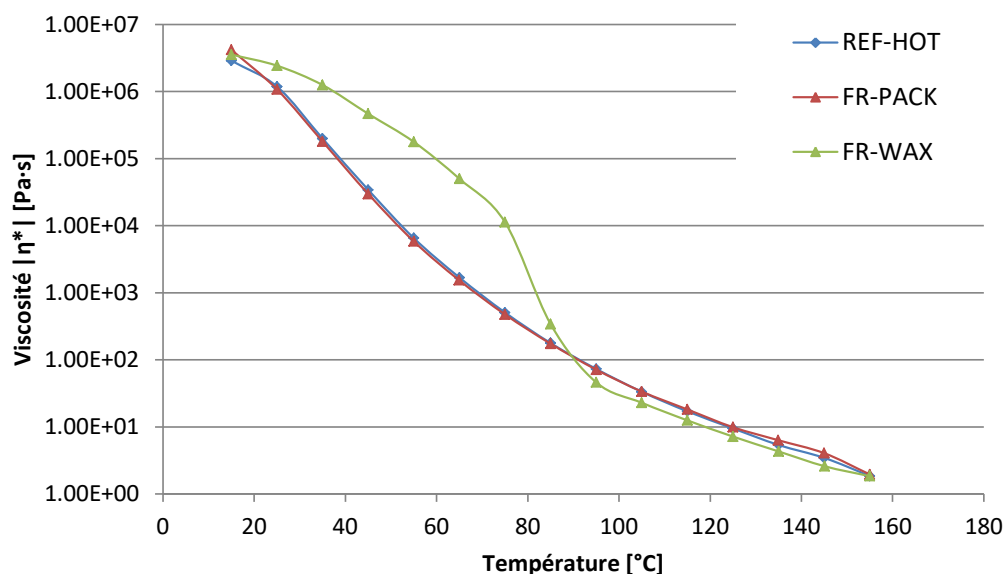


Fig. 28 Essais étendus de viscosité: Viscosité dynamique DSR des mastics

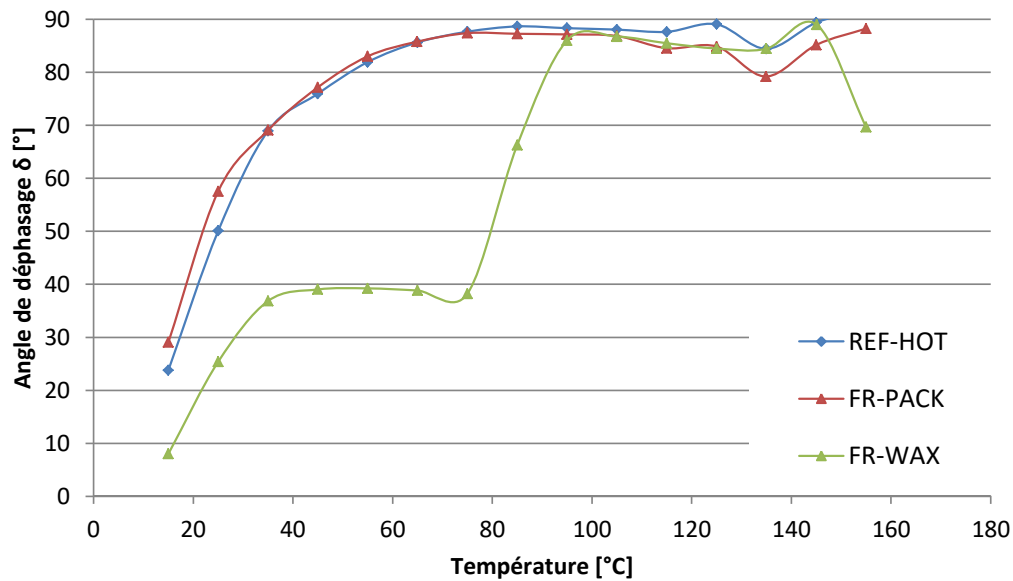


Fig. 29 Essais étendus de viscosité: Angle de déphasage des mastics

Nous pouvons encore relever que des données complémentaires relatives à l'analyse de la viscosité des liants et mastics peuvent être trouvées dans le travail [35] réalisé au LAVOC, travail dans lequel l'auteur étudie différents bitumes (50/70, 80/100) de provenance variable, avec également l'utilisation d'additifs (cire, Biodiesel). Les résultats obtenus mettent notamment en évidence l'effet de l'ajout de Biodiesel qui apporte une diminution de la viscosité du liant sur toute la plage de températures de fabrication-pose et service, alors que l'ajout de cire testée a pour effet une augmentation de la viscosité au-dessous de 100 °C et une diminution au-dessus de cette dernière température. Les auteurs ont également testé un enrobé à la mousse pour lequel de très bonnes performances mécaniques ont été obtenues, soit comparables à la référence à chaud ceci au-travers d'un essai de compression diamétrale à 15 °C. de plus amples investigations seraient nécessaires le cas échéant.

5.3 Essais sur enrobés

Contrairement au liant et au mastic, la viscosité d'un enrobé bitumineux n'est pas mesurable de manière directe, mais elle est souvent caractérisée par l'intermédiaire de sa compactibilité ou sa maniabilité.

La mesure de la compactibilité (aptitude au compactage) la plus courante est effectuée avec la presse à cisaillement giratoire, l'évolution de la compacité pouvant être déterminée en fonction du nombre de girations appliquées. Des considérations relatives à la PCG seront proposées au chapitre 5.3.1.

La compactibilité peut également être quantifiée par des compactages Marshall avec un nombre de coups variables, cela a par ailleurs été abordé précédemment au chapitre 3.4.

L'évaluation de la maniabilité d'un enrobé peut également être réalisée au moyen d'appareils spécifiques tels que le maniabilimètre pour lequel une démonstration et analyse préliminaire de quelques essais est proposée au chapitre 5.3.2.

On pourra finalement proposer de consulter le chapitre 3.4 qui contient également quelques éléments relatifs au compactage à différentes températures des enrobés tièdes.

5.3.1 Compactage PCG

Les résultats de compactage PCG réalisés à différentes températures sont consignés dans le Tab. 16, une représentation graphique de la compacité à 60 girations (que l'on peut assimiler à celle rencontrée pour une couche de 60 mm d'épaisseur) étant proposée dans la figure 30.

De manière générale, les différences observées pour un même matériau lors du compactage à différentes températures sont relativement faibles; un impact plus important de la température pouvant être attendu.

Sur la base de la figure 30, nous pouvons par exemple observer que la température de compactage de 95 °C dans le cas d'un enrobé à chaud (REF-HOT) est alors largement insuffisante si l'on souhaite obtenir un domaine de vides conforme aux exigences. Un compactage à 155 °C permet quant à lui de sensiblement diminuer la teneur en vides, ceci alors que les températures de 115 °C et 135 °C amènent des résultats comparables. Les tendances observées pour l'enrobé avec cire FR-WAX sont par contre quelque peu surprenantes, ceci en particulier pour le point à la température de 120 °C. Dans le cas de l'enrobé avec additif chimique FR-PACK, nous pouvons relever la différence importante sur la maniabilité et donc la compacité entre une température de 135 °C et 120 °C; un compactage à 155 °C n'amenant par contre aucun gain significatif au niveau de la compacité. Ainsi, bien que pas toujours univoques, la réalisation de PCG à différentes températures permet de quantifier la compactibilité du mélange en fonction de la température; certains résultats (FR-WAX à 120 °C et FR-ZEO à 155 °C) devant *a priori* être considérés avec précaution voire exclus de l'analyse.

Tab. 16 Enrobés fabriqués en laboratoire: Compactibilité PCG

	C1 [%]	C60 [%]	C200 [%]	Pente reg.
REF-HOT (95°C)	77.8	93.2	96.2	3.65
REF-HOT (115°C)	78.0	93.9	97	3.77
REF-HOT (135°C)	77.7	93.8	96.9	3.8
REF-HOT (155°C)	79.1	94.1	96.9	3.55
REF-HOT (95°C)	77.8	93.2	96.2	3.65
REF-HOT (115°C)	78.0	93.9	97	3.77
REF-HOT (135°C)	77.7	93.8	96.9	3.8
REF-HOT (155°C)	79.1	94.1	96.9	3.55
FR-WAX (105 °C)	81.1	94.6	96.2	3.11
FR-WAX (120 °C)	81.4	95.1	96.8	3.18
FR-WAX (135 °C)	79.6	94.3	96.6	3.45
FR-WAX (155 °C)	79.5	94.5	96.8	3.52
FR-PACK (105 °C)	78.1	93.5	96.5	3.64
FR-PACK (120 °C)	79.3	94.1	96.6	3.48
FR-PACK (135 °C)	77.7	93.3	96.6	3.72
FR-PACK (155 °C)	78.5	93.8	96.8	3.64
FR-PACK (105 °C)	81.8	95.3	97	3.13
FR-PACK (120 °C)	82.2	95.1	96.5	2.96
FR-PACK (135 °C)	82.7	95.8	97.3	3.02
FR-PACK (155 °C)	82.4	95.7	97.3	3.07
FR-WATER (95 °C)	81.4	94.4	96.1	3.02
FR-WATER (105 °C)	82.7	95.5	97.1	2.96
FR-WATER (120 °C)	82.1	95.3	97.2	3.08
FR-WATER (135 °C)	83.2	95.7	97.3	2.91
FR-WATER +RAP (95 °C)	81.4	94.4	96.1	3.02
FR-WATER +RAP (105 °C)	82.7	95.5	97.1	2.96
FR-WATER +RAP (120 °C)	82.1	95.3	97.2	3.08
FR-WATER +RAP (135 °C)	83.2	95.7	97.4	2.91

FR-ZEO (105 °C)	84.1	95.8	97.1	2.71
FR-ZEO (120 °C)	83.8	96.2	97.9	2.89
FR-ZEO (135 °C)	84.5	96.6	97.9	2.78
FR-ZEO (155 °C)	83.9	95.8	97.3	2.77

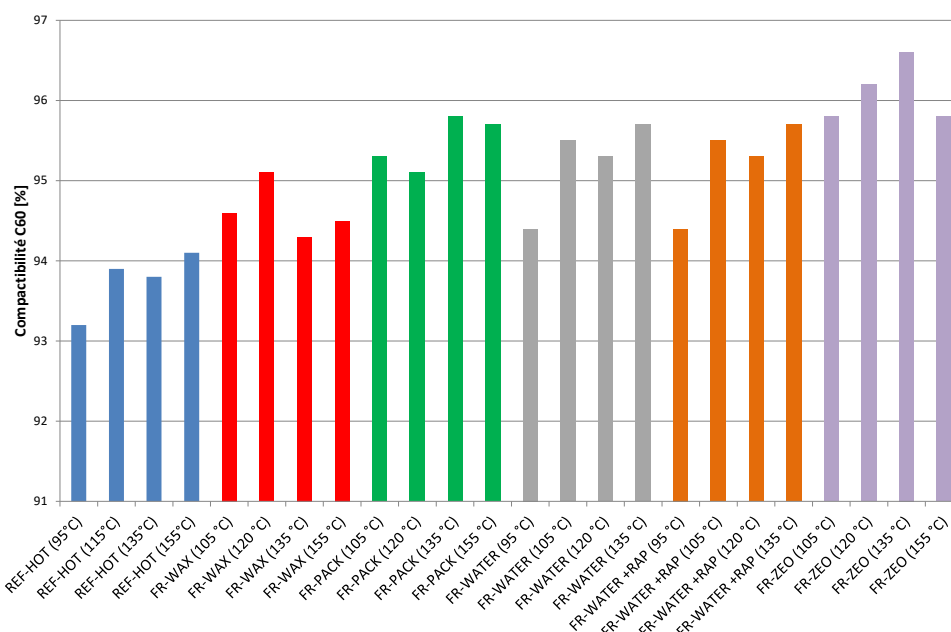


Fig. 30 Essais étendus de viscosité: Mesures de compactibilité PCG sur enrobés

Nous pouvons finalement relever que des informations complémentaires à la maniabilité des enrobés selon compactage PCG pourront être trouvées dans le chapitre 3.4 dans lequel une analyse exhaustive a été réalisée afin de définir les conditions optimales à suivre lors d'une procédure de réchauffage en laboratoire.

5.3.2 Maniabilimètre

Un indicateur qualitatif relatif à la maniabilité des enrobés est généralement fourni par l'appréciation des ouvriers sur chantier. Poursuivant cette approche, différents appareils ou mesures ont été développés afin de caractériser la maniabilité. Le maniabilimètre Nynas [36, 37], inspiré de la boîte de Casagrande, a pour but de caractériser l'aptitude au répandage de l'enrobé entre la phase de malaxage et la mise en œuvre sur chantier. Cet appareil développé initialement pour l'analyse des enrobés à froid permet d'évaluer la maniabilité ainsi que son évolution dans le temps.

Cet essai est encadré provisoirement par la norme NF P 98-258-1 (projet 2013). Une norme européenne est actuellement en cours d'élaboration.

Le principe de l'essai consiste à mesurer la résistance à une sollicitation de cisaillement-poussée d'un matériau à la sortie de son malaxage. On considère l'effort maximum développé pour une vitesse de cisaillement constante de l'éprouvette. On appelle cet effort « force de cohésion ». Cette force est déterminée par un capteur, couplé au piston du vérin de poussée. L'essai est destructif. La détermination de l'évolution de la force de cohésion en fonction du temps peut nécessiter une certaine masse de matériau, un essai demandant environ 12 kg d'enrobé (dépend du type de moules).

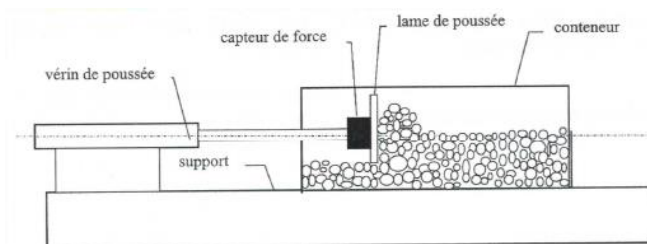


Fig. 31 Schéma du maniabilimètre Nynas [37]



Fig. 32 Maniabilimètre EPFL-LAVOC

La mise en place de la mesure avec maniabilimètre a été réalisée dans le cadre du présent projet PLANET. Pour cela, des essais étendus sur différents enrobés ainsi que des analyses paramétriques ont été réalisées. De manière globale, la réalisation de l'essai consiste à mesurer la force maximale sur la lame de poussée qui correspond à la force de cisailement. Sur la base de différentes expériences et recommandations, on estime qu'un coefficient de variation de 15% est admissible avec cet essai.

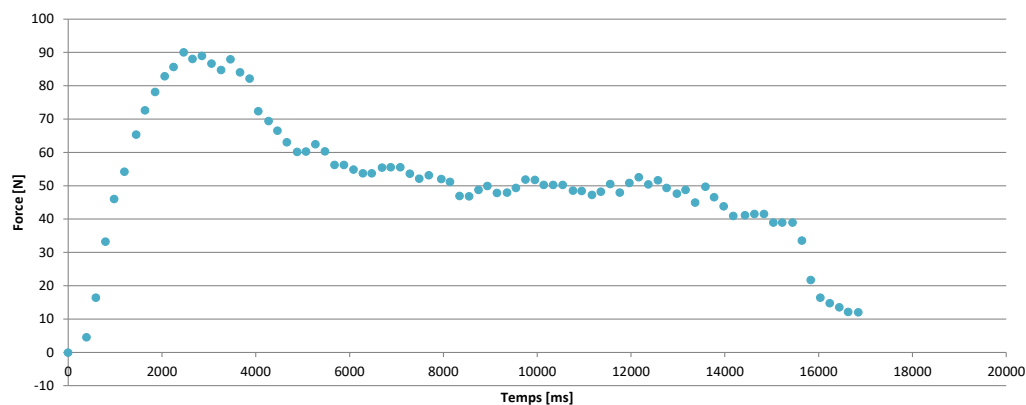


Fig. 33 Vue générale d'un résultat d'essai au maniabilimètre

La mise et validation de l'essai ainsi que de la méthodologie ont été réalisés par différentes analyses de répétabilité sur enrobé AC MR8 et AC T 22S. Les résultats de répétabilité obtenus sont globalement satisfaisants, seules 7% des essais (1/14) ne respectant pas les exigences. L'instrumentation et la réalisation de l'essai sont jugés satisfaisants. Dans cette phase préliminaire, la sensibilité de l'essai à la taille des granulats a également pu être observée; une force plus importante étant nécessaire dans le cas de grains plus gros. Le cas échéant, un bac d'essai plus grand peut également

être utilisé afin de garantir un milieu suffisamment homogène pour la réalisation de l'essai.

La mesure de la maniabilité à l'aide du maniabilimètre a été réalisée sur les enrobés des procédés suivants : REF-HOT, FR-PACK, FR-ZEO, FR-WATER et FR-WATER+RAP. Les résultats déterminant sont représentés dans le Tab. 17. Chaque résultat est la moyenne obtenue sur 2 échantillons, à l'exception des essais marqués avec un astérisque.

L'effet de la température peut être illustré par les résultats d'essais sur les mélanges FR-PACK et FR-ZEO réalisés à 105 °C et 120 °C. Nous pouvons observer que dans le cas de la zéolithe, l'enrobé apparaît comme moins maniable (force plus élevée) à la température de 105 °C. Une piste d'explication pourrait être liée à l'atténuation de l'effet de la zéolithe, environ deux heures après la fabrication selon la littérature. La tendance opposée est obtenue pour l'enrobé FR-PACK où la force moyenne apparaît davantage élevée à 105 °C. Cette tendance quelque peu surprenante nécessiterait davantage d'investigations.

Une comparaison entre enrobés avec (WATER+RAP) et sans fraisat (FR-WATER) des enrobés utilisés pour les planches d'essais a également été réalisée. De manière générale, nous pouvons observer que les forces de cisaillement sont plus élevées pour l'enrobé avec RAP que pour l'enrobé sans RAP; ceci pour une même température d'essai. Ceci est particulièrement marqué aux températures de 105 °C, 120 °C et 135 °C; la différence étant marginale à la température de 95 °C.

Tab. 17 Enrobés fabriqués en laboratoire: Maniabilité au maniabilimètre Nynas

	Température conditionnement [°C]	Force moyenne [N]	Ecart-type [N]	Coef. var. [%]
REF-HOT	150	41.55	4.27	10.28
FR-PACK*	105	47.97	3.99	8.32
FR-PACK*	120	55.30	4.53	8.19
FR-ZEO*	105	59.73	8.89	14.88
FR-ZEO*	120	49.13	5.24	10.66
FR-ZEO 4.6%	105	71.95	5.44	7.57
FR-ZEO 4.6%	120	61.10	5.66	9.26
FR-WATER	95	58.80	2.97	5.05
FR-WATER	105	48.05	0.78	1.62
FR-WATER	120	50.05	1.77	3.53
FR-WATER	135	47.70	0.71	1.48
WATER+RAP	95	60.00	8.34	13.91
WATER+RAP	105	79.10	5.23	6.62
WATER+RAP	120	61.15	7.14	11.68
WATER+RAP	135	56.65	1.63	2.87

Une analyse de l'effet de la teneur en liant met en évidence certaines tendances qui ne peuvent en l'état être exploitées de manière exhaustive; de plus amples investigations étant nécessaires afin d'obtenir des conclusions fiables.

Les essais réalisés ont finalement permis de mettre en évidence l'incidence du réchauffage sur la maniabilité des enrobés, comparativement à une mesure réalisée directement lors de la fabrication des mélanges et donc sans réchauffage. Les forces de cisaillement mesurées sur l'enrobé réchauffé apparaissent en effet sensiblement plus élevées et les tendances moins marquées que dans le cas d'essais sur enrobé frais. Ces premiers résultats, exploratoires, permettent de mettre en évidence le potentiel ainsi que les limites de ce type de mesures de maniabilité, tout en mettant en évidence quelques perspectives de développement.

