



# Performances et domaine d'application des enrobés bitumineux à froid

**Eigenschaften und Anwendungsbereiche von Kaltmischgut**

**Performances and application domain of cold mix asphalt**

**Berner Fachhochschule**  
**Nicolas Bueche, Ing. civil, prof., dr ès science EPF**  
**Maïssa Gharbi, Ing. Civil, Dr.**  
**Samuel Mazor, Ing. Civil, MSE**

**IMP Bautest AG**  
**Christian Angst, dr ès science ETHZ**  
**Pietro Luraschi, dipl. Erdw. ETHZ**

**Projet de recherche VSS 2017/327 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)



# **Performances et domaine d'application des enrobés bitumineux à froid**

**Eigenschaften und Anwendungsbereiche von Kaltmischgut**

**Performances and application domain of cold mix asphalt**

**Berner Fachhochschule**  
**Nicolas Bueche, Ing. civil, prof., dr ès science EPF**  
**Maïssa Gharbi, Ing. Civile, Dr.**  
**Samuel Mazor, Ing. civil, MSE**

**IMP Bautest AG**  
**Angst Christian, dr ès science ETHZ**  
**Pietro Luraschi, dipl. Erdw. ETHZ**

**Projet de recherche VSS 2017/327 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

Nicolas Bueche

### Membres

Nicolas Bueche

Maïssa Gharbi

Samuel Mazor

Amandine Ziegelmeier

Angst Christian

Pietro Luraschi

## Commission d'experts responsable

Commission d'experts CT 3 Matériaux : Couches bitumineuses

## Commission de suivi

### Président

Hans Peter Bucheli

### Membres

Thomas Arn

Yvan Ramel

Felix Solcà

Hans Peter Beyeler

## Auteur de la demande

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

## Source

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

# Table des matières

<b>Impressum</b> .....	<b>4</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>7</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>9</b>
<b>Summary</b> .....	<b>11</b>
<b>1 Introduction</b> .....	<b>13</b>
1.1 Problématique (situation actuelle).....	13
1.2 Objectifs et méthodologie.....	13
1.3 Démarche de l'étude .....	13
<b>2 État des connaissances</b> .....	<b>15</b>
2.1 Etat de la recherche .....	15
2.1.1 Analyse des travaux en Suisse .....	15
2.1.2 Analyse des travaux internationaux .....	15
2.1.3 Composants de l'enrobé à froid .....	20
2.2 Synthèse - besoins de recherche.....	21
<b>3 Etude des performances mécaniques et caractéristiques déterminantes</b> .....	<b>23</b>
3.1 Programme des essais en laboratoire .....	23
3.2 Descriptifs des principaux essais sur enrobé.....	24
3.2.1 Maniabilité, SN EN 12697-53 [23].....	24
3.2.2 Essai de résistance à la traction indirecte (ITS), SN EN 12697-23 [24] .....	24
3.2.3 Essai Duriez, SN EN 12697-12 [25].....	25
3.2.4 Essai de rigidité IT-CY, SN EN 12697-26 [26] .....	26
3.2.5 Essai de compression cyclique (Druckschwellversuch DSV), SN EN 12697-25 [3].....	26
3.2.6 Essai d'orniérage, SN EN 12697-22 [4] .....	27
3.3 Essais préliminaires .....	28
3.3.1 Caractérisation des émulsions .....	29
3.3.2 Caractérisation du RAP.....	29
3.3.3 Caractérisation des granulats .....	33
3.3.4 Ciment.....	33
3.3.5 Essais d'enrobage et essais d'affinité liant/granulat .....	33
3.3.6 Bilan des essais préliminaires.....	35
3.4 Essais étendus.....	36
3.4.1 Fabrication des enrobés à froid.....	39
3.4.2 Résultats des essais de laboratoire .....	44
3.4.3 Bilan : comparaison des deux émulsions.....	56
<b>4 Production en centrale d'enrobé</b> .....	<b>59</b>
4.1 Organisation de la production .....	59
4.2 Essais de caractérisation des enrobés à froid .....	60
4.2.1 Essai in situ - Maniabilité.....	60
4.2.2 Essai en laboratoire .....	61
4.3 Bilan de la production au poste d'enrobage.....	67
<b>5 Procédure de dimensionnement</b> .....	<b>69</b>
5.1 Hypothèses de base .....	69
5.1.1 Trafic.....	69
5.1.2 Matériaux.....	69
5.2 Méthode Française de dimensionnement.....	70
5.3 Résultats du dimensionnement analytique .....	72
5.4 Détermination du coefficient « a » .....	74
5.5 Enseignements.....	75

<b>6</b>	<b>Evaluation globale des performances .....</b>	<b>77</b>
6.1	Principes et architecture de la méthodologie .....	77
6.2	Application de la méthodologie .....	78
6.2.1	Choix des matériaux (variantes) .....	79
6.2.2	Inventaire du cycle de vie simplifié et indicateurs de performances .....	80
6.2.3	Résultats .....	81
6.3	Enseignements .....	84
<b>7</b>	<b>Conclusions et recommandations .....</b>	<b>87</b>
	<b>Annexes .....</b>	<b>91</b>
	<b>Glossaire .....</b>	<b>139</b>
	<b>Bibliographie .....</b>	<b>141</b>
	<b>Clôture du projet .....</b>	<b>145</b>

## Résumé

Le domaine des infrastructures de transport contribue de manière considérable au réchauffement climatique qui est l'un des plus grands défis auxquels nous sommes confrontés. L'entretien, le renforcement et la construction des chaussées entraînent une utilisation massive de ressources naturelles et une production importante de « déchets ». Depuis la crise des années 1970 et avec le protocole de Kyoto (1997), les chercheurs ont porté plus d'attention à la consommation d'énergie, aux émissions de CO<sub>2</sub> et à la durabilité des enrobés bitumineux. L'enrobé à froid (Cold Mix Asphalt CMA), qui ne nécessite pas de chauffage des matériaux et est fabriqué à température ambiante, suscite un grand intérêt en raison de sa rentabilité et de ses avantages environnementaux et économiques par rapport à l'enrobé à chaud. Les enrobés à froid permettent en effet d'économiser environ 95 % d'énergie par rapport aux enrobés à chaud [44], tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre et en offrant de meilleures conditions de travail aux ouvriers [45], [46]. En outre, compte tenu de la rareté des ressources, l'utilisation de matériaux recyclés (RAP) est une contribution potentiellement importante pour les enrobés à froid [47].

Malgré leur potentiel, les enrobés à froid ne sont que rarement utilisés en Suisse. Jusqu'à présent, leur utilisation est principalement limitée aux couches de fondation, à la construction de routes rurales et aux routes à faible trafic. L'expérience du comportement mécanique de ces enrobés, de leur suivi et de leur contrôle (in situ et en laboratoire) est encore très limitée, ce qui rend leur utilisation à large échelle difficile.

Le présent projet vise à évaluer les performances et le domaine d'application des enrobés à froid fabriqués en laboratoire et à évaluer leur potentiel pour être utilisés dans des couches de portance ou de liaison.

Sur le principe, les deux technologies de fabrication des enrobés à froid soit avec émulsion ou avec bitume mousse sont étudiées dans ce projet. La méthodologie appliquée s'articule essentiellement autour d'une importante phase de laboratoire au cours de laquelle deux types d'émulsions cationiques (Ea et Ec) contenant 40% d'eau ont été étudiées. Les essais au niveau des enrobés à froid se sont concentrés sur des enrobés AC B 16, avec également l'analyse de l'impact de l'ajout d'agrégats d'enrobé (*aka* RAP) et de liant hydraulique (2% ciment). Ces essais en laboratoire ont également été complétés par une phase de productions tests d'enrobés à froid à la mousse dans un poste d'enrobage ainsi que des analyses spécifiques relatives à la prise en compte de ces enrobés dans une procédure de dimensionnement et l'établissement d'un bilan global.

Les principaux enseignements du projet peuvent être résumés ainsi :

- Que ce soit en laboratoire ou au poste d'enrobage, la fabrication des enrobés à froid est un processus complexe, à appréhender de manière différente de celle des enrobés traditionnels. La qualité de l'enrobage et l'humidité résiduelle des enrobés sont des facteurs déterminants.
- L'optimisation de la formulation devra tout particulièrement prendre en compte le choix de l'émulsion qui dépendra notamment des granulats (polarité), du temps de rupture visé et de sa teneur en eau. La problématique de l'adhésion liant-granat (froid) est également à approfondir de manière spécifique.
- La fabrication des échantillons de laboratoire a démontré la pertinence des échantillons Duriez ou PCG, le compactage Marshall n'étant pas adapté dans le cas d'enrobés à froid. Le compactage de plaques s'est également avéré complexe et peu satisfaisant.
- Les essais réalisés avec les deux émulsions ont mis en évidence le processus de mûrissement des enrobés ainsi que certaines différences entre les deux émulsions, les résultats étant somme toute conformes aux attentes en ce qui concerne l'essai Duriez, la traction indirecte et les valeurs de rigidité. L'ensemble des enrobés à froid testés dans le cadre de ce projet ont cependant montré de très faibles performances vis-à-vis des sollicitations dynamiques de type compression cyclique ou essai d'orniérage.

- L'ajout d'agrégats d'enrobé permet d'améliorer les performances mécaniques, de même que l'ajout de ciment. Les performances améliorées concernent essentiellement la rigidité et la résistance mécanique, la résistance aux sollicitations cycliques restant faible.
- Sur la base des différents résultats de laboratoire, les performances obtenues avec l'émulsion Ea sont finalement légèrement meilleures que pour la seconde émulsion Ec.
- Les résultats obtenus, ceci tout particulièrement par rapport aux sollicitations cycliques, ne permettent pas (encore) d'envisager une application pour des couches fortement sollicitées de type AC T ou AC B. Ces résultats concernent cependant exclusivement les produits testés dans le cadre de ce projet et ne peuvent être extrapolés sans précautions.
- Une correspondance avec les coefficients d'équivalence « a » selon VSS 40 324 [5] est également proposée et une évaluation globale des performances a été effectuée afin de porter une aide aux décideurs.
- Il est finalement recommandé de poursuivre les investigations avec les enrobés à froid à base d'émulsion qui s'avèrent davantage prometteurs que les enrobés à la mousse. Cela nécessite cependant encore certains travaux notamment au niveau des émulsions et de leur disponibilité en Suisse, de la fabrication en vraie grandeur et de l'établissement de plans d'essais et contrôles avec valeurs limites permettant de garantir une durée de service conforme aux attentes.



## Zusammenfassung

Die Verringerung oder zumindest Eindämmung der globalen Erwärmung ist sicherlich eine der grössten Herausforderungen für die kommenden Jahrzehnte. Eine Verringerung der Treibhausgasemissionen und ein Umdenken in unserer Gesellschaft ist auf allen Ebenen notwendig. Der Bereich der Strasseninfrastruktur bildet dabei keine Ausnahme: auch hier müssen neue Technologien und Produktionsmethoden entwickelt werden, um die Menge der erzeugten Emissionen zu verringern. Die Instandhaltung, Verstärkung und der Bau von Fahrbahnen führen zu einem massiven Verbrauch natürlicher Ressourcen und zu einer erheblichen Produktion von "Abfällen". Seit der Ölkrise in den 1970er Jahren und mit dem Kyoto-Protokoll (1997) haben die Forscher dem Energieverbrauch, den CO<sub>2</sub>-Emissionen und der Nachhaltigkeit von Asphaltmischungen mehr Aufmerksamkeit gewidmet. Kaltmischgut (Cold Mix Asphalt CMA), bei dem das Material nicht erhitzt werden muss, stösst aufgrund seiner Kosteneffizienz und seiner ökologischen und wirtschaftlichen Vorteile gegenüber Heissasphalt auf grosses Interesse. Denn mit Kaltmischgut lassen sich im Vergleich zu Heissasphalt etwa 95 % der Energie einsparen [44], während gleichzeitig die Treibhausgasemissionen reduziert und bessere Arbeitsbedingungen für die Bauarbeiter geschaffen werden [45], [46]. Bei der Konzeption von Kaltasphalt ist - angesichts der Kreislaufwirtschaft - die Verwendung von Recyclingmaterial (RAP) ein wichtiger Beitrag [47].

Trotz seines Potenzials wird Kaltmischgut in der Schweiz nur selten eingesetzt. Bisher ist ihre Verwendung hauptsächlich auf Foundationsschichten, den Bau von Landstrassen und Strassen mit geringer Verkehrsbelastung beschränkt. Die Erfahrungen mit dem mechanischen Verhalten des Kaltmischgutes sowie der Überwachung und Kontrolle (in situ und im Labor) sind noch sehr begrenzt, was eine breite Anwendung erschwert.

Das vorliegende Projekt zielt darauf ab, die Leistungsfähigkeit und den Anwendungsbereich von im Labor hergestelltem Kaltmischgut zu bewerten und sein Potenzial für den Einsatz in Trag- oder Bindschichten zu beurteilen.

Grundsätzlich wurden in diesem Projekt beide Technologien zur Herstellung von Kaltmischgut untersucht: Bitumenemulsionen und Schaumbitumen. Die angewandte Methodik basiert im Wesentlichen auf einer umfangreichen Laborphase, in der zwei Arten von kationischen Emulsionen (Ea und Ec) mit einem Wasseranteil von 40% untersucht wurden. Die Versuche auf der Ebene des Kaltmischguts konzentrierten sich auf ein AC B 16 Mischgut, wobei auch die Auswirkungen der Zugabe von RAP und Zement analysiert wurden. Die Laborprüfungen wurden durch eine Produktionsphase von Kaltmischgut in einer Aufbereitungsanlage ergänzt, wobei die Produktion nach dem Schaumbitumen-Verfahren durchgeführt wurde. In der letzten Phase wurden die erzielten Ergebnisse analysiert und zur Erstellung von Dimensionierungsmodellen und einer Gesamtbilanz verwendet.

Die wichtigsten Erkenntnisse des Projekts können wie folgt zusammengefasst werden:

- Ob im Labor oder an der Asphaltmischanlage, die Herstellung von Kaltmischgut ist ein komplexer Prozess, der anders als bei herkömmlichem Mischgut zu verstehen ist. Eine korrekte Umhüllung der Gesteinskörnungen und die Restfeuchte des Mischguts sind entscheidende Faktoren.
- Bei der Optimierung der Rezeptur muss insbesondere die Wahl der Emulsion berücksichtigt werden, die vor allem von den Gesteinskörnungen, der angestrebten Brechzeit und dem Wassergehalt abhängt. Die Problematik der Haftung zwischen Bindemittel und Granulat muss ebenfalls speziell untersucht werden.
- Die Herstellung von Laborproben hat die Eignung von Duriez- oder Gyrator-Proben gezeigt, da die Marshall-Verdichtung im Falle von Kaltmischgut nicht geeignet ist. Auch die Herstellung von Platten Anhand des Radverdichters erwies sich als komplex und unbefriedigend.

- Die mit beiden Emulsionen durchgeführten Prüfungen erlaubten den Reifungsprozess des Mischguts zu untersuchen, sowie einige Unterschiede zwischen den beiden Emulsionen zu beobachten. Die Ergebnisse der Duriez-Prüfungen, der indirekten Zugfestigkeit und der Steifigkeitswerte entsprachen im Wesentlichen den Erwartungen. Alle im Rahmen dieses Projekts geprüften Kaltmischgut-Rezepturen zeigten jedoch eine sehr schwache Leistung bei dynamischen Belastungen (Druck Schwell Versuch und Spurrinnenprüfung).
- Die Zugabe von RAP, das im Allgemeinen aus einem relativ steifen Bitumen besteht, führt zu einer Verbesserung der mechanischen Eigenschaften (insbesondere der Widerstandsfähigkeit gegenüber statischen Belastungen).
- Die Zugabe von Zement (2 % in diesem Projekt) erhöht die Steifigkeit des Mischguts erheblich. Allerdings bleibt auch in diesem Fall die Widerstandsfähigkeit gegenüber dynamischen Belastungen sehr gering.
- Auf der Grundlage der verschiedenen Laborergebnisse sind die mit der Ea-Emulsion erzielten Ergebnisse letztlich etwas besser als die der Ec-Emulsion.
- Die erzielten Ergebnisse, insbesondere in Bezug auf die dynamische Beanspruchung, erlauben es (noch) nicht, eine Anwendung für stark beanspruchte Schichten vom Typ AC T oder AC B in Betracht zu ziehen. Diese Ergebnisse beziehen sich jedoch ausschliesslich auf die im Rahmen dieses Projekts getesteten Produkte und können nicht ohne Weiteres verallgemeinert werden.
- Für die Dimensionierung wurden Werte analog den Äquivalenzkoeffizienten "a" gemäß VSS 40 324 [5] vorgeschlagen. Es wurde eine globale Leistungsbewertung durchgeführt, um den Entscheidungsträgern eine Hilfe zu bieten.
- Es wird schliesslich empfohlen, die Untersuchungen mit emulsionsbasiertem Kaltmischgut fortzusetzen, welcher sich als vielversprechender erweist als Schaumbitumen-Mischungen. Dies erfordert jedoch noch einige Arbeiten, insbesondere in Bezug auf die Emulsionen und ihre Verfügbarkeit in der Schweiz, die industrielle Herstellung und die Erstellung von Prüf- und Kontrollplänen mit Grenzwerten, um eine den Erwartungen entsprechende Nutzungsdauer zu gewährleisten.

## Summary

The field of transportation infrastructure contributes significantly to global warming, which is one of the biggest challenges we face today. The maintenance, reinforcement, and construction of roads require the massive use of natural resources and result in significant waste production. Since the oil crisis in the 1970s and the Kyoto Protocol in 1997, researchers have focused on energy consumption, CO<sub>2</sub> emissions, and the sustainability of bituminous pavements. Cold Mix Asphalt (CMA), which does not require heating of materials and is manufactured at ambient temperature, has generated significant interest due to its cost-effectiveness and environmental and economic advantages over hot mix asphalt. Cold mix asphalt allows for the saving of approximately 95% of energy compared to hot mix asphalt [44], while reducing greenhouse gas emissions and providing better working conditions for workers [45], [46]. Moreover, given the scarcity of resources, the use of Recycled Asphalt Pavement (RAP) materials is a potentially significant contribution to cold mix asphalt [47].

Despite their potential, cold mix asphalts are rarely used in Switzerland. Until now, their use has been mainly limited to foundation layers, rural road construction, and low-traffic roads. The experience of the mechanical behavior of these asphalts, their monitoring and control (in situ and in the laboratory) is still very limited, making their widespread use difficult.

This project aims to evaluate the performance and application domain of laboratory-manufactured cold mix asphalts and assess their potential for use in base or binder courses. In principle, both cold mix asphalt manufacturing technologies, with emulsion or with foamed bitumen, are studied in this project. The applied methodology essentially revolves around an important laboratory phase during which two types of cationic emulsions (Ea and Ec) containing 40% water were studied. The cold mix asphalt tests focused on AC B 16 asphalt, also analyzing the impact of the addition of recycled asphalt aggregates (RAP) and hydraulic binder (2% cement). These laboratory tests were also supplemented by a phase of production tests of foamed cold mix asphalt in a mixing plant, as well as specific analyses related to the consideration of these asphalts in a design procedure and the establishment of a global balance.

The main findings of the project can be summarized as follows:

- Whether in the laboratory or at the mixing plant, cold mix asphalt production is a complex process, to be approached differently from that of traditional asphalts. Coating quality and residual moisture content are determining factors.
- The optimization of the formulation will need to take account of the choice of emulsion, which will depend on the aggregates (polarity), the desired break time, and its water content. The problem of binder-aggregate (cold) adhesion is also to be specifically investigated.
- Laboratory sample production has demonstrated the relevance of Duriez or PCG samples, with Marshall compaction not being suitable for cold mix asphalts. Plate compaction has also been found to be complex and unsatisfactory.
- Tests carried out with both emulsions have highlighted the aging process of the asphalts as well as certain differences between the two emulsions, the results being overall in line with expectations regarding the Duriez test, indirect tensile strength, and stiffness values. However, all the cold mix asphalts tested in the framework of this project showed very poor performance vis-à-vis dynamic solicitations such as cyclic compression or rutting tests.
- The addition of recycled asphalt aggregates improves mechanical performance, as does the addition of cement. The improved performance concerns mainly stiffness and mechanical resistance, with a slight decrease in fatigue life.
- Based on the different laboratory results, the performance obtained with emulsion Ea is finally slightly better than the second emulsion Ec.
- The results obtained, particularly with respect to cyclic stresses, do not (yet) allow for application in highly stressed layers such as AC T or AC B. However, these results concern

exclusively the products tested within the framework of this project and cannot be extrapolated without caution.

- A correspondence with equivalence coefficients "a" according to VSS 40 324 [5] is also proposed and an overall evaluation of performance has been carried out in order to provide assistance to decision-makers.
- It is finally recommended to continue investigations with cold mix asphalt based on emulsions, which are more promising than foam mix asphalt. However, this still requires some work, particularly in terms of emulsions and their availability in Switzerland, full-scale production, and the establishment of test and control plans with limit values to guarantee a service life that meets expectations.

# 1 Introduction

## 1.1 Problématique (situation actuelle)

Les tendances actuelles dans le domaine de la construction routière s'orientent clairement en direction des technologies permettant de minimiser les impacts énergétiques et écologiques, ce qui implique généralement une réduction des températures et/ou une augmentation des taux de recyclage (agrégats d'enrobé AE *aka* RAP). Le présent projet de recherche se concentre essentiellement sur la problématique de la diminution de la température de production. Dans un premier temps, nous pouvons observer que différents produits et procédés permettant une réduction de la température de production d'environ 30 °C (enrobés tièdes) ont été développés et appliqués avec succès pour la majorité des couches de chaussée. Les enrobés tièdes dont il est question constituent un premier pas en direction d'une baisse significative des températures ; un projet VSS/OFROU leur ayant été consacré (PLANET [47, 1]).

Poursuivant la stratégie de diminution des températures, des techniques dites « à froid » existent depuis de nombreuses années mais ne sont appliquées que de manière très sporadique et dans des couches spécifiques (par ex. slurry – matériaux bitumineux coulés, enduits superficiels, AFK – couches de fondation en enrobé bitumineux à froid). Les enrobés à froid constituent donc une alternative potentielle aux enrobés à chaud ou tièdes dans le cas de chaussées bitumineuses. En plus d'un bilan énergétique et environnemental prometteur et d'une contribution à la meilleure gestion des ressources, ces enrobés démontrent des performances mécaniques intéressantes, rendant leur domaine potentiel d'application relativement large. Cela doit cependant être davantage étudié, les applications courantes concernant généralement les couches de fondation.

## 1.2 Objectifs et méthodologie

Le présent projet a pour but d'analyser dans quelle mesure les enrobés à froid peuvent être utilisés pour d'autres couches (portance AC T, liaison AC B) que pour les couches de fondation (AC F) auxquelles ils sont généralement destinés. En effet, l'expérience relative au comportement mécanique de ces enrobés ainsi que leur suivi et contrôle (in situ et en laboratoire) est actuellement très limitée en Suisse, ce qui rend difficile leur utilisation et la promotion de la bonne pratique.

Dans le domaine des technologies à froid, la normalisation actuelle contient des éléments relatifs aux couches de fondation en enrobé bitumineux à froid KMF (VSS 40 492), aux matériaux bitumineux coulés à froid (VSS 40 416) et aux enduits superficiels à base d'émulsion (VSS 40 415). Les normes suisses ne proposent aucun élément relatif à l'utilisation d'enrobé à froid pour couches de portance et de liaison ; domaines dans lesquels le potentiel est pourtant élevé. Ce potentiel sera donc étudié dans le cadre du présent projet.

Au niveau européen, le comité CEN a défini comme objectif la rédaction de normes additionnelles à celles des enrobés à chaud respectivement tièdes (EN 13108-XX), mais pour le domaine des enrobés à froid. Dans un premier temps, la norme relative aux enrobés bitumineux à base d'émulsion (EN 13108-31) a été publiée en 2022. Cela illustre toute la pertinence et l'utilité du présent projet de recherche qui pourra apporter une contribution substantielle non seulement au niveau suisse mais également au niveau européen.

## 1.3 Démarche de l'étude

La Fig. 1 présente la démarche adoptée pour la rédaction de ce présent rapport, ainsi que le fil conducteur lors de la rédaction. Le principe de la démarche se base essentiellement sur deux grandes phases soit une approche en laboratoire ainsi que quelques essais réduits au poste d'enrobage.

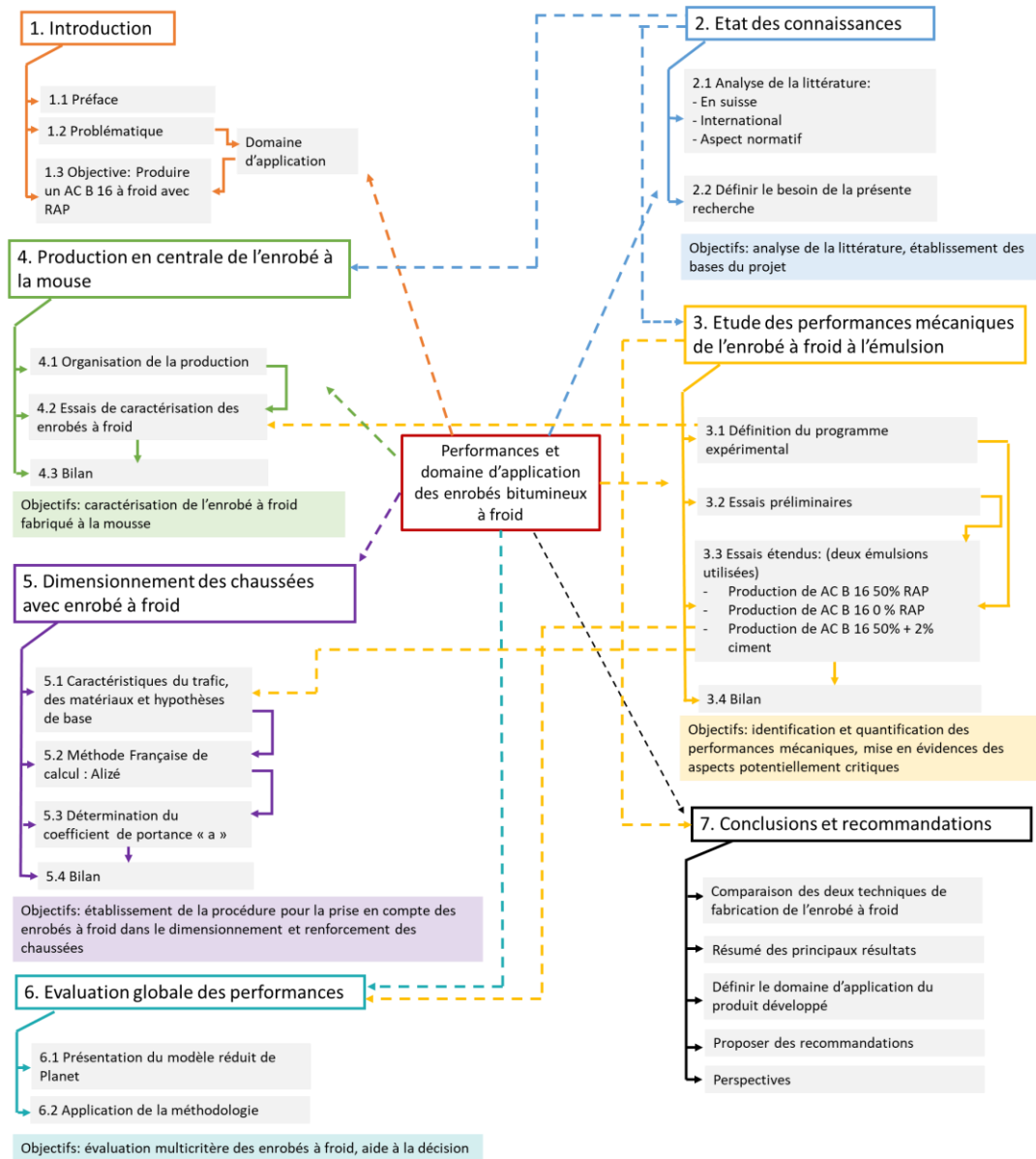


Fig. 1 Schéma général de la démarche du projet (et rédaction)

## 2 État des connaissances

### 2.1 Etat de la recherche

L'état de la recherche s'intéresse de manière spécifique aux enrobés à froid, ceci sans prise en compte des ECF (enrobés coulés à froid) ou autres enduits à froid qui constituent une thématique d'application (et de recherche) bien distincte. De manière non exhaustive, nous nous intéressons dans un premier temps à l'expérience en Suisse, puis à certaines recherches et pratiques issues de pays jugés représentatifs.

#### 2.1.1 Analyse des travaux en Suisse

Au niveau **Suisse**, l'expérience avec les enrobés à froid est relativement limitée. Si l'on fait abstraction des récents projets relatifs aux enrobés tièdes (paquet de recherches PLANET - Potentiel et ANalyse des Enrobés Tièdes), nous pouvons relever trois projets de recherche VSS/OFROU dans le domaine des enrobés bitumineux à froid au cours des 15 dernières années.

En 2011, deux projets liés ont été lancés simultanément (VSS 2010/505 [30] et VSS 2010/506 [48]), projets basés sur les travaux préparatoire issus du mandat VSS 2002/401 [24] relatif aux RC-Grave avec granulats d'asphalte. Le premier projet [6] était tourné vers une approche théorique, alors que le second [48] concernait davantage une approche pratique des couches liées à froid. Nous pouvons également ajouter :

- Projet VSS 2010/505 [30] « Couches liées à froid avec liants hydrauliques et/ou bitumineux » : Dans le cadre de ce projet de recherche une évaluation ciblée de certains paramètres a été réalisée. Le but visé étant d'utiliser un maximum de matériaux de récupération, seuls des liants bitumineux ont été utilisés comme matériau d'apport, les granulats étant exclusivement du RAP.
- Projet VSS 2010/506 [48]: Ce projet s'est intéressé à l'utilisation de granulats de béton dans les couches de fondation, ceci avec des liants hydrauliques ou bitumineux. Les liants bitumineux ont été produits selon un procédé de moussage du bitume, contrairement au projet [30].

Toujours au niveau suisse, on pourra également relever les travaux issus de la thèse à l'ETH Zürich de Xing Fang [32] qui s'intéressent aux enrobés à froid à l'émulsion modifiés avec matériaux cimentaires, ceci dans le but de s'affranchir de la problématique du mûrissement des technologies à froid traditionnelles. Dans ses conclusions, l'auteur considère le ciment comme un additif nécessaire ; la stabilité des émulsions et l'homogénéité des mélanges étant mentionnés comme thématiques futures d'investigation.

L'évaluation selon une approche par inventaire et/ou analyse du cycle de vie de technologies à faibles impacts a quant à elle fait l'objet de différentes recherches au niveau suisse parmi lesquelles nous pouvons mentionner [33] qui s'intéresse à l'analyse du cycle de vie des enrobés tièdes et [34] qui propose un modèle global d'évaluation pour l'aide à la décision dans le choix de la technologie d'enrobé tiède (voir également les travaux de N. Bueche [35]). La recherche [36] s'intéresse quant à elle à la réalisation d'un écobilan pour les liants bitumineux ; certaines sources de données pouvant être spécifiquement utiles à la réalisation de la présente recherche (émulsions par exemple).

Bien que les résultats ne puissent être directement exploités, la méthodologie appliquée dans ces projets sera une base importante permettant de répondre à l'objectif relatif à l'évaluation des performances globales des enrobés à froid.

#### 2.1.2 Analyse des travaux internationaux

L'expérience **internationale** au niveau des enrobés à froid est relativement variable. De manière non exhaustive, nous proposons quelques considérations issues de travaux

réalisés au sein de pays spécifiquement actifs dans le domaine soit la France, la Belgique, l'Italie et le Canada ; l'Australie pouvant également être mentionnée parmi les pays possédant de l'expérience de même que l'Espagne.

En Europe, la **France** est indiscutablement un des moteurs dans le domaine des enrobés à froid (plus gros producteur européen selon statistiques EAPA 2015). Différentes publications relatives à la doctrine française en matière de caractérisation, formulation et dimensionnement des enrobés à froid ont été réalisées dans le cadre du projet OPTIMIRR (optimisation des matériaux routiers économes en énergie et incorporant des recyclés de la route) initié en 2006. Nous pouvons par ailleurs relever les contributions suivantes relatives aux enrobés à froid à l'émulsion de bitume :

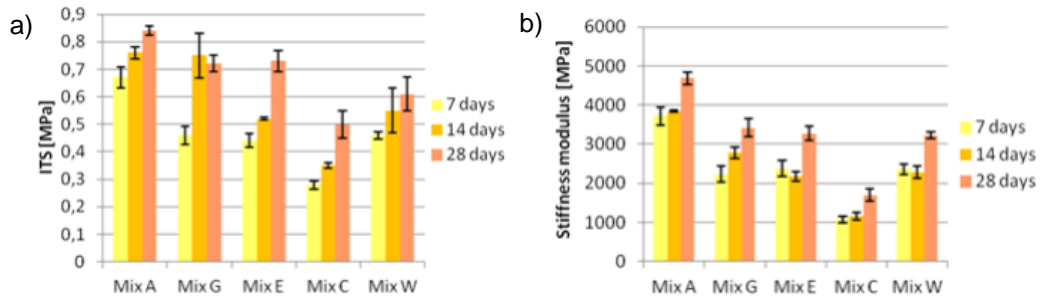
- La caractérisation des liants bitumineux des enrobés à froid est discutée dans [48], ceci dans une perspective d'adaptation des méthodes d'essais utilisées traditionnellement pour les enrobés à chaud. Les résultats mettent en évidence la nécessité de mise en place d'une étape préalable de séchage permettant de quantifier la teneur en eau du mélange avant de procéder à l'extraction. La sensibilité de la méthode de distillation à la nature du solvant utilisé ainsi qu'à celle de l'éventuel fluxant a également été mise en évidence par les auteurs qui recommandent finalement une distillation avec perchloroéthylène.
- La cinétique de montée en cohésion du mélange a également été évaluée par Delfosse et al. [49], les auteurs réalisant des essais de maniabilité (maniabilimètre Nynas, court terme soit 0 à 3 h) et des essais de cohésion (mesure de couple de torsion, long terme 6 à 20 h) dans des conditions de température et hygrométrie contrôlées. Outre les essais appliqués, les valeurs de seuils de maniabilité proposées par les auteurs sont particulièrement intéressantes.
- Le comportement *in situ* des matériaux à froid fait l'objet de la publication [50] où un accent particulier est mis sur le choix de l'instrumentation et celui des indicateurs relatifs à l'évolution du comportement des matériaux et de la structure. Ces éléments constitueront également une source importante de données pour le présent projet.
- Considérant le comportement évolutif des enrobés à froid fabriqués à l'émulsion, différentes recherches ont été effectuées afin d'étudier leur effet sur la résistance de l'enrobé à différents âges. En effet, avec le temps, la cohésion entre les granulats augmente. L'eau s'écoule par gravité ou s'évapore par le réseau poreux. En conséquence, les performances mécaniques de l'enrobé à l'émulsion s'améliorent, ceci même après le départ de l'eau et elles évoluent ainsi vers un comportement d'enrobé à chaud [51].

Čížková et al [52] ont étudié l'effet de murissement sur la résistance à la traction indirecte et le module de rigidité par compression diamétrale sur échantillon cylindrique, par la méthode de traction indirecte IT-CY. Pour ce faire, différents mélanges d'enrobé à froid ont été testés en modifiant principalement le taux en ciment et en émulsion (Fig. 2). On pourra constater dans les résultats présentés dans la Fig. 3 une augmentation successive des deux propriétés mécaniques avec le murissement pour l'ensemble des enrobés avec et sans ciment. Il est aussi noté une augmentation de ces caractéristiques en fonction de l'augmentation de la teneur en liant hydraulique. Il est finalement plausible d'affirmer que l'augmentation du module de rigidité en fonction du murissement correspond très bien aux valeurs de résistance à la traction indirecte. Si l'on compare les mélanges avec différents teneurs en ciment, alors du point de vue des deux caractéristiques évaluées, il est possible d'observer une différence importante. En effet, l'utilisation du ciment présente un impact positif nettement plus élevé sur les valeurs de rigidité que sur les valeurs de résistance ITS.

	Mix A	Mix C	Mix E	Mix G	Mix W
RAP	91.0%	94.0%	93.0%	92.5%	94.0%
Water	2.5%	2.5%	2.5%	2.5%	2.5%
Bituminous emulsion	3.5%	3.5%	3.5%	3.5%	2.5%
Cement	3.0%	0.0%	1.0%	1.5%	1.0%

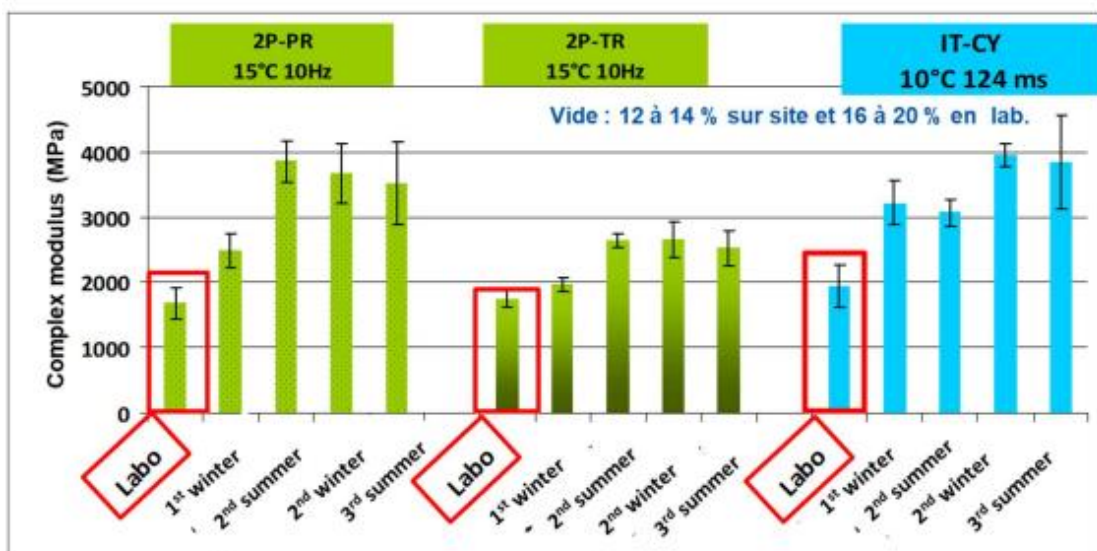
**Fig. 2** Différents mélanges d'enrobé à froid [52]



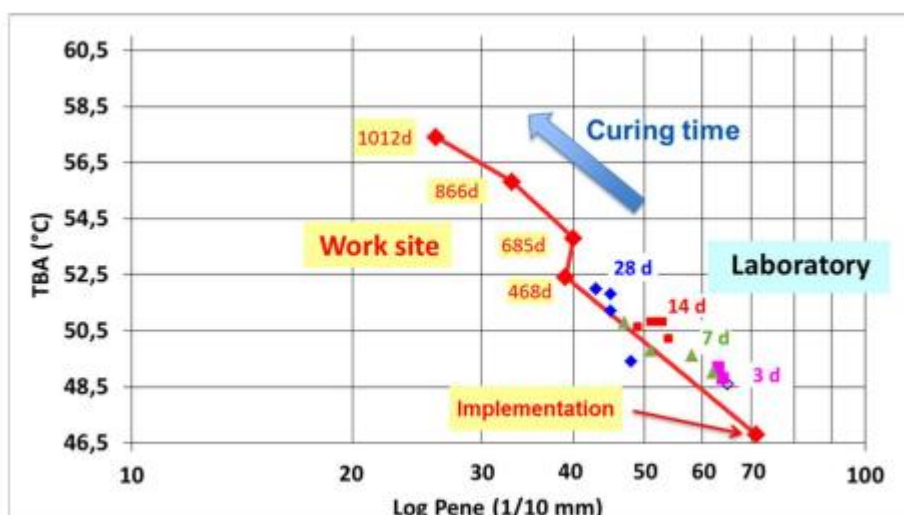


**Fig. 3** Evolution de la valeur de : a) IST b) Module de rigidité en fonction de murissement pour différents enrobés à froid ( $T=20\pm 2^{\circ}\text{C}$ ) [52]

- Dans ce même contexte, Beghin et al [48] ont étudié l'impact de murissement sur le module de rigidité avec des essais de flexion 2 points sur éprouvettes prismatiques (2PB-PR) et trapézoïdales (2PB-TR) ainsi que des essais de traction directe et compression diamétrale sur des éprouvettes cylindrique (IT-CY) [69]. Les essais ont été réalisés sur des enrobés à l'émulsion fabriqués en laboratoire et des prélèvements issus d'un chantier. On constate des résultats résumés dans la Fig. 4 que, quel que soit la méthode, les modules mesurés sur éprouvettes fabriquées en laboratoire ( $35^{\circ}\text{C}$ - 14 jours) sont sensiblement inférieurs aux modules stabilisés des éprouvettes issues du prélèvement sur chantier. Ceci pourra être expliqué en partie par les différences de compacité (12 à 14% échantillons in situ et 16 à 20% en laboratoire). Les résultats montrent également que cette différence provient de la méthode de murissement en laboratoire qui est insuffisante pour retranscrire le phénomène d'évolution en place, ceci même après un hiver seulement. Afin de comprendre ce biais entre laboratoire et in situ, une analyse des liants a été réalisée par Beghin et al [48] à l'aide d'essais de pénétration à l'aiguille et de point de ramollissement bille-anneau (TBA). Les résultats de la Fig. 5 montrent que le liant se durcit avec le murissement, ce qui pouvait être attendu. Ceci se traduit par une augmentation des valeurs TBA et une diminution des valeurs mesurées de pénétrabilité. Ces résultats permettent de définir la correspondance de 28 jours en laboratoire par rapport au chantier qui est de 468 jours, soit après un deuxième été. On remarque aussi que la pénétrabilité et TBA chantier continuent encore à évoluer le long de la même droite alors qu'en termes de rigidité, cette dernière semble stagner après le troisième été (Fig. 5).



**Fig. 4** Comparaison des valeurs de module de rigidité obtenues en laboratoire (murissement accéléré  $35^{\circ}\text{C}$ -14 jours) avec les valeurs obtenues sur chantier à différents échéances (de [51] origine [48])



**Fig. 5** Comparaison des cinétiques d'évolution temporelle des caractéristiques des liants extraits des éprouvettes de laboratoire et des éprouvettes in-situ (de [51] origine [48])

- Triquigneaux et al [53] ont quant à eux étudié l'effet de deux méthodes de murissement sur la résistance à la compression des enrobés à froid : une procédure de murissement normalisée (18°C -50% HR -7 jours) et une procédure de murissement accéléré ( 35°C-20% HR-7 jours et 50°C -7 jours). Prenant l'exemple de la modalité 2 (voir Tab. 1), on pourra observer que les valeurs de la résistance à la compression augmentent avec le murissement.

**Tab. 1** Résultats de l'essai Duriez pour trois types de conditionnement (données de [53])

	Modalité1- 120kN		Modalité2- 40kN	
(MPa)	14J 18°C 50%HR	14J 18°C 50%HR	14J 35°C 20%HR + 7J 7J 35°C 20%RH +7J 18°C 50%HR	50°C + 7J 18°C 50%HR
R	4.90	2.70	3.45	3.86
r	2.92	1.64	2.30	3.12
r/R	0.64	0.61	0.67	0.81

Le code de bonne pratique **belge** [54] rapporte quant à lui un bilan de leurs premières expériences avec les enrobés à froid. En plus d'un bilan environnemental globalement positif, cette recherche met également en évidence les difficultés rencontrées avec les émulsions (constance des caractéristiques) ainsi que l'absence de recherches au niveau de la formulation de ces enrobés (état début 2000). Les auteurs relèvent également le caractère évolutif du matériau ce qui nécessite la modification des procédures d'essais voire le développement de nouvelles procédures. Les essais d'orniérage réalisés dans ce projet mettent en évidence un post-compactage lié au caractère évolutif du matériau.

L'expérience **canadienne** est également pertinente, ceci car les enrobés à froid y sont fréquemment appliqués comme couche de base sur autoroutes. Les techniques de retraitement en place des chaussées (full depth reclamation<sup>1</sup>) ainsi que le recyclage en place à froid (cold in-place recycling CIR) des chaussées sont en effet appliquées depuis

<sup>1</sup> Le principe consiste à stabiliser les matériaux avec une mousse ou une émulsion de bitume, ceci tout en ajoutant de l'eau ou du ciment.

plus de 20 ans au Québec, ceci pour des raisons environnementales mais également en raison des coûts sensiblement inférieurs à ceux des techniques à chaud traditionnelles.

De nombreuses études canadiennes relatives aux enrobés à froid peuvent être trouvées, le comportement rhéologique étant un des axes de recherche principaux. On pourra relever les travaux de Gandi et al. [37] qui s'intéressent aux techniques de recyclage à froid à l'émulsion (différents taux de RAP) avec notamment une étude de la rigidité et des conséquences sur la problématique du dimensionnement des chaussées. La rigidité des matériaux à froid est en effet sensiblement plus faible que celle des enrobés à chaud traditionnels ; ce qui n'est pas sans conséquences sur l'état de contraintes et déformations de la chaussée.

Parmi les autres travaux, on pourra encore relever [38] et [39] qui s'intéressent à la combinaison des deux techniques (mousse/émulsion); les auteurs obtenant des résultats prometteurs pour la traction indirecte et la stabilité Marshall des enrobés. La recherche met également en évidence l'importance d'un bon enrobage ce qui permettra le cas échéant de diminuer la sensibilité à l'eau de l'enrobé et améliorer son comportement mécanique global.