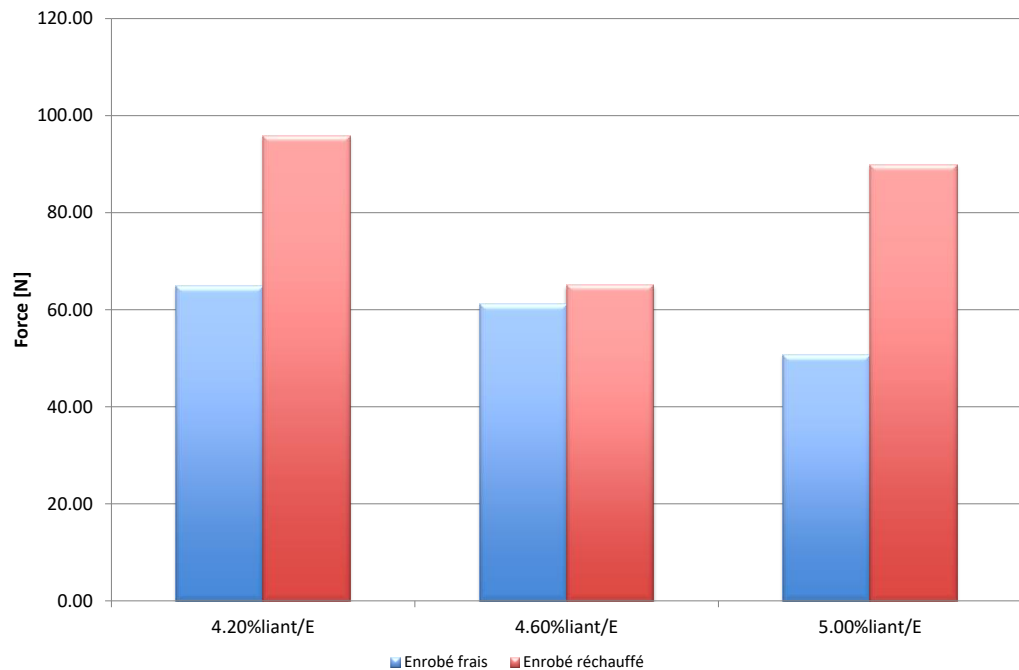


Fig. 34 Essais de maniabilité: Impact du réchauffage et de la teneur en liant

5.3.3 Autres systèmes pour évaluation de la maniabilité

Des considérations relatives à la maniabilité des enrobés ont été effectuées dans le chapitre 5.3, ceci sur la base de différents modes de compactage (Marshall, PCG) ou alors de mesures au moyen d'un maniabilimètre. D'autres moyens ont été développés afin de quantifier la maniabilité des enrobés bitumineux. De manière non-exhaustive, nous pouvons mentionner ci-dessous deux expériences.

Dans [38], l'auteur a réalisé des travaux sur le phénomène de prise des bétons et des graves émulsions de bitume dans lesquels il présente différents dispositifs de mesure de la maniabilité de matériaux hétérogènes évolutifs. Parmi les méthodes, nous pouvons relever le test de maniabilité ESSO qui consiste à mettre en rotation trois pointes au sein d'un enrobé à froid, jusqu'à obtenir sa déstructuration sous l'effet du cisaillement imposé. Cet essai est également appelé essai ACTE (Adhésion-Cohésion Test ESSO).

Dans leur travaux sur les enrobés à chaud [39] procèdent à une analyse de maniabilité par l'utilisation d'un prototype dont le principe de base est issu des travaux de Marvillet et Bougault (publiés en 1978 dans le Journal of Association of Asphalt Paving Technologist). Le principe de la mesure consiste à mesurer la résistance à la rotation d'une hélice plongée dans un récipient d'enrobé. Ainsi, une mesure de couple peut-être réalisée. Des malaxeurs de laboratoire équipés de ce type de systèmes de mesures peuvent par ailleurs être trouvés sur le marché. Dans leurs travaux [40], les auteurs mettent en évidence l'influence de la forme des granulats, de la taille maximale de ces granulats, du type de liant ainsi que de la température du mélange sur la mesure de maniabilité. Par contre, aucun effet significatif lié à la température du mélange n'est observé.



Fig. 35 Appareil de mesure de maniabilité [39]

D'autres auteurs proposent des mesures de maniabilité selon un principe comparable de mesure du couple au sein d'un malaxeur. De manière globale, nous pouvons observer que les mesures de maniabilité sur enrobés fonctionnent généralement de manière relative. Un essai normalisé avec également des valeurs limites font encore défaut.

6 Analyses spécifiques: Optimisation de la formulation

La phase de formulation et optimisation des performances constitue une partie essentielle de la recherche RS-3. Etant donnée le nombre élevée de matériaux analysés ainsi que les multiples caractéristiques et performances, une étude paramétrique exhaustive ne semble pas adéquate. Pour cette raison, il a été choisi de procéder par la réalisation de différentes études ciblées, chacune amenant des connaissances spécifiques relatives à l'optimisation de la formulation des enrobés tièdes. Les éléments suivants sont proposés ci-après:

- Considérations relatives aux méthodes de formulation (chapitre 6.1).
- Analyse de l'effet du type de liant (grade de bitume) sur les performances des enrobés tièdes (chapitre 6.2).
- Etude approfondie de l'optimisation de la résistance à l'humidité des enrobés tièdes (chapitre 6.4).
- Effet de la qualité des granulats sur les performances des enrobés tièdes (chapitre 6.5).
- Procédure d'optimisation de la formulation par la méthode Marshall de modification de la teneur en liant (chapitre 6.6).
- Considérations relatives à l'impact de l'ajout de matériaux recyclés sur les performances mécaniques des enrobés tièdes (chapitre 6.7).

6.1 Considérations relatives à la formulation

Nous proposons ici quelques considérations relatives aux méthodes de formulation et plus particulièrement leur applicabilité pour une optimisation des enrobés bitumineux tièdes.

La formulation a pour objectif de déterminer la composition (optimale) des constituants de l'enrobé afin de résister aux sollicitations mécaniques et climatiques sur l'ensemble de la durée de vie de la chaussée. Différentes propriétés sont recherchées selon le type de couche bitumineuse considérée. De nombreuses approches pour la formulation des enrobés bitumineux existent. Ces approches peuvent être basées sur des essais empiriques, des calculs analytiques, une méthodologie empirico-analytique, recourir à des essais fondamentaux, performantiels ou de caractérisation. Un état de l'art global est proposé par [41]. Aucune méthode ne faisant office de référence au niveau suisse, nous proposons ci-dessous une brève synthèse de trois approches jugées pertinentes.

6.1.1 Méthode française de formulation

La méthode française de formulation se caractérise par une approche basée le plus possible sur les performances du mélange. Il ne s'agit pas d'une méthode par recette (*i.e.* basée sur l'expérience de mélanges traditionnels ayant apporté satisfaction), les considérations volumétriques étant fondées sur la presse à cisaillement giratoire qui est un de piliers de la méthode. Lors de l'épreuve de formulation, une séquence d'essai est choisie selon le niveau d'épreuve requis; le niveau d'épreuve ayant différents niveaux d'exhaustivité notamment selon le type de couche, son épaisseur, les prévisions de trafic et la nature des couches inférieures. Par exemple, le niveau 1 (applications à faible niveau de sollicitation) concerne les spécifications relatives au pourcentage de vides (PCG) et à la résistance à l'humidité (Duriez). Pour davantage d'informations sur la méthode française, on pourra consulter [42].

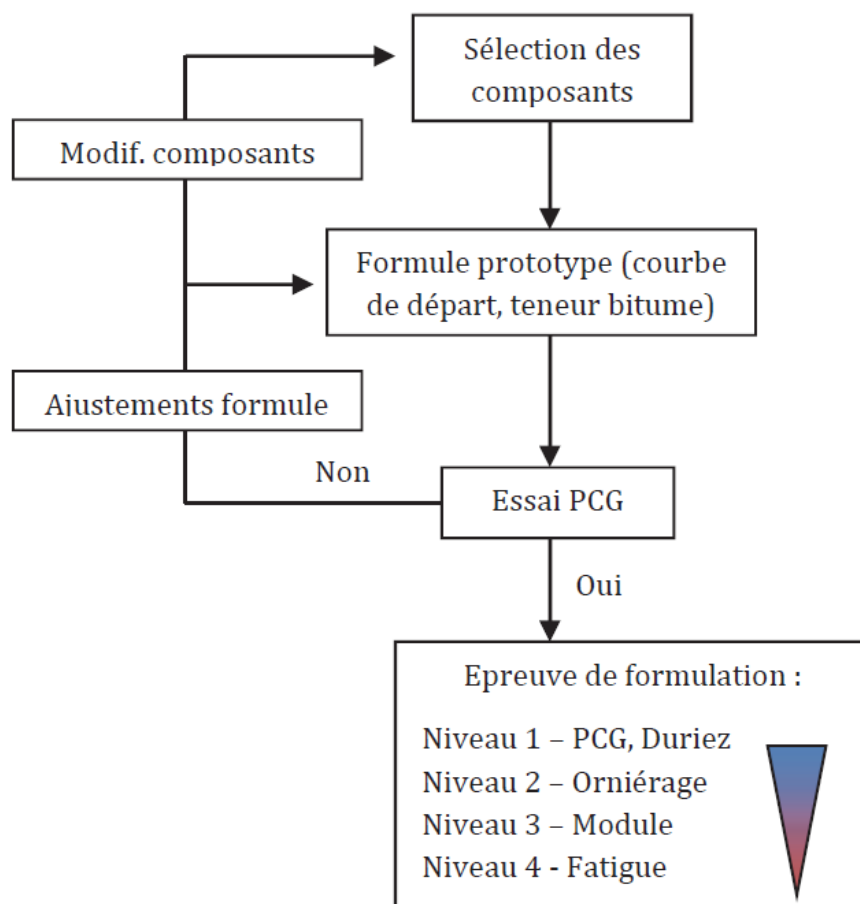


Fig. 36 Méthode française de formulation (tiré de [29, 42])

6.1.2 Méthode belge de formulation

Cette méthode de formulation analytique a été développée en Belgique par le Centre de Recherches Routières (CRR). Dans un premier temps, la méthode classe les mélanges en trois familles distinctes, selon leur teneur en filler ($< 63 \mu\text{m}$), sable ($63 \mu\text{m}$ à 2 mm) et pierres ($> 2 \text{ mm}$). Pour cela, un diagramme triangulaire spécifique est utilisé. La méthode développée ensuite s'adresse aux mélanges à squelette sableux et aux mélanges à squelette pierreux; les mélanges à squelette de filler n'étant pas considérés.

Cette méthode très puissante de formulation a la particularité de reposer à la fois sur des observations expérimentales ainsi que sur des essais en laboratoire. Le principe consiste à effectuer une formulation volumique analytique, les résultats étant traduits en masse dans une ultime étape. L'approche volumique permet notamment 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. Dans cette méthode, les essais de laboratoire sont utilisés comme moyen de vérification des valeurs obtenues par la formulation volumique. La procédure de formulation de la méthode belge se décompose en trois phases (choix et caractérisation des matériaux, formulation, essais), représentées dans la figure 37.

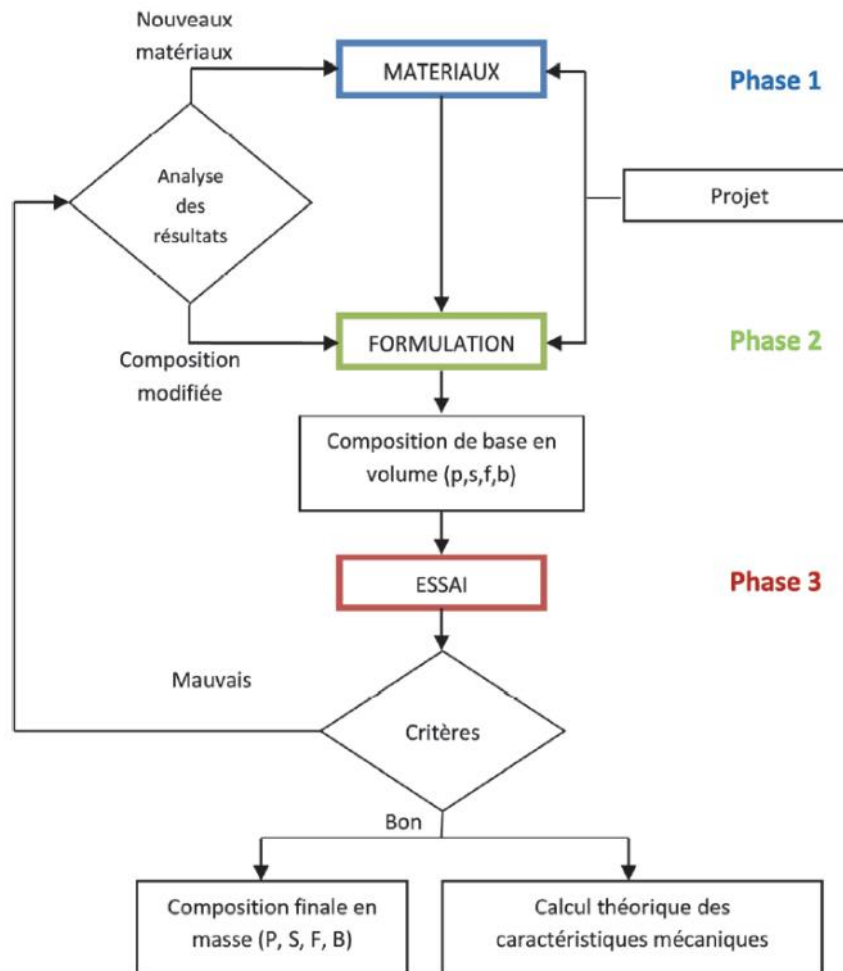


Fig. 37 Structure de la méthode belge de formulation (tiré de [29, 43])

La méthode belge de formulation est implémentée dans le logiciel PradoWin®; disposant également d'un module de prévision des performances selon différents modèles issus de la littérature. On pourra consulter [43, 44] pour davantage de détails sur cette méthode.

Nous pouvons également relever que cette méthode est également un des constituants de la méthodologie proposée par [45] où les auteurs proposent une méthode de formulation basée sur la méthode belge, complétée par certains essais de laboratoire (module complexe, fatigue, ...).

6.1.3 Approche suisse de formulation

Il n'existe pas de méthode spécifique suisse de formulation des enrobés bitumineux, la méthode Marshall étant traditionnellement recommandée. Cette méthode Marshall est principalement utilisée afin de déterminer l'optimum de la teneur en bitume pour une composition granulométrique prédéterminée. Le principe consiste à compacter différentes éprouvettes avec une variation de la teneur en liant pour ensuite déterminer le pourcentage de vides. Un essai de stabilité et fluage Marshall est ensuite effectué sur les éprouvettes une fois compactées. La teneur en liant optimale est finalement déterminée sur la base de ces résultats.

6.1.4 Commentaires relatifs à la formulation des enrobés tièdes

Comme décrit en introduction, les enrobés tièdes se distinguent des enrobés à chaud par le recours à des processus permettant d'abaisser leur viscosité dans le domaine des températures de production, pose et compactage ceci tout en diminuant ces températures comparativement à un enrobé à chaud traditionnel. La prise en compte de

cette variation de la viscosité de l'enrobé, dans le cadre d'une méthode analytique du type de la méthode Belge semble (pour l'instant) relativement complexe à effectuer. Ainsi, l'optimisation de la formulation d'un enrobé tiède semble relativement complexe à réaliser de manière analytique.

Considérant que la courbe granulométrique optimale sera identique pour un enrobé à chaud et un enrobé tiède, le processus d'optimisation de la formulation de l'enrobé tiède se fera donc principalement au niveau du type de liant, des éventuels additifs et de leur dosages respectifs. Afin de prendre en compte cela, une approche impliquant des essais de laboratoire semble la plus adéquate. Ainsi, il a été décidé dans la suite de ce chapitre de procéder selon deux axes principaux:

- Optimisation par une approche de formulation Marshall (approche Suisse)
- Réalisation de différentes analyses spécifiques, ciblant des performances potentiellement critiques

Ces différentes analyses vont finalement permettre de mettre en évidence les processus et principes déterminants dans le cadre d'une optimisation de la formation des enrobés tièdes.

6.2 Fabrications en laboratoire de la recette de référence

Les recettes produites en centrale pour les différents procédés ont été reconstituées en laboratoire selon les protocoles décrits en 3.5.

Les essais de module complexe (rigidité) et de fatigue ont été réalisés sur les enrobés des procédés suivant : REF-HOT, FR-PACK, FR-ZEO, FR-WAX, PA-HWAM et PA-PACK.

Les résultats des modules complexes sont donnés à 15°C/10Hz et 10°C/25Hz au Tab. 18.

Tab. 18 Enrobés AC B 16S, fabrication en laboratoire: Valeurs caractéristiques module complexe (2PB-TR)

	REF-HOT	FR-PACK	FR-ZEO	FR-WAX	PA-HWAM	PA-PACK
Vides moyens géom.	3.4%	4.9%	4.7%	4.6%	4.6%	5.8%
15°C, 10 Hz						
E* [MPa]	10'974	9'145	9'078	10'935	7'485	8'305
Phi [°]	16.9	18.2	19.4	16.9	24.0	21.1
10 °C, 25 Hz						
E* [MPa]	15'979	13'431	13'620	15'635	11'861	12'707
Phi [°]	10.5	11.4	12.7	10.8	15.1	13.0

La référence à chaud et l'enrobé FR-WAX présentent des valeurs de module et de déphasage équivalentes avec une rigidité comparable à celle rencontrée pour les AC EME C1 en Suisse.

Les enrobés FR-PACK et FR-ZEO forment le deuxième groupe de comportement avec des modules et des angles de phase comparables à ce qui est rencontré d'habitude pour des ACT 22 à chaud (ou des matériaux de la classe GB3 en France).

Le PA-HWAM et dans une moins grande mesure le PA-PACK sont les procédés qui aboutissent aux rigidités les plus faibles et aux déphasages les plus élevés (matériaux plus visqueux). La rigidité du PA-HWAM et PA-PACK correspond respectivement à ce qui est rencontré d'habitude pour les ACF 22 et ACT 22 à chaud (ou des matériaux de la classe GB1, respectivement GB2 en France).

Comparativement aux valeurs obtenues sur les enrobés des planches d'essais, nous pouvons observer que l'enrobé fabriqué en laboratoire présente un module de rigidité à 15 °C, 10 Hz environ 700 MPa plus élevé soit 7.5%, la différence étant donc relativement faible. L'enrobé FR.PACK fabriqué en laboratoire a quant à lui un module de rigidité (15 °C, 10 HZ) environ 9% plus faible que l'enrobé prélevé sur la planche d'essais, la différence étant de 6% pour l'enrobé FR-ZEO avec là aussi un module plus faible lors de la fabrication en laboratoire. De manière globale, nous pouvons observer que la fabrication en laboratoire des recettes utilisées sur les planches d'essais abouti à des valeurs cohérentes et réalistes.

A noter que le module de rigidité considéré seul ne peut pas être considéré comme un indicateur de performance. Il doit être associé aux caractéristiques de fatigue correspondantes.

6.3 Effet du type de liant sur les performances

L'effet du type de liant sur les performances de l'enrobé est mis en évidence par l'utilisation d'un deuxième liant pur plus mou de la classe 70/100 pour la fabrication du matériau FR-WAX. Les résultats obtenus sont comparés par rapport à ceux obtenus pour les matériaux REF-HOT et FR-WAX élaborés avec le bitume de référence 50/70.

La formule retenue pour la fabrication du matériau FR-WAX avec bitume 70/100 demeure inchangée par rapport à la formule de référence mis à part le remplacement du liant.

Les caractéristiques des liants sont données dans le Tab. 19.

Tab. 19 Effet du type de liant sur les caractéristiques des liants

	REF-HOT	FR-WAX	FR-WAX
Liant	50/70	50/70	70/100
Additif	Non	Oui	Oui
Dosage additif	-	3%	3%
Pen @ 25°C [10-1]	55.0	36.5	50.0
Temp. A&B [°C]	51.9	79.2	73.3
IP [-]	-0.5	3.3	3.3
Visc. 60°C [10-1 Pa.s]	2662	2560	1741
Visc. 90°C [10-1 Pa.s]	115	83.2	70.4
Visc. 110°C [10-1 Pa.s]	24	16.8	13.6
Visc. 130°C [10-1 Pa.s]	6.4	5	4.4
Visc. 150°C [10-1 Pa.s]	2.5	2	1.7

Dans le cas des bitumes additionnés de 3% de cire, le remplacement du liant de référence 50/70 par un liant plus mou 70/100 conduit à un mélange légèrement plus susceptible à la température, notamment :

- L'augmentation de la pénétration à 25°C avec des valeurs comparables à celle du bitume 50/70 de référence (sans ajout de cire)
- Le maintien d'une température A&B assez élevée
- Des viscosités entre 60°C et 150°C bien inférieures à celles mesurées sur les bitume 50/70 avec et sans ajout de cire
- Un indice de pénétrabilité IP comparable à celui du 50/70 avec 3% de cire

Les caractéristiques mécaniques des 3 enrobés analysés (sensibilité à l'eau, valeurs Marshall et compression diamétrale à -10°C et 40°C) sont données dans le Tab. 20.

Tab. 20 Effet du type de liant sur les caractéristiques et performances des enrobés

	REF-HOT	FR-WAX	FR-WAX
Liant	50/70	50/70	70/100
Additif	Non	Oui	Oui
Dosage additif	-	3%	3%
Valeurs Marshall			
Vides HM [%]	6.8	6.7	5.1
Stabilité SM [kN]	8.7	8.8	9.7
Fluage FM [mm]	3.0	2.4	3.1
Sensibilité à l'eau			
ITSw [kPa]	745	666	718
ITSd [kPa]	929	724	806
Ratio ITSR [%]	80	92	89
Compression diamétrale -10°C			
Vides HM [%]	5.7	6.5	5.3
Contrainte [N/mm2]	4.1	3.9	3.7
$\Delta D/D$ [10-3]	7.2	6.9	9.3
Δ Contr. (max-min) [N/mm2]	0.7	1.2	0.4
Compression diamétrale 40°C			
Vides HM [%]	5.6	6.3	5.4
Contrainte [N/mm2]	0.44	0.38	0.30
$\Delta D/D$ [10-3]	14.2	11.3	12.2
Δ Contr. (max-min) [N/mm2]	0.04	0.06	0.03

Les valeurs Marshall indiquent que le FR-WAX avec bitume 70/100 est plus compacte d'environ 1.7% que le REF-HOT et le FR-WAX avec bitume 50/70. Cette compacité plus élevée s'accompagne d'une valeur de stabilité Marshall plus élevée pour ce matériau.