D'un point de vue pratique, l'expérience canadienne met également en évidence les éléments suivants :

- L'utilisation de chaux ou de ciment peut être faite juste après la pose, ceci dans le cas où une réouverture rapide de la chaussée est souhaitée. Il est cependant important que le dosage soit relativement faible (1% à 3%), ceci afin d'éviter une fissuration précoce de la chaussée (effet rigidifiant).
- La teneur en vides (non-communicants) est généralement située entre 13% et 15% (max. 18%).
- La mise sous circulation durant environ 2 semaines avant la pose de la couche suivante est bénéfique dans le cas d'enrobés à l'émulsion.
- La teneur en eau est un critère déterminant avant la couverture d'un enrobé à froid (max. 1,5%).
- D'un point de vue normatif, la résistance mécanique est évaluée par la stabilité Marshall (méthode d'essai LC 26-002, Ministère des Transports du Québec) ; une stabilité de 10 kN étant généralement jugée comme acceptable.

En **Italie**, on pourra relever les travaux de Ferrotti et al. [55] qui ont mené des études sur le CAM (Cold Asphalt Mixture – Enrobé à froid) renforcé avec différents types de fibres soit cellulose, verre-cellulose et nylon-polyester-cellulose, à deux teneurs différentes (0,15 % et 0,30 %). Les mélanges renforcés ont été testés après différents temps de durcissement (1 jour, 7 jours, 14 jours et 28 jours) et conditions (sec et humide). Les résultats ont révélé que le mélange renforcé avec 0,15% de fibres de cellulose, avait montré une performance comparable, voire meilleure que le mélange conventionnel de référence à chaud HMA (Hot Mix Asphalt).

Au niveau **international**, différentes recherches relatives aux enrobés à froid peuvent encore être mentionnées parmi lesquelles les travaux de Thanaya et al. [63] qui proposent une étude en laboratoire d'enrobés à froid (émulsion) avec des considérations relatives à la rigidité et à la fatigue des mélanges et à l'amélioration des performances mécaniques obtenues par l'ajout de 1-2% de ciment (accélération du mûrissement).

On pourra finalement relever de nombreux projets internationaux qui s'intéressent aux technologies à faibles impacts et à leur évaluation sous différentes formes. Par exemple, le projet CEDR EDGAR (Evaluation and Decision process for Greener Asphalt Roads) propose dans un premier temps une analyse exhaustive de différentes technologies d'enrobés à faibles impacts, pour ensuite établir une méthodologie globale d'évaluation et de classement des techniques [57], [58], [40]. On pourra également relever la contribution du projet CEDR CEREAL (Evaluation of existing CO2 tools for roads) dont l'objectif était notamment de développer un outil permettant de calculer les émissions de CO<sub>2</sub> relatives à la construction de la chaussée et aux travaux de maintenance, ceci tout en harmonisant les procédures au niveau européen.

### 2.1.3 Composants de l'enrobé à froid

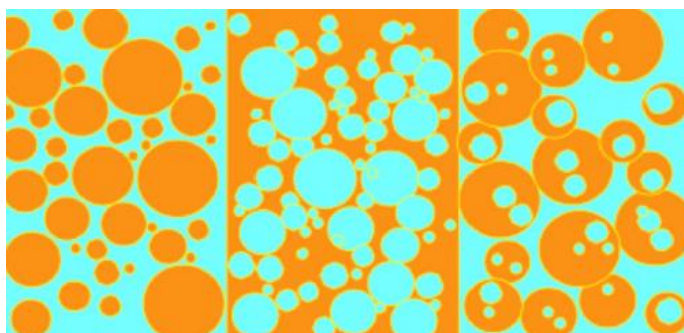
Un enrobé à froid est sur le principe composé des mêmes éléments constitutifs qu'un enrobé à chaud soit granulats, sable, filler, liant (bitume) et éventuels additifs. Comme il le sera décrit plus loin, la diminution de température de l'enrobé peut être sur le principe obtenue soit par l'utilisation d'une émulsion de bitume ou alors par le recours à un bitume mousse ; ces deux options devant permettre de garantir un bon enrobage des matériaux granulaires, malgré la diminution des températures. A cela il sera généralement ajouté une certaine quantité d'eau et, selon les cas, du ciment afin de favoriser les performances mécaniques à court terme. Ces différents constituants sont détaillés dans le présent chapitre.

#### 2.1.3.1 Émulsion

Une émulsion est une dispersion de petites gouttelettes d'un liquide dans un autre liquide. Elle est principalement composée de deux phases. Une phase dispersée, soit le bitume autour de 60-70% en masse, et d'une phase continue (dispersante), soit l'eau (30-40% en masse) additivée d'émulsifiant. Il existe trois types d'émulsion (Fig. 6) :

- Huile dans eau H/E : la phase continue est de l'eau et la phase dispersée est un liquide huileux,
- Eau dans l'huile E/H : la phase continue est une huile et la phase dispersée est de l'eau,
- Une émulsion multiple H/E/H : Certaines gouttelettes de bitume peuvent contenir de plus petites gouttelettes d'eau à l'intérieur.

Les émulsions de bitume (asphalte) standard sont normalement considérées comme étant du type H/E.



**Fig. 6** Schéma des différents types d'émulsions a) H/E, b) E/H et E/H/E [59]

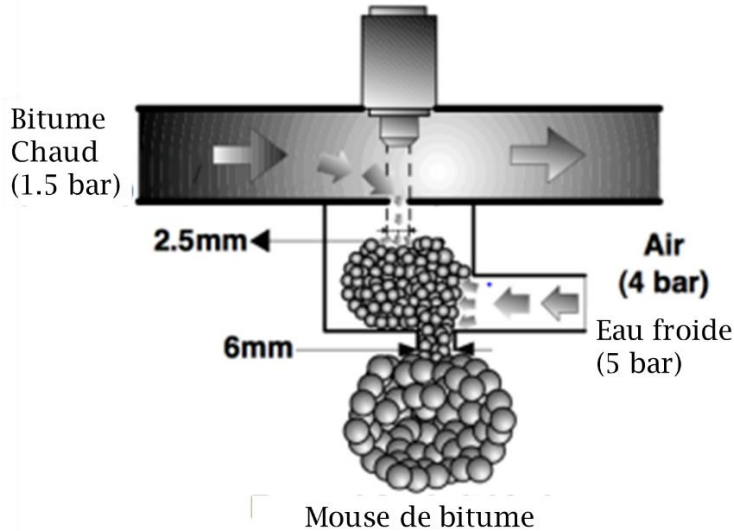
Les émulsions de bitume sont classées selon le signe de la charge (positive/négative) sur les gouttelettes et selon leur réactivité. Il existe des émulsions cationiques dont les gouttelettes sont chargées positivement et des émulsions anioniques dont les gouttelettes sont chargées négativement. Le choix du type d'émulsion (anionique resp. cationique) dépendra notamment des granulats utilisés (polarité). Les émulsions cationiques sont les plus utilisées.

Les émulsifiants utilisés comme additif sont des produits tensioactifs anioniques ou cationiques. Les agents de surface utilisés pour la fabrication de ces derniers les plus répandus en France sont de la famille des amines, notamment les diamines (propylènes-diamines), les amido-amines, les propylènes-polyamine. En effet, l'émulsion modifiée aux polymères offre des avantages tels qu'un meilleur enrobage des granulats, une plus grande résistance à la fatigue et une affectation mineure par la présence de particules fines dans le mélange [60].

#### 2.1.3.2 Mousse de bitume

La mousse de bitume (bitume-mousse) est composée de bitume et d'eau (1.5% à 3%). L'eau froide, injectée à une certaine pression, entre en contact avec une masse de bitume

chaud (160°C à 180°C) et de l'air sous pression (environ 5 bars) (Fig. 7). L'eau se vaporise alors instantanément et un film de bitume se crée, ce qui conduit à la formation d'une mousse de bitume [61], [62]. La viscosité du bitume diminue alors et elle permet l'enrobage des matériaux granulaires [63]. Le procédé de moussage de bitume appliqué dans le cadre des enrobés à froid est finalement comparable à celui appliqué dans le cas des enrobés tièdes avec bitume-mousse.



*Fig. 7 Schéma de la formation de la mousse de bitume [63]*

### 2.1.3.3 Eau

L'eau utilisée pour la fabrication des émulsions et de l'enrobé à froid est en général de l'eau de réseau public, sans aucune exigence normative relative à sa qualité. Initialement, la présence de l'eau permet la meilleure répartition du liant dans le mélange et facilite la mise en place et le compactage de l'enrobé. En revanche, elle s'avère néfaste car elle retarde la montée en cohésion et contribue à la fragilité au jeune âge, tout en impactant la durabilité de l'enrobé [64], [65].

### 2.4.1.1 Ciment

Le ciment Portland étant un liant « hydraulique » qui s'hydrate avec l'eau en formant une matrice plus rigide qui lie alors les particules granulaires entre-elles. Afin d'améliorer les performances des enrobés à froid, le ciment peut être ajouté au mélange. L'ajout de 1-2% de ciment améliore significativement ses propriétés mécaniques comme sa résistance et sa durabilité, tout en ayant des propriétés comparables à celles de l'enrobé à chaud à l'état durci [64], [66], [67]. Des études ont montré que plus le temps de durcissement est long, plus la résistance initiale de l'enrobé à froid avec ciment ajouté est élevée [56], [68], [55], [37]. Flores et al. (2020) [69] ont montré que l'usage de ciment dans le mélange d'enrobé à froid avec 100% de RAP améliore la résistance à la traction indirecte ITS, la sensibilité à l'eau ITSr, le module de rigidité et prolonge également sa durée de vie en fatigue.

## 2.2 Synthèse - besoins de recherche

Le besoin de recherche global selon le descriptif initial du projet peut finalement être synthétisé ainsi : L'expérience montrant que les enrobés à froid peuvent être appliqués en substitution d'une couche de fondation à chaud existe-t-elle ? Est-ce que ces technologies à froid peuvent être appliquées en tant que couches de portance (AC T) ou de liaison (AC B) et le cas échéant quels sont alors les aspects déterminants à prendre en compte ?

L'état de la recherche et l'expérience de l'équipe de projet permettent de définir les besoins de recherche prioritaires suivants :

- L'humidité de l'enrobé et son évolution constitue un aspect déterminant dans le processus de montée en performance des enrobés à froid. Les expériences françaises et canadiennes montrent que ces enrobés présentent une teneur en eau élevée, ce qui constitue un élément supplémentaire par rapport aux enrobés à chaud traditionnels. Ceci n'est pas sans conséquences sur le comportement mécanique et le processus de mûrissement.
- La teneur en vides des enrobés à froid est relativement élevée (12% à 20% selon expérience française) et elle peut évoluer en fonction des sollicitations (diminution des vides durant le premier mois suivant la pose). L'impact de cette teneur en vides sur les performances mécaniques et le post-compactage (*i.e.* orniérage immédiat) doit être étudié.
- Le comportement sous sollicitation des enrobés à froid doit être approfondi ; en particulier le processus de post-compactage, la résistance aux sollicitations dynamique, la montée en performance et l'impact de la remise sous circulation.

Les documents d'appel d'offre mentionnent également la proposition d'une approche d'évaluation des performances globales des enrobés à froid ; approche devant alors permettre de fournir une aide à la décision aux gestionnaires d'infrastructures. Les travaux récents réalisés dans ce domaine au niveau Suisse [34], [35] et international [38], [40] serviront de base de réflexion afin de prendre en compte ce besoin de recherche et proposer ainsi quelques pistes de réflexions.

Au niveau européen, de nouvelles normes EN relatives aux enrobés bitumineux à base d'émulsion ont été publiées, ce qui constitue une première étape. L'élaboration de ces normes a clairement montré que très peu de pays disposent d'une expérience suffisante avec cette technologie. Pour cette raison, les futures normes EN laisseront un choix relativement large sur différents points. Il sera alors du ressort de la VSS de préciser ces points et prendre des décisions. L'état actuel des connaissances ne suffit pas pour introduire en Suisse la future série de normes EN 13108-3X avec des arguments suffisamment fondés. Etant donné que ces normes sont des documents clés pour l'avenir, les deux tendances principales étant la diminution des températures et l'augmentation de la teneur en matériaux recyclés (cf. chapitre 2 " 2.1.1 Analyse des travaux en Suisse "), la Suisse se doit d'approfondir ses connaissances dans ce domaine ce qui nécessite des travaux de recherche.

### 3 Etude des performances mécaniques et caractéristiques déterminantes

Ce chapitre relatif aux différents essais et mesures réalisés en laboratoire constitue le cœur du projet de recherche. Comme il le sera expliqué plus loin, les essais en centrale d'enrobage n'ont pu être réalisés que de façon limitée (production à la mousse) et c'est pourquoi un accent spécifique a été porté à l'approche en laboratoire.

Ce chapitre propose dans un premier temps un descriptif du programme d'essais avant de détailler les essais préliminaires ainsi que les essais étendus (performantiels) qui ont suivi.

#### 3.1 Programme des essais en laboratoire

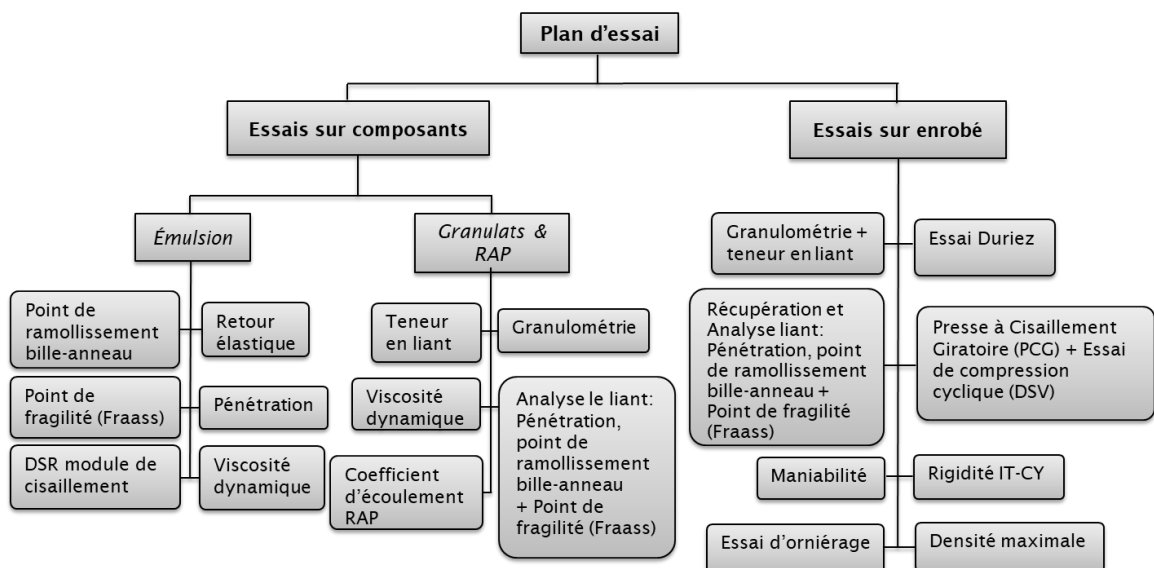
La Fig. 8 présente le programme détaillé des essais en laboratoire effectués pour les différents composants ainsi que les enrobés produits. Ce programme se compose de deux grandes parties :

- Essais préliminaires : Essais de caractérisation des matériaux de base.
- Essais sur les enrobés fabriqués (essais étendus).

Les essais sur les enrobés sont divisés en deux parties :

- Des essais préliminaires : Granulométrie, compactibilité avec presse à cisaillement giratoire (PCG), Essai de compression cyclique / Druckschwellversuch (DSV).
- Des essais étendus : Compactage et essai Duriez, compactibilité avec presse à cisaillement giratoire (PCG), Essai de compression cyclique / Druckschwellversuch (DSV), rigidité, orniérage, maniabilité (maniabilimètre Nynas).

Après chaque fabrication une analyse de liant récupéré est effectuée, ceci afin d'aider lors de l'analyse des résultats.

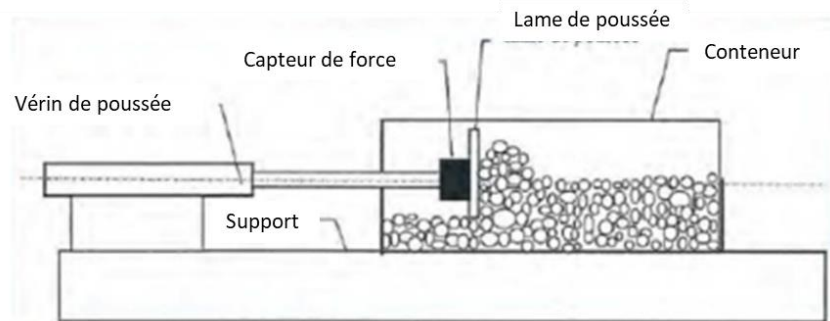


**Fig. 8** Programme d'essais en laboratoire

## 3.2 Descriptifs des principaux essais sur enrobé

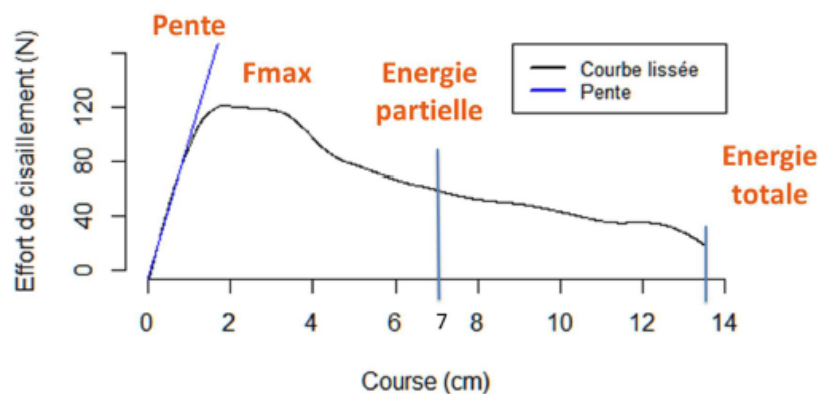
### 3.2.1 Maniabilité, SN EN 12697-53 [23]

Le maniabilimètre a été développé afin de mesurer la montée en cohésion des enrobés à froid à l'émulsion de bitume. La mesure de la maniabilité des enrobés à froid est effectuée selon la norme [23] à l'aide du maniabilimètre Nynas. Ce dernier est un appareil qui permet de simuler l'action d'un finisseur sur chantier. Le principe de l'essai est le suivant (Fig. 9) : une certaine masse d'enrobé (environ 11 kg) est placée dans un moule et poussée à l'aide d'un vérin et d'une lame de poussée. Le principe correspond donc à celui de la boîte de Casagrande soit un appareil de cisaillement rectiligne à vitesse de déformation imposée. Lors de l'essai, un capteur de force mesure la force exercée par le vérin pour étaler l'échantillon d'enrobé, et donc la force nécessaire à la décohésion de l'enrobé. Cet essai permet finalement de caractériser la maniabilité de l'enrobé à partir de la force nécessaire appliquée par le vérin pour entraîner la décohésion de l'échantillon d'enrobé. Relevons qu'il n'y a pas d'exigences normatives par rapport aux résultats de l'essai ; ce dernier fonctionnant de manière relative.



**Fig. 9** Principe de l'essai Maniabilimètre Nynas [63]

Il existe essentiellement quatre indicateurs pour analyser les résultats (Fig. 10). L'indicateur choisi afin de caractériser la maniabilité dans le cadre du présent projet est la force maximale ( $F_{max}$ ).



**Fig. 10** Différents indicateurs pour l'analyse des courbes de résultats au maniabilimètre [71]

### 3.2.2 Essai de résistance à la traction indirecte (ITS), SN EN 12697-23 [24]

L'essai de traction indirecte (indirect tensile strength - ITS) est effectué selon la norme EN 12697-23 avec le même équipement que celui utilisé pour la stabilité Marshall, mais avec un gabarit de chargement différent. Le dispositif d'essai pour les essais de traction indirecte est illustré dans la Fig. 11. La vitesse de chargement appliquée est de 50 mm/min jusqu'à la rupture de l'échantillon ; le mode de rupture étant également un paramètre d'évaluation.





**Fig. 11** Essai IST

Pour chaque spécimen testé, la résistance à la traction indirecte est déterminée selon la formule (1) :

$$ITS = \frac{2P}{\pi DH} 1000 \quad (1)$$

Où :

$P$  est la charge maximale, exprimée en newtons (N),

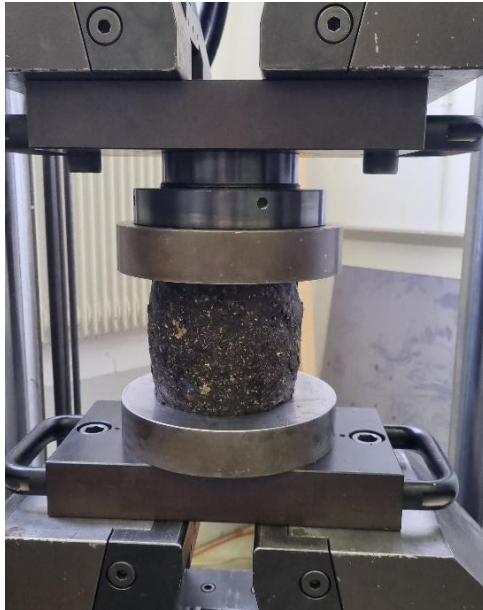
$D$  est le diamètre de l'éprouvette, exprimé en (mm)

$H$  est la hauteur de l'éprouvette, exprimée en (mm)

### 3.2.3 Essai Duriez, SN EN 12697-12 [25]

L'essai Duriez est utilisé en France depuis plus de 40 ans pour évaluer la sensibilité à l'eau et la résistance mécanique des enrobés bitumineux (Fig. 12). Cet essai a pour objectif d'évaluer, pour une température d'essai et un degré de compactage donné, la résistance à l'eau d'un enrobé bitumineux à partir du rapport des résistances à la compression ( $r/R$ ) avec et sans conditionnement à l'eau des éprouvettes. Cet essai permet finalement d'évaluer sa résistance au désenrobage par l'eau présente dans les matériaux bitumineux (évaluer la sensibilité à l'eau des enrobés bitumineux). Le principe de conditionnement des échantillons consiste à immerger certaines éprouvettes dans l'eau alors que le solde des échantillons sont stockés « à sec ». La vitesse de chargement lors de l'essai est de 1 mm/s.

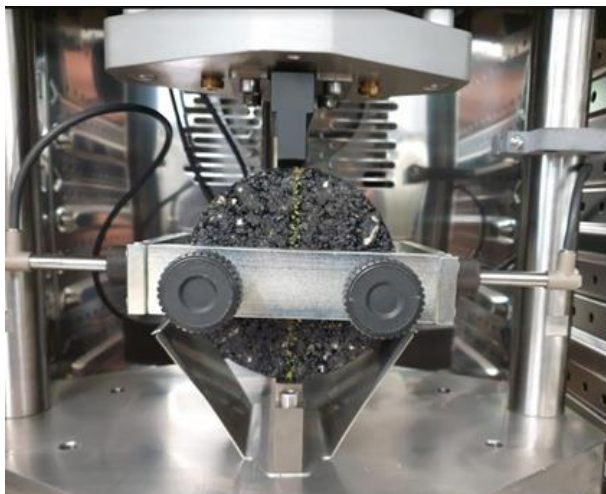
Les coefficients  $r$  et  $R$  représentent respectivement les valeurs moyennes de la résistance à la compression des éprouvettes sèches et humides.



*Fig. 12 Essai de compression Duriez*

### 3.2.4 Essai de rigidité IT-CY, SN EN 12697-26 [26]

La méthode utilisée pour l'évaluation de la rigidité des enrobés est l'essai de traction indirecte IT-CY (Fig. 13) selon [26]. Pour cet essai, quatre éprouvettes PCG (répétitions) sont soumises à des déformations dans le domaine linéaire, ceci par des chargements répétés ou à des vitesses de déformation contrôlées. Les amplitudes de la contrainte et de la déformation sont calculées à partir de la force mesurée et du signal de déformation. A partir des mesures de la contrainte et de la déformation, le module du matériau peut ensuite être calculé.

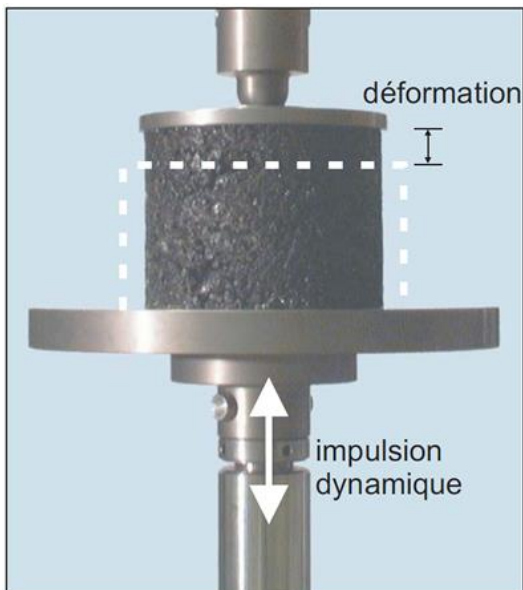


*Fig. 13 Essai de rigidité*

### 3.2.5 Essai de compression cyclique (Druckschwellversuch DSV), SN EN 12697-25 [3]

L'essai de compression cyclique permet de déterminer la résistance aux déformations permanentes des enrobés bitumineux (Fig. 14). Cet essai constitue donc une « alternative » à l'essai d'orniérage généralement réalisé à l'aide d'un simulateur de trafic. Relevons que les exigences normatives suisses font référence à l'essai au simulateur de trafic ; des exigences par rapport à l'essai de compression cyclique n'étant pas formulées au niveau de la normalisation suisse. Cet essai est réalisé selon la norme [3] et son principe de base consiste à conditionner des éprouvettes (PCG, par exemple) à une température

donnée (50°C), pour ensuite effectuer des simulations de charges avec une impulsion de chargement sinusoïdale sur l'ensemble de la surface. L'évolution de la déformation au cours des chargements est ensuite enregistrée ; 10'000 cycles de chargement étant généralement réalisés.



**Fig. 14** Essai de compression cyclique (IMP)

### 3.2.6 Essai d'orniérage, SN EN 12697-22 [4]

Afin de déterminer la résistance aux déformations permanentes des enrobés à froid, un essai d'orniérage est proposé, ceci en accord avec la normalisation suisse. Le principe de base de cet essai décrit dans la norme [4] consiste à compacter deux plaques d'essais (50 x 18 x 10 cm ou 5 cm – selon le type d'enrobé) avec un compacteur de plaques (Fig. 15). Les plaques sont ensuite conditionnées à la température d'essai de 60°C puis testées dans l'orniéreur (appelé également simulateur de trafic). Lors de l'essai 30'000 passages de roues sont généralement et la profondeur d'ornière est exprimée en pourcent par rapport à la hauteur de la plaque d'essai (5 cm ou 10 cm). La sensibilité à la déformation permanente est finalement évaluée par l'ornière formée par des passages répétés de la roue ; la température d'essai étant maintenue constante.



**Fig. 15** Compacteur de plaques

### 3.3 Essais préliminaires

Nous proposons dans ce chapitre les résultats des différents essais préliminaires réalisés dans le cadre du projet. Relevons ici que la répartition des essais entre les deux laboratoires (IMP et BFH) a été faite de manière interne, ceci dans le but d'optimiser l'utilisation des ressources et l'exploitation des compétences de chaque partenaire.

Les matériaux de base utilisés dans ce projet sont les granulats, le RAP (agrégats d'enrobé AE), l'émulsion et le ciment.

Dans le cadre du présent projet, deux fournisseurs d'émulsion ont collaboré soit un fournisseur Français et un Suisse.

Dans une première phase, différents types d'émulsions nommées « Ea » du fournisseur français ont été utilisées pour des essais préliminaires détaillés en annexe de ce rapport, ceci afin de choisir l'émulsion finale qui sera utilisée pour la suite du projet. La liste des émulsions testées dans cette première phase est la suivante :

- Émulsion cationique formulée à destination des graves-émulsion (Ea1)
- Émulsion cationique formulée à destination des BBE (Ea2) : 60 % (70/100) /16-1/2 Stabiram MS 1000-Polyram L920 (teneur en émulsifiant (kg/t)) / pH2
- Émulsion cationique formulée à destination des BBE (Ea3) : 65% 160/220 teneur en émulsifiant (5 kg/t) Polyram L920/pH2
- Émulsion cationique formulée à destination des BBE (Ea4) : 65% 160/220 teneur en émulsifiant (15 kg/t) Polyram L920/pH2
- Émulsion cationique formulée à destination des BBE (Ea5) : 60% 70/100 teneur en émulsifiant (10kg/t) Polyram L920/pH2

Un seul type d'émulsion du fournisseur suisse a été testée, cette émulsion étant ci-après dénommée « Ec » :

- Émulsion cationique formulée à destination des BBE (Ec) : 60% 70/100/ pH3
- 

Sur la base de l'analyse de la littérature, des essais avec différentes émulsions Ea et de l'expérience dans le domaine, deux émulsions ont finalement été sélectionnées pour la suite des investigations, soit une par fournisseur. Ces émulsions cationiques ont été utilisées pour les différents travaux en laboratoire.

Les émulsions ainsi que les granulats et le RAP utilisés dans le cadre de ce projet ont été caractérisés en laboratoire par les deux partenaires du projet (double vérification). La liste des essais de caractérisation est présentée dans le Tab. 2.

**Tab. 2** Essais de caractérisation des composants

Matériau - Essai/caractéristique	Norme (SN/EN)
RAP - Granulométrie et teneur en liant	SN 670 902-1_EN-933-1 [5] SN EN 12697-1 [27]
RAP - Récupération du liant	SN EN 12697-3-A1 [6]
RAP - Analyse du liant (Pen, A&B)	SN 670 511_EN-1426, SN 670 512_EN-1427, [7], [8]
RAP - Coefficient d'aplatissement	SN-670902-6_EN-933-6 [9]
RAP - Coefficient d'écoulement	SN 670 585_EN-1428 [10]
Granulats - Granulométrie	SN 670 902-1_EN-933-1 [5]
Emulsion - Teneur en liant	SN EN 13075-1_SN 670 586-1 [11]
Emulsion - Rupture	SN 670 581-1_EN-12846-1 [12]
Emulsion - Temps d'écoulement 40/85°C	SN EN 13074-1 [13]
Emulsion - Stabilisation émulsion	EN-13398_SN 670 547 [14]
Emulsion - Pen, A&B	SN 670 511_EN-1426, SN 670 512_EN-1427 [7], [8]
Emulsion - Retour élastique	SN 670 507_EN-12593 [15]

Emulsion - Fraass	SN 670 559_EN-14770 [16]
Emulsion - DSR Module cisaillement	SN 670 103B-NA_EN-13043 [17]

### 3.3.1 Caractérisation des émulsions

Les différentes émulsions ont été caractérisées selon la liste des essais indiquée dans le Tab. 2. Le Tab. 3 présente les résultats d'essais.

La pénétrabilité et la température de ramollissement bille et anneau permettent de classer les émulsions en fonction de leur dureté. La détermination de la température haute de caractérisation se fait par le rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR) afin de mesurer le module complexe en cisaillement  $G^*$  et l'angle de phase  $\delta$ .

**Tab. 3** Caractéristiques des émulsions Ea et Ec

Paramètre	Norme	Ea1	Ea2	Ec1
Point de ramollissement bille-anneau (°C)	[8]	54,8	56,2	56,4
Pénétrabilité à l'aiguille (1/10mm)	[7]	39	38	42
MSCR Retour élastique (%)	[15]	17	15	61
Point de fragilité Fraass (°C)	[16]	-9	-10	
Module complexe $G^*$ (60°C) (KPa)		5'375	6'480	
Angle de phase $\delta$ [°]		82	80	

En raison de la durée/quantité des expériences, différents lots d'émulsions (*i.e.* livraisons) ont été nécessaires. Le Tab. 4 montre les analyses effectuées sur les émulsions Ea et Ec utilisées dans la deuxième phase du projet. Contrairement aux études précédentes, les émulsions n'ont pas été séchées dans un four (ce qui a un effet sur le vieillissement du bitume) mais simplement au contact de l'air. Nous pouvons constater une différence considérable dans la valeur de pénétration et le point de ramollissement.

**Tab. 4** Caractéristiques des émulsions Ea et Ec

Paramètre	Norme	Ec	Ea
Point de ramollissement bille-anneau (°C)	[8]	40.6	48.8
Pénétrabilité à l'aiguille (1/10mm)	[7]	-	65
MSCR retour élastique (%)		3.8	1.6
Module complexe $G^*$ (60°C) (KPa)		1'354	2'460
Angle de phase $\delta$ [°]		83	87

### 3.3.2 Caractérisation du RAP

Outre les matériaux neufs (granulats d'apport) utilisés dans la formulation des enrobés bitumineux, des agrégats d'enrobés AE (RAP) sont utilisés dans ce projet. Les agrégats d'enrobés sont composés de granulats et de bitume résultant de la première utilisation du matériau. Les AE utilisés dans le cadre de ce projet sont issus de stocks provenant d'une centrale située au canton de Fribourg.

Les agrégats d'enrobés (RAP) ont été caractérisés en termes de granulométrie avant et après l'extraction (granulométrie noire, granulométrie blanche soit sans liant). Leur teneur en liant a été aussi déterminée selon la norme [5] à l'aide d'un asphalt-analysateur. La teneur en liant moyenne du RAP est de 4.37%.

Les différents résultats sont présentés ci-dessous.

### 3.3.2.1 Granulométrie [5]

L'analyse granulométrique a été réalisée selon la norme EN 933-1 [5]. Les courbes granulométriques du RAP sont présentées dans la Fig. 16.

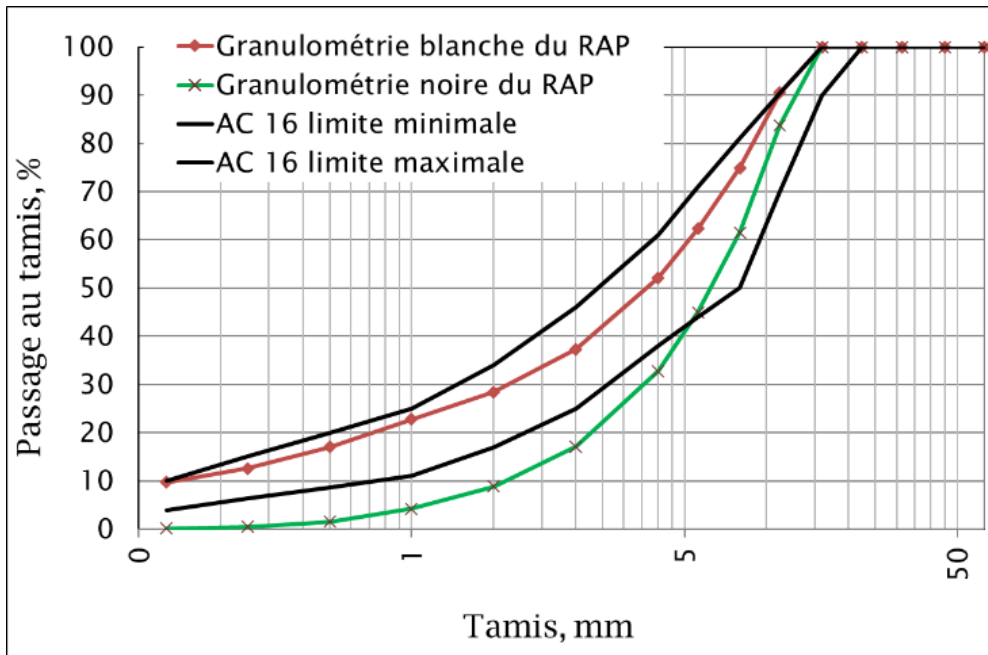


Fig. 16 Courbes granulométriques

### 3.3.2.2 Analyse du liant récupéré (SN 670 511\_EN-1426 [7], SN 670 512\_EN-1427 [8])

Les résultats des essais de caractérisation du bitume récupéré sont détaillés dans le Tab. 5 et la Fig. 17.

Tab. 5 Caractéristiques du liant récupéré

Paramètre	Norme	Liant récupéré
Point de ramollissement bille-anneau (°C)	[8]	63.4
Pénétrabilité à l'aiguille (1/10mm)	[7]	30
Point de fragilité Fraass (°C)	[16]	-10

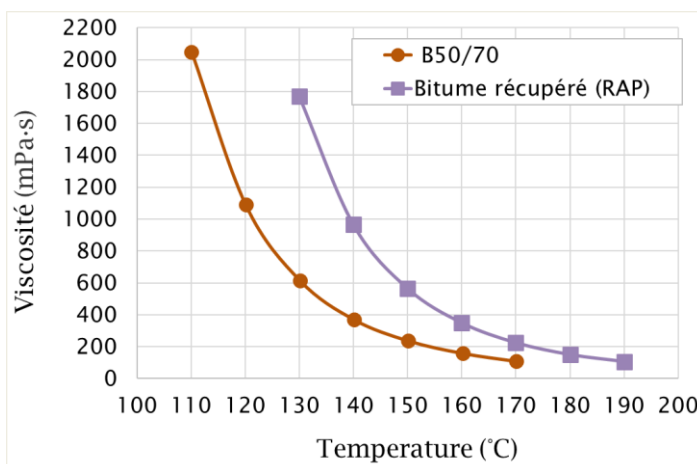
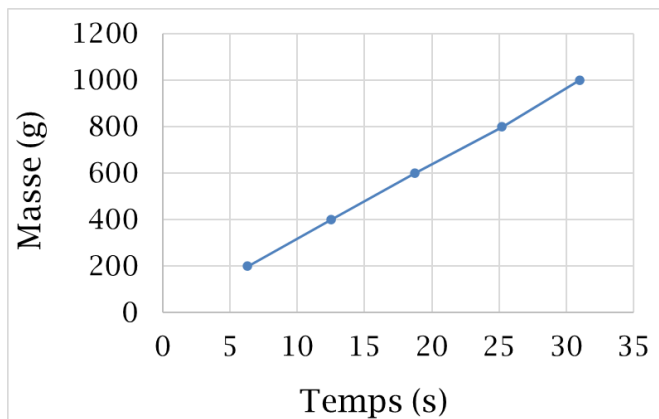


Fig. 17 Viscosité du liant récupéré

### 3.3.2.3 Coefficient d'écoulement du RAP (SN 670 902-6\_EN 933-6 [28])

Les matériaux alluvionnaires qui n'ont pas subi de concassage présentent habituellement des formes arrondies, alors que les granulats concassés présentent des arêtes vives et ont par conséquent une forte angularité. A compacité ou indice de vides égaux, une bonne angularité confère au mélange granulaire une meilleure stabilité mécanique.

Cet essai nécessite généralement plusieurs extractions afin d'obtenir suffisamment de matériau pour la détermination du coefficient d'écoulement. La fraction nécessaire est de 0,063/2 mm et la quantité requise par échantillon est de 1000 g. Afin de réduire le temps d'essais sans en diminuer sa représentativité, la quantité de matériau par essai (échantillon) a été réduite à 400 g. Dans le but de valider que la tendance du coefficient d'écoulement est directement proportionnelle à la quantité de matériau testée, des essais préalables ont été réalisés. Par conséquent, le coefficient d'écoulement a été déterminé pour des masses d'échantillons de 200 g, 400 g, 600 g, 800 g et 1000 g (Fig. 18).



**Fig. 18** Tendance du coefficient d'écoulement

Comme supposé initialement, la tendance du coefficient d'écoulement pour le sable est directement proportionnelle à la masse d'échantillon, comme illustré ci-dessus. La quantité de matériau de l'échantillon a donc été réduite à 400 g et ensuite multipliée par la valeur 2,5, ceci afin d'être comparée aux valeurs obtenues lors des essais effectués avec une quantité de matériau de 1000 g.

Une telle optimisation de la quantité de matériau permet d'économiser du temps, du matériau, de l'énergie ainsi que la consommation de solvant.

La comparaison des différents coefficients d'écoulement du sable « noir » et du sable « blanc » (désenrobé) est présentée dans le graphique de la Fig. 19. Le sable « blanc » a toujours besoin de moins de temps pour traverser le dispositif, ce qui signifie que le sable « blanc » est moins anguleux que le sable « noir » ; ce qui semble cohérent si l'on considère le film de bitume présent sur le sable « noir ».

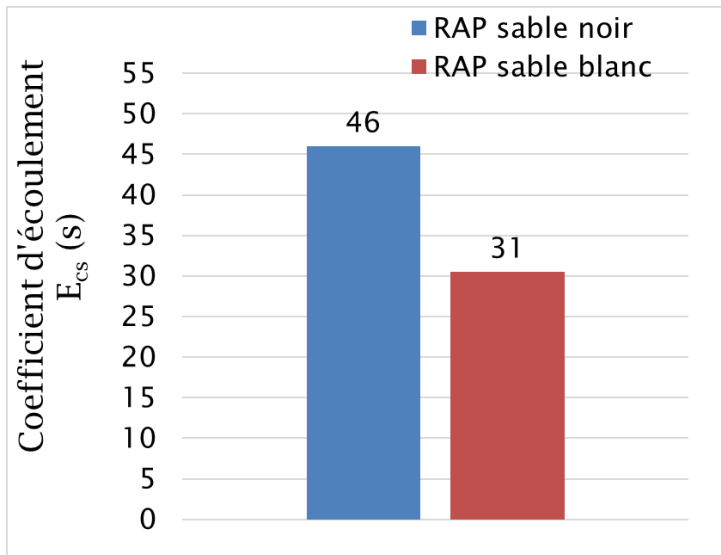


Fig. 19 Coefficient d'écoulement

La Fig. 20 illustre les résultats de l'essai d'écoulement effectués sur le sable provenant du RAP. On peut noter que la fraction de sable « blanc » évaluée à un temps d'écoulement de 31 s, ce qui correspond à un comportement semi-frottant ; ce qui indique *a priori* des performances moyennes à faibles.

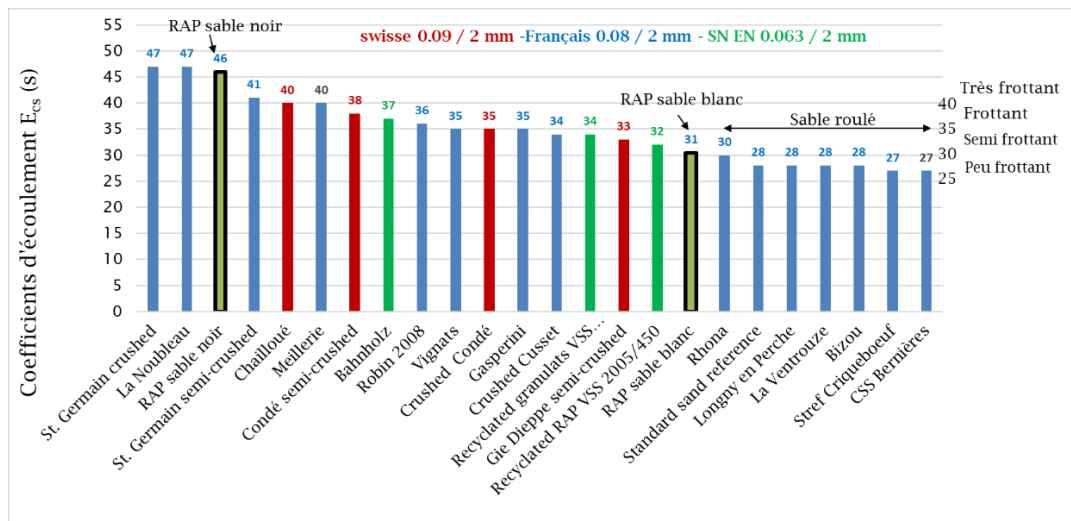


Fig. 20 Comparaison entre les coefficients d'écoulements (modifié de [28])

### 3.3.2.4 Coefficient d'aplatissement du RAP (SN-670902-3, EN 933-3 [29])

Le coefficient d'aplatissement des granulats permet de caractériser la forme plus ou moins « massive » des granulats dont la dimension est comprise entre 4 et 80 mm et de suivre la régularité au niveau de la fourniture des gravillons. Trois échantillons ont été testés pour l'indice d'aplatissement selon la norme (SN-670902-3\_EN-933-3), les résultats étant disponibles dans le Tab. 6.

Tab. 6 Coefficient d'aplatissement

	RAP
Valeur d'aplatissement	8.8
Indice d'aplatissement FI Tab-7 [18]	$FL_{10}$
Exigence Tab.3 [18]	$FL_{10}$



### 3.3.3 Caractérisation des granulats

Les granulats utilisés dans ce projet proviennent de la gravière de Chatillon SA (canton Fribourg). En plus du filler, des sables roulés, des sables concassés ainsi que des gravillons concassés ont été utilisés.

Les granulats ont été analysés en termes de granulométrie [5] et les résultats sont disponibles dans la Fig. 21.