Cette tendance n'est pas confirmée par le compactage PCG présenté ci-dessous.

L'effet du bitume 70/100 sur la sensibilité à l'eau de l'enrobé FR-WAX est modérée. Le ratio ITSR obtenu est comparable à celui obtenu pour le FR-WAX avec bitume 50/70, même si les valeurs absolues des tractions sont légèrement inférieures.

La compression diamétrale à basse température (-10°C) aboutit à des valeurs de contrainte proches pour les 3 matériaux compte tenu de la variabilité de l'essai. Nous pouvons également constater que le FR-WAX avec bitume 70/100 présente un comportement plus ductile que les enrobés avec bitume 50/70 avec un $\Delta D/D$ plus élevé.

Les résultats de la compression diamétrale à 40°C montrent que le bitume 70/100 induit une diminution significative de la contrainte à la rupture.

Il est important de noter que les vides Marshall obtenus lors de la confection des éprouvettes que ce soit pour la sensibilité à l'eau ou la compression diamétrale montrent tous que l'enrobé FR-WAX avec bitume 70/100 présente systématiquement les vides les plus faibles et l'enrobé FR-WAX avec bitume 50/70 les vides les plus élevés. La référence REF-HOT s'illustre par une variabilité des vides plus importante mais qui se situe en général au niveau des vides du FR-WAX avec bitume 50/70.

L'aptitude à la mise en place des matériaux a été analysée à différentes températures de compactage avec la PCG et les résultats sont illustrés dans le Tab. 21. Afin de tenir compte de la maniabilité plus importante induite par l'utilisation d'un bitume 70/100, la gamme de température de compactage étudiée a été étendue à 80°C, soit une étendue totale de plus de 50°C.

Tab. 21 Effet du type de liant sur la compacité PCG à 100 girations des enrobés

	REF-HOT	FR-WAX	FR-WAX
Liant	50/70	50/70	70/100
Additif	Non	Oui	Oui
Dosage additif	-	3%	3%
Température de compactage [°C]	Compacité à 100 girations [%]		
80			95.2
90			95.0
100			94.1
110		92.8	94.9
120		94.7	94.2
130		94.2	95.1
130/150	94.0		

La compacité PCG à 100 girations présente très peu de variation d'une part en fonction de la température de compactage pour un enrobé donné, mais également entre les 3 enrobés testés.

Ce constat démontre, en tout cas pour le procédé à la cire, le large domaine de température de compactage disponible offrant une maniabilité comparable à un enrobé de référence à chaud. Aucune zone de température optimale ne se dessine dans la gamme de températures testées pour le FR-WAX avec bitume 70/100 tandis que pour le FR-WAX avec bitume 50/70 une diminution de la maniabilité se constate sous les 120°C.

6.4 Sensibilité à l'eau des enrobés tièdes

La sensibilité à l'eau des enrobés tièdes a été évaluée au travers de la réalisation d'essais discriminants appliquées sur les enrobés suivants : FR-WAX, FR-PACK, PA-PACK et PA-HWAM. Les essais retenus afin de qualifier la sensibilité à l'eau sont:

- Adhésivité passive (Taux d'enrobage) selon norme SN 670 460 [4] : 1997
- Sensibilité à l'eau (Traction indirecte et ITSR) selon norme SN 670 412a-NA [2] : 2009
- Module sécant (Essai NAT) selon norme SN 670 426 [3] : 2004

Les résultats de l'essai d'adhésivité passive sont donnés dans le Tab. 22.

Tab. 22 Taux d'enrobage des granulats pour plusieurs procédés d'enrobés tièdes

Enrobé	FR-WAX	FR-PACK	PA-PACK	PA-HWAM
Taux d'enrobage des granulats U [%]	100	82	83	85

L'ensemble des enrobés testés présentent un taux d'enrobage dépassant 80%, limite au-delà de laquelle l'adhésivité liant-granulats est garantie pour la majorité des utilisations selon [67].

Le FR-WAX est l'enrobé qui atteint le taux d'enrobage le plus élevé, qualifié d'excellent. Les deux procédés avec additif chimique (FR-PACK et PA-PACK) obtiennent des valeurs comparables légèrement dépassées par le taux d'enrobage du PA-HWAM.

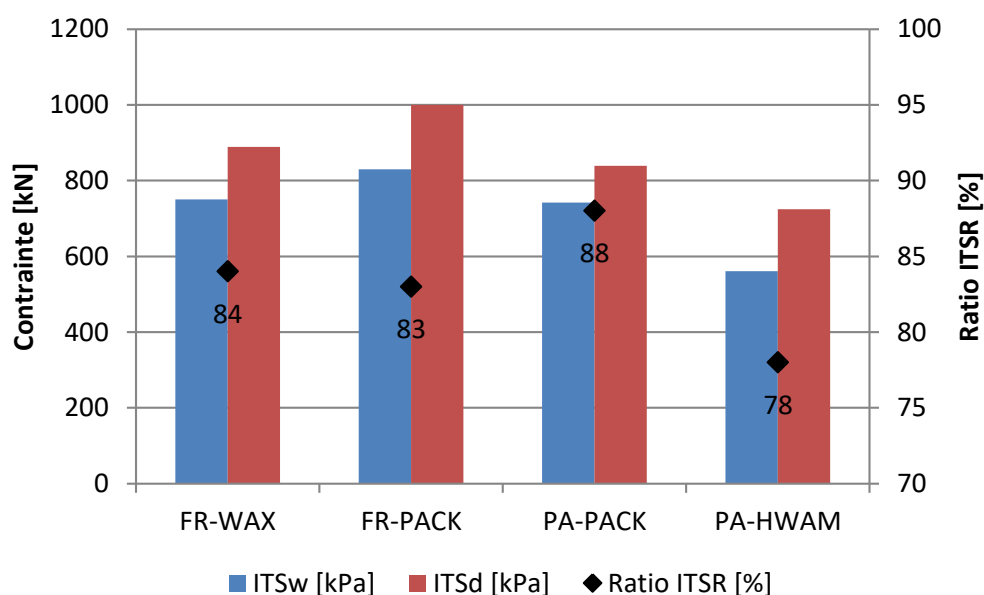
Les résultats de sensibilité à l'eau sont regroupés au Tab. 23.

Tab. 23 Sensibilité à l'eau pour plusieurs procédés d'enrobés tièdes

Enrobé	FR-WAX	FR-PACK	PA-PACK	PA-HWAM
ITSw [kPa]	750	830	742	561
ITSd [kPa]	889	1000	839	724
Ratio ITSR [%]	84	83	88	78

L'ensemble des enrobés respectent l'exigence minimale de 70% de la norme SN 640 431-1-NA [1].

L'enrobé PA-HWAM présente néanmoins le ratio ITSR ainsi que les résistances à la traction les plus faibles. Les autres enrobés peuvent être admis comme équivalents au regard de la variabilité de l'essai avec de meilleures valeurs absolues à la traction indirecte à sec et humide pour le FR-PACK.

**Fig. 38** Sensibilité à l'eau pour plusieurs procédés d'enrobés tièdes

Les résultats de l'essai du module sécant (selon annexe C de la norme EN 12697-26 [25]: 2004) sont donnés dans le Tab. 24. La valeur de module donnée pour chaque éprouvette correspond à la moyenne de deux mesures de module réalisée selon deux orientations perpendiculaires de l'éprouvette.

Tab. 24 Module sécant pour plusieurs procédés d'enrobés tièdes pour des échantillons conditionnés avec et sans eau

Enrobé	FR-WAX		FR-PACK		PA-PACK		PA-HWAM	
Module de rigidité à 15°C avec essai de traction indirecte IT-CY [MPa]								
	Sèche	Humide	Sèche	Humide	Sèche	Humide	Sèche	Humide
Éprouvette n°1	10'004	9'685	9'047	8'650	8'197	6'802	6'340	6'561
Éprouvette n°2	10'817	10'034	8'061	7'862	7'591*	7'947	7'405	7'036
Moyenne	10'411	9'860	8'554	8'256	8'197	7'375	6'873	6'799
Ratio	95%		97%		90%		99%	

* : Valeur devant être rejetée selon annexe C de la norme EN 12697-26 [25]: 2004

Les valeurs obtenues permettent d'attribuer au FR-WAX le module de rigidité le plus élevé et avec la variabilité des résultats la plus faible. Ce résultat est comparable à ce qui peut être mesuré sur des enrobés à chaud. Suivent ensuite, et par valeur de module décroissante : FR-PACK, PA-PACK et PA-HWAM.

Les ratios de modules entre les éprouvettes sèches et humides sont dans tous les cas supérieurs à 90%, ce qui est assez élevé mais justifié par l'énergie de compactage plus importante par rapport à celle de l'essai de sensibilité à l'eau. Il n'existe pas actuellement de valeurs indicatives pour ce ratio dans la littérature.

6.5 Effet de la pétrographie sur les performances

L'effet de la pétrographie sur les performances des enrobés tièdes a été examiné sur la formule AC B 16S pour les procédés FR-ZEO et PA-HWAM fabriqués avec deux types de granulats : Weibel et Berag.

Les essais retenus afin de qualifier l'effet de la pétrographie sont :

- Sensibilité à l'eau (Traction indirecte et ITSR) selon norme SN 670 412a-NA [2] : 2009
- Compression diamétrale à -10, 15 et 40°C selon norme SN EN 12697-6-8-23 [22]
- Compactage PCG selon norme NF P 98-252

Les résultats de sensibilité à l'eau et de la compression diamétrale sont donnés au Tab. 25.

Tab. 25 Effet de la pétrographie sur les caractéristiques et performances des enrobés

	REF-HOT	FR-ZEO	FR-ZEO	PA-HWAM	PA-HWAM
Liant	Weibel	Berag	Weibel	Berag	Weibel
Additif	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Sensibilité à l'eau					
ITSw [kPa]	1065	730	408	660	466
ITSd [kPa]	1230	954	841	812	799
Ratio ITSR [%]	87	77	49	81	58
Compression diamétrale -10°C					
Vides HM [%]	4.3	4.7	6.9	5.5	6.5
Contrainte [N/mm ²]	4.8	4.4	4	4.2	3.8
$\Delta D/D$ [10-3]	6.8	6.5	5.8	6.5	7.4
Coefficient de traction [N/mm ²]	1119	1079	1090	1030	819
Compression diamétrale 15°C					
Vides HM [%]	4.3	4.7	6.8	5.6	6.4
Contrainte [N/mm ²]	2.48	2.07	1.82	1.71	1.65
$\Delta D/D$ [10-3]	13.2	14.1	16.1	16.6	16.9
Coefficient de traction [N/mm ²]	296	232	180	162	153
Compression diamétrale 40°C					
Vides HM [%]	4.2	4.7	6.9	5.6	6.5
Contrainte [N/mm ²]	0.55	0.38	0.34	0.28	0.29
$\Delta D/D$ [10-3]	13.2	15.5	14.9	15.8	14.7
Coefficient de traction [N/mm ²]	66	38	36	28	31

L'essai de sensibilité à l'eau nous montre que l'ITSR est fortement influencé par la nature du granulat et peut conduire pour les granulats Weibel à des valeurs très faibles.

Le choix d'un dope d'adhésivité adéquat et compatible avec le procédé tiède utilisé est un élément très important afin de garantir un bon enrobage des granulats.

Il est important de rappeler que les deux procédés tièdes retenus pour cette comparaison mettent en œuvre l'action de l'eau pour la réduction de la viscosité et de la température de fabrication.

Le même classement observé pour l'ITSR est retrouvé dans les résultats de la compression diamétrale mais avec un effet du type de granulat plutôt faible.

Les résultats de l'essai PCG sont donnés au Tab. 26.

Tab. 26 Enrobés fabriqués en laboratoire: Compactibilité PCG

	Granulat	C1 [%]	C60 [%]	C200 [%]	Pente reg.
REF-HOT (95°C)	Weibel	77.8	93.2	96.2	3.65
REF-HOT (115°C)	Weibel	78	93.9	97	3.77
REF-HOT (135°C)	Weibel	77.7	93.8	96.9	3.8
REF-HOT (155°C)	Weibel	79.1	94.1	96.9	3.55
PA-HWAM (75 °C)	Berag	79.7	94	96.3	3.35
PA-HWAM (90 °C)	Berag	79.8	94	96.2	3.31
PA-HWAM (105 °C)	Berag	78.9	94	96.6	3.54
PA-HWAM (75 °C)	Weibel	77	92.9	96	3.78
PA-HWAM (90 °C)	Weibel	75.5	91.6	95.2	3.84
PA-HWAM (105 °C)	Weibel	76.7	92.1	95.3	3.67
FR-ZEO (75 °C)	Berag	73.3	90.1	94	4.02
FR-ZEO (90 °C)	Berag	77.5	92.8	96	3.64
FR-ZEO (105 °C)	Berag	75.4	91.5	95.4	3.88
FR-ZEO (120 °C)	Berag	79.9	94.4	96.8	3.41
FR-ZEO (75 °C)	Weibel	73.3	90	94	4.02
FR-ZEO (90 °C)	Weibel	75.9	91.8	95.4	3.83
FR-ZEO (105 °C)	Weibel	75.4	91.5	95.4	3.88
FR-ZEO (120 °C)	Weibel	77.2	92.8	96.1	3.73

6.6 Optimisation par modification de la teneur en liant

6.6.1 Cas 1: Enrobé PA-PACK

L'optimisation des caractéristiques de l'enrobé tiède PA-PACK a été réalisée par la variation de la teneur en liant autour de la valeur nominale de 4.6% de la recette de la centrale d'enrobage, soit : 4.3, 4.6, 4.9 et 5.2%. Une approche classique (méthode Marshall) a donc été suivie. Ces quatre mélanges ont été fabriqués en laboratoire.

Les résultats déterminants de l'essai Marshall sont donnés au Tab. 27.

Tab. 27 Effet de la teneur en liant sur les caractéristiques Marshall des enrobés

	PA-PACK	PA-PACK	PA-PACK	PA-PACK
Liant	50/70	50/70	50/70	50/70
Teneur en liant sur enrobé [%]	4.3	4.6	4.9	5.2
Dosage additif	1%	1%	1%	1%
Valeurs Marshall				
Vides HM [%]	7.0	5.3	3.9	3.6
Stabilité SM [kN]	8.8	9.1	10.4	9.0
Fluage FM [mm]	3.0	3.1	3.3	3.8

Le mélange avec la teneur en liant de 4.9% est celui qui aboutit à la valeur de la stabilité Marshall la plus élevée avec des vides proches de 4% qui est la valeur cible initialement visée.

Les résultats de la compactibilité PCG des mélanges précédents sont résumés au Tab. 28.

Tab. 28 Effet de la teneur en liant sur la compactibilité PCG

	Teneur en liant sur enrobé [%]	C1 [%]	C60 [%]	C200 [%]	Pente reg.
PA-PACK (120°C)	4.3	76.3	91.5	95.1	3.65
PA-PACK (120°C)	4.6	80.2	94.7	96.9	3.39
PA-PACK (120°C)	4.9	80.4	94.6	96.7	3.33
PA-PACK (120°C)	5.2	80.7	95.3	97.2	3.39

Les valeurs PCG montrent que les teneurs en liant supérieures ou égales à 4.6% permettent une mise en place satisfaisante du matériau PA-PACK.

Les résultats des essais Marshall et PCG conduisent à considérer la formule avec teneur en liant sur enrobé de 4.9% comme la formule optimale, soit un écart de +0.3% par rapport à la teneur en liant de la formule de référence.

6.6.2 Cas 2: Enrobés FR-ZEO et PA-PACK

Une seconde analyse a été menée simultanément pour les enrobés REF-HOT, FR-ZEO et PA-PACK. L'ensemble des résultats d'essais sont consignés dans le Tab. 32.

Tab. 29 Effet du type de liant sur les caractéristiques et performances des enrobés

	REF-HOT		FR-ZEO			PA-PACK	
Teneur liant/Enrobé	4.60	5.00	4.60	4.90	5.20	4.60	5.00
Additif	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Dosage additif	-	-	0.25%*	0.25%*	1%	1%	1%
Analyse liant							
Pen @25 °C [10-1mm]	48	33	-	45	44	60	55
TA&B [°C]	51.9	57.9	-	53.5	54.5	55.5	52.0
IP [-]	-0.8	-0.4	-	-0.6	-0.5	-0.6	-0.5
Valeurs Marshall (60°C)							
Vides HM [%]	4.5	2.7	5.9	4.2	3.5	5.3	4.0
Stabilité SM [kN]	13.1	12.7	9.6	9.3	9.6	9.1	9.4
Fluage FM [mm]	2.8	3.5	3.1	3.5	4.1	3.1	3.7
Sensibilité à l'eau							
ITSw [kPa]	1065	1232	408	524	757	649	760
ITSd [kPa]	1230	1294	841	853	925	903	841
Ratio ITSR [%]	87	95	49	61	82	72	90
Compression diamétrale -10°C							
Vides HM [%]	4.3	2.7	6.9	4.5	3.3	5.5	3.8
Contrainte [N/mm2]	4.8	5.2	4.0	4.6	4.7	4.6	4.6
ΔD/D [10-3]	6.8	5.5	5.8	5.7	7.2	6.5	6.4
Compression diamétrale 15°C							
Vides HM [%]	4.3	2.8	6.8	4.4	3.2	5.3	3.8
Contrainte [N/mm2]	2.48	1.72	1.82	1.96	1.98	1.84	1.74
ΔD/D [10-3]	13.2	15.2	16.1	15.3	15.8	14.8	20.0
Orniérage							
Vides [%]	5.2	4.6	6.2	-	5.1	6.4	4.9
Ornière cal @10'000 c. [%]	4.7	12.5	3.7	-	11.1	5.7	17.3
Ornière mes @10'000 c. [%]	4.8	14.2	3.7	-	12.5	5.8	12.7

* Dosage par rapport à la masse d'enrobé

La comparaison des différents enrobés amène les commentaires suivants:

- La gamme de vide des enrobés tièdes est légèrement supérieure à celle de l'enrobé de référence; l'optimum se situant à environ 6%.
- Les enrobés tièdes testés présentent une stabilité Marshall plus faible que la référence à chaud; le fluage étant quant à lui plus élevé.
- La sensibilité à l'eau des enrobés tièdes testée est plus grande que celle du mélange de référence; ceci tout particulièrement pour le mélange FR-ZEO qui présente des ratio ITSR inférieurs à la limite normative de 70% pour une teneur en liant de 4.60 ou 4.90%.
- La tendance lors des essais de compression diamétrale est identique à savoir un meilleur comportement pour l'enrobé REF-HOT, suivi de près par l'enrobé PA-PACK. L'enrobé avec ajout de zéolithe montre quant à lui les performances les moins élevées.
- L'essai d'orniérage indique une susceptibilité plus faible pour l'enrobé FR-ZEO, qui est même davantage performant que l'enrobé à chaud. L'enrobé PA-PACK présente les moins bons résultats à l'orniérage; le vieillissement plus faible de son liant étant probablement une composante expliquant ce comportement.

L'analyse de l'enrobé de référence indique que l'augmentation de la teneur en liant diminue sans surprise les vides Marshall, le fluage Marshall augmentant également de 0.7 cm. Une teneur plus élevée en liant permet de sensiblement améliorer le ratio ITSR, ceci principalement par une augmentation de la résistance des échantillons humides en raison du degré d'enrobage supérieur des granulats comparativement au mélange avec 4.6% de liant. Les essais de compression diamétrale indiquent également une tendance logique à savoir un meilleur comportement à basse température avec une teneur plus élevée en liant; le comportement à 15 °C étant par contre péjoré. Etant données les "mauvais" comportements à l'orniérage de l'enrobé avec 5% de liant, nous pouvons supposer que la teneur en liant de 4.6% est globalement satisfaisante.

Les mécanismes sont identiques pour l'enrobé FR-ZEO à savoir l'impact suivant d'une augmentation de la teneur en liant:

- Diminution des vides Marshall;
- Augmentation du fluage Marshall
- Stabilité Marshall globalement stable;
- Amélioration de la résistance des échantillons conditionnés dans l'eau et donc du ratio ITSR;
- Meilleur comportement à basse température lors de l'essai de compression diamétrale, et résistance de rupture plus faible à la température de 15°C en raison d'un mélange contenant davantage de liant;
- Péjoration de la résistance à l'orniérage; la profondeur d'orniérage étant environ 3 fois plus élevée dans le cas d'un mélange contenant 04 resp. 0.6% de liant en plus.

Ainsi, sur la base de ces différentes observations, nous pouvons remarquer que le processus d'optimisation de la formulation des enrobés tièdes selon une approche Marshall est globalement comparable à celui appliqué dans le cas d'enrobé à chaud. Les tendances sont en effet les mêmes, l'ampleur des différences variant selon le type d'enrobé considéré.

6.7 Considérations relatives à l'ajout de matériaux recyclés

Bien que cela ne soit pas l'objectif premier du paquet de recherche, la prise en compte de fraisat d'enrobé dans les enrobés tièdes est une piste intéressante d'une part pour son impact sur la consommation énergétique ainsi que la réduction de l'utilisation de matière première (bitume, granulats), mais cela peut également s'avérer intéressant pour le comportement mécanique global des enrobés.

Des informations peuvent être obtenues au-travers de l'analyse des planches d'essais où un enrobé avec moussage du bitume a été produit sans (FR-WATER) et avec 50% de RAP (FR-WATER+RAP). Sur la base des informations contenues au chapitre 1 et des éléments mis en évidence dans le rapport RS-6 [30] relatif aux planches d'essais, nous pouvons relever les éléments ci-dessous, valable uniquement pour le cas de la technologie tiède considérée:

- De manière générale, le liant récupéré du mélange avec fraisat d'enrobé possède une pénétration plus faible et température anneau et bille plus élevée, ce qui pouvait être attendu étant donné que le fraisat apporte un liant plus dur au mélange.
- Le mélange WATER+RAP présente un ratio ITSR plus élevé (83%) que le mélange ne contenant pas de fraisat (63%). La résistance à l'humidité est donc améliorée. L'analyse des pressions de rupture lors de l'essai ITSR indique cependant que le mélange avec RAP possède des contraintes à la rupture plus faible que le mélange FR-WATER.
- L'effet du RAP sur la résistance à l'orniérage de l'enrobé tiède, tout autre paramètre étant gardé identique, est manifeste. En effet, alors que le mélange WATER présente une profondeur d'ornière de 10% à 10'000 cycles (valeur limite normative) et environ 15% à 30'000 cycles, le même mélange mais avec 50% de RAP présente environ 5% d'ornière à 10'000 cycles soit la moitié du mélange sans fraisat, la pente de la courbe d'orniérage étant également plus faible.
- Les mesures de rigidité effectuée (essai 2PB-TR) indiquent quant à elles un module complexe légèrement plus élevé pour le mélange avec 50% de RAP soit $E^*=9'622$ MPa (15 °C, 10 Hz), le mélange FR-WATER ayant une valeur de 9'010 MPa dans les mêmes conditions. Cette faible différence peut être expliquée par les caractéristiques du liant récupéré qui est légèrement plus vieilli pour le mélange avec RAP.
- La réalisation d'essais de fatigue (2PB-TR) met en évidence une différence significative, le mélange avec fraisat d'enrobé présentant une valeur $\epsilon_6=118 \cdot 10^{-6}$ soit 20% plus élevée que le mélange sans RAP ($\epsilon_6=98 \cdot 10^{-6}$ pour FR-WATER); les valeurs de pente étant comparables.
- Les différentes mesures de portance au FWD, détaillées dans [30] ne mettent pas en évidence significative entre le mélange avec et sans RAP.
- Sur la base des différents résultats obtenus sur les planches d'essais, l'ajout de RAP à un enrobé à la mousse semble assurément bénéfique, ceci notamment pour la résistance à l'orniérage et les performances en fatigue. Ce résultat ne peut cependant être généralisé comme il le sera illustré ci-dessous.

Une analyse de littérature permet de mettre en évidence des résultats aux tendances variées lors de la combinaison entre enrobé tiède et fraisat d'enrobé. Nous pouvons illustrer ces propos par les éléments ci-dessous:

- En raison d'une maniabilité plus élevée, les enrobés tièdes peuvent contenir un taux de fraisat d'enrobé plus élevé que celui qui serait alors utilisé pour un enrobé à chaud [78, 84]. Le vieillissement plus faible lors de la fabrication d'un enrobé tiède est un autre argument permettant d'utiliser une teneur en RAP plus élevée avec des technologies tièdes. On pourra finalement indiquer que la susceptibilité potentiellement accrue à l'orniérage des enrobés tièdes pourra également se trouver quelque peu "compensée" par l'ajout de RAP.
- De manière générale, l'ajout de RAP aux enrobés tièdes améliore la résistance à l'humidité [70, 79] ainsi que la résistance mécanique (résistance en traction) [70, 83]. Ceci peut être expliqué par la plus grande rigidité d'un mélange contenant du fraisat d'enrobé comparativement à un mélange sans RAP, ceci indépendamment que le mélange soit à chaud ou tiède.
- Dans une étude sur site réalisée par [84], il a été montré que les facteurs tels que la température de fabrication et le type de matériaux affecte significativement la susceptibilité à l'orniérage de la chaussée. L'utilisation d'enrobés tièdes a tendance à augmenter les déformations permanentes, l'addition de RAP ayant un effet contraire. Cela a été démontré dans [84] où la section tiède avec 50% de RAP présente un orniérage plus faible que la section tiède de référence sans fraisat d'enrobé.

- Dans une autre étude [82], les essais d'orniérage réalisés indiquent que le mélange tiède avec RAP présente un orniérage davantage marqué que l'enrobé de référence à chaud sans RAP dans la phase initiale de chargement, alors que dans la suite des essais le mélange avec RAP démontre une meilleure résistance à l'orniérage que l'enrobé à chaud.
- Cependant, étant donné la rigidité supérieure d'un mélange contenant du fraisat d'enrobé, le risque de fissuration (comportement fragile) sera alors également plus élevé comparativement à un enrobé tiède dans RAP. Ainsi, il se peut par exemple que le comportement à basse température soit péjoré. Dans l'étude [81], les auteurs étudient deux additifs pour enrobés tièdes avec ajout de RAP. Les résultats obtenus indiquent une diminution de la résistance à la fatigue pour le mélange contenant du fraisat d'enrobé. Nous pouvons relever ici un effet de la technologie tiède utilisée, cette tendance pouvant être inverse selon le type d'enrobé tiède produit. Dans la même étude [81], les auteurs indiquent que les mélanges tièdes avec RAP présentent un vieillissement différent du mélange sans fraisat d'enrobé ayant pour conséquence une résistance plus faible à la fissuration à basse température. La même étude indique que la résistance à l'humidité après conditionnement selon des cycles gel-dégel ne semble pas être problématique dans le cas d'enrobés tièdes avec RAP.
- Un soin particulier doit être porté dans le choix du liant d'apport et la sélection des granulats, ceci afin d'assurer une résistance suffisante à la fissuration des mélanges [79]. Dans [80], les auteurs recommandent d'évaluer les performances du mélange sur le bitume récupéré notamment.
- Nous pouvons finalement relever que le processus de mélange lors de l'ajout d'une teneur "élevée" en fraisat d'enrobé (plus de 30%) est complexe et cela a été passablement discuté notamment dans les projets [85, 86].

7 Evaluation de la montée en performance des enrobés

La problématique relative à la montée en performance des enrobés tièdes est fréquemment mentionnée comme une différence potentielle entre les mélanges chauds et tièdes. Par montée en performance, il est sous-entendu les performances à court terme des enrobés (que l'on pourra comprendre comme un processus de mûrissement), et non pas la durabilité et les performances à long terme qui font l'objet d'une recherche séparée RS-4 au sein du projet PLANET.

Afin de mieux évaluer cela, des essais ont été réalisés à différents pas de temps sur une sélection représentative des enrobés considérés dans le cadre du projet PLANET. Deux études sont présentées ci-après soit avec un enrobé AC T 22S ainsi qu'avec un enrobé AC B 16S.

7.1 Etude sur enrobé AC T 22S

L'étude menée sur enrobé AC T 22S concerne les enrobés suivants:

- REF-HOT
- FR-WAX
- FR-PACK
- PA-HWAM

Afin d'évaluer la montée en performance, des essais sur liant récupéré, compression diamétrale, résistance à l'orniérage, sensibilité à l'eau et module complexe ont été réalisés à différents pas de temps. Nous proposons ci-après une analyse des résultats pour chacun des essais réalisés, les essais réalisés à "0 semaine" signifiant qu'ils ont été menés directement après la fabrication, mais tout en respectant les exigences normatives concernant les éventuels temps d'attente.

7.1.1 Essais sur liant récupéré

Des essais de pénétration à 25 °C, la détermination de la température anneau et bille (A&B) ainsi que le calcul de l'indice IP sont effectués sur les liants récupérés après 1 semaine et 12 semaines. Les résultats sont consignés dans le Tab. 30 où l'indication "brut" correspond à un liant sans additif mais non récupéré à-partir d'un enrobé pour l'essai à 0 semaine.

Tab. 30 Evaluation de la montée en performance (AC T): Essais sur liants récupérés

	REF-HOT	FR-WAX	FR-PACK	PA-HWAM
Dosage add.	-	3%	0.4%	0.4%
Temp. A&B [°C]				
Brut	51.9	79.2	51.2	52.0
Récupéré 1 sem.	56.2	76.0	55.6	53.7
Récupéré 12 sem.	58.2	76.6	57.2	55.9
Pen @ 25°C [10 ⁻¹]				
Brut	55	36	57	62
Récupéré 1 sem.	42	35	46	55
Récupéré 12 sem.	35	30	37	40
IP [-]				
Brut	-0.5	3.3	-0.6	-0.2
Récupéré 1 sem.	-0.2	2.8	-0.1	-0.1
Récupéré 12 sem.	-0.2	2.6	-0.2	-0.4

Nous pouvons effectuer les commentaires suivants:

- Comme discuté précédemment lors des analyses de viscosité, l'effet de la cire est clairement identifiable car elle permet d'augmenter la température A&B du liant brut non-additivé (REF-HOT) de plus de 27 °C, cette augmentation étant de 18.4 °C sur le liant récupéré après 12 semaines. L'agent tensio-actif (FR-PACK) ne modifie pas la température A&B par rapport au cas de référence alors que le fluxant végétal (PA-HWAM) la diminue légèrement (2.3 °C sur liant récupéré après 12 semaines).
- A l'exception du liant avec cire, la température anneau et bille des différents liants augmente avec le vieillissement. Cette augmentation entre le liant brut et le liant récupéré après 12 semaines est la plus élevée pour les liants REF-HOT et FR-PACK, avec une augmentation de 6 °C environ. Le liant PA-HWAM moins vieilli lors de la fabrication, présente quant à lui une augmentation plus faible de la température A&B (3.9 °C). Le cas du liant avec cire (FR-WAX) est différent et on observe une légère diminution de la température anneau et bille par rapport au liant brut (-2.6 °C). On pourrait supposer que cela traduit une dissipation de l'effet de la cire au cours du temps. Cependant, la température A&B des liants FR-WAX testés se situe aux alentours de 80 °C, ce qui correspond à l'amorce du processus de fusion de la cire. Pour un essai réalisé avec de l'eau, la répétabilité (bitume non modifié) selon la norme EN 1427 [20] est de 1 °C et la reproductibilité de 2 °C. De plus, la réalisation de l'essai sur liants FR-WAX se situe à la limite du domaine d'utilisation de l'eau (80 °C), ce qui peut légèrement biaiser les résultats. Compte tenu de ces informations, nous ne pouvons juger l'évolution de la température A&B du liant avec cire comme significative.
- Les liants REF-HOT et FR-PACK présentent globalement un comportement comparable, l'effet tensio-actif (FR-PACK) n'agissant pas sur le liant mais à l'interface liant-granulat. Le liant PA-HWAM présente une pénétration plus importante en raison de l'utilisation de fluxant et du vieillissement plus faible du liant. La pénétration est également modifiée par l'ajout de cire ; le liant brut FR-WAX présente une pénétration de 19 [10⁻¹ mm] plus faible que le liant brut de référence. La différence est plus faible sur le liant récupéré après 12 semaines, 5 [10⁻¹ mm]. Pour l'ensemble des liants testés, la pénétration à 25 °C diminue avec le vieillissement. La diminution de pénétration entre le liant récupéré après 12 semaines et le liant brut est de 20 [10⁻¹ mm] pour les liants REF-HOT et FR-PACK. Le liant PA-HWAM indique une diminution de pénétration du même ordre de grandeur, 22 [10⁻¹ mm], alors que le liant avec ajout de cire présente une diminution de pénétration beaucoup plus faible de 6 [10⁻¹ mm]. La cire « rigidifie » le liant à la température d'essai.
- L'importance du vieillissement entre le liant brut et la récupération après 1 semaine, et le mûrissement entre les récupérations après 1 et 12 semaines, est variable selon les procédés testés.
- L'indice de pénétration (IP) des liants REF-HOT, FR-PACK et PA-HWAM est faiblement négatif. Ceci caractérise des liants légèrement susceptibles à la

température. L'indice IP passe de -0.5 pour le bitume brut de référence à +3.3 pour le liant brut modifié avec cire (FR-WAX). Ceci caractérise une diminution significative de la susceptibilité thermique par rapport aux liants dont l'IP est négatif. Il s'agit de l'effet souhaité de la cire. Une augmentation de la teneur en cire augmenterait également l'indice IP. Rappelons ici que l'indice IP correspond à des conditions de températures précises (essai de pénétration à 25 °C) et il ne peut être généralisé pour toute la gamme de températures.

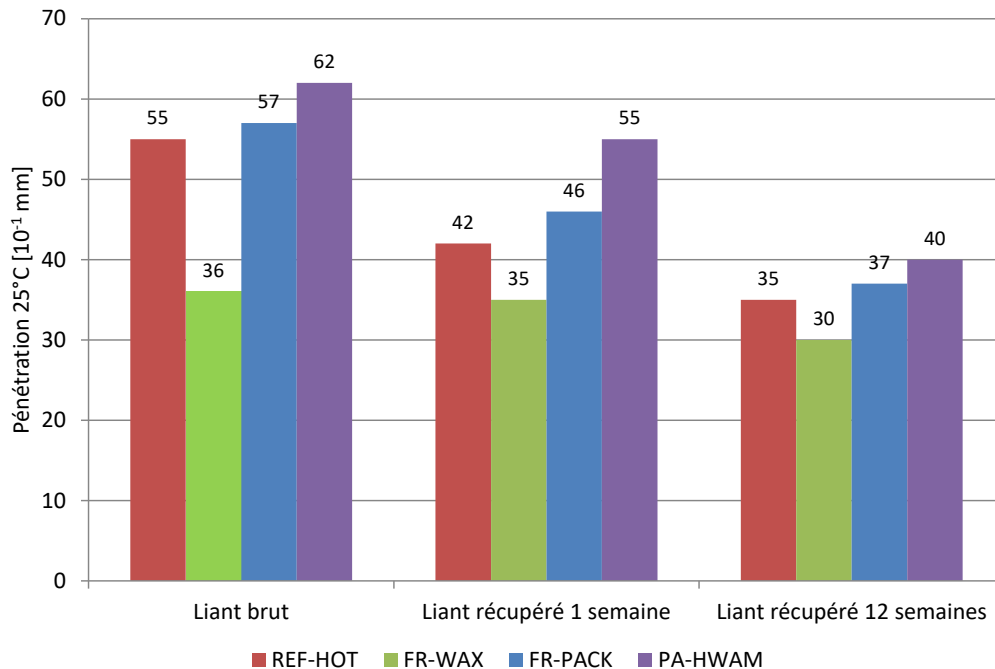


Fig. 39 Evaluation de la montée en performance (AC T): Essai de pénétration à 25 °C

7.1.2 Essais de compression diamétrale

Une analyse de la montée en performance est ensuite réalisée par la réalisation d'essais de compression diamétrale à trois températures soit – 10 °C, 15 °C et 40 °C. Des essais ont ainsi été réalisés après 0, 1, 2, 4 et 12 semaines de conditionnement. Les conditions d'essais sont celles préalablement décrites au chapitre 4.6; chaque essai correspondant à la moyenne de trois échantillons Marshall 50/50.

Une analyse préliminaire de la teneur en vides des différents échantillons a été menée. Les différents échantillons présentent une gamme de compacité comparable, la teneur en vides étant de 6.5 % pour l'enrobé REF-HOT, 6.6% pour FR-WAX, 6.8% pour FR-PACK et 7.2% pour l'enrobé PA-HWAM. L'écart-type varie entre 0.3 et 0.4% selon la famille d'enrobé testée.

La variabilité des différents échantillons testés a également été calculée, la différence minimale et maximale par rapport à la contrainte moyenne mesurée étant calculée pour chaque domaine de températures (Tab. 31). Nous pouvons observer que la variabilité est plus importante à basse température où le comportement est fragile et la rupture dépend alors considérablement de l'orientation de l'éprouvette sous sollicitation. Par contre, à 40 °C, la variabilité est 40% plus faible et la précision également améliorée. Ces tendances correspondent aux attentes ; la répétabilité et la précision sont jugées satisfaisantes.

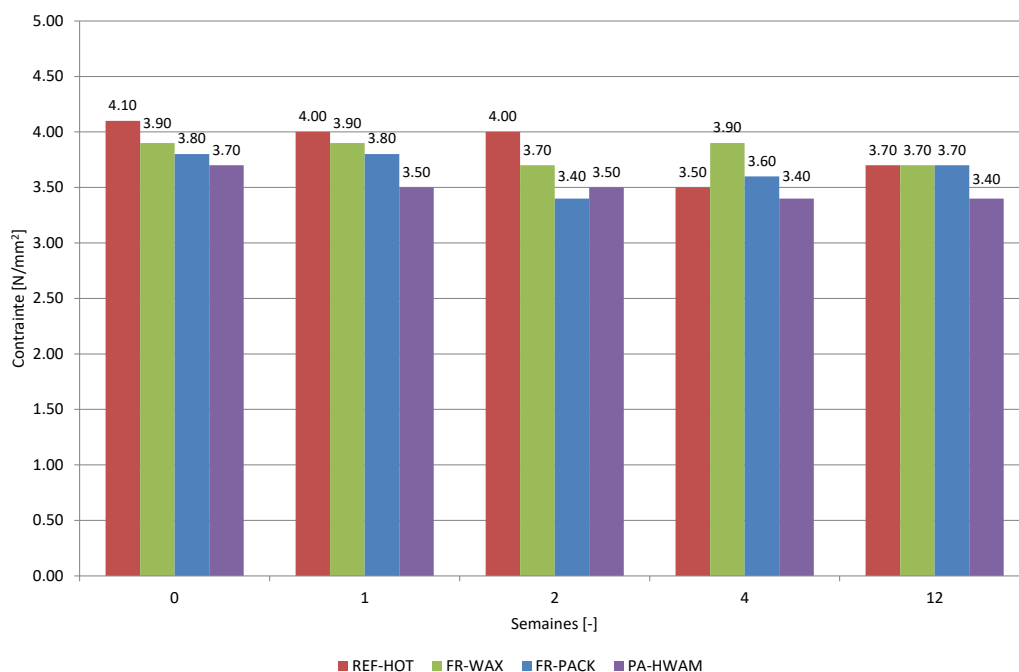
Tab. 31 Evaluation de la montée en performance (AC T): Variabilité des essais de compression diamétrale par rapport à la valeur moyenne

	$\Delta_{\max}$ [N/mm ²]	$\Delta_{\max}$ [%]	$\Delta_{\min}$ [N/mm ²]	$\Delta_{\min}$ [%]
-10 °C	0.34	9.5	-0.35	-9.7
15 °C	0.15	8.4	-0.16	9.1
40 °C	0.02	5.9	-0.02	6.1

Un comparatif des contraintes à la rupture est proposé dans la figure 40 (-10 °C), la figure 41 (15 °C) et la figure 42 (40°C).

A la température de -10 °C, l'enrobé REF-HOT apparaît comme étant globalement le plus performant, suivi de très près par les enrobés FR-WAX et FR-PACK. La mesure REF-HOT à 4 semaines, légèrement moins bonne, correspond à des essais pour lesquels un problème de compactage des échantillons Marshall a été identifié *a posteriori*. A basse température, l'enrobé avec cire peut présenter une rupture « violente » lors de l'essai. L'enrobé PA-HWAM apparaît comme le moins performant à cette température. Pour une même courbe granulométrique, le comportement de l'enrobé à basse température est principalement lié à la compacité de l'éprouvette, le liant jouant un rôle moins important. Le comportement est alors fragile. La différence maximale entre les enrobés REF-HOT et PA-HWAM est de 12.5% (essais à 1 et 2 semaines).