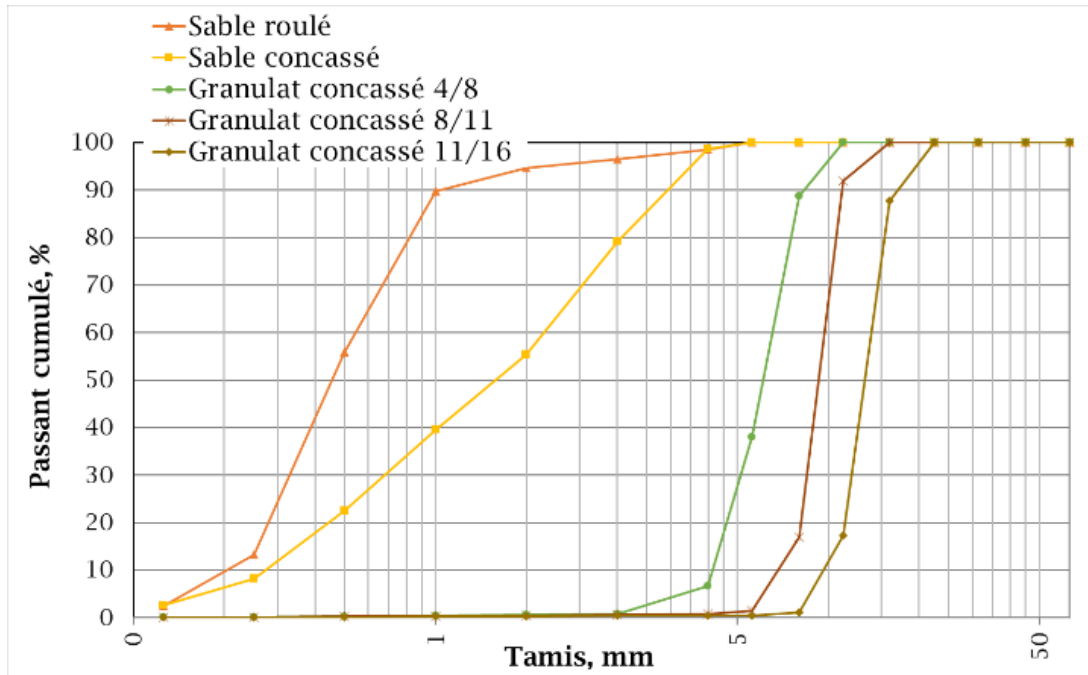


Fig. 21 Courbes Granulométrique des différentes fractions granulaires

### 3.3.4 Ciment

Le ciment utilisé dans le cadre de ce projet est un ciment Jura pro de l'entreprise Jura cement. Sa désignation normalisée [19] est CEM III/B 42.5L-LH/SR. Il contient de 20 à 34% de clinker et de 66 à 80% de sable de laitier. Ce ciment se caractérise par une grande résistance aux attaques chimiques.

Les caractéristiques techniques du ciment utilisé ont été fournies par l'entreprise et elles sont résumées dans le Tab. 7.

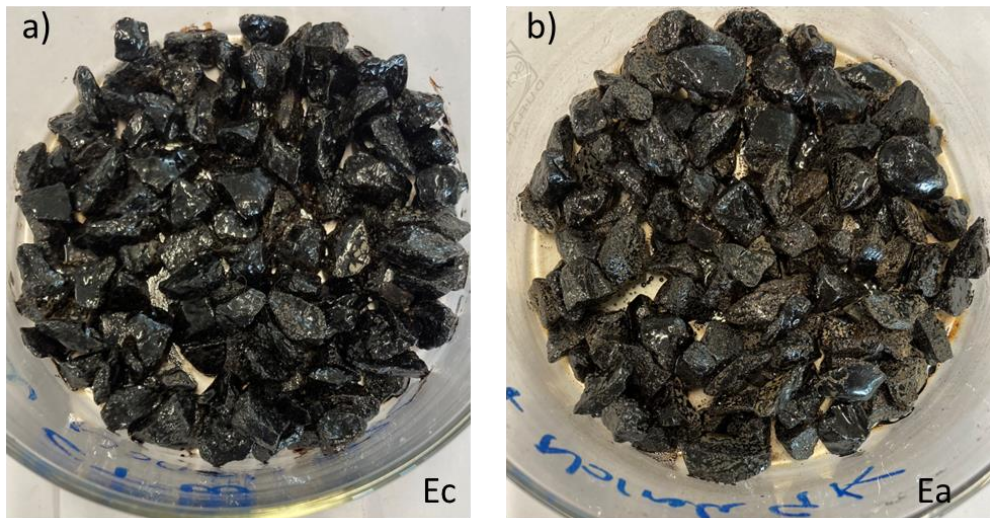
Tab. 7 Caractéristiques du ciment Jura Pro

Caractéristique	Valeur moyenne normalisée
Résistance à la compression (mortier normalisé) [MPa]	$\geq 16$ (7d) $\leq 62,5$ (28d)
Teneur en chlorure [% masse]	$\leq 0,1$
Masse volumique apparente en vrac [kg/m]	1000
Masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ]	3000

### 3.3.5 Essais d'enrobage et essais d'affinité liant/granulat

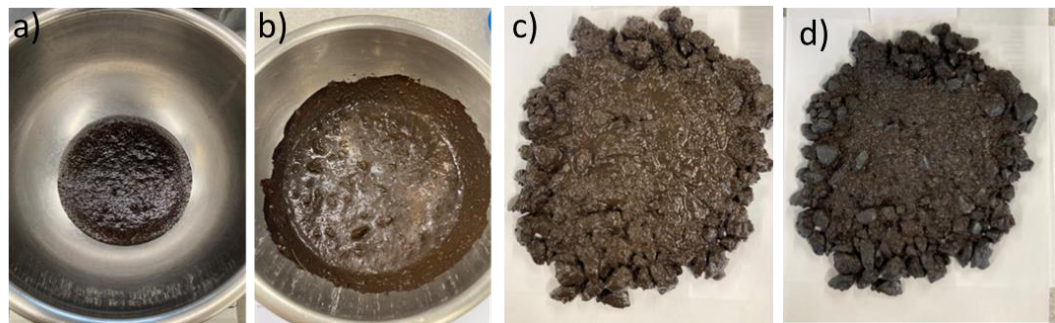
Des essais d'affinité liant/granulat ont été effectués selon la norme [20]. Cette méthode permet de vérifier la tendance du liant à se désenrober du granulat. En effet, l'efficacité de l'adhésion liant-granulat est déterminante pour la tenue à l'eau des enrobés à froid. La Fig. 22 présente les deux échantillons testés avec l'usage des émulsions Ea et Ec. Les images montrent que la cohésion entre l'émulsion Ec (Fig. 23a) et les granulats standards est

meilleure que celle avec l'émulsion Ea (Fig. 23b). Pour les deux émulsions, dans chaque cas, l'affinité est finalement jugée satisfaisante.

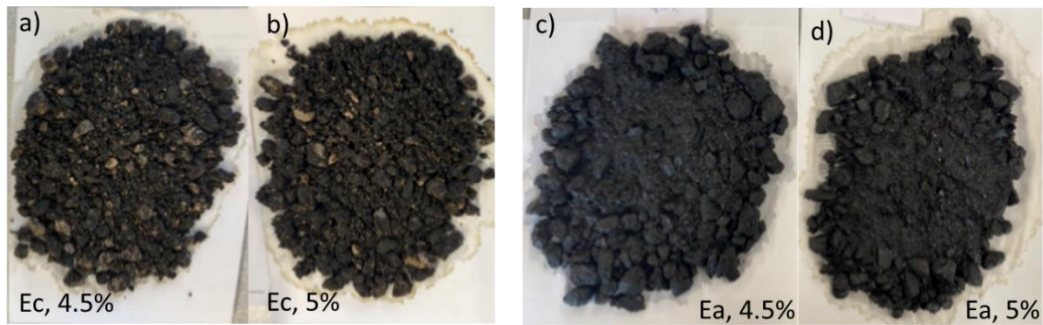


**Fig. 22** Résultats des essais d'affinité liant/granulat avec l'émulsion: a) Ea ; b) Ec

La norme française NF P 98-257-1:2004 permet d'évaluer le degré d'enrobage des granulats dans un enrobé produit par émulsion. Le test consiste à produire cinq mélanges en mélangeant une quantité spécifique de différents agrégats avec une quantité croissante d'émulsion (Fig. 23) ; la quantité totale d'eau (eau d'addition et eau de l'émulsion) restant constante. Cela permet d'évaluer le degré général d'enrobage et, en particulier, de sélectionner la quantité optimale d'émulsion pour obtenir le meilleur enrobage. Selon ces observations et essais il a été conclu que l'émulsion Ea est plus adaptée à ce type d'enrobé que l'émulsion Ec (Fig. 24). Les résultats ont également montré qu'une teneur en émulsion de 4.5 % est suffisante pour assurer un bon enrobage des granulats.



**Fig. 23** Emulsion Ea : a) sans agrégat b) avec agrégats c) Mélange étalé sur une feuille pour évaluer l'état d'enveloppement après 0.5 h d) après 24 heures



**Fig. 24** Enrobage des granulats après 24 h pour l'émulsion : a) Ec, 4,5% teneur en liant b) Ec, 5% teneur en liant c) Ea 4,5% teneur en liant d) Ea 5% teneur en liant

### 3.3.6 Bilan des essais préliminaires

Dans cette première phase de projet, l'ensemble des matériaux de base ont été caractérisés et les différents résultats détaillés. Par la suite, des essais sur l'enrobage et l'affinité liant-granat ont également été réalisés et discutés.

Sur la base de ces essais préliminaires, il est conclu que l'émulsion Ea est probablement la plus adaptée pour la fabrication de l'enrobé à froid dans le cadre du présent projet soit avec les matériaux utilisés pour ce projet spécifique. Par ailleurs, une teneur en émulsion de 4.7% minimum est recommandée pour les recettes de AC B 16 avec et sans RAP qui seront produites dans le cadre de ce projet. Cette teneur en émulsion de 4.7% est 0.2% que la valeur idéale déterminée précédemment, ceci afin d'améliorer encore davantage la qualité de l'enrobage ; ce paramètre étant déterminant.

Il est également conclu sur la base de ces premiers résultats qu'il est nécessaire de réaliser dans un premier temps une étude approfondie relative à la teneur en liant optimale. Cette étude préliminaire et son ampleur ne sont pas à négliger, comme le démontrent les multiples itérations réalisées ici.

Des essais étendus vont ensuite être réalisés sur les enrobés fabriqués avec les deux types d'émulsion Ea et Ec, ceci afin d'approfondir les aspects relatifs à leurs propriétés mécaniques et pouvoir mieux définir leurs domaines d'applications.

## 3.4 Essais étendus

### **Concept de base**

Cette partie du projet concerne l'analyse approfondie du comportement mécanique et des performances de l'enrobé à froid fabriqué en laboratoire avec et sans RAP, ceci tout en comparant les deux types d'émulsions préalablement sélectionnées.

Dans un premier temps, une étude de faisabilité de la production en laboratoire de l'enrobé à froid a été réalisée avec l'usage de plusieurs émulsions de type Ea. Les productions sont nommées AC B 16 0%-Ea<sub>i</sub> (i=1...5) dans la suite du document. Les résultats détaillés de cette étude de faisabilité sont présentés dans l'annexe A de ce rapport et ils ont permis de définir respectivement affiner le programme de fabrication, la méthode de compactage ainsi que la recette de l'enrobé à froid. Il est à relever que la méthode Marshall de compactage n'est pas adaptée à ce type de matériau. En effet, l'eau présente dans l'enrobé à froid ne sera pas drainée durant le compactage et un effet de compression est ensuite appliqué en engendrant un compactage de mauvaise qualité (eau « incompressible »). La méthode française de compactage Duriez semble par conséquent être la méthode la plus adaptée pour le compactage des enrobés à froid. Cette méthode est donc finalement sélectionnée pour ce projet.

Les essais étendus présentés dans la Fig. 8 ont ensuite été réalisés sur les enrobés à froid fabriqués avec les deux types d'émulsions Ea et Ec.

Le programme d'essais consiste essentiellement à caractériser le comportement mécanique et rhéologique des enrobés fabriqués à froid. Un accent particulier est mis sur les aspects potentiellement critiques soit : la maniabilité, la teneur en eau, la résistance à l'orniérage et l'évaluation de la rigidité des matériaux. Les essais préliminaires ainsi que le retour d'expérience dans le domaine des enrobés à froid montrent que l'évaluation de la sensibilité à l'eau et la méthode de compactage sont davantage appropriées avec l'essai Duriez que l'essai ITSR communément appliqué avec les enrobés à chaud.

Dans un premier temps, la fabrication de l'enrobé à froid a été effectuée avec l'émulsion Ec avec 0% et 50% de RAP. Dans cette première partie, l'effet de l'ajout du RAP est examiné. Suite à cela, l'émulsion Ea a été utilisée pour fabriquer l'enrobé à froid avec 50% de RAP en introduisant le ciment comme additif. Cette seconde étude permet d'étudier l'effet de l'ajout de ciment sur les propriétés mécaniques de l'enrobé à froid.

### Programme de conditionnement

Le programme de conditionnement appliqué pour l'ensemble des éprouvettes fabriquées est détaillé dans cette section. L'ensemble des éprouvettes issues des différentes méthodes de compactage ont suivi un programme de stockage présenté dans le **Tab. 8**.

**Tab. 8** Programme de conditionnement

Déroutement temporel		7 jours	7 jours	28 jours (tot.)
<b>6 X Duriez</b>	14 jours stockage à 18°C, 50% d'humidité relative			
		6 X stockage à sec [7 jours]	3 X stockage à sec [7 jours]	Essai
<b>6 X Duriez</b>	14 jours stockage à 35°C, 20% d'humidité relative		3 X stockage humide [7 jours]	Essai
		6 X stockage à sec [7 jours]	3 X stockage à sec [7 jours]	Essai
<b>4X Giratoire PCG</b>	14 jours stockage à 35°C, 20% d'humidité relative	Druckschwellversuch DSV	3 X stockage humide [7 jours]	Essai
				28
<b>2 X Orniérage</b>	28 jours stockage à 35°C, 20% d'humidité relative			Essai

On pourra encore relever que deux programmes de stockage ont été sélectionnés pour les éprouvettes Duriez :

- Murissement court terme normalisé [21]: ceci correspond à l'état frais de l'enrobé atteint en place quelques jours après la pose. Pour ce faire, les éprouvettes doivent être stockées pendant 14 jours à 18°C, 50% d'humidité relative (HR).
- Murissement accéléré [65]: ceci correspond à l'état final de l'enrobé atteint sur place quelques années après la pose (1 à 3 ans) [48]. Pour ce faire, les éprouvettes doivent être stockées pendant 14 jours à 35°C, 20% d'humidité relative.

Après avoir présenté le programme expérimental ainsi que le programme de conditionnement, les recettes de l'ensemble de fabrications de l'enrobé à froid AC B 16 sont proposées dans l'annexe B.

### Facteurs critiques relatifs à la fabrication d'enrobé à froid au laboratoire

Avant de fabriquer l'enrobé à froid avec un malaxeur du laboratoire (Fig. 25), il a été décidé d'effectuer manuellement des petites productions d'une quantité maximale de 7 kg sans RAP, ceci selon les indications détaillées disponibles dans le Tab. 43 de l'Annexe B. L'objectif consiste à vérifier à petite échelle la qualité de l'enrobé à froid tout en assurant un malaxage uniforme des matériaux. En effet, le malaxeur de laboratoire n'assure pas un mélange homogène et efficace de l'enrobé à l'émulsion considérant la grande quantité de matériaux à mixer. Au moment du mélange, les granulats plus fins ont tendance à rester

au fond du malaxeur sans être mélangés correctement avec l'émulsion. Des éprouvettes PCG ont ensuite été fabriquées avec ces premières fabrications manuelles afin d'effectuer l'essai de compression cyclique DSV selon la norme [3]. Pour rappel, cet essai permet d'évaluer la résistance aux déformations permanentes des enrobés bitumineux compactés sous charges dynamiques. Dans cette partie la teneur en liant est aussi variée pour l'émulsion Ea.



**Fig. 25** 20-0160 Malaxeur du laboratoire (30 litres)

Comme indiqué précédemment, une quantité de 7 kg d'enrobé AC B 16 a été fabriquée manuellement dans un premier temps, ceci avec une teneur en émulsion Ea de 4.7% et 0% de RAP. Après un temps de pause d'une heure, trois éprouvettes PCG ont été confectionnées. La Fig. 26 illustre la présence de l'eau bloquée au fond du moule de la presse à cisaillement giratoire (PCG). Cette eau résiduelle pourra avoir un effet sur la qualité du compactage de l'enrobé à froid. Les images des différentes éprouvettes montrent que l'enveloppement des agrégats est globalement satisfaisant mais que ce dernier n'est pas encore optimal avec la présence de quelques granulats non enrobés. Ce facteur pourra aussi avoir un effet significatif sur les propriétés mécaniques. En effet, la densité moyenne de compactage obtenue de  $2.23 \text{ g/cm}^3$  est relativement (trop) faible.

Les éprouvettes PCG ont ensuite été utilisées pour l'essai de compression cyclique DSV. Les résultats obtenus ne sont finalement pas satisfaisants, ceci pour l'ensemble des éprouvettes. L'ensemble des échantillons testés par cette méthode se déforment très rapidement et ne résistent pas aux contraintes dynamiques.



**Fig. 26** Eprouvettes PCG (100 x 65 mm)

De cette première fabrication manuelle, deux questions principales sont apparues :

- Est-ce que le temps de pause d'une heure a un effet sur les résultats des essais DSV ?
- La teneur en liant de 4,7% est-elle satisfaisante ?

Il a ainsi par la suite été décidé d'effectuer deux autres fabrications manuelles en utilisant le même type d'émulsion Ea, mais avec une teneur en liant plus élevée (5.3%) et avec la confection des éprouvettes PCG directement après le malaxage (sans le temps de pause). L'objectif de ces deux fabrications est d'une part de vérifier si l'augmentation du dosage en émulsion permettra d'améliorer les propriétés mécaniques de l'enrobé à froid ou non, et d'autre part d'étudier si le temps de pause d'une heure après le malaxage aura un effet sur les propriétés mécaniques.

Trois éprouvettes PCG ont donc été préparées après 1 h de pause et trois autres ont été directement fabriquées sans ce temps de pause. Les résultats des essais DSV restent non satisfaisants (très grandes déformations après moins de 200 cycles). On note que d'une part, le temps de pause d'une heure n'a pas d'effet sur les propriétés mécaniques ainsi que sur la densité de compactage et d'autre part que l'augmentation de la teneur en émulsion n'améliore pas la résistance mécanique.

Sur la base de ces résultats et d'une inspection visuelle minutieuse des échantillons, la teneur en émulsion de 4,7 % est validée pour la suite du projet.

### 3.4.1 Fabrication des enrobés à froid

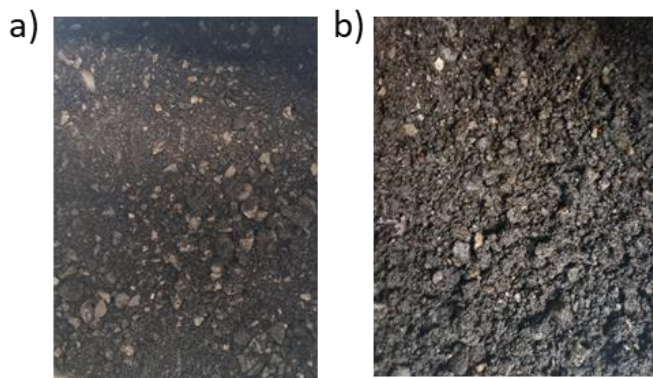
#### 3.4.1.1 Fabrication des enrobés avec et sans RAP et émulsion Ec

##### a. *Production en laboratoire*

La première phase de ce travail consiste à étudier l'effet de l'ajout de 50% de RAP dans l'enrobé fabriqué à froid soit à la température ambiante de 20°C environ. Pour cette étape l'émulsion Ec a été utilisée.

Une quantité totale de 144 kg d'enrobé AC B 16 0% RAP et AC B 16 50% RAP ont été respectivement fabriquées à la BFH selon le protocole de production défini dans la Fig. 85 de l'Annexe A et selon les recettes des Tab. 43 et Tab. 44 de l'Annexe B. Considérant la capacité maximale du malaxeur, la production a été effectuée en trois gâchées. Les matériaux ont par la suite été transportés à IMP pour la confection des différentes éprouvettes.

La Fig. 27 illustre l'aspect visuel des deux enrobés fabriqués en laboratoire avec 0% et 50% de RAP. On peut noter que l'enrobé fabriqué avec 50% de RAP présente visuellement un meilleur enrobage. Cela pourrait être dû au liant présent dans le RAP.



**Fig. 27** Aspect du mélange : a) AC B 16 0% RAP Ec b) AC B 16 50% RAP Ec

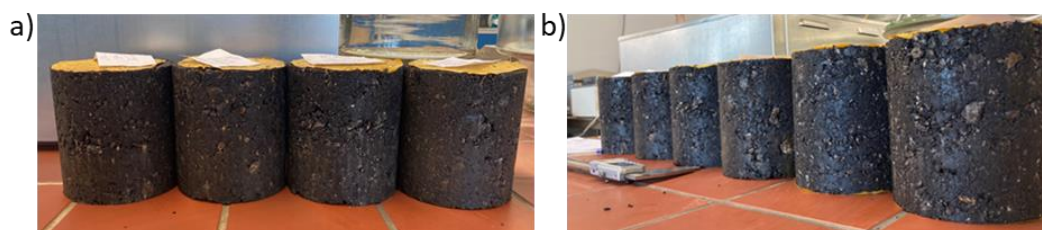
### **b. Confection des éprouvettes Duriez**

Pour les éprouvettes Duriez, les moules de diamètre 120 mm sont remplis de 3500 g d'enrobé. Six éprouvettes ont été compactées avec une pression de compactage de 120 kN destinée à un murissement accéléré et six éprouvettes ont été compactées avec une pression de 40 kN destinée à un murissement normalisé.

Les Fig. 28 et Fig. 29 montrent les différentes éprouvettes compactées à 40 kN et 120 kN. L'aspect visuel des éprouvettes AC B 16 50% RAP montre un meilleur enrobage par rapport aux éprouvettes des AC B 16 0% RAP, comme indiqué précédemment.



**Fig. 28** Eprouvettes Duriez AC B 16 0% RAP Ec compactées à une pression de : a) 40 kN ; b) 120 kN



**Fig. 29** Eprouvettes Duriez AC B 16 50% RAP Ec compactées à une pression de : a) 40 kN ; b) 120 kN

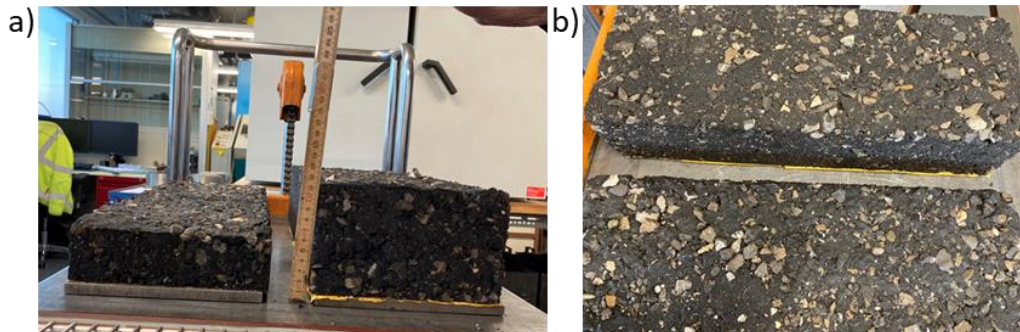
### **c. Production des plaques pour orniérage**

Deux plaques d'essais de dimension (50 × 18 × 10 cm) ont été fabriquées au compacteur de plaques [63] et conditionnées à 35°C, 20% d'humidité relative, ceci pendant une durée 28 jours (Fig. 30). Les deux mélanges avec 0% et 50% de RAP ont été produits à la BFH ; les plaques ayant ensuite été compactées par IMP.