Cette tendance relative entre les différents enrobés est confirmée par la mesure à 40 °C, beaucoup plus stable, pour laquelle l'enrobé de référence apparaît comme le plus performant. La différence avec l'enrobé FR-WAX est cependant très faible. Les mesures de viscosité ont montré que le gain lié à l'utilisation de cire est moins important à la température de 40 °C que dans le domaine de températures allant de 50 °C à 70 °C où la cire est particulièrement active afin de favoriser la résistance à l'orniérage. L'enrobé PA-HWAM est le moins performant à cette température, la diminution de contrainte maximale à 0 semaine est de 41% par rapport à la référence. Cette différence est maintenue avec le temps. Comparativement aux résultats à -10 °C et 15 °C, les différences relatives sont plus élevées à haute température où le comportement de l'enrobé est davantage ductile et le liant joue donc un rôle important.

**Fig. 40** Evaluation de la montée en performance (AC T): Essai de compression diamétrale (-10 °C)

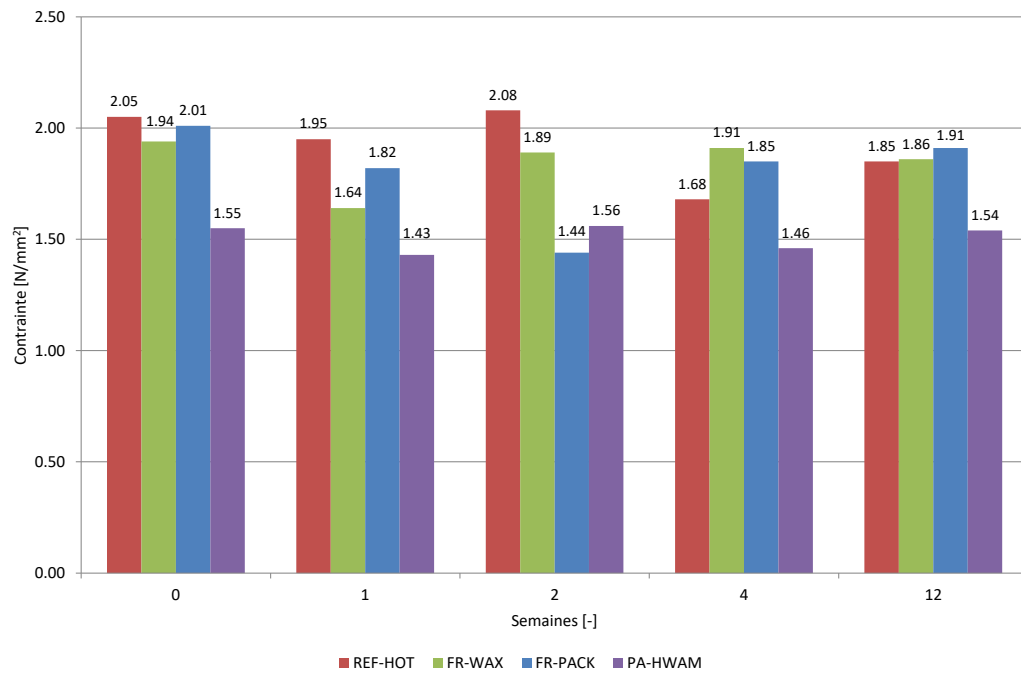


Fig. 41 Evaluation de la montée en performance (AC T): Essai de compression diamétrale (15 °C)

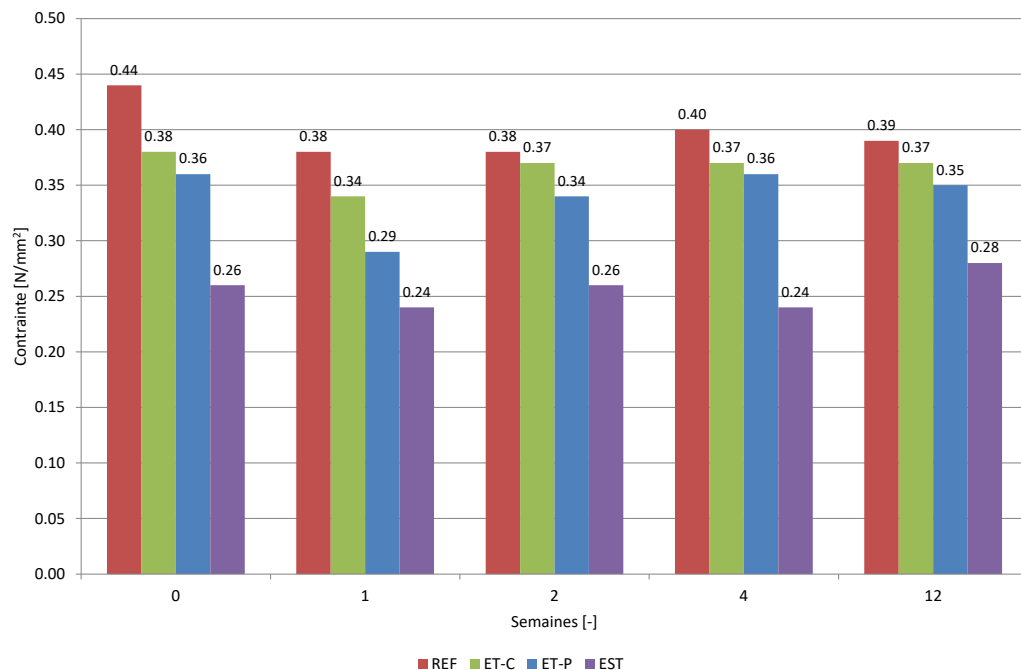


Fig. 42 Evaluation de la montée en performance (AC T): Essai de compression diamétrale (40 °C)

Une analyse complémentaire des déformations à la rupture des échantillons met en évidence les éléments suivants:

- La déformation à la rupture est globalement deux fois plus importante à 40 °C que à -10 °C.
- Aux différentes températures d'essais, l'enrobé PA-HWAM présente une déformation à la rupture plus élevée que les autres enrobés analysés. Son comportement est plus ductile.
- Dans le domaine des basses températures, malgré le rôle prépondérant du squelette granulaire et de la compacité de l'échantillon, les différences de déformation à la

rupture entre enrobés ne sont pas négligeables (maximum de 27% entre PA-HWAM et REF-HOT, à 12 semaines).

- Le mécanisme est différent à température élevée (40 °C) où l'enrobé FR-WAX présente la déformation à la rupture la plus faible. Ceci est compréhensible étant donné l'augmentation de la rigidité liée à l'ajout de cire rendant ainsi le matériau davantage fragile. Dans ce domaine de température, la différence de déformation à la rupture entre l'enrobé FR-WAX et l'enrobé PA-HWAM atteint 44% (0 semaine).

L'analyse des essais de compression diamétrale à différents pas de temps de permet pas de mettre en évidence une tendance univoque de montée en performance des mélanges. Pour les différents enrobés, le pic de performance se situe globalement dans les deux premières semaines. Par la suite, les performances se stabilisent ou diminuent très légèrement. La réalisation d'un test statistique (test de Student, T-Test) indique également que les échantillons testés à 1 et 12 semaines ne sont pas statistiquement différents et par conséquent, aucun processus significatif de montée en performance n'a été statistiquement mesuré.

7.1.3 Résistance aux déformations permanentes

La résistance à l'orniérage des enrobés a été évaluée par la réalisation d'essais au simulateur de trafic après 0 et 12 semaines. L'essai est réalisé à 60 °C. Les principaux résultats sont consignés dans le Tab. 32 où nous pouvons observer que la gamme de vides des différents échantillons testés est comparable.

Tab. 32 *Evaluation de la montée en performance (AC T): Résistance à l'orniérage des enrobés*

	REF-HOT	FR-WAX	FR-PACK	PA-HWAM
Dosage add.	-	3%	0.4%	0.4%
Cure= 0 semaine				
Vides [%]	6.0	6.1	5.8	5.8
Pente [-]	0.219	0.231	0.205	0.254
Ornière calc. à 10'000 cy [%]	4.5	3.9	4.6	5.0
Ornière calc. à 30'000 cy [%]	5.6	5.0	5.8	6.7
Ornière mes. à 10'000 cy [%]	4.4	4.0	4.6	5.2
Ornière mes. à 30'000 cy [%]	5.5	5.0	5.5	6.2
Cure=12 semaines				
Vides [%]	6.1	6.5	7.1	7.0
Pente [-]	0.175	0.151	0.204	0.209
Ornière calc. à 10'000 cy [%]	4.5	3.9	4.5	4.6
Ornière calc. à 30'000 cy [%]	5.5	4.7	5.6	5.8
Ornière mes. à 10'000 cy [%]	4.5	3.9	4.4	4.6
Ornière mes. à 30'000 cy [%]	5.2	4.6	5.2	5.5

Comme illustré préalablement par les essais rhéologiques sur liants et mastics, la cire est particulièrement active pour les hautes températures de service où la chaussée est sensible à l'orniérage. Ainsi, l'enrobé FR-WAX apparaît comme le plus performant à l'orniérage des matériaux testés, avec 0.6% (0 semaine) respectivement 0.8% (12 semaines) d'ornières en moins que l'enrobé de référence après 30'000 cycles. L'enrobé PA-PACK présente à-nouveau un comportement très proche de la référence, la différence entre ces deux enrobés étant très faible. En raison notamment du vieillissement plus faible de son liant, l'enrobé PA-HWAM est le moins résistant à l'orniérage; la différence à 30'000 cycles (0 semaine) atteint 1.7% par rapport à l'enrobé FR-WAX. Nous pouvons également relever la bonne adéquation entre les performances à l'orniérage et les caractéristiques des liants récupérés (pen, A&B). Le liant FR-WAX possède une température A&B située entre 76 et 79 °C soit supérieure à la température de réalisation de l'essai et supérieure à celle des autres liants testés.

Finalement, les différences observées entre les enrobés testés restent malgré tout relativement faibles ; la bonne qualité des granulats ((surtout la fraction 16/22) permettant de garantir des performances élevées des mélanges à l'orniérage.

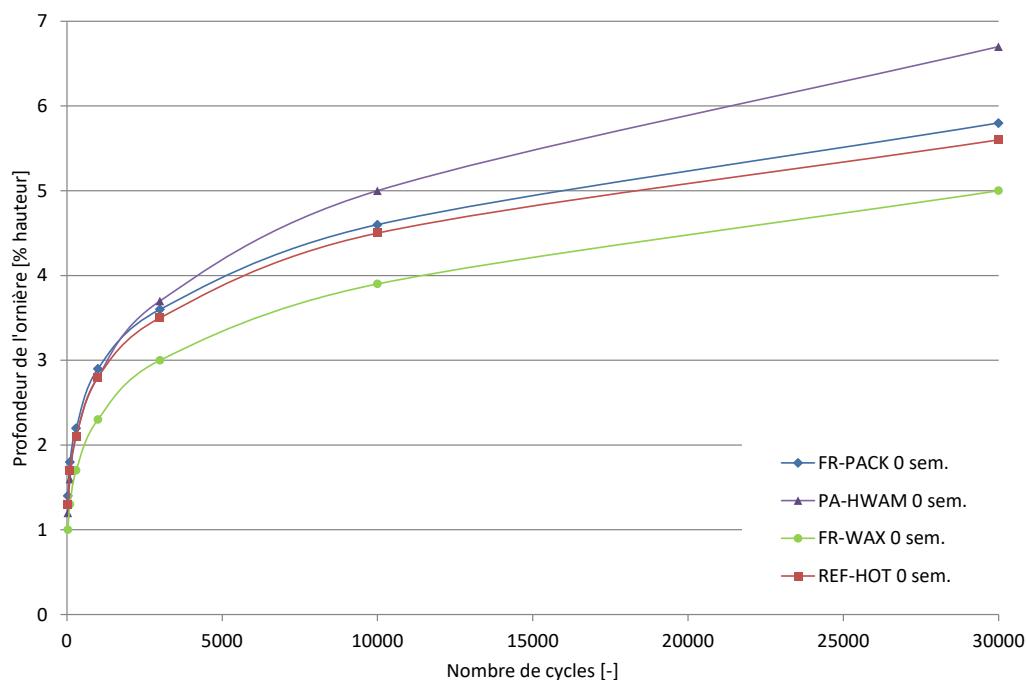


Fig. 43 Evaluation de la montée en performance (AC T): Evolution de la profondeur d'ornièr à 0 semaines

Les mesures à 0 et 12 semaines mettent en évidence le vieillissement de l'enrobé avec une profondeur d'ornièr diminuée lors de l'essai à 12 semaines (Figure 44). De même, la pente (représentation de la profondeur d'ornièr en fonction du nombre de cycles en échelle logarithmique) diminue avec le vieillissement de l'enrobé.

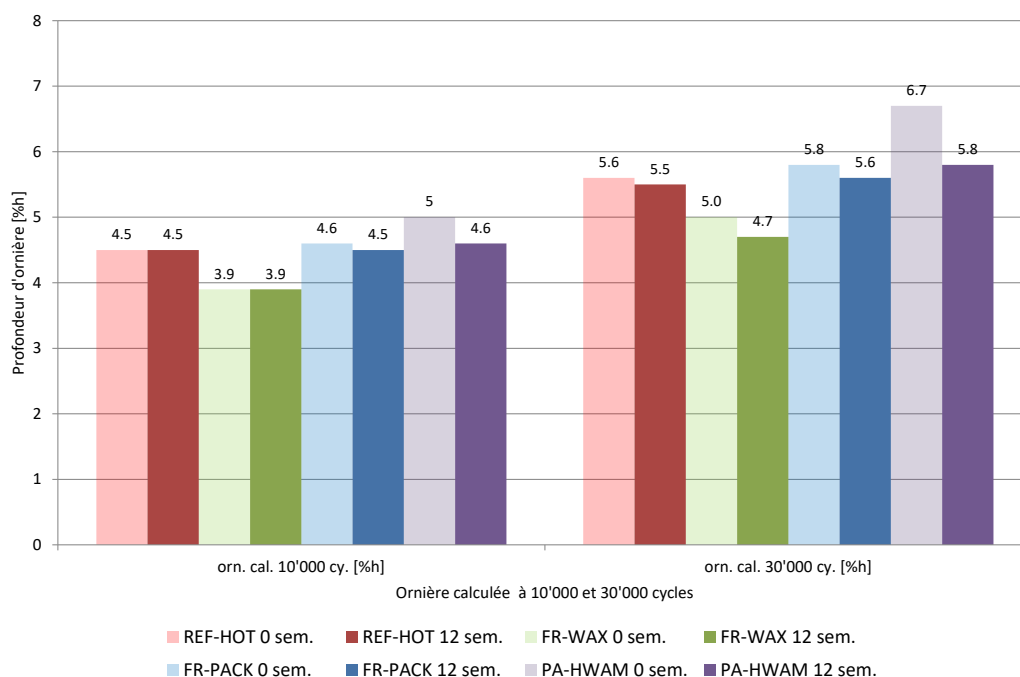


Fig. 44 Evaluation de la montée en performance (AC T): Evolution de la profondeur d'ornièr entre 0 et 12 semaines

Il est finalement utile de mentionner que l'ensemble des enrobés testés présentent une très bonne résistance à l'orniérage, la profondeur d'ornière à 10'000 cycles allant de 3.9% (FR-WAX, 0 et 12 semaines) à 5% (PA-HWAM, 0 semaine). La norme SN 640 431-1-NA [1] indique en effet une exigence de profondeur d'ornière à 10'000 cycles de $\leq 10\%$ pour les enrobés testés ici. Les hautes performances des enrobés peuvent être attribuées notamment à la gamme de teneur en vides qui permet un bon blocage des granulats.

7.1.4 Sensibilité à l'eau

Des essais ITSR de sensibilité à l'eau ont été réalisés à différents pas de temps, ceci également afin d'identifier un éventuel processus de cure (montée en performance) des enrobés. Les résultats sont présentés dans le Tab. 33 où nous pouvons indiquer que les mesures de vides ont été effectuées de manière hydrostatique.

Tab. 33 Evaluation de la montée en performance (AC T): Sensibilité à l'eau des enrobés

	REF-HOT	FR-WAX	FR-PACK	PA-HWAM
Dosage add.	-	3%	0.4%	0.4%
Cure= 0 semaine				
Vides [%]	9.1	8.8	11.4	8.2
Ratio ITSR	80	92	82	81
ITSw [kN/m2]	745	666	756	619
ITSd [kN/m2]	929	724	923	765
Cure= 1 semaine				
Vides [%]	9.4	9.4	9.8	9.6
Ratio ITSR	88	88	83	73
ITSw [kN/m2]	815	850	706	571
ITSd [kN/m2]	930	963	854	781
Cure= 2 semaines				
Vides [%]	8.1	9.1	9.4	9.2
Ratio ITSR	90	87	96	78
ITSw [kN/m2]	999	922	953	608
ITSd [kN/m2]	1109	1057	994	778
Cure= 4 semaines				
Vides [%]	8.5	9.9	9.6	9.5
Ratio ITSR	86	100	84	82
ITSw [kN/m2]	881	900	791	635
ITSd [kN/m2]	1022	903	940	776
Cure= 12 semaines				
Vides [%]	9.3	9.5	9.8	8.6
Ratio ITSR	87	87	90	65
ITSw [kN/m2]	804	824	979	580
ITSd [kN/m2]	925	944	1085	891

Nous pouvons effectuer les commentaires suivants:

- De manière générale, le ratio ITSR des enrobés REF-HOT, FR-WAX et FR-PACK est supérieur à 80%, ce qui traduit un bon comportement des mélanges. Prenant en considération la répétabilité de l'essai discutée précédemment, nous pouvons estimer que ces trois enrobés présentent un comportement comparable à l'exception de la meures FR-WAX après 4 semaines qui est plus élevée (ratio ITSR=100%).
- L'enrobé PA-HWAM présente les performances les moins élevées avec un ratio ITSR inférieur à 80% après 1, 2 et 12 semaines (82% à 4 semaines).
- Le calcul direct du ratio "masque" quelque peu l'ordre de grandeur des pressions appliquées lors de l'essai, pressions qui traduisent également la cohésion de l'échantillon. L'analyse des pressions appliquées lors de l'essai confirme le comportement comparable entre les enrobés REF-HOT, FR-WAX et FR-PACK. Les

performances moins élevées de l'enrobé PA-HWAM sont également confirmées par des pressions à la rupture moins élevées que pour les autres matériaux testés. Cela peut être expliqué notamment par la différence de vieillissement des liants.

- Dans l'analyse des pressions, une montée en performance au cours des deux premières semaines est observée pour les enrobés REF-HOT, FR-PACK et FR-WAX. Cette évolution de la résistance est moins visible dans l'analyse des ratios ITSR. Elle doit cependant être considérée avec précaution compte tenu de la répétabilité de l'essai.
- A l'exception du mélange PA-HWAM testé à 12 semaines, les différents enrobés respectent l'exigence normative relative au ratio ITSR (> 70%), mais il est utile de relever que le seul respect de cette exigence normative ne traduit pas un comportement comparable de l'ensemble des enrobés testés.

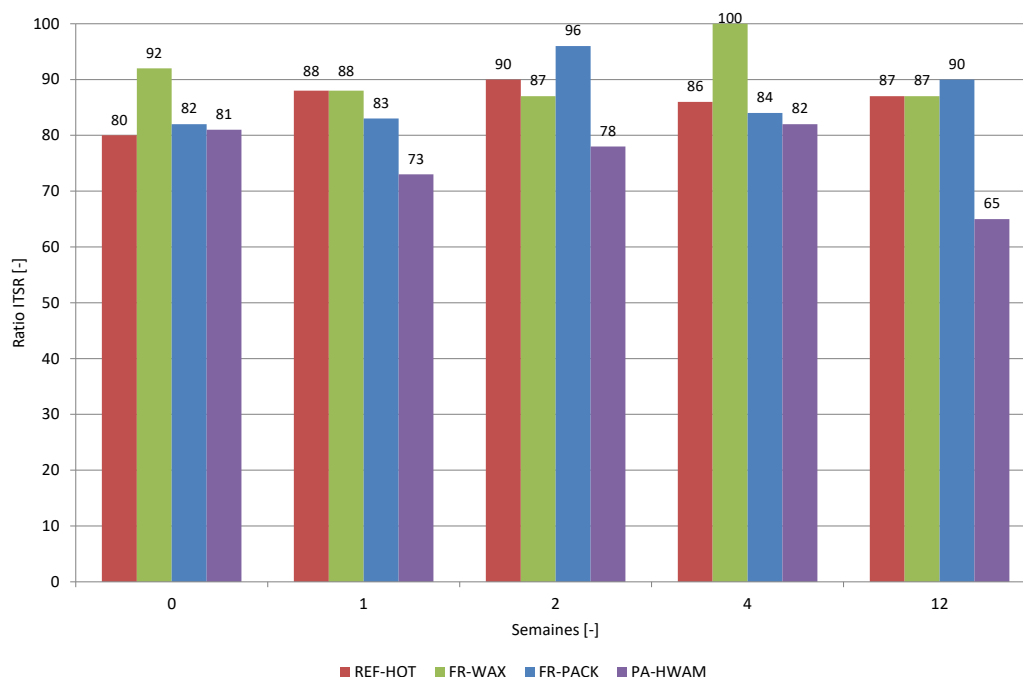


Fig. 45 Evaluation de la montée en performance (AC T): Evolution de la sensibilité à l'eau (ratio ITSR)

7.1.5 Module complexe

Dans le cas d'un enrobé bitumineux, le degré de cohésion du mélange varie en fonction de la température et de la fréquence de chargement. Afin de connaître l'évolution de cette cohésion, des essais de module complexe ont été réalisés sur éprouvettes trapézoïdales (2PB-TR), après 2 et 12 semaines. Les essais ont été réalisés dans une gamme de température située entre -10 °C et 30-35 °C (selon angle de déphasage), et pour des fréquences allant de 1 à 40 Hz. La courbe maîtresse est déterminée à la température de référence T_R de 15 °C, selon la loi d'Arrhénius et elle est représentée dans la figure 46 pour les essais à 2 semaines et la figure 47 pour les essais à 12 semaines; les teneurs en vides moyenne des éprouvettes testées étant également indiquées dans les figures.

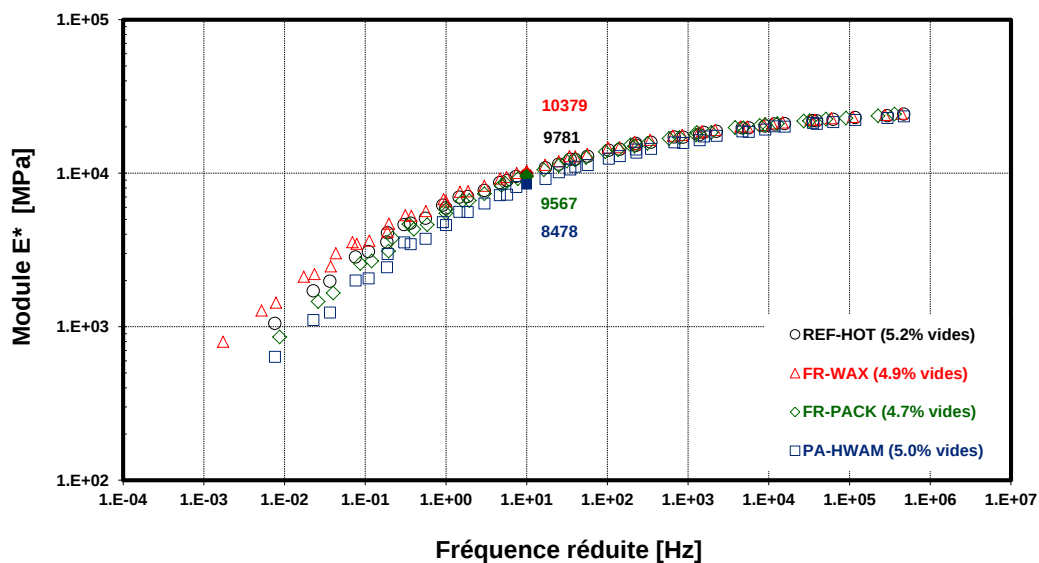


Fig. 46 Evaluation de la montée en performance (AC T): Courbe maîtresse des enrobés après 2 semaines ($T_{ref}=15\text{ °C}$)

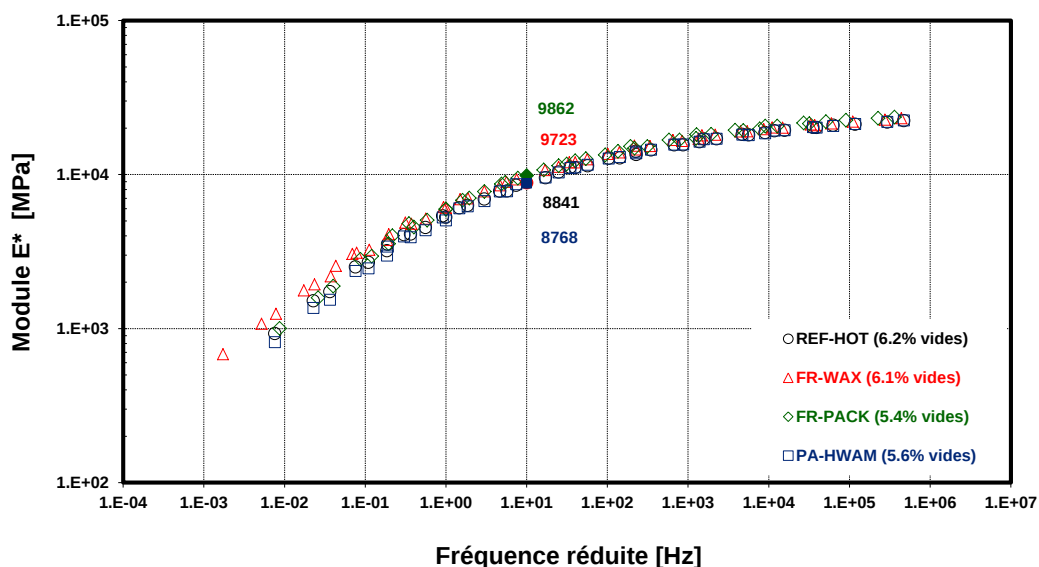


Fig. 47 Evaluation de la montée en performance (AC T): Courbe maîtresse des enrobés après 12 semaines ($T_{ref}=15\text{ °C}$)

L'analyse des résultats d'essais de module complexe amène les commentaires suivants:

- La gamme de vides est comparable pour les différents enrobés testés à un même pas de temps. La compacité légèrement inférieure des échantillons testés à 12 semaines ne doit selon toute vraisemblance pas avoir d'incidence significative sur le comportement des enrobés.
- Pour chaque mélange et pas de temps, les résultats indiqués sont la moyenne de 4 échantillons. L'écart-type diminue de manière générale avec l'augmentation de la température d'essai. Dans les conditions de référence (15 °C, 10 Hz), l'écart-type est de 370 MPa pour l'enrobé de référence, 560 MPa pour l'enrobé FR-WAX, 200 MPa pour l'enrobé FR-PACK et 300 MPa pour l'enrobé PA-HWAM. Ainsi, des différences de module inférieures à 400 MPa ne peuvent être assimilées à des différences significatives de comportement entre matériaux.
- Après 2 semaines, l'enrobé avec cire FR-WAX présente le module complexe le plus élevé. Cette différence est d'autant plus importante dans le domaine des hautes températures (partie gauche de la courbe maîtresse). On observe une superposition

des différentes courbes maîtresses à basses températures, le squelette granulaire et la compacité étant principalement responsables du comportement mécanique des matériaux dans ce domaine.

A la température et fréquence de référence (15 °C, 10 Hz), l'enrobé FR-WAX a un module 600 MPa plus élevé que la référence. L'enrobé FR-PACK est par contre très proche de la référence, la différence étant d'environ 200 MPa. L'enrobé PA-HWAM présente un module complexe sensiblement plus faible, sa valeur étant 1900 MPa inférieure au module complexe de l'enrobé avec ajout de cire.

- Les essais réalisés après 12 semaines confirment module complexe plus élevé de l'enrobé FR-WAX dans le domaine des hautes températures. De manière générale, la tendance et les différences entre les courbes maîtresses est par contre resserrée, certainement en raison du mûrissement de l'enrobé. Dans les conditions de référence (15 °C, 10 Hz), l'enrobé FR-PACK possède le module complexe le plus élevé, la différence avec l'enrobé FR-WAX n'est cependant pas significative (<140 MPa). L'enrobé de référence présente un module complexe environ 1'000 MPa plus faible que le mélange FR-PACK, l'enrobé PA-HWAM présentant la valeur de module complexe la moins élevée tout comme lors des essais après 2 semaines.
- Les enrobés FR-PACK et PA-HWAM démontrent une augmentation de module complexe légèrement inférieure à 300 MPa entre les essais à 2 et 12 semaines. Pour les enrobés FR-WAX et REF-HOT les mesures fournissent par contre une diminution du module complexe de respectivement 650 MPa et 940 MPa. Cette évolution des modules complexe entre les essais à 2 et 12 semaines peut être en partie liée à la teneur en vides. On pourrait également se demander si cette évolution ne traduit pas une atténuation de l'effet de la cire au cours du temps cette hypothèse nécessitant le cas échéant de plus amples investigations. Les essais de module ne mettent finalement pas en évidence de montée en performance significative des enrobés.
- L'analyse des angles de déphasage indique que l'enrobé avec cire présente généralement un angle de déphasage plus faible que les autres matériaux, sa composante visqueuse étant moins importante. Cette diminution de l'angle de déphasage lors de l'ajout de cire avait également été observée lors des essais sur mastics et liants discutés précédemment.

7.2 Etude sur enrobé AC B 16S

Une seconde analyse de la montée en performance des enrobés tièdes a été effectuée pour des enrobés AC B 16S produits selon la recette de référence. Les enrobés testés sont les suivants:

- Enrobé avec moussage du bitume (zéolithe) FR-ZEO
- Enrobé avec additif chimique PA-PACK

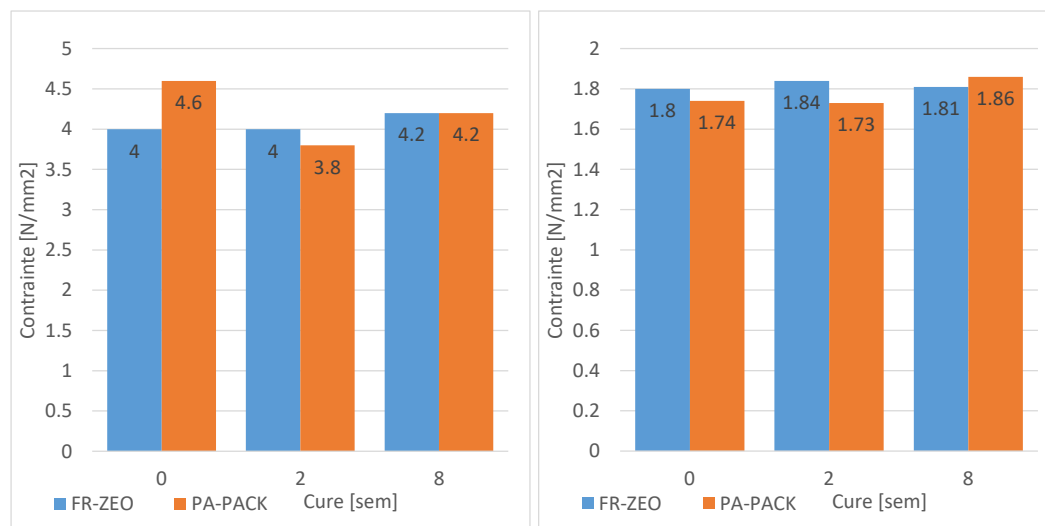
Afin d'évaluer la montée en performance, des essais de sensibilité à l'eau ITSR, essai Marshall et essais de compression diamétrale (-10 °C, 15 °C, 40 °C) ont été réalisés après 0, 2 et 8 semaines.

Les résultats de compression diamétrale sont détaillés dans le Tab. 34, une représentation de la contrainte à la rupture aux différents pas de temps étant proposé dans la figure 48 (-10 °C et 15 °C) et la figure 49 (40 °C). Nous pouvons observer:

- De manière générale, la gamme de teneur en vides des différents échantillons testés est comparable. Les valeurs de variabilité sont également an adéquation avec ce qui avait été précédemment mesuré les sur enrobés AC T 22S.
- Compte tenu de la variabilité, les enrobés FR-ZEO et PA-PACK présentent des performances comparables dans les trois domaines de températures testées; l'enrobé avec ajout de zéolithe semble cependant légèrement plus performant dans le domaine des températures élevées (40 °C).
- L'essai de compression diamétrale ne met pas en évidence de montée en performance des enrobés au cours des deux premiers mois; les performances restent globalement stables. Ce résultat est par ailleurs confirmé par la réalisation d'un test statistique de Student.

Tab. 34 Evaluation de la montée en performance (AC B): Essai ITS

-10°C	Vides [%]	Contrainte [N/mm ²]	Δ max [N/mm ²]	Δ max [%]	Δ min [N/mm ²]	Δ min [%]
FR-ZEO						
0 sem	6.0	4.00	0.40	10	-0.20	-5
2 sem	5.9	4.00	0.30	8	-0.20	-5
8 sem	6.1	4.20	0.20	5	-0.60	-14
PA-PACK						
0 sem	5.5	4.60	0.10	2	-0.20	-4
2 sem	5.5	3.80	0.20	5	-0.20	-5
8 sem	5.4	4.20	0.20	5	-0.40	-10
15°C						
FR-ZEO						
0 sem	6.0	1.80	0.15	8	-0.16	-9
2 sem	5.9	1.84	0.17	9	-0.14	-8
8 sem	6.1	1.81	0.09	5	-0.07	-4
PA-PACK						
0 sem	5.1	1.74	0.12	7	-0.10	-6
2 sem	5.5	1.73	0.24	14	-0.26	-15
8 sem	5.5	1.86	0.13	7	-0.12	-6
40 °C						
FR-ZEO						
0 sem	6.0	0.36	0.01	3	-0.01	-3
2 sem	5.9	0.36	0.01	3	-0.01	-3
8 sem	6.2	0.35	0.01	3	-0.01	-3
PA-PACK						
0 sem	5.1	0.34	0.02	6	-0.03	-9
2 sem	5.5	0.30	0.01	3	-0.01	-3
8 sem	5.7	0.33	0.01	3	-0.01	-3

**Fig. 48** Evaluation de la montée en performance (AC B): Résultats d'essais ITS, -10°C (gauche), 15°C (droite)

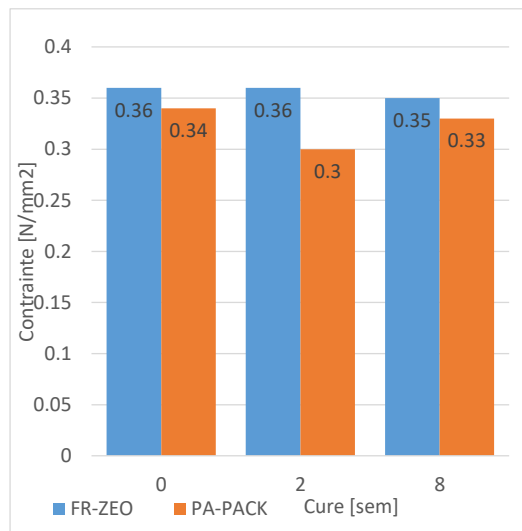


Fig. 49 Evaluation de la montée en performance (AC B):Résultats d'essais ITS, 40 °C

Les résultats de l'essai ITSR sont présentés dans la figure 50 (ratio ITSR) et la figure 51 (pressions à la rupture. Pour rappel, l'essai ITSR est réalisé sur des échantillons Marshall compactés avec 25 coups sur chaque face (50 coups sur chaque face pour la traction indirecte); la teneur en vides des échantillons étant située entre 8.5% (8 semaines) et 8.8% (0 semaine) pour l'enrobé FR-ZEO et entre 7.5% (2 semaines) et 8.1% (0 semaine) pour l'enrobé PA-PACK.

Nous pouvons commenter:

- L'enrobé avec ajout de zéolithe (FR-ZEO) présente des performances sensiblement plus faibles pour la résistance à l'humidité que l'enrobé PA-PACK avec additif chimique. Les performances de l'enrobé FR-ZEO sont très faibles et bien en-deçà des limites normatives suisses (ITSR $\geq$ 70%). L'enrobé PA-PACK présente certes un ratio ITSR plus élevé, mais compte tenu de l'expérience avec ce type d'essai nous pouvons évaluer son comportement comme moyen.
- L'analyse des pressions à la rupture montre très clairement la très faible résistance mécanique des échantillons FR-ZEO conditionnés dans l'eau. Les pressions à la rupture de ces échantillons sont plus proches de celles généralement obtenues pour des enrobés à froid que des enrobés à chaud. Par contre, les échantillons FR-ZEO conditionnés dans l'air à 22 °C présentent une résistance mécanique satisfaisante.
- Sur la base des résultats ITSR, nous pouvons supposer un très léger processus de montée en performance pour l'enrobé PA-PACK, ce résultats étant à pondérer étant donné la variabilité des résultats de l'essai ITSR répétabilité d'environ 15% et reproductibilité de 23% selon normalisation). L'enrobé avec ajout de zéolithe ne semble pas montrer de processus de montée en performance particulier.

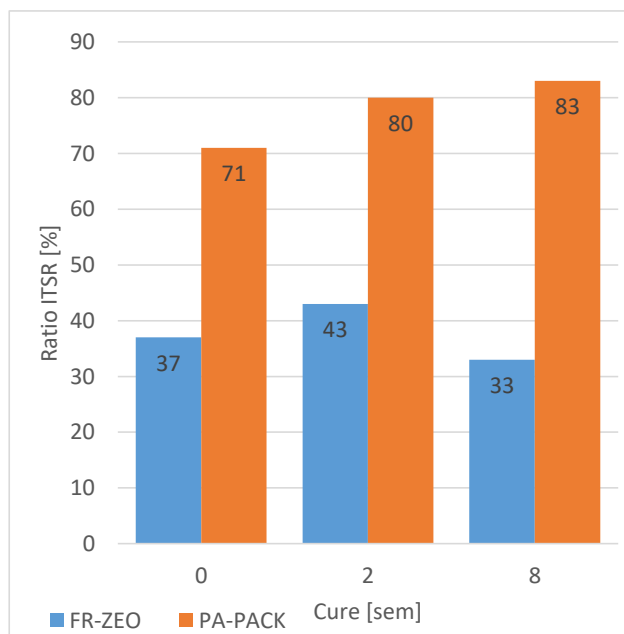


Fig. 50 Evaluation de la montée en performance (AC B): Essai ITSR - Ratio

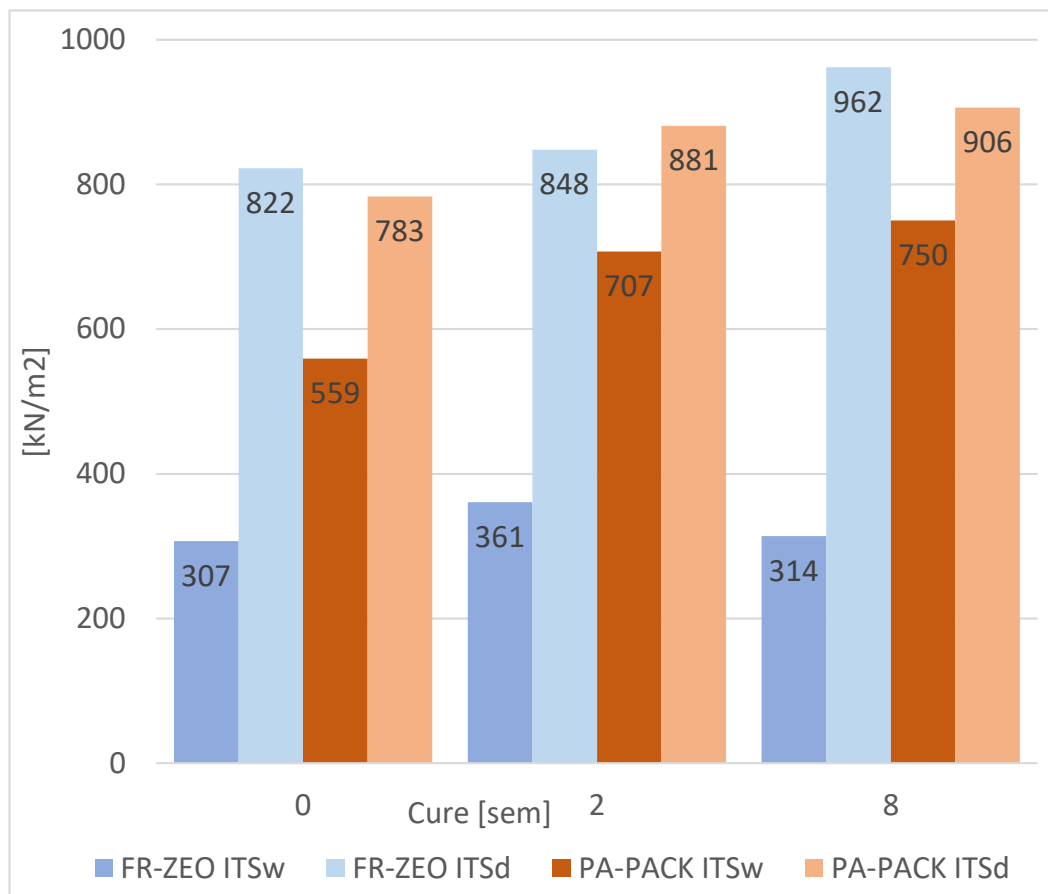


Fig. 51 Evaluation de la montée en performance (AC B): Essai ITSR – Pressions de rupture (w=échantillons humides, d=échantillons secs)

Les résultats de l'essai Marshall sont finalement présentés dans la figure 52 pour la stabilité et la figure 53 pour les résultats de fluage; les échantillons étant compactés avec 50 coups sur chaque face. Une synthèse des résultats est également proposée dans le Tab. 35.

La normalisation SN ne définit pas d'exigences relatives à l'essai Marshall des enrobés AC B 16S, la résistance à l'orniérage étant à vérifier.