Les premières plaques sans RAP ont atteint un degré de compactage de 85-90% seulement. La seconde des deux plaques a été compactée en essayant d'obtenir une



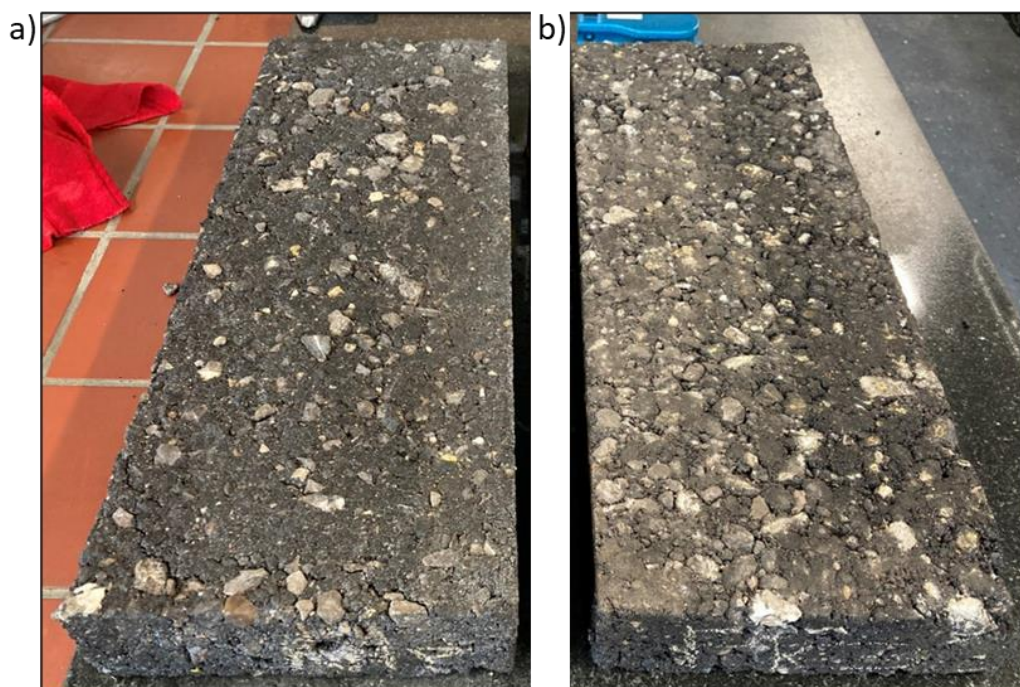
épaisseur de 5 cm au lieu des 10 cm habituels. Le but de cette tentative était d'évaluer si le manque de compaction était lié à la taille de l'échantillon (et donc à la présence d'eau). Les photos de la Fig. 30 montrent un enrobage non satisfaisant des granulats, ceci pour les deux plaques. Considérant l'état non-satisfaisant des plaques produites, l'essai d'orniérage n'a pas pu être réalisé.



**Fig. 30** Plaques d'orniérage sans RAP a) vue de face b) vue de dessus

Une plaque additionnelle a été compactée en utilisant le mélange contenant 50% de RAP. Là encore, un faible degré de compaction, comparable à celui de la première tentative (~90%), a été obtenu. Pendant le compactage, une faible quantité d'eau a par ailleurs été libérée.

Dans une nouvelle tentative, une plaque de 5 cm a été produite en utilisant une autre typologie de compacteur (avec segments en acier [22], Fig. 31b). Là encore, le degré de compaction requis n'a pas été atteint (~90%).



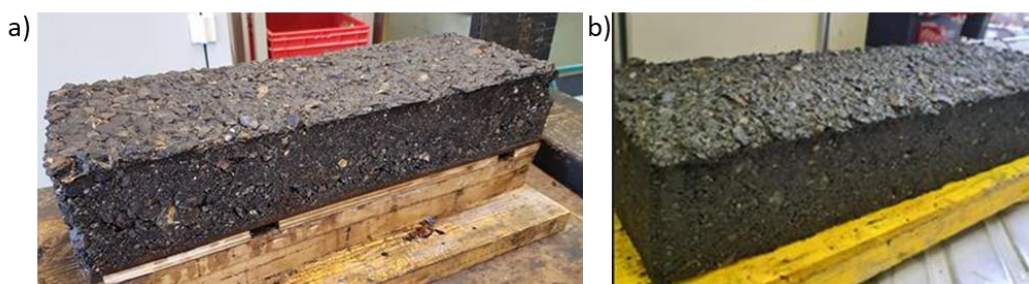
**Fig. 31** Plaque compactée à l'aide de : a) d'un compacteur à roues b) d'un compacteur à segments d'acier

L'analyse de la littérature et l'expérience française rapportent que l'enrobé à froid atteint un compactage optimal après plusieurs semaines d'exposition au trafic. Pour cette raison, la dernière plaque a été recompactée (à température ambiante) après quelques semaines, ceci afin de vérifier si un meilleur compactage était atteignable. L'expérience n'a montré aucun post-compactage significatif lors de cette tentative.

Pour les plaques produites à l'aide du compacteur à roues, la détermination de la densité de compactage indique des valeurs pas optimales (~90%). En général, les échantillons ayant une teneur en vide élevée sont mesurés géométriquement pour la détermination du volume. Les plaques compactées à l'aide d'un compacteur à roues produisent cependant une surface très irrégulière (Fig. 31a), ce qui ne permet pas une estimation précise de la densité de compactage. À cet égard, le compacteur avec un segment en acier offre une surface plus plane et donc une détermination plus fiable de la densité de compactage.

#### **d. Nouvelle fabrication de plaques d'orniérage**

Considérant la fragilité des premières plaques produites, deux nouvelles plaques pour essai d'orniérage ont été fabriquées au sein du laboratoire de la BFH (Fig. 32). Dans ce cas, les plaques ont été compactées directement au laboratoire afin d'avoir un temps d'attente plus court entre la production du mélange et le compactage, ceci considérant la diminution relativement rapide de maniabilité avec le temps.



**Fig. 32** Plaques orniérage a) AC B 16 0% RAP b) AC B 16 50% RAP (Les deux plaques ont été produites à l'aide de l'émulsion Ec)

#### **3.4.1.2 Fabrication des enrobés avec 50 % RAP et émulsion Ea**

Il a été décidé, sur la base de l'analyse bibliographique, de compléter l'étude avec une recette comportant l'ajout de ciment pour l'émulsion Ea, ceci dans le but d'étudier l'effet du liant hydraulique sur les propriétés mécaniques de l'enrobé.

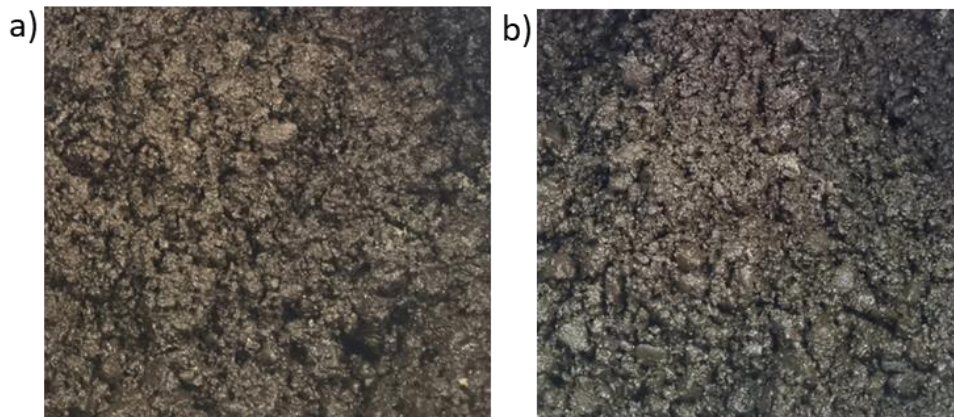
Afin de vérifier l'homogénéité du malaxage de l'enrobé AC B 16 50% avec et sans ciment, il a également été décidé de rajouter une quantité de 10 kg d'enrobé pour une fabrication manuelle soit sans malaxeur. De cette petite production une éprouvette PCG et une éprouvette Duriez ont été confectionnées.

La recette de l'enrobé AC B 16 50%RAP sans ciment est la même que celles avec l'émulsion Ec et est présentée dans le Tab. 44. La recette de l'enrobé AC B16 50% RAP avec 2% ciment est quant à elle indiquée dans le Tab. 45 de l'Annexe B.

#### **a. Production en laboratoire**

Pour cette étape, l'émulsion Ea (70/100) a été utilisée. Une quantité totale de 67.4 kg des enrobés AC B 16 50% RAP Ea et AC B 16 50% RAP 2%ciment Ea a été fabriquée à la BFH, ceci selon le protocole de production défini dans Fig. 85 de l'Annexe A. Considérant la capacité maximale du malaxeur, la production a été effectuée en deux gâchées. Les matériaux ont par la suite été transportés au laboratoire IMP pour la confection des différentes éprouvettes.

La Fig. 33 présente l'aspect visuel des deux enrobés fabriqués en laboratoire avec 0% et 2% de ciment. On peut noter que les deux enrobés fabriqués avec RAP, avec et sans ciment, présentent un enrobage satisfaisant, presque identique. Il peut être conclu que l'ajout de ciment n'a pas d'effet sur l'aspect du mélange à l'état frais.

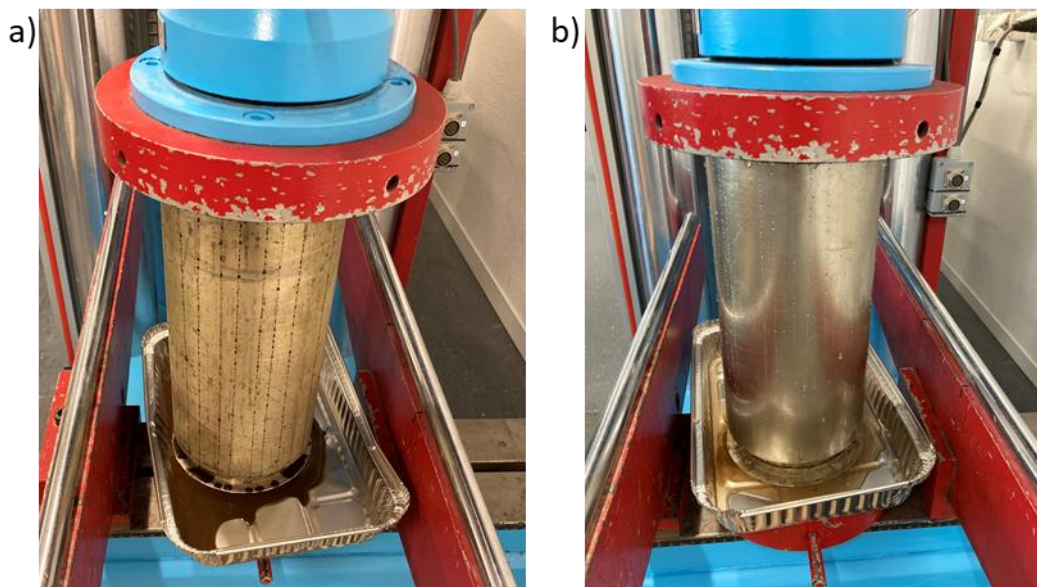


**Fig. 33** Aspect du mélange a) AC B 16 50% RAP Ea b) AC B 16 50% RAP Ea+ 2% ciment

### **b. Fabrication des éprouvettes Duriez**

Quatre éprouvettes Duriez pour l'enrobé AC B16 50%RAP et pour l'enrobé AC B16 50%RAP avec ajout de ciment ont été confectionnées. Ces éprouvettes ont fait l'objet d'un compactage Duriez avec une pression de compactage de 120 kN destinée à murissement accéléré à sec. La Fig. 34 présente un exemple de compactage Duriez pour les deux enrobés avec et sans ciment. Les observations faites lors du compactage indiquent que le ciment favorise la rupture de l'émulsion étant donné la couleur de l'eau sortant des deux moules.

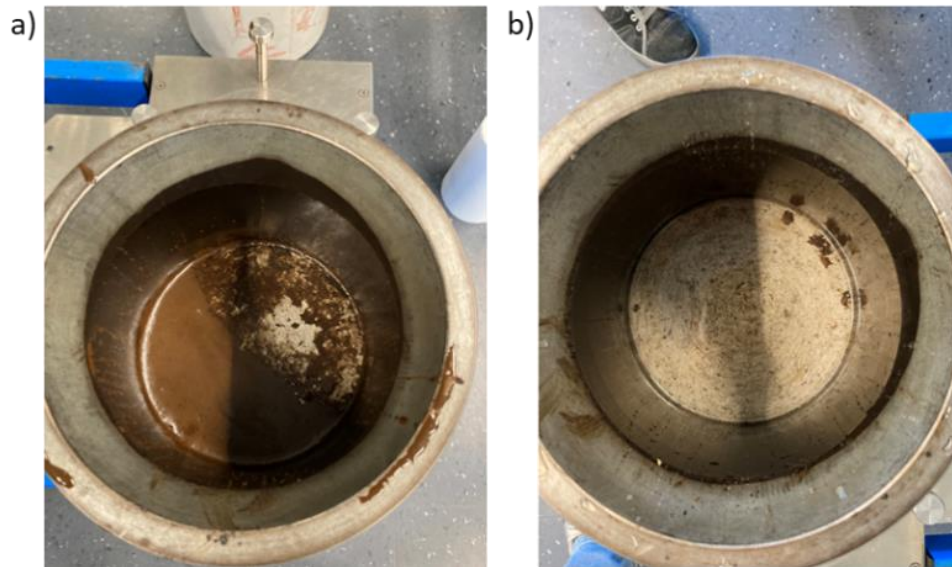
Les éprouvettes issues de la méthode Duriez de compactage ont ensuite été stockées à sec selon la procédure de murissement accéléré.



**Fig. 34** Eprouvettes Duriez: a) AC B 16 50% RAP Ea b) AC B 16 50% RAP Ea+ 2% ciment

### **c. Echantillons avec Presse à Cisaillement Giratoire (PCG)**

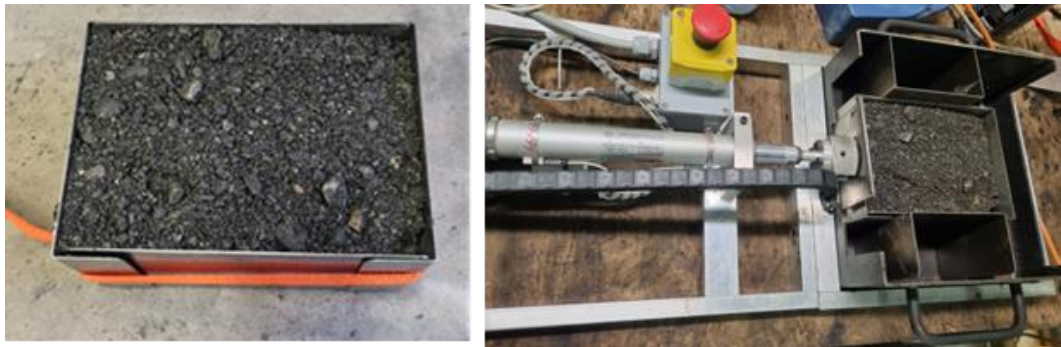
La presse à cisaillement giratoire est utilisée selon la norme EN 12697-31 afin de fabriquer quatre éprouvettes : deux sont destinées à l'essai de rigidité IT-CY, une éprouvette sera utilisée pour l'essai de compression cyclique DSV et une éprouvette pour un essai ITS. La Fig. 35 montre les moules de la PCG après le compactage et démoulage des enrobés, avec et sans ciment. Il peut être noté que l'eau présente au fond du moule pour l'enrobé contenant 2% de ciment est beaucoup plus claire. Ceci confirme l'avantage de l'usage du ciment ainsi que son impact sur la rupture de l'émulsion et très probablement sur l'adhésion émulsion/granulat.



**Fig. 35** Eprouvette PCG: a) AC B 16 50% RAP Ea b) AC B 16 50% RAP Ea+ 2% ciment

#### **d. Moules pour essai de maniabilité**

Trois moules ont été préparés pour chaque fabrication. Les moules ont été pesés avant d'être remplis par l'enrobé (Fig. 36). Une quantité d'enrobé (environ 6 kg) est ensuite versée dans ces moules, ceci sans effectuer de compactage. La surface supérieure du moule rempli a ensuite été arasée afin d'assurer une épaisseur finale de  $100 \pm 2$  mm. La mesure de la masse de chaque moule est effectuée avant l'essai, ceci en vue de l'exploitation des mesures.



**Fig. 36** Moule pour essai maniabilité

### **3.4.2 Résultats des essais de laboratoire**

Après la production des enrobés, une analyse de bitume récupéré ainsi que de la composition de l'enrobé a été effectuée afin de vérifier leurs conformités par rapport à la recette cible. Les détails peuvent être trouvés dans l'Annexe C.

#### **3.4.2.1 Enrobés avec et sans RAP et émulsion Ec**

##### **a. Maniabilité**

Un premier moule a été directement testé via le maniabilimètre Nynas et les deux autres moules ont été conservés pendant respectivement 3 et 6 h à 20°C et 50% d'humidité. La vitesse de l'essai (piston) est de 1 cm/s.

Les valeurs maximales de force à 0 h, 3 h et 6h sont présentées dans la Fig. 37. Dans un premier temps, ces résultats montrent une augmentation importante de la force maximale de poussée lorsque le temps de conservation augmente, ceci pour les deux fabrications. Plus les matériaux sont mûrs plus la force de cisaillement est élevée et par conséquent la

maniabilité est faible. L'effort de cisaillement à 0 h est plus élevé pour le AC B 16 0% RAP, mais sur la base de l'expérience acquise avec ce type d'appareil, la différence peut être considérée comme relativement modérée (12 kN – 20%). En revanche l'enrobé sans RAP présente une maniabilité meilleure que l'enrobé AC B 50% RAP après 3 et 6 h. L'ajout de 50% de RAP réduit visiblement la maniabilité d'environ 26% et d'environ 79% à respectivement 3 et 6 h de mûrissement. En revanche la maniabilité est augmentée d'environ 20% à 0 h.

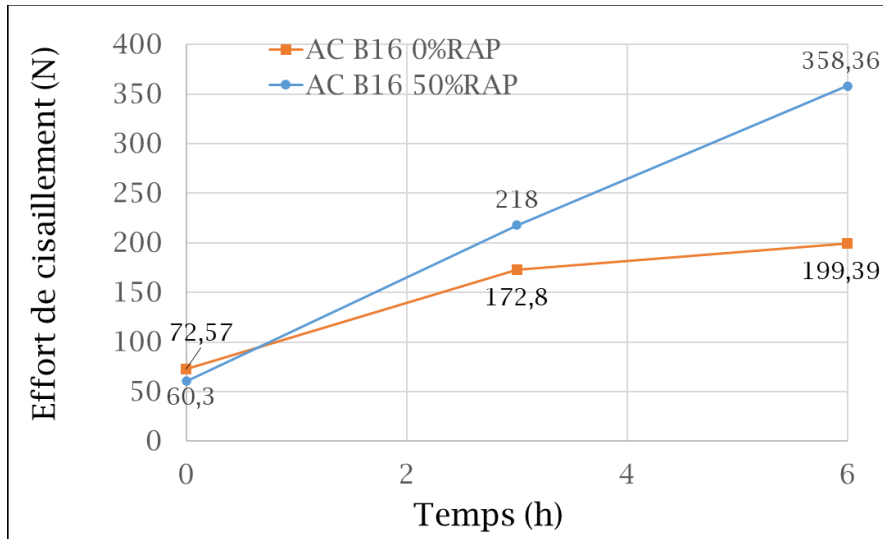


Fig. 37 Valeurs de Maniabilité à 0, 3 et 6 h pour l'enrobé AC B 16, émulsion Ec

#### b. Presse à Cisaillement Giratoire (PCG)

Différents échantillons pour les deux mélanges d'enrobé ont été compactés avec la presse à cisaillement giratoire PCG. Quel que soit le type de mélange, une importante perte d'eau a été constatée pendant le compactage ainsi qu'après le stockage. La densité de compactage et la teneur en vides réelle ne sont donc atteintes qu'après deux semaines de stockage. Les essais en laboratoire ont montré qu'entre 50% et 70 % de l'eau contenue dans l'échantillon est perdue pendant le compactage, en fonction du mélange (voir **Tab. 9**). En effet, l'eau présente dans l'enrobé est en partie drainée lors de compactage, une partie résiduelle étant stockée à l'intérieur de l'échantillon au niveau des pores, tandis qu'une partie reste finalement bloquée au-dessus de l'échantillon, à l'intérieur du moule. On pourra observer que la majorité de l'eau résiduelle de l'échantillon est perdue pendant les 3 à 4 premiers jours de stockage.

**Tab. 9** Résumé de la variation de la masse volumique et de la teneur en vides de différents échantillons compactés à la PCG (200 girations).

	AC B 16, 0% RAP, Emulsion Ec						
	Masse [g]			Masse volumique apparente [g/cm <sup>3</sup> ]		Teneur en vides [%]	
	Avant PCG	Après PCG	Après stockage	Après PCG	Après stockage	Après PCG	Après le stockage
<b>E3</b>	4780	4632	4561	2.380	2.340	5.8	7.2
<b>E4</b>	4780	4633	4565	2.380	2.350	5.6	7.0
<b>E5</b>	4780	4615	4544	2.390	2.350	5.3	6.7
<b>E6</b>	4780	4519	4448	2.380	2.350	5.6	7.1
			<b>Moyenne</b>	<b>2.380</b>	<b>2.350</b>	<b>5.6</b>	<b>7.0</b>

AC B 16, 50% RAP, Emulsion Ec							
	Masse [g]			Masse volumique apparente [g/cm <sup>3</sup> ]		Teneur en vides [%]	
	Avant PCG	Après PCG	Après stockage	Après PCG	Après stockage	Après PCG	Après le stockage
<b>E2</b>	4550	4478	4408	2.310	2.280	6.4	7.9
<b>E3</b>	4550	4483	4410	2.310	2.270	6.6	8.0
<b>E4</b>	4550	4466	4384	2.310	2.270	6.4	8.1
<b>E5</b>	4550	4460	4379	2.310	2.270	6.5	8.2
			<b>Moyenne</b>	<b>2.310</b>	<b>2.270</b>	<b>6.5</b>	<b>8.1</b>

#### AC B 16, 0% RAP, Ec

Le mélange atteint, après un stockage de 15 jours à 35°C et 20% HR, une densité moyenne de compactage de 2,350 g/cm<sup>3</sup> et une teneur en vide de 7%. La teneur en vides est calculée en utilisant la masse volumique réelle indiquée dans l'Annexe C du présent rapport.

#### AC B 16, 50% RAP, Ec

Le mélange contenant 50 % de RAP a atteint une densité de compactage moyenne de 2,270 g/cm<sup>3</sup> et une teneur en vides d'environ 8% après le stockage. La teneur en vides est également calculée sur la base des données rappelées dans l'Annexe C.

### **c. Essai de compression cyclique (DSV)**

La Fig. 38 présente les éprouvettes après l'essai de compression cyclique DSV, réalisé selon la norme [3]. Les résultats sont par ailleurs disponibles dans la Fig. 39. De fortes déformations ont été notées dès le début de l'essai. La déformation est si forte et rapide que, dans la plupart des cas, les résultats ne peuvent même pas être exploités, ceci car les échantillons sont complètement déformés après quelques centaines de cycles (quelques minutes), alors qu'ils devraient résister à l'essai durant plusieurs heures (Fig. 39a).

Comme on peut le voir dans la Fig. 39a, la déformation de l'échantillon augmente très rapidement et dépasse déjà 20 % après seulement quelques cycles. La Fig. 39b, montre le même mélange (froid) qui a ensuite été compacté selon la méthode Marshall mais à chaud (145°C). Le but de cet essai était d'évaluer l'effet de la température sur le compactage et les propriétés mécaniques, ceci pour le même mélange, c'est-à-dire avec une composition identique. On peut noter que, bien que l'échantillon ne réussisse pas le test, il résiste nettement mieux à la déformation mécanique et ne se déforme fortement qu'après environ 3'000 cycles.

Ce fait suggère donc que, bien que le mélange soit identique, la température joue un effet significatif à la fois sur la teneur en vides (la densité apparente atteinte à chaud est de 2,380 g/cm<sup>3</sup>) et probablement sur l'affinité bitume/agrégat.



Fig. 38 Éprouvettes après l'essai DSV

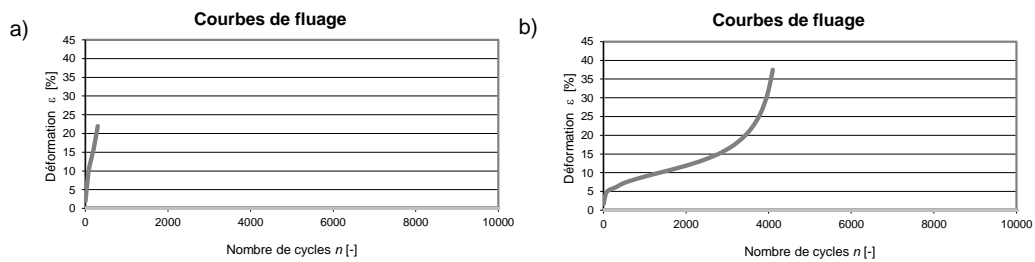


Fig. 39 Courbe de fluage pour a) AC B 16 sans RAP (froid) b) AC B 16 sans RAP (chaud)

#### d. Résistance à la compression (Essai Duriez)

Les éprouvettes ont suivi le programme de stockage détaillé dans le **Tab. 8**. Nous pouvons encore indiquer que, dans le cadre de ce projet, les essais de résistance à la compression sont tous effectués après 28 jours et avec une vitesse de 1 mm/s.

##### Mélange AC B 16 0% RAP (A)

Le **Tab. 10** résume l'ensemble des résultats issus de l'essai Duriez pour ce mélange A (sans RAP), ceci pour des éprouvettes compactées à 40 kN et 120 kN ; et stockées dans des conditions sèches (S) ou humides (H).

Tab. 10 Résultats Duriez de l'enrobé AC B 16, 0% RAP

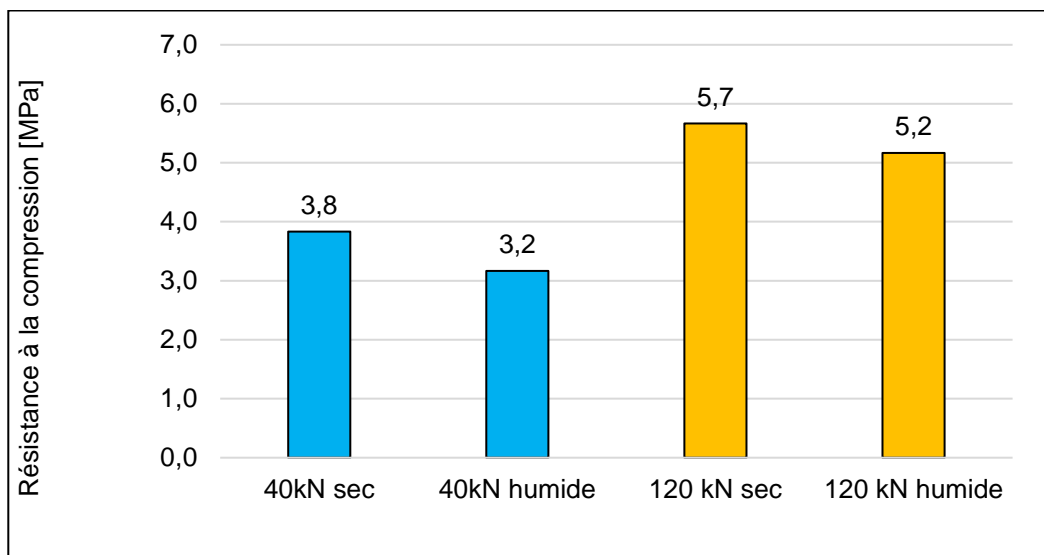
	Masse volumique apparente [g/cm <sup>3</sup> ]		Teneur en vides [%]		Force max [kN]	Résistance à la compression [MPa]
	Avant le stockage	Après le stockage	Avant le stockage	Après le stockage		
<b>40 kN S</b>	2.270	2.170	11%	14%	41.5	3.8
<b>40 kN H</b>	2.240	2.210	12%	13%	36.4	3.2
<b>120 kN S</b>	2.350	2.290	8%	10%	65.2	5.7
<b>120 kN H</b>	2.340	2.310	8%	9%	60.6	5.2

Nous pouvons effectuer les observations suivantes :

- En moyenne, la compression à 40 kN entraîne une densité apparente inférieure de 3 à 4 % à celle des échantillons compactés à 120 kN. Il faut également tenir compte du fait qu'une certaine quantité d'eau est encore présente à l'intérieur des échantillons après la compression. La densité apparente diminue donc encore de quelques pourcents après l'évaporation de l'eau.
- En compactant les échantillons à 120 kN, on obtient alors une teneur en vides trop élevée (9-10%), ceci est probablement dû majoritairement à la présence d'eau résiduelle à l'intérieur de l'échantillon, ce qui ne permet pas un compactage optimal.

Les résultats de la résistance à la compression pour un murissement normalisé ainsi que pour un murissement accéléré sont tous deux présentés dans la Fig. 40.

Les valeurs de la résistance à la compression  $R$  obtenue pour le cas sans RAP sont environ 5.7 MPa pour un compactage à 120 kN et un murissement accéléré et 3.8 MPa pour un compactage de 40 kN et un murissement normalisé. A titre comparatif, des études ont été effectuées par [48], [53] sur le comportement des grave-émulsion sans RAP. Les résultats montrent des valeurs de résistance à la compression pour des éprouvettes sèches autour de 4.6 MPa et 2.4 MPa respectivement pour un compactage à 120 kN et 40 kN. L'ordre de grandeur des valeurs obtenues semble donc cohérent.



**Fig. 40** Résistance à la compression pour l'enrobé à froid AC B 16 0% RAP

#### Mélange AC B 16 50% RAP (B)

Le **Tab. 11** résume les résultats du mélange B (50% RAP) obtenus pour les éprouvettes compactées à 40 kN et 120 kN ; et stockées dans des conditions sèches (S) ou humides (H). Nous pouvons observer :

- Les échantillons compactés à 40 kN ont atteint une masse volumique apparente inférieure de 5% à celle des échantillons compactés à 120 kN.
- La teneur en vides obtenue est également assez élevée : ~12% à 40 kN et ~7% à 120 kN avant stockage et entre 11~14% à 40 kN et entre 8- 9% à 120 kN après stockage.

**Tab. 11** Résultats Duriez du AC B 16 50% RAP

	Masse volumique apparente $g/cm^3$		Teneur en vides [%]		Force max [kN]	Resistance à la compression [MPa]
	Avant le stockage	Après le stockage	Avant le stockage	Après le stockage		
<b>40 kN S</b>	2.160	2.110	12.3%	14%	49	4.5
<b>40 kN H</b>	2.180	2.190	11.7%	11%	41	3.7
<b>120 kN S</b>	2.290	2.250	7.2%	9%	70	6.2
<b>120 kN H</b>	2.300	2.260	7.0%	8%	68	6.0

Les résultats de la résistance à la compression pour un murissement normalisé ainsi que pour un murissement accéléré sont résumés dans la Fig. 41.

Nous pouvons observer que les valeurs de la résistance à la compression obtenues pour le cas 50% de RAP pour des éprouvettes sèches sont autour de 6 MPa pour un compactage à 120 kN et un murissement accéléré et autour de 4 MPa pour un compactage de 40 kN et un murissement normalisé. Konate, 2022 [73] a étudié la résistance à la compression des enrobés neufs et recyclés dans le cadre de sa thèse et indique des valeurs de résistance à la compression  $R$  après 14 jours à 18 °C pour des



éprouvettes sèches entre 5 et 8 MPa. Les résultats du présent projet sont donc visiblement du même ordre de grandeur que les résultats issus de la littérature.

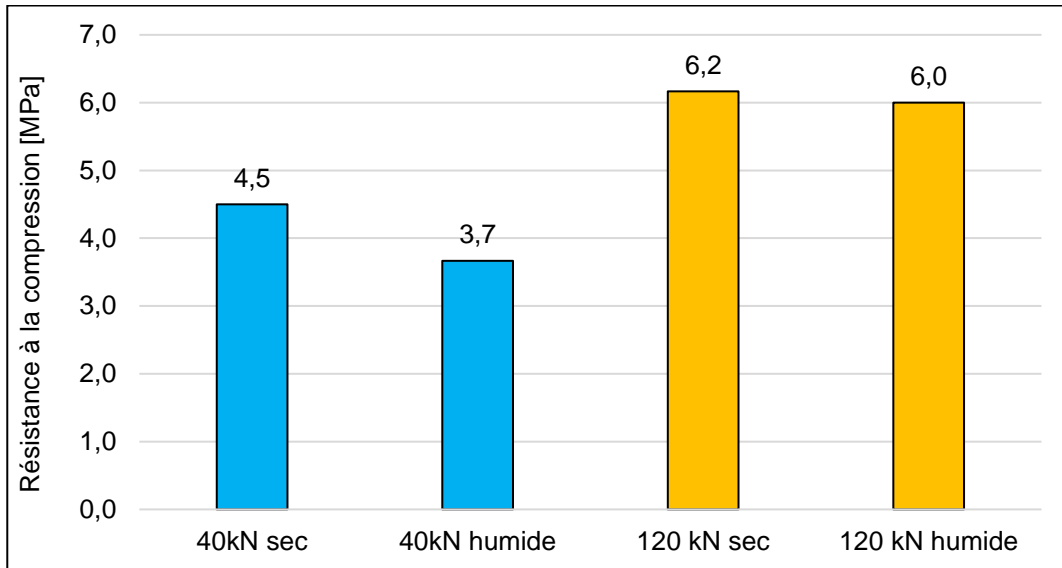


Fig. 41 Résistance à la compression pour l'enrobé à froid avec 50% RAP

#### Comparaison des mélanges A et B

Nous pouvons observer que les deux mélanges n'atteignent pas une densité de compactage satisfaisante (pour un enrobé AC B 16), ceci probablement à cause de la présence d'eau. En revanche, une teneur en vides comparable est obtenue pour les deux mélanges A et B (après stockage) soit d'environ 14% (à 40 kN) et 9% (120 kN). Les valeurs obtenues de résistance à la compression pour les AC B 16 fabriqués avec et sans RAP et avec l'émulsion Ec sont globalement satisfaisantes au regard des valeurs comparatives issues de la littérature. On relèvera encore que ces valeurs sont bien supérieures aux valeurs minimales requises pour une couche de fondation AC F K (> 3MPa). En effet, les performances suivantes ont été rapportées dans [67] d'après différentes études conduites sur les enrobés contenant du RAP :

- Compacité sur éprouvettes Duriez : 86 à 93 %,
- Résistance en compression simple après 14 jours à 18 °C : 5,0 à 8,0 MPa,
- Rapport immersion-compression à 18 °C (après 7 jours de conservation à l'air et dans l'eau) : 0,70 à 0,75.

Les résultats obtenus montrent également que l'ajout de 50% de RAP entraîne les conséquences suivantes :

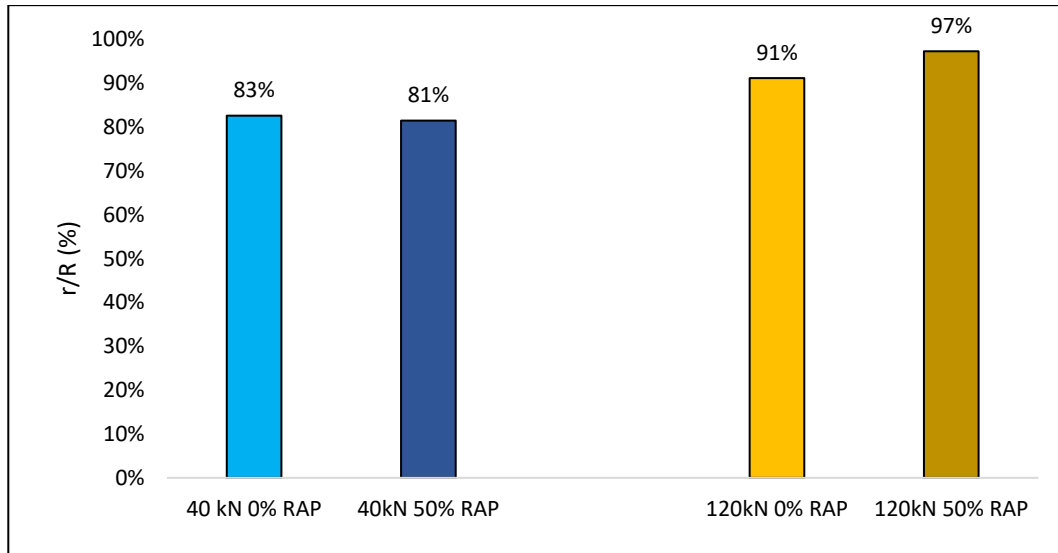
- Dans le cas d'un compactage à 40 kN : une augmentation de la résistance de 18% et de 16%, par rapport à l'échantillon sans RAP, ceci pour les éprouvettes sèches et humides respectivement.
- Dans le cas d'un compactage à 120 kN : une augmentation de la résistance à la compression de 9% et 15% pour les éprouvettes sèches et humides respectivement.
- Indépendamment de la force de compactage et de la méthode de stockage, les résistances en compression des éprouvettes sèches et humides des enrobés AC B 16 50% RAP sont plus élevées que celles des enrobés AC B 0% RAP.

D'autre part, on notera que :

- L'ajout de 50% de RAP a un effet plus important sur les propriétés mécaniques pour un murissement accéléré que pour un murissement à court terme.
- Les valeurs de résistances obtenues pour un murissement à 35°C sont plus élevées que celle mesurées après la conservation à 18°C. Ceci est probablement dû à l'augmentation simultanée de la force de compactage et de la température de conservation. Il semble que

la conservation à 18°C et 50% HR des éprouvettes ne « durcit » pas significativement le liant et nous sommes donc bien en présence d'un état frais du matériau. Cependant, après 14 jours à 35°C et 20% HR le liant durcit sensiblement et on peut le qualifier de matériau mûri [19].

- Les valeurs de sensibilité à l'eau ( $r/R$ ) obtenues pour les différents cas (Fig. 42) varient de 83% à 97%. Il est noté que la tenue à l'eau semble légèrement améliorée pour les enrobé sans et avec RAP après 14 jours à 35°C. On peut conclure que l'ajout de 50% de RAP diminue la sensibilité à l'eau de l'enrobé à froid.



**Fig. 42** Sensibilité à l'eau

#### e. **Résistance aux déformations permanentes (orniérage)**

Les deux plaques produites au sein de la BFH (chapitre 3.4.1.) ont été testées à l'orniérage selon la norme SN EN 12697-22 [4] par le laboratoire IMP.

Pour les deux plaques, la déformation après 30'000 cycles (environ 40 mm, visible sur la Fig. 43) était bien supérieure à la déformation maximale mesurable qui est de 25 mm avec ce type d'équipement. Le résultat est donc largement non conforme par rapport aux exigences normatives pour enrobés AC B. Aucune différence significative n'a été notée avec ou sans RAP. Tout comme l'essai DSV réalisé précédemment, cette méthode démontre que les plaques ne sont pas résistantes par rapport à une sollicitation dynamique.



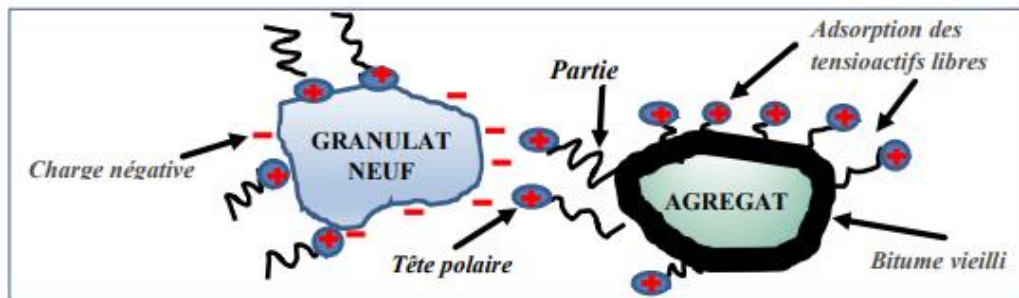
**Fig. 43** Plaques d'orniérage après l'essai

## f. **Bilan**

Les résultats présentés dans ce chapitre montrent que l'ajout du RAP améliore de :

- 6% la sensibilité à l'eau à 120 kN.
- 16% la résistance à la compression pour les éprouvettes sèches avec un murissement normalisé.
- 9% et 15% la résistance à la compression respectivement pour les éprouvettes sèches et humides avec un murissement accéléré.
- L'ensemble des résultats montrent que l'ajout du RAP améliore la résistance mécanique de l'enrobé et ceci pourrait être expliqué par la contribution du bitume « vieilli » des agrégats d'enrobés à travers des tensioactifs libres qui s'y adsorbent par leur queue lipophile (partie du tensioactifs et présentant une affinité pour l'huile et qui y est soluble) (Fig. 44) [73]. Selon Konate, 2021 [73] leur présence conjuguée avec l'augmentation de la compacité améliore la cohésion interne de l'enrobé recyclé, d'où l'augmentation de la résistance en compression. De plus, Ling et al. [75] ont révélé par analyse d'imagerie numérique que le niveau de recouvrement en liant des granulats dans les mélanges à froid améliore la résistance à l'eau et la maniabilité.

Une autre piste complémentaire d'explication est liée au fait de la contribution du liant « vieilli » du RAP, liant par définition plus dur que celui de l'émulsion et qui peut amener une certaine contribution à la résistance mécanique totale.



**Fig. 44** Mécanisme d'adsorption des tensioactifs sur les granulats neufs et les agrégats d'enrobé dans le recyclage à l'émulsion [73]

### 3.4.2.2 Enrobés avec 50 % RAP, avec et sans ciment et émulsion Ea

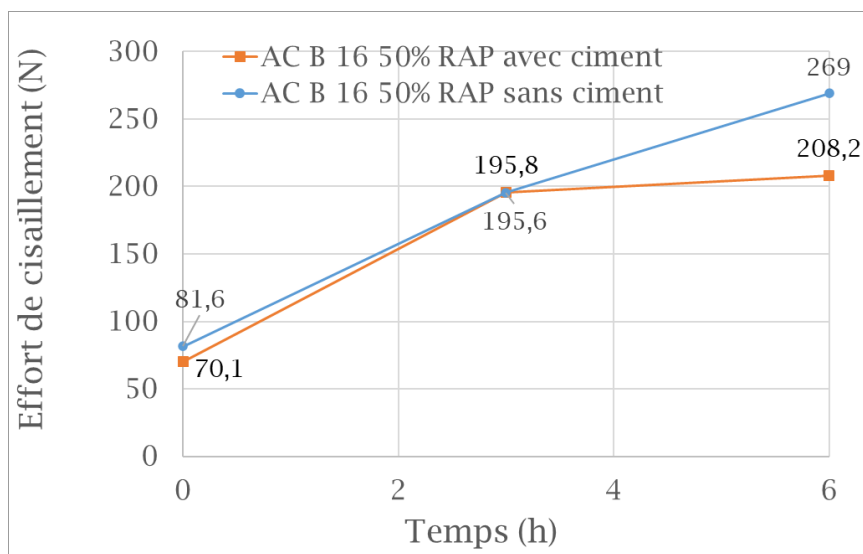
#### a. **Maniabilité**

Le même principe que celui présenté dans le chapitre 3.3.4 pour la préparation des éprouvettes et la réalisation des essais est appliqué.

Sur la base des résultats présentés dans la Fig. 45, nous pouvons observer :

- Une augmentation de l'effort de cisaillement avec l'augmentation du temps de conservation pour les deux enrobés, ceci avec et sans ciment.
- à 0 h : la maniabilité de l'enrobé AC B 16 50%RAP sans ciment est plus faible que celle de l'enrobé AC B 16 50%RAP avec ciment. En effet, la force de poussée nécessaire pour cisailier l'échantillon AC B 16 50%RAP sans ciment est plus élevée que celle avec 2% de ciment. Bien que relativement faible (11 kN), cela traduit la difficulté de mise en place de l'enrobé.
- à 3 h : Pas d'effet notable sur la maniabilité lié à l'ajout de ciment.
- à 6 h : Le matériau est comme attendu plus mure après 6 h de conservation. On peut relever une différence relativement significative de 29% entre la maniabilité des enrobés AC B 16 50%RAP avec et sans ciment. L'enrobé avec ciment présente une force plus faible donc une meilleure maniabilité. Ce résultat peut paraître quelque peu surprenant si l'on suppose que le ciment doit favoriser la prise de résistance (hydratation) et de facto diminuer la maniabilité.
- En effet, selon Delfosse et al [49] une montée en cohésion trop rapide rendre l'enrobé peu propice à une bonne maniabilité. En revanche une montée en cohésion trop lente peut

retarder la mise en service de la chaussée. Dans notre cas le ciment aide dans ce mécanisme de montée en cohésion rapide.



**Fig. 45** Valeurs de la maniabilité à 0, 3 et 6 h pour l'enrobé AC B 16 avec émulsion Ea

#### b. Résistance à la compression (Duriez)

Les résultats de l'essai Duriez pour les enrobés avec et sans ciment, ceci pour les deux types de productions manuelle et avec malaxeur sont résumés dans le **Tab. 12**. Il vient les commentaires suivants :

- Les éprouvettes ont été compactées à 120 kN. La masse volumique apparente est d'environ 2.30 g/cm<sup>3</sup> pour les enrobés avec et sans ciment produits à l'aide du malaxeur. Les teneurs en vides obtenues avant et après stockage sont respectivement d'environ 6% et 7%.
- Pour la fabrication manuelle, une légère différence entre les masses volumiques des enrobés avec et sans ciment est notée. Cette différence est un peu plus importante pour la teneur en vides des deux enrobés (environ 1%), et est réduite après le stockage.

**Tab. 12** Résultats des essais Duriez de compression

	Teneur en ciment [%]	Masse volumique avant stockage [g/cm <sup>3</sup> ]	Masse volumique après stockage [g/cm <sup>3</sup> ]	Teneur en vides avant stockage [%]	Teneur en vides après stockage [%]	Force max [kN]	Résistance à la compression [MPa]
<b>Grande production malaxeur (60 kg, 4 Duriez)</b>							
120 kN S	0%	2.290	2.260	6.0	7.2	84.0	7.3
120 kN S	2%	2.300	2.280	6.2	6.8	94.1	8.4
<b>Petite production manuelle (10 kg, 1 Duriez)</b>							
120 kN S	0%	2.280	2.260	6.5	7.3	90.6	8.0
120 kN S	2%	2.320	2.260	5.3	7.6	106.4	9.5

Les résultats de la résistance à la compression des enrobés avec et sans ciment pour un murissement accéléré sont présentés dans la Fig. 46. Nous pouvons effectuer les commentaires ci-après.

Production avec malaxeur :

- Pour des valeurs proches de teneurs en vides, la résistance à la compression de l'enrobé AC B 16 50% RAP + 2% ciment est 16% plus élevée que celle de l'enrobé AC B 16 50% RAP sans ciment.

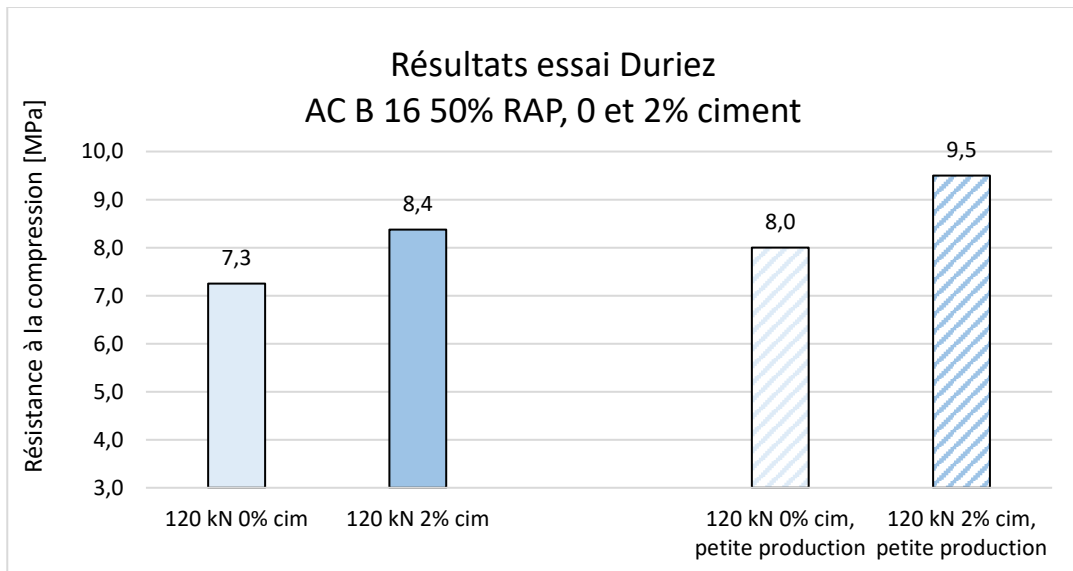
- La force maximale de rupture pour l'enrobé AC B 16 50% RAP + 2% ciment est 12 % plus élevée que celle de l'enrobé AC B 16 50% RAP sans ciment.

Production manuelle :

- Pour des valeurs proches de teneur en vides, la résistance à la compression de l'enrobé AC B 16 50% RAP + 2% ciment est 19% plus élevée que celle du même enrobé mais sans ciment.
- La force maximale de rupture pour l'enrobé AC B 16 50% RAP + 2% ciment est 17 % plus élevée que celle de l'enrobé AC B 16 50% RAP sans ciment.

Comparaison des deux productions :

- Pour l'enrobé AC B 16 50% RAP sans ciment, la force maximale de rupture ainsi que la résistance à la compression sont respectivement plus élevées de 8% et 10% pour l'éprouvette issue de la fabrication manuelle que celle issue de la fabrication avec malaxeur de laboratoire.
- Pour l'enrobé AC B 16 50% RAP +2% ciment, la force maximale de rupture ainsi que la résistance à la compression sont plus élevées de 13% pour la fabrication manuelle que pour la fabrication avec malaxeur.



**Fig. 46** Résistance à la compression AC B 16 50% RAP avec et sans ciment (petite production=manuelle, grande production=malaxeur laboratoire)

### c. Essai de compression cyclique DSV

Les expériences précédentes avec l'enrobé à froid et l'essai de compression cyclique n'ont pas donné de résultats positifs (voir chapitre 3.4.2.1).

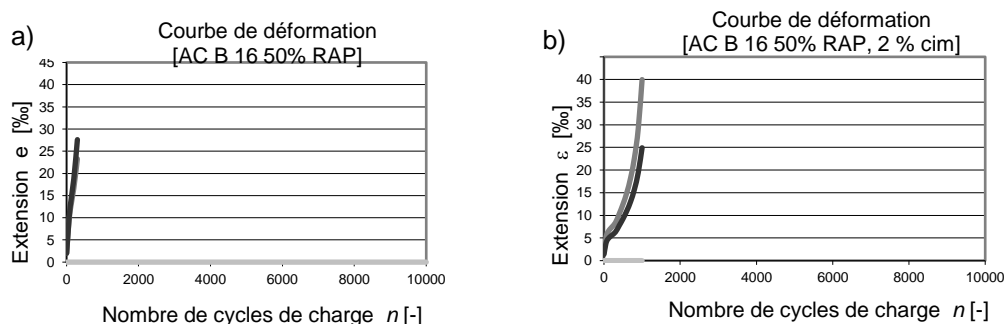
Les caractéristiques des éprouvettes des deux mélanges préparés avec la PCG sont disponibles dans le Tab. 13. Avant l'essai de compression cyclique, les éprouvettes ont été stockées pendant 15 jours à 35°C et 20% d'humidité relative. Les essais de compression cyclique ont ensuite été réalisés sur les deux mélanges bitumineux (avec et sans ciment) à la température de 50°C et avec une charge sinusoïdale haversine. On relèvera encore que les éprouvettes confectionnées sont caractérisées par une teneur en vides située entre 6.4% et 7.3%.

**Tab. 13** Caractéristiques des échantillons pour essai de compression cyclique DSV

Mélange	RAP	Emulsion	Ciment	Densité volumique apparente [g/cm <sup>3</sup> ]	Densité volumique réelle [g/cm <sup>3</sup> ]	Teneur en vides [%]
A	50%	Ea	0%	2.260	2.438	7.3%
B	50%	Ea	2 %	2.290	2.448	6.4%

La Fig. 47a illustre la courbe de déformation des échantillons préparés sans agrégats d'enrobés (RAP). On constate que les échantillons se déforment rapidement (déjà après quelques centaines de cycles) et ne résistent donc pas aux contraintes dynamiques.

Les éprouvettes préparées en ajoutant du ciment (Fig. 47b) montrent une résistance légèrement meilleure aux contraintes dynamiques que les échantillons sans ciment. Cependant, ces échantillons échouent également au test et se déforment fortement après environ 1000 cycles de charge seulement. Comme précédemment, les résultats sous sollicitation dynamique ne sont donc finalement pas concluants.

**Fig. 47** Courbe de déformation-nombre de cycles pour : a) AC B 16 50% RAP, b) AC B 16 50% RAP 2% ciment

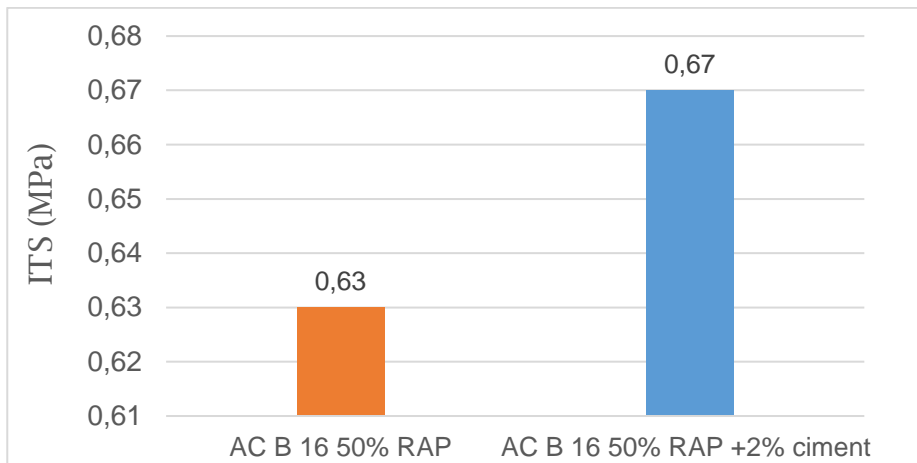
#### d. Essai de résistance à la traction indirecte (ITS)

Pour les mélanges AC B 16 50% avec et sans ciment, deux éprouvettes fabriquées avec la PCG (150 x 110 mm) ont été ensuite testées par un essai de résistance à la traction indirecte ITS. L'essai est effectué uniquement pour des éprouvettes sèches.

Les éprouvettes présentent une teneur en vides de 8.1% et 7.7% respectivement pour les enrobés AC B 16 50% et AC B 16 50% +2% ciment (Tab. 14). Les valeurs de rupture ITS reportées dans la Fig. 48 montrent que l'ajout de 2% de ciment engendrent une amélioration de 6% de la résistance mécanique. L'ordre de grandeur des forces de rupture reste cependant relativement bas, ce qui pouvait légitimement être attendu avec ce type de mélange.

**Tab. 14** Caractéristiques des éprouvettes et résultats d'essai ITS

Mélange	Teneur en ciment [%]	Hauteur [mm]	Diamètre [mm]	Densité volumique apparente [g/cm <sup>3</sup> ]	Densité volumique réelle [g/cm <sup>3</sup> ]	Teneur en vides [%]	Force maxi de rupture [kN]	ITS [MPa]
Mélange A	0%	113.06	150	2.240	2.438	8.1%	16.7	0.63
Mélange B	2 %	112.67	150	2.260	2.448	7.7%	17.7	0.67



**Fig. 48** Résultat de l'essai ITS pour les AC B 16 50% RAP avec et sans ciment

#### e. **Rigidité**

Les éprouvettes ont été testées 4 mois après leur fabrication pour la réalisation d'un essai de rigidité (module d'élasticité, méthode IT-CY) à la température de 20°C et fréquence de 2 Hz [26]. Nous pouvons observer que l'ajout de 2% de ciment augmente de 75% la rigidité de l'enrobé à froid fabriqué avec l'émulsion Ea. La valeur de la rigidité avec 2% de ciment correspond approximativement à la rigidité d'un AC B 16 préparé à chaud (Tab. 15).

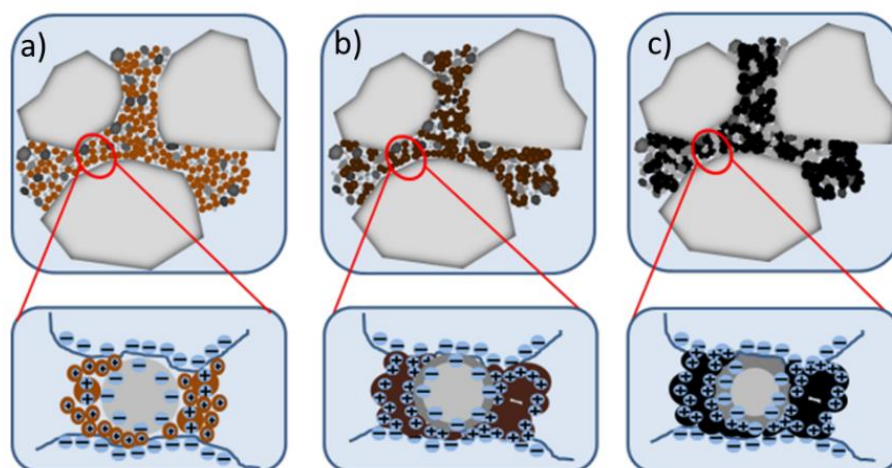
**Tab. 15** Résultats d'essai de rigidité

	RAP	Emulsion	Ciment	Rigidité [MPa]	Densité volumique apparente [g/cm <sup>3</sup> ]	Densité volumique réelle [g/cm <sup>3</sup> ]	Teneur en vides [%]
<b>Mélange A</b>	50%	Ea	0%	3'181	2.260	2.438	7.3%
<b>Mélange B</b>	50%	Ea	2 %	5'572	2.290	2.448	6.4%

#### f. **Bilan**

Sur la base de ces résultats obtenus sur l'enrobé à froid AC B 16 50% RAP, nous pouvons constater que l'ajout de ciment améliore globalement la résistance à la compression et la rigidité de l'enrobé à froid. On notera une amélioration de 6%, 12% et 75% respectivement pour la résistance à la traction indirecte, la résistance à la compression et la rigidité.

Le ciment ajouté dans l'enrobé interagit visiblement avec l'émulsion et les deux agissent comme des liants. En effet, l'émulsion de bitume fournit l'eau nécessaire à l'hydratation du ciment. Dans un premier temps, cette hydratation de ciment accélère donc la rupture de l'émulsion de bitume et améliore sa résistance à la compression (Fig. 49a). Quand l'émulsion de bitume se brise et le ciment commence à s'hydrater, ces derniers commencent alors à lier les granulats (Fig. 49b). Ce phénomène augmente par la suite la résistance à la compression de l'enrobé avec le temps. Après l'évaporation de l'eau contenue dans l'émulsion, l'émulsion de bitume ne contient alors plus que du bitume et assure une meilleure liaison entre les granulats (Fig. 49c) [64] ; l'eau de l'émulsion allant interagir avec le ciment afin de favoriser la prise.



**Fig. 49** Représentation schématique de la rupture d'une émulsion de bitume en présence de ciment [64]

### 3.4.3 Bilan : comparaison des deux émulsions

Les deux émulsions utilisées dans le cadre de ce projet ont montré des résultats prometteurs pour l'enrobé à froid avec agrégats d'enrobé (RAP).

L'essai Duriez de compression a été effectué dans les mêmes conditions d'essai pour les différents enrobés fabriqués à froid. Le Tab. 16 résume les résultats issus de l'essai de compression Duriez. Nous pouvons effectuer les comparaisons ci-après.

Comparaison 1 : Effet du RAP - AC B 16 0% RAP et 50%RAP, émulsion Ec

- Une meilleure résistance à la compression est obtenue avec l'ajout de 50% de RAP (9%).

Comparaison 2 : Effet de l'émulsion- AC B 16 50% RAP, Ec et AC B 16 50% RAP, Ea

- La teneur en vides de l'enrobé avec émulsion Ea est plus faible de 17 % que celle de l'enrobé avec émulsion Ec.
- La force maximale de rupture avec émulsion Ea est 20% plus élevée que celle avec émulsion Ec.
- La résistance à la compression de l'enrobé avec émulsion Ea est environ 18% plus élevée que celle de l'enrobé avec émulsion Ec.

Comparaison 3 : Effet du ciment - AC B 16 50% RAP, Ea et AC B 16 50% RAP, Ea +2% ciment

- La résistance à la compression de l'enrobé avec 2% de ciment est 16% plus élevée que celle du même enrobé sans ajout de ciment.

**Tab. 16** Comparaison des résultats Duriez pour l'ensemble des fabrications

	Masse volumique apparente [g/ cm <sup>3</sup> ]	Teneur en vides [%]	Force max [kN]	Resistance à la compression [MPa]
<i>Emulsion Ec</i>				
<b>AC B 16 0%, Ec</b>	2.290	9.4	65	5.7
<b>AC B 16 50%, Ec</b>	2.250	8.9	70	6.2
<i>Emulsion Ea</i>				
<b>AC B 16 50%, Ea</b>	2.260	7.4	84	7.3



<b>AC B 16 50% + 2% ciment, Ea</b>	2.280	6.3	94	8.4
--	-------	-----	----	-----

Concernant l'essai de traction indirecte ITS, cet essai n'était initialement pas prévu pour les enrobés fabriqués avec émulsion Ec, mais des essais réduits ont tout de même été réalisés. En revanche, l'essai ITS a quant à lui été réalisé après six mois de stockage des éprouvettes à 20°C. Ceci permet d'étudier l'effet d'une longue période de murissement sur les propriétés d'un enrobé à froid. Les résultats résumés dans le **Tab. 17** montrent que :

- La teneur en vides de l'enrobé avec émulsion Ec après murissement de 6 mois augmente de 17% pour les éprouvettes contenant 50% de RAP, ceci comparativement la situation sans vieillissement. Il est supposé que cela est inhérent à la perte d'eau.
- La résistance à la traction indirecte ITS de l'enrobé avec émulsion Ec après murissement de 6 mois augmente de 6% avec l'ajout de 50% de RAP comparativement au cas sans RAP. Ceci nous permet d'illustrer l'effet de l'ajout d'agrégats d'enrobé sur l'augmentation de la résistance mécanique d'un enrobé mûri.
- La teneur en vides de l'enrobé 50% RAP émulsion Ec après murissement de 6 mois est comparable à celle du même enrobé avec émulsion Ea.
- L'enrobé avec 50% RAP et émulsion Ec (après 6 mois de murissement) présente des valeurs ITS plus élevées de 16% que celle préparée avec l'émulsion Ea. Ceci montre que la période 6 mois de murissement augmente significativement la résistance de l'enrobé.

**Tab. 17** Comparaison des résultats ITS pour l'ensemble de fabrication

	Masse volumique apparente [g/ cm <sup>3</sup> ]	Teneur en vides [%]	Force max [kN]	ITS [MPa]
<b>Emulsion Ec</b>				
<b>AC B 16 0%, Ec (Murissement de 6 mois)</b>	2.350	6.9	17.9	0.69
<b>AC B 16 50%, Ec (Murissement de 6 mois)</b>	2.270	8.1	18.8	0.73
<b>Emulsion Ea</b>				
<b>AC B 16 50%, Ea</b>	2.240	8.1	16.7	0.63
<b>AC B 16 50% + 2% ciment, Ea</b>	2.260	7.7	17.7	0.67



## 4 Production en centrale d'enrobé

Des productions d'enrobé à froid selon une technique à la mousse ont été effectuées dans le cadre de ce projet ; ceci dans le but d'évaluer au poste d'enrobage l'impact de l'ajout d'agrégats d'enrobé (RAP) ainsi que la faisabilité de ce type d'enrobé froid avec un poste traditionnel.

Relevons également qu'un poste d'enrobage suisse en mesure de produire des enrobés à froid à l'émulsion et désirant de participer au projet n'a pas pu être trouvé dans le cadre de ce projet.

### 4.1 Organisation de la production

La production d'un enrobé à froid avec de la mousse de bitume a été réalisée à la centrale d'enrobage de Weibel AG à Oberwangen (BE) au mois de novembre 2020. Le mélange cible est un enrobé AC B 16 N avec un bitume B 70/100.

Au total, neuf recettes (M1 à M9) ont été produites en modifiant les proportions de filler, de sable, de granulats, la teneur en liant ainsi que la teneur en RAP. Les recettes des différents mélanges sont présentées dans l'Annexe C. La température de fabrication en sortie de poste des différents enrobés est d'environ 16 °C et 73% d'humidité de l'air. Chaque mélange a ensuite été évalué visuellement dans le godet de la pelle et les trois mélanges les plus prometteurs selon le critère de degré d'enrobage des granulats ont été sélectionnés pour des essais supplémentaires au laboratoire.

Les mélanges jugés les plus prometteurs ont également été compactés in situ avec les roues d'une pelle mécanique et à nouveau contrôlés visuellement.

Les enrobés M5, M6 et M9 ont été testés pour leur maniabilité in situ à 0, 2 et 4 heures (maniabilimètre Nynas). Les partenaires du projet ont ensuite récupéré des matériaux de ces mêmes mélanges pour la réalisation des essais complémentaires au laboratoire.

#### **Production des enrobés**

Les mélanges ont été produits selon la procédure traditionnelle appliquée pour les enrobés à chaud, mais avec une diminution des températures pour les composants granulaires (Fig. 50).

La Fig. 51 présente, à titre d'illustration, l'aspect des deux mélanges M5 et M6. Les deux images montrent globalement un enrobage (très) faible des granulats. En effet, les deux enrobés contiennent les mêmes proportions de granulats, mais la teneur en liant du mélange M6 est plus faible que celle de l'enrobé M5 ; cette différence dans la teneur en liant n'ayant pas trop d'incidence sur l'aspect final de ces deux productions en l'occurrence.



**Fig. 50** Aspect de l'enrobé à froid fabriqué à la mousse



**Fig. 51** Aspect visuel des enrobés : a) M5, b) M6

## 4.2 Essais de caractérisation des enrobés à froid

### 4.2.1 Essai in situ - Maniabilité

L'essai de maniabilité a été réalisé directement in-situ conformément à la norme [4], ceci uniquement pour les mélanges M3, M5, M6 et M9 (Tab. 18). Chaque mélange a été testé à un temps de 0 h, 2 h et après 4 heures. Les échantillons ont été conditionnés à l'extérieur à une température d'environ 16 °C et une humidité de l'air d'environ 73 %. Pour chaque mélange, deux échantillons ont été préparés pour chaque pas de temps. Au total, 6 échantillons ont donc été prélevés par mélange.

**Tab. 18** Mélanges retenus pour les essais complémentaires

Mélange	Teneur en liant (%)	Teneur en eau (%)	Teneur en RAP (%)
M3	6.8	3.0	0
M5	6.8	1.0	0
M6	5.8	1.5	0
M9	5.8	1.5	62.5

Les résultats des essais de maniabilité sont illustrés dans le Tab. 19.

**Tab. 19** Résultats de maniabilité

Temps (h)	Mélanges			
	M3	M5	M6	M9
	<b>Effort de cisaillement (N)</b>			
0	68.2	66.7	70.8	74.1
2	154.2	120.7	110.4	171.8
4	221.0	108.4	141.8	162.5

Les résultats de la Fig. 52 montrent que :

- À 0 h, le mélange M9 possède la valeur la plus élevée d'effort de cisaillement. Pour rappel, plus la force est élevée, plus l'ouvrabilité est faible. Ce mélange présente donc l'ouvrabilité la plus faible entre les quatre mélanges. La différence entre les mélanges est cependant très faible pour ce pas de temps. Relevons également que ce mélange M9 contient une teneur en RAP de 62,5% et ceci pourrait être une des raisons permettant d'expliquer la faible ouvrabilité à 0 h ainsi que même à 2 h.
- En revanche, après à 4 h de conditionnement, la force de poussée du mélange M9 nécessaire pour cisailer l'échantillon a sensiblement diminué, phénomène quelque peu

surprenant tout de même. La maniabilité de ce mélange M9 reste cependant plus faible que celle du mélange M6 sans RAP contenant une teneur en liant et en eau identiques.

- Le mélange M3 contient une teneur en liant de 6.8 % et la teneur en eau la plus élevée des différents mélanges soit 3.0 %. La force de cisaillement de ce mélange à 0 h est plus élevée que celle du mélange M5 qui contient une même teneur en liant et une granulométrie assez comparable mais une teneur en eau trois fois plus faible. Il semblerait que la maniabilité de ce mélange soit peut-être affectée par cette teneur en eau ; les résultats étant à considérer avec précaution bien que les ordres de grandeurs des forces mesurées correspondent à celles mesurées lors des essais de laboratoire