Les deux enrobés tièdes testés présentent une stabilité comparable que l'on peut juger comme élevée; les valeurs étant stables aux trois pas de temps (pas de processus de montée en performance).

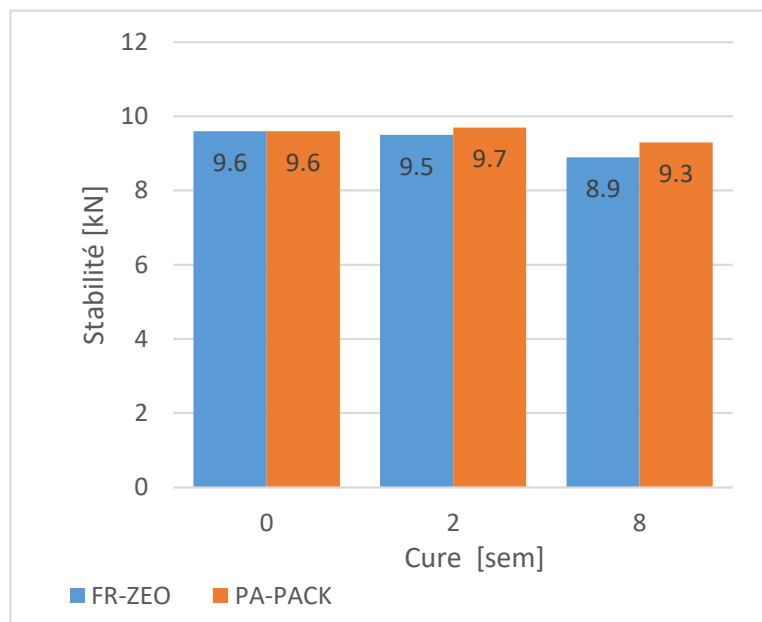


Fig. 52 Evaluation de la montée en performance (AC B): Essai Marshall – Stabilité

Les valeurs de fluage Marshall sont légèrement supérieures dans le cas de l'enrobé avec additif chimique PA-PACK. Sachant que cet additif est également utilisé comme dope d'adhésivité dans le cas d'enrobés à chaud, nous aurions alors pu suspecter une valeur de fluage plus faible que pour l'enrobé FR-ZEO. De plus amples considérations ne peuvent être faites sans analyses spécifiques des liants récupérés. Relevons encore que les résultats de fluage ne mettent également pas en évidence de processus spécifique de montée en performance.

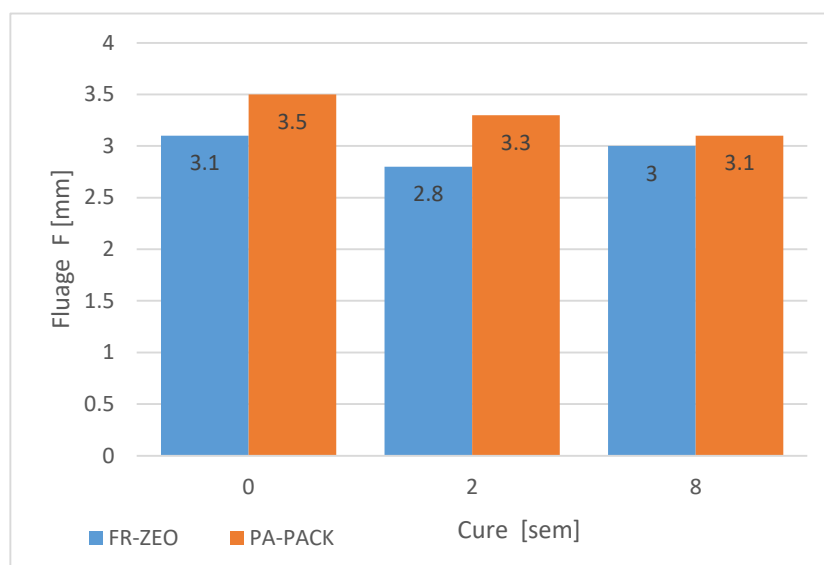


Fig. 53 Evaluation de la montée en performance (AC B): Essai Marshall – Fluage

Tab. 35 *Evaluation de la montée en performance (AC B): Essai Marshall*

	Cure [sem]	Vides [%]	Stabilité Sm [kN]	Fluage F [mm]	Fluage Ft [mm]	Quotient S/F
FR-ZEO	0	5.9	9.6	3.1	1.7	3.1
	2	5.9	9.5	2.8	1.5	3.1
	8	6.2	8.9	3.0	1.6	3.0
PA-PACK	0	5.6	9.6	3.5	1.7	2.8
	2	5.0	9.7	3.3	1.8	3.0
	8	4.9	9.3	3.1	2.0	3.0

8 Conclusions et recommandations

Cette recherche a pour objectif l'étude de la formulation et son optimisation ainsi que l'évaluation des performances au jeune âge des enrobés tièdes (processus de montée en performance). Pour cela, la méthodologie suivante a été appliquée:

- Mise à jour des connaissances et étude de publications représentatives dans le domaine de la formulation des enrobés tièdes et de leurs performances *in situ*.
- Réalisation d'essais sur la recette de référence utilisée lors de la fabrication des planches d'essais du projet PLANET
- Etude, par des essais étendus en laboratoire, de différents aspects potentiellement déterminants dans une procédure de formulation. Mise en application d'une optimisation de la formulation.
- Evaluation de la montée en performance des enrobés par la réalisation d'essais réalisés après différents pas de temps.

8.1 Conclusions

L'analyse performantielle réalisée en laboratoire met en évidence les éléments suivants:

- La sensibilité accrue à l'eau est à n'en pas douter un des points potentiellement critiques des mélanges tièdes. Cela a été observé lors de différents essais en laboratoire et est également soulevé par de nombreux auteurs. Cette sensibilité à l'eau est très fortement dépendante des caractéristiques du liant et donc de son vieillissement. Ainsi, des enrobés semi-tièdes pourront alors présenter une résistance à l'humidité sensiblement plus faible. L'utilisation de dope d'adhésivité et de granulats à performances élevées permettra de lutter, du moins partiellement, contre cette sensibilité accrue à l'humidité.
- De manière globale, à l'exception de la sensibilité à l'eau discutée plus haut, les enrobés tièdes testés présentent des performances mécaniques pouvant être le plus souvent légèrement inférieures, mais parfois également supérieures à celles des enrobés à chaud. Les écarts observés restent acceptables pour la majorité des enrobés tièdes ce qui en font une alternative tout à fait crédible aux enrobés à chaud.
- Parmi les procédés tièdes testés, les enrobés avec ajout de cire (FR-WAX) présentent une résistance élevée à l'orniérage et c'est pour cela qu'ils seront régulièrement utilisés sur des surfaces à fortes sollicitations de types chaussées d'aéroports ou voies de bus. Corollaire de cette résistance élevée à l'orniérage, les enrobés avec ajout de cire présentent une rupture plus soudaine voire fragile à basse température et donc un risque de fissuration thermique.
- Les enrobés avec additif chimique (agent tensio-actif) FR-PACK présentent des valeurs de résistance mécanique (traction indirecte) globalement comparables à celles de l'enrobé à chaud de référence.
- Pour les investigations effectuées, les enrobés avec zéolithe tendent quant à eux à montrer une susceptibilité accrue à l'orniérage (enrobés des planches d'essais) et surtout une sensibilité à l'eau plus élevée que les autres mélanges tièdes testés. Ces enrobés apparaissent comme globalement moins performants que la référence à chaud.
- Pour l'ensemble des enrobés tièdes avec additif chimique, cire ou ajout de zéolithe, la rigidité (module complexe 2PB-TR à 15 °C, 10 Hz) est globalement comparable à celle de l'enrobé de référence à chaud. Les enrobés avec moussage du bitume présentent un module complexe légèrement plus faible, cela étant notamment lié à un vieillissement moins important du liant. Cette valeur doit de toute façon être associée aux caractéristiques de fatigue des matériaux pour pouvoir juger de la performance dans le temps des enrobés tièdes.
- Les performances en fatigue des enrobés tièdes testés sont globalement équivalentes à celles de l'enrobé de référence à chaud.
- L'ajout de fraisat d'enrobé aux enrobés tièdes est assurément une piste prometteuse. Etant donné le vieillissement plus faible du liant lors de la fabrication d'enrobés

tièdes, l'apport du liant "dur" du RAP permet pour certains cas d'augmenter significativement la résistance à l'orniérage ainsi que les performances en fatigue ainsi que la diminution de la sensibilité à l'eau. Cela a par exemple été observé pour les enrobés des planches d'essais.

- L'ensemble des résultats obtenus ainsi que l'étude approfondie de la littérature mettent en évidence différentes tendances qui ne peuvent être extrapolées sans certaines précautions préalables. La terminologie "enrobé tiède" sous-entend de nombreux procédés et produits qui ne sont assurément pas tous équivalents. A notre connaissance, aucun procédé ou produit actuel du marché ne constitue la solution parfaite; le choix devant être fait selon le projet et ses exigences (type de couche, tonnages, contraintes climatiques, trafic, dimensionnement, etc). On peut par exemple citer différents types de cires (Fischer-Tropsch, Montan, ..) dont les performances peuvent être sensiblement variables. De même, dans les procédés par moussage du bitume, de multiples fournisseurs existent avec chaque ses caractéristiques et performances propres (système d'injection, dosage, avec ou sans double enrobage, système de nettoyage des buses, etc.)

La montée en performance de différents enrobés tièdes a été évaluée, ceci par la réalisation d'essais jusqu'à 12 semaines après la fabrication. Pour l'ensemble des enrobés testés (FR-WAX, FR-PACK, PA-HWAM, FR-ZEO, PA-PACK), aucun processus de montée en performance n'a été mis en évidence. Le mécanisme est globalement identique à celui de l'enrobé de référence à chaud.

Les différentes analyses de sensibilité réalisées dans le cadre d'une approche d'optimisation de la formulation mettent en évidence les aspects suivants:

- Les enrobés tièdes ont pour principe de base une diminution de la viscosité dans le domaine des températures de pose et de compactage. Chaque procédé ou produit fonctionnant de manière spécifique, il est crucial de bien comprendre les aspects relatifs à la viscosité des produits que l'on utilise. Pour cela, une étude spécifique de la viscosité des liants, mastic et de l'enrobé a été menée. Cette étude a permis de mettre en évidence les différences de fonctionnement par exemple entre la cire et un additif chimique. Là où la cire (FR-WAX) augmente la viscosité de 30 à 40% dans le domaine des températures de pose et compactage (90 à 130 °C), l'agent tensio-actif (FR-PACK) n'affecte pas (ou peu) le comportement du liant et du mastic comparativement au cas de référence.
Ce paramètre de viscosité doit donc assurément être pris en compte lors de la formulation, par exemple par un suivi du comportement de l'enrobé comme démontré de manière exploratoire par des essais avec le maniabilimètre.
- Les méthodes analytiques/volumétriques de formulation semblent, en l'état actuel des connaissances, pas nécessairement adaptées pour le cas des enrobés tièdes. Les mécanismes de viscosité discutés précédemment ne sont en effet pas totalement intégrés dans ces méthodes qui peuvent cependant permettre d'identifier la courbe granulométrique optimale qui est *a priori* identique dans le cas d'un enrobé tiède ou à chaud.
- Comme dans le cas des enrobés à chaud, les caractéristiques intrinsèques des granulats et des liants vont jouer un rôle déterminant sur la formulation et son optimisation.
- Selon le type d'enrobé tiède, le grade de bitume pourra alors être éventuellement modifié comparativement à un enrobé à chaud traditionnel. Par exemple, dans le cas d'un enrobé avec cire, certains auteurs recommandent l'utilisation d'un liant plus mou afin d'améliorer le comportement à basse température, ceci tout en péjorant de manière limitée une résistance à l'orniérage *a priori* élevée avec ce type d'additif. Cependant, comme observé dans cette recherche, l'impact de l'utilisation d'un liant plus mou sur la gamme de température de compactage devra être pris en compte le cas échéant.
- Comme dans le cas d'enrobés à chaud traditionnels, il est nécessaire de travailler avec des granulats secs. Une teneur en eau trop élevée de l'enrobé en sortie de poste d'enrobage aura pour conséquences une forte diminution des performances mécaniques et de la durabilité. Pour cela, selon la technique d'enrobé tiède choisie

(par ex: moussage du bitume, zéolithe, maîtrise de la teneur en eau), il serait alors recommander de procéder à une vérification de la teneur en eau de l'enrobé.

Nous pouvons finalement affirmer que les enrobés tièdes constituent assurément une alternative crédible aux enrobés à chaud. Comme expliqué précédemment, ces enrobés peuvent présenter des performances au moins équivalentes à celles d'un mélange à chaud, ceci pour autant que la formulation, fabrication et pose soient réalisés de manière satisfaisante.

8.2 Perspectives de recherche, apport pour la normalisation

Nous pouvons mettre en évidence les perspectives de recherche suivantes:

- Une méthode de formulation pour les enrobés tièdes doit être proposée, cette méthode pouvant le cas échéant également être appliquée aux enrobés à chaud.
- Afin de favoriser la bonne pratique avec les enrobés tièdes, une typologie des domaines d'utilisation devrait être mise en place. Bien qu'ils soient vraisemblablement destinés à toutes les couches de la chaussée, on pourra recommander leur utilisation principalement dans les couches de fondation, portance et liaison.
- Pour les technologies recourant à l'ajout ou la maîtrise de la teneur en eau, il est indispensable d'évaluer l'incidence de l'humidité résiduelle sur les performances. Des valeurs limites et codes de bonne pratique doivent être proposés afin de garantir un comportement mécanique satisfaisant aux exigences.
- Comme mentionné, la maîtrise de la viscosité est l'aspect déterminant à la base des enrobés tièdes. Alors que la viscosité des liants, voire des mastics, est relativement bien définie et aisée à déterminer, des approches de quantification de la viscosité des enrobés restent à développer davantage. Une étude exploratoire avec un maniabilimètre est proposée dans cette recherche; davantage d'investigations étant nécessaires afin de mieux définir les conditions d'essais, l'exploitation des mesures et d'éventuelles valeurs seuils.
- D'un point de vue normatif, il semble dans un premier temps indispensable de donner la possibilité de recourir aux enrobés tièdes, ceci sans péjorer ces techniques. Au-delà de cela, les défis suivants se posent pour la normalisation:
 - Définition des conditions pour la réalisation des essais (par ex. température et méthode de réchauffage des échantillons).
 - Etude des limites et exigences pour les caractéristiques et performances.
 - Combinaison avec l'ajout de fraisat d'enrobé; définition de critères par exemple relatifs aux sollicitations prévues et caractéristiques du fraisat.
 - Eventuelle définition de domaines d'applicabilité afin de favoriser la bonne pratique.

Glossaire

Terme	Signification
A&B	Température anneau et bille
AC B	Enrobé bitumineux dense pour couche de liaison (AC B)
AC T	Enrobé bitumineux dense pour couche de base (AC T)
AC EME	Enrobé bitumineux dense à module élevé (AC EME)
AIPCR	Association mondiale de la Route (AIPCR)
CO ₂	Dioxyde de carbone, gaz carbonique (CO ₂)
DSR	rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR)
EPFL	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
FHWA	Federal Highway Administration (FHWA)
FR	Fil rouge (FR)
FWD	Falling Weight Deflectometer (FWD)
GB	Grave bitume (GB)
HMA	Hot mix asphalt (HMA)
HWAM	Half Warm Mix Asphalt (enrobé semi-tiède) (HWAM)
HWTD	Hamburg Wheel Tracking Device (HWTD)
IRF	International Road Federation (IRF)
LAVOC	Laboratoire des voies de circulation (LAVOC)
LTA	Low temperature asphalt (LTA)
NAPA	National Automotive Parts Association (NAPA)
NCAT	National Center for Asphalt Technology (NCAT)
NTA	Niedertemperaturasphalt (NTA)
NTEA	National Center for Asphalt Technology (NTEA)
PA	Procédés additionnels (PA)
PACK	Procédé utilisant des packages d'additifs (PACK)
PCG	Presse à cisaillement giratoire (PCG)
PLANET	Potentiel et analyse des enrobés tièdes (PLANET)
PG	Performance Grade (PG)
RAP	Enrobé recyclé fraisé (RAP)
REF-HOT	Référence à chaud (REF-HOT)
RS	Recherche spécifique (RS)
SN	Normes suisses (SN)
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)
W	Watt (W)
WATER	Procédé avec moussage de bitume (WATER)
WAX	Procédé utilisant de la cire (WAX)
WMA	Warm mix asphalt (WMA)
ZEO	Procédé utilisant de la zéolite (ZEO)

Bibliographie

Normes

- [1] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2013), « **Mélanges bitumineux - Spécifications des matériaux – Partie 1: Enrobés bitumineux** » *SN 640431-1-NA*.
- [2] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2009), « **Compactage admis en Suisse Mélanges bitumineux – Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie 12: Détermination de la sensibilité à l'eau des éprouvettes bitumineuses** » *SN 670412a-NA*.
- [3] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2004), « **Mélanges bitumineux; Méthodes d'essai pour enrobés à chaud – Partie 26: Rigidité** » *SN 670426*.
- [4] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (1997), « **Enrobés bitumineux; prescriptions d'essai – adhésivité des liants bitumineux aux granulats minéraux** » *SN 670460*.
- [5] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2013), « **Bitumes et liants bitumineux - Détermination du module complexe en cisaillement et de l'angle de phase – Rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR)** » *SN 670559*.
- [6] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2004), « **Essais pour déterminer les propriétés générales des granulats – Partie 1: Méthodes d'échantillonnage** » *SN 670901-1a*.
- [7] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2004), « **Essais pour déterminer les propriétés générales des granulats – Partie 2: Méthodes de réduction d'un échantillon de laboratoire** » *SN 670901-2a*.
- [8] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2004), « **Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 2: Détermination de la granularité – Tamis de contrôle, dimensions nominales des ouvertures** » *SN 670902-2a*.
- [9] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2003), « **Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 10: Détermination des fines – Granularité des fillers (tamisage dans un jet d'air)** » *SN 670902-10a*.
- [10] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2003), « **Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 4: Détermination de la porosité du filler sec compacté** » *SN 670903-4a*.
- [11] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2003), « **Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 7: Détermination de la masse volumique absolue du filler – Méthode au picnomètre** » *SN 670903-7a*.
- [12] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2003), « **Essais sur fillers utilisés dans les mélanges bitumineux - Partie 1: Essai bille-anneau** » *SN 670906-1*.
- [13] Comité européen de normalisation CEN (1996), « **Essais pour déterminer les propriétés générales des granulats - Partie 1 : méthodes d'échantillonnage** », *EN 932-1*.
- [14] Comité européen de normalisation CEN (1999), « **Essais pour déterminer les propriétés générales des granulats - Partie 2 : méthodes de réduction d'un échantillon de laboratoire** », *EN 932-2*.
- [15] Comité européen de normalisation CEN (1996), « **Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 2 : détermination de la granularité - Tamis de contrôle, dimensions nominales des ouvertures** », *EN 933-2*.
- [16] Comité européen de normalisation CEN (2009), « **Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 10 : détermination des fines - Granularité des fillers (tamisage dans un jet d'air)** », *EN 933-10*.
- [17] Comité européen de normalisation CEN (2008), « **Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 4 : détermination de la porosité du filler sec compacté** », *EN 1097-4*.
- [18] Comité européen de normalisation CEN (2014), « **Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau** », *EN 1097-6*.
- [19] Comité européen de normalisation CEN (2008), « **Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 7 : détermination de la masse volumique absolue du filler - Méthode au pycnomètre** », *EN 1097-7*.
- [20] Comité européen de normalisation CEN (2007), « **Bitumes et liants bitumineux - Détermination du point de ramollissement - Méthode Bille et Anneau** », *EN 1427*.

- [21] Comité européen de normalisation CEN (2008), « **Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 12 : détermination de la sensibilité à l'eau des éprouvettes bitumineuses** », *EN 12697-12*.
- [22] Comité européen de normalisation CEN (2004), « **Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 23 : détermination de la résistance à la traction indirecte des éprouvettes bitumineuses** », *EN 12697-23*.
- [23] Comité européen de normalisation CEN (2012), « **Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 24 : résistance à la fatigue** », *EN 12697-24*.
- [24] Comité européen de normalisation CEN (2005), « **Mélanges bitumineux - Méthodes d'essais pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 25 : essai de compression cyclique** », *EN 12697-25*.
- [25] Comité européen de normalisation CEN (2012), « **Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 26 : module de rigidité** », *EN 12697-26*.
- [26] Comité européen de normalisation CEN (2013), « **Essais sur les fillers utilisés dans les mélanges bitumineux - Partie 1 : essai bille-anneau** », *EN 13179-1*.
- [27] Comité européen de normalisation CEN (2012), « **Bitumes et liants bitumineux - Détermination du module complexe en cisaillement et de l'angle de phase - Rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR)** », *EN 14770*.

Documentation

- [28] Bueche N., Dumont A.-G. et Angst C. (2009), « **Projet initial - Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques** », *Rapport VSS 2008/502*, VSS, Zürich.
- [29] Bueche N. (2011), « **Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques** », *Thèse EPFL N° 5169*.
- [30] Angst C. & Bueche N. (2016), « **PLANET EP6: Anforderungen und Qualitätskontrolle** » *Rapport VSS*.
- [31] D'Angelo, J., E. Harm, et al. (2008), « **Warm-Mix Asphalt: European Practice** », *Federal Highway Administration: 60*.
- [32] Radenberg (2006), « **Merkblatt für Temperaturabsenkung von Asphalt M TA** », *Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen*.
- [33] Dumont A.-G., & Pittet M. (2012) « **Vieillessement thermique des enrobés bitumineux en laboratoire** », *Mandat de recherche VSS 2000/434, Rapport N° 1408*.
- [34] Assef-Vaziri, A. H., M. L. Pigois, et al. (1984), « **Essai de compression diamétrale appliqué aux enrobés hydrocarbonés** », *EPFL – LAVOC, 1984*.
- [35] Golaz, B. (2007), « **Maîtrise de la viscosité des mélanges bitumineux routiers** », *Projet de semestre pour le cycle de master, EPFL-LAVOC*.
- [36] Gustavsson, B. et U. Lillbroända (1996), « **Nynas Workability Test** », *Eurasphalt & Eurobitume Congress 1996*, Strasbourg (France): 7.
- [37] Brion, Y., C. L. Roux, et al. (1999), « **Mesure de l'évolution de la cohésion à l'émulsion au jeune âge par le maniabilimètre Nynas** », *Revue générale des routes et aérodromes N°769*: 6.
- [38] Dierkens, M. (2005), « **Mesures rhéologiques et modélisation de matériaux en cours de prise** », *Génie Civil. Lyon, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat*: 267.
- [39] Gudimettla, J. M. et L. A. Cooley (2003), « **Workability of Hot Mix asphalt** », *Transportation Research Board Annual Meeting*, Washington D.C.: 23.
- [40] Gudimettla, J. M., L. A. Cooley, et al. (2004), « **Workability of Hot-Mix Asphalt** », *Transportation Research Record N°1891*: 9.
- [41] Luminari, M. et A. Fidato (1998), « **State of the Art Report on Mix Design** », *RILEM Report: Bituminous Binders and Mixes. L. Franken. 17*: 32.
- [42] Delorme, J.-L., Y. Brosseaud, et al. (2005), « **Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés à chaud** », *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)*: 172.
- [43] Steuperaert, J. et A. Vanelstraete (1997), « **Code de bonne pratique pour la formulation des enrobés bitumineux** », Bruxelles (Belgium).
- [44] Franken, L. et A. Vanelstraete (1993), « **New Developments in Analytical Asphalt Mix Design** », *5th Eurobitume Congress*, Stockholm (Sweden).
- [45] Junod, A. et A.-G. Dumont (2005), « **Formulation et optimisation des formules d'enrobés** », *p. O.-Office Fédéral des Routes, EPFL-LAVOC: 81*, Lausanne (Switzerland).
- [46] Al-Rawashdeh, A. S. (2008), « **Performance Assessment of Warm Mix Asphalt (WMA) Pavements** », *Ohio University. Master of Science*: 104.

-
- [47] Sheth, N. M. (2010) « **Evaluation of selected warm mix asphalt additives** », *University of Iowa. Master Thesis*: 121.
-
- [48] Zaumanis, M. (2010), « **Warm Mix Asphalt Investigation** », *Technical University of Denmark. Master of Science Theses*: 111.
-
- [49] Austerman, A. J., W. S. Mogawer, et al. (2009), « **Evaluating the Effects of Warm Mix Asphalt Technology Additive Dosages on the Workability and Durability of Asphalt Mixtures Containing Recycled Asphalt Pavement** », *Transportation Research Board Annual Meeting. Washington D.C.*: 18.
-
- [50] Hurley, G. C. et B. D. Prowell (2005), « **Evaluation of Sasobit for use in warm mix asphalt** », *Auburn University, National Center for Asphalt Technology (NCAT)*.
-
- [51] Hurley, G. C. et B. D. Prowell (2005), « **Evaluation of Aspha-min zeolite for use in warm mix asphalt** », *Auburn University, National Center for Asphalt Technology (NCAT)*.
-
- [52] Carter, A., O. Mainardis, et al. (2010), « **Design of Half-Warm Asphalt Mixes with Additives** », *Transportation Research Board Annual Meeting. Washington D.C.*: 12.
-
- [53] Damm, K.-W., Bielenberg, et al. (2006), « **Nachuntersuchungen an ausgesuchten Streckenabschnitten zur Beurteilung des Langzeitverhaltens von TA-Asphalten** », *asphalt-labor, BAST*: 45.
-
- [54] Wagner, M. (2010), « **Temperaturabgesenkte Asphalte: gebrauchsvorhaltenorientierte Untersuchungen an Bitumen und Asphalten** », *Professur für Strasses- und Flugbetriebsflächenbau, Universität Wien*: 176.
-
- [55] Soenen, H., T. Tanghe, et al. (2008), « **A laboratory study on the use of waxes to reduce paving temperatures** », *Eurasphalt & Eurobitume Congress 2008, Copenhagen (Denmark)*: 12.
-
- [56] Edwards, Y. (2009), « **Influence of Waxes on Bitumen and Asphalt Concrete Mixture Performance.** " *Road Materials and Pavement Design* », 10(N°2/2009): 313-335.
-
- [57] Edwards, Y. (2008), « **Influence of waxes on bitumen and asphalt concrete mixture performance** », *Eurasphalt & Eurobitume Congress 2008, Copenhagen (Denmark)*: 10.
-
- [58] Visscher, J. D., F. Vervaecke, et al. (2008), « **Asphalt production at reduced temperatures and the impact on asphalt performance** », *International Society for Asphalt Pavement ISAP, Zürich (Switzerland)*: 12.
-
- [59] Visscher, J. D., F. Vervaecke, et al. (2010), « **Asphalt Production at Reduced Teemperatures using Zeolites and the Impact on Asphalt Performance** », *Road Materials and Pavement Design 11(N°1/2010)*: 65-81.
-
- [60] Barthel, W., J.-P. Marchand, et al. (2004), « **Warm Asphalt Mixes by Adding a Synthetic Zeolite** », *Eurasphalt & Eurobitume Congress 2004, Vienna (Austria)*: 8.
-
- [61] Marchand, J.-P., S. Soliman, et al. (2008), « **Performance and environmental assessment of the warm bituminous mixes with Aspha-min** », *Eurasphalt & Eurobitume Congress 2008, Copenhagen (Denmark)*: 9.
-
- [62] Middleton, B. et R. W. Forlylow (2009), « **An evaluation of warm mix asphalt produced with the double barrel green process** » *Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D.C.*: 14.
-
- [63] Larsen, O. R., O. Moen, et al. (2004), « **WAM Foam asphalt production at lower operating temperatures as an environmental friendly alternative to HMA** », *Eurasphalt & Eurobitume Congress 2004, Vienna (Austria)*: 10.
-
- [64] Jenkins, K. J. (2000), « **Mix design considerations for cold and half-warm bituminous mixes with emphasis on foamed bitumen** », *Civil Engineering, University of Stellenbosch*: 368.
-
- [65] Grampre, L., J. A. G. Leon, et al. (2008), « **Warm asphalt mixtures by chemical additivition: Field tests and laboratory studies** », *Eurasphalt & Eurobitume Congress 2008, Copenhagen (Denmark)*: 7.
-
- [66] Gonzalez-León, J.-A., L. Grampre, et al. (2009), « **Warm mix asphalts with low dosage chemical additives** », *Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D.C.*: 12.
-
- [67] Rehmann G., Gubler R. (1995), « **Haftvermögen bituminöser Bindemittel an Mineralstoffen – Grundlagen zur Normierung** ». *Mandat de recherche VSS 10/90, Rapport N° 347*.
-
- [68] European Asphalt Pavement Association. (2010), « **The Use of Warm Mix Asphalt** », *EAPA position paper, January 2010. www.eapa.org. (accede 19.01.2016)*
-
- [69] Rubio, M. C., Martínez, G., Baena, L., & Moreno, F. (2012), « **Warm mix asphalt: an overview** », *Journal of Cleaner Production*, 24, 76-84.
-
- [70] Shu, X., Huang, B., Shrum, E. D., & Jia, X. (2012), « **Laboratory evaluation of moisture susceptibility of foamed warm mix asphalt containing high percentages of RAP** », *Construction and Building Materials*, 35, 125-130.
-
- [71] Jamshidi, A., Hamzah, M. O., & You, Z. (2013), « **Performance of warm mix asphalt containing Sasobit®: State-of-the-art** », *Construction and Building Materials*, 38, 530-553.
-

-
- [72] Syroezhko AM, Baranov MA, Ivanov SN, Maidanova NV (2011), « **Influence of natural additives and those synthesized by the Fischer-Tropsch method on the properties of petroleum bitumen and quality of floated asphalt** » *Coke Chem*; 54 (1):26–31.
-
- [73] Vaiana, R., Iuele, T., Gallelli, V., & Tighe, S. L. (2013), « **Warm mix asphalt by water-containing methodology: a laboratory study on workability properties versus micro-foaming time** » *Canadian Journal of Civil Engineering*, 41(3), 183-190
-
- [74] Sanchez-Alonso, E., Vega-Zamanillo, A., Calzada-Perez, M. A., & Castro-Fresno, D. (2013), « **Effect of warm additives on rutting and fatigue behaviour of asphalt mixtures** », *Construction and Building Materials*, 47, 240-244.
-
- [75] Goh, S. W., Hasan, M. R. M., & You, Z. (2013), « **Performances Evaluation of Cecabase® RT in Warm Mix Asphalt Technology** », *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 96, 2782-2790.
-
- [76] Kim, Y. R., Zhang, J., & Ban, H. (2012), « **Moisture damage characterization of warm-mix asphalt mixtures based on laboratory-field evaluation** », *Construction and Building Materials*, 31, 204-211.
-
- [77] Jones, D., et al. (2012), « **Accelerated loading, laboratory, and field testing studies to fast-track the implementation of warm mix asphalt in California** », *Advances in Pavement Design through Full-scale Accelerated Pavement Testing*: 165.
-
- [78] Bonaquist R., (2011), « **Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt** », *NCHRP Report 691, Transportation Research Board, WashingtonD.C., USA* Bonaquist R., 2011. *Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt. NCHRP Report 691, Transportation Research Board, WashingtonD.C., USA*
-
- [79] Hill, B. (2011), « **Performance evaluation of warm mix asphalt mixtures incorporating reclaimed asphalt pavement** », *Diss. University of Illinois at Urbana-Champaign.*
-
- [80] Buss, A., Williams, R. C., & Schram, S. (2015), « **The influence of warm mix asphalt on binders in mixes that contain recycled asphalt materials** », *Construction and Building Materials*, 77, 50-58.
-
- [81] Guo, N., You, Z., Zhao, Y., Tan, Y., & Diab, A. (2014), « **Laboratory performance of warm mix asphalt containing recycled asphalt mixtures** », *Construction and Building Materials*, 64, 141-149.
-
- [82] Al-Rawashdeh, A., Nazzal, M. D., & Sargand, S. (2010), « **Evaluation of warm mix asphalt mixtures containing rap using accelerated loading tests** », *Journal of Testing and Evaluation*, 39(3), 1-8.
-
- [83] Goh, S. W., & You, Z. (2011), « **Mechanical properties of porous asphalt pavement materials with warm mix asphalt and RAP** », *Journal of Transportation Engineering*.
-
- [84] Vargas-Nordcbeck, A., & Timm, D. H. (2012), « **Rutting characterization of warm mix asphalt and high RAP mixtures** », *Road Materials and Pavement Design*, 13(sup1), 1-20.
-
- [85] Bueche, N. Pittet, M. & Dumont A.-G. (2015), « **Recyclage à chaud des enrobés bitumineux, EP-5: Formulation** », *Projet de recherche VSS 2005/456*.
-
- [86] Bressi S. (2015), « **Advanced methodology for optimization of mixture design of asphalt concrete containing reclaimed asphalt pavement material** », *Thèse EPFL-LAVOC*.
-

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

RECHERCHE DANS LE DOMAINE ROUTIER DU DETEC

Version du 09.10.2013

Formulaire N° 3 : Clôture du projet

établi / modifié le : 23.05.2016

Données de base

Projet N° : VSS 2010/543

Titre du projet : Projet PLANET RS-3: Formulation et optimisation des performances

Echéance effective : Mai 2016

Textes :

Résumé des résultats du projet :

La présente recherche « RS-3 : Formulation et optimisation des performances » a pour objectif d'identifier les paramètres déterminants lors de la formulation, évaluer l'applicabilité aux enrobés tièdes des méthodes traditionnelles de formulation ainsi qu'évaluer le processus de montée en performance (mûrissement) des enrobés.

Les principaux résultats de l'analyse en laboratoire sont les suivants:

- Les enrobés tièdes peuvent selon les cas présenter une susceptibilité à l'eau accrue. Comme pour les enrobés à chaud, les caractéristiques des granulats et du liant (y.-compris vieillissement) ont un impact déterminant, de même que l'utilisation éventuelle de dope d'adhésivité. Des pistes d'optimisation sont élaborées.
- A l'exception de la sensibilité à l'eau, les enrobés tièdes testés présentent des performances mécaniques s'avérant le plus souvent légèrement inférieures, mais parfois également supérieures à celles des enrobés à chaud. Les écarts avec la référence à chaud restent acceptables pour la majorité des enrobés tièdes, les exigences normatives étant également respectées. Les enrobés tièdes constituent donc une alternative crédible aux mélanges à chaud.
- Parmi les procédés tièdes testés, les enrobés avec ajout de cire (FR-WAX) présentent une résistance très élevée à l'orniérage. Corollaire de cette rigidité élevée aux températures de service, l'ajout de cire peut rendre le matériau davantage sensible aux basses températures.
- Les enrobés avec additif chimique (agent tensio-actif) FR-PACK présentent des valeurs de résistance mécanique (traction indirecte) globalement comparables à celles de la référence (REF-HOT).
- Pour les investigations effectuées, les enrobés avec zéolithes présentent une susceptibilité accrue à l'orniérage et surtout une sensibilité à l'eau plus élevée que les autres mélanges tièdes. Ces enrobés sont, pour les cas testés, moins performants que la référence à chaud.
- Les performances en fatigue des enrobés tièdes testés sont globalement équivalentes à celles de l'enrobé de référence à chaud.
- L'ajout de fraisât dans les enrobés tièdes est une piste prometteuse en raison notamment de l'amélioration du comportement à l'orniérage et des performances en fatigue, ainsi que de la réduction de la sensibilité à l'eau des enrobés.

Pour l'ensemble des enrobés tièdes testés, aucun processus de montée en performance n'a été mis en évidence. Le mécanisme est globalement identique à celui d'un enrobé à chaud.

Les principaux résultats relatifs à la formulation sont les suivants:

- Chaque procédé resp. produit engendre un mécanisme d'action spécifique qu'il est nécessaire de comprendre et quantifier. Pour cela, la caractérisation de la viscosité sur liants ainsi que sur enrobé est à déterminer.
- En raison des aspects relatifs à la variation de viscosité des enrobés en fonction de la gamme de température considérée, les méthodes analytiques/volumétriques de formulation semblent, en l'état actuel des connaissances, pas nécessairement adaptées pour les enrobés tièdes.
- Selon le type d'enrobé tiède, une modification du grade de bitume pourrait être recommandée comparativement au même mélange à chaud. Cela est par exemple le cas pour les enrobés avec ajout de cire ou enrobés semi-tièdes.

Les enrobés tièdes constituent finalement une alternative crédible aux enrobés à chaud. Leurs performances peuvent être au moins équivalentes à celles d'un mélange à chaud, ceci pour autant que la formulation, la fabrication et la pose fassent l'objet d'une réflexion.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Atteinte des objectifs :

Les objectifs globaux de la recherche RS-3 ont été atteints. Cela concerne particulièrement:

- Évaluation de l'applicabilité des méthodes traditionnelles de formulation au cas des enrobés tièdes.
- Identification des paramètres et caractéristiques critiques dans une procédure de formulation des enrobés tièdes.
- Établissement de pistes pour l'optimisation des performances, ceci selon le type d'enrobé tiède.
- Étude du processus de montée en performance.

Déductions et recommandations :

La recherche RS-3 met en évidence les recommandations suivantes:

- Une méthode de formulation spécifique aux enrobés tièdes doit être proposée, cette méthode pouvant le cas échéant être également appliquée aux enrobés à chaud.
- La maîtrise de la viscosité est un aspect déterminant des enrobés tièdes. Alors que la viscosité des liants (voire mastics) est bien définie et mesurée, des approches de quantification de la viscosité des enrobés restent à développer davantage. Une étude exploratoire avec un maniabilimètre est proposée.
- Des valeurs limites (exigences normatives) et codes de bonne pratique doivent être établis afin de garantir un comportement mécanique et une durée de service satisfaisant aux exigences.
- L'intégration des enrobés tièdes dans un cadre normatif doit, sans délai, faire l'objet de réflexions.

Des pistes sont discutées dans le cadre de ce projet PLANET parmi lesquelles la définition des conditions d'essais et l'établissement de typologies d'utilisation.

Publications :

- Angst C. & Bueche N. Mechanical properties and quality-control of warm asphalt. 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress. Prague, Czech. Juin 2016.
- Bueche N., Dumont A.-G. & Angst C. Instrumentation and in-situ evaluation of warm mix asphalt test sections, 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress. Prague, Czech. Juin 2016.
- Bueche N. Performances mécaniques des enrobés tièdes. Journée technique VSS: Des chaussées durables et respectueuses de l'environnement. Olten. Avril 2014.
- Bueche N., Beyeler H.-P. & Arn T. Schweizerische Erfahrung mit Niedertemperatur-Asphalt: Forschungsprojekt PLANET. Asphalt magazine (Allemagne). Janvier-Février 2013.
- Bueche N. Enrobés tièdes et contexte suisse: projet « PLANET ». Congrès SMI, Berne. Janvier 2013.
- Bueche N. Analyse des performances et des impacts des enrobés bitumineux tièdes. Magazine Route et Trafic, Février 2012.
- Bueche N. & Dumont A.-G. Evaluation of WMA key performances with regards to curing time and conditioning method. 2nd International Conference on Warm Mix Asphalt, St-Louis (USA). Octobre 2011.
- Bueche N. Évaluation des performances et des impacts des enrobés bitumineux tièdes. Thèse EPFL n° 5169, 2011.

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 différents objectifs du projet PLANET RS-3 ont été atteints. Les résultats obtenus fournissent une contribution substantielle pour l'analyse de la formulation et l'optimisation des performances des enrobés tièdes.

Les divers essais et analyses spécifiques menés en laboratoire permettent d'identifier les caractéristiques et performances potentiellement critiques ainsi que leurs impacts sur le comportement mécanique des enrobés. La réalisation d'essais à différents pas de temps (mûrissement jusqu'à 12 semaines) apporte également une contribution intéressante relative au processus de montée en performance des enrobés.

Mise en oeuvre :

De manière générale, les résultats du paquet de recherche PLANET doivent servir de base pour l'intégration des enrobés tièdes au niveau de la normalisation suisse. Ils doivent également contribuer à la bonne pratique dans le domaine.

Plus spécifiquement, les résultats du présent projet RS-3 doivent fournir une contribution substantielle au niveau normatif ceci notamment pour les aspects suivants:

- Préparation, conditionnement des échantillons et méthodologie d'essai en laboratoire.
- Typologie d'utilisation des enrobés tièdes (domaines d'application).
- Valeurs limites et exigences normatives (caractéristiques et performances).
- Dimensionnement des chaussées (performances mécaniques).

Besoin supplémentaire en matière de recherche :

Divers besoins de recherche ont été mis en évidence. On pourra relever:

- Développement d'une approche globale de formulation des enrobés tièdes (et chaud).
- Prise en compte de la viscosité des enrobés dans le processus de formulation, optimisation des performances et contrôle de pose (ex: maniabilité).
- Impacts de la teneur en eau sur les performances des enrobés tièdes.
- Combinaison des enrobés tièdes avec matériaux recyclés (RAP): Potentiel et performances.

Influence sur les normes :

Les résultats et réflexions issus de cette recherche doivent fournir une contribution substantielle pour la prise en compte des enrobés tièdes dans la normalisation VSS (voir "mise en œuvre" ci-dessus).

Président/Présidente de la commission de suivi :

Nom : Aeschlimann

Prénom : Heinz

Service, entreprise, institut : Aeschlimann Asphalt Engineering AG

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

Recherche dans le domaine routier du DETEC : Formulaire 3

Page 3 / 3

Index des rapports de recherche en matière de route

L'index actuel des rapports publiés dernièrement peut être téléchargé sur notre site www.astra.admin.ch (Recherche en matière de routes --> Downloads --> Formulaires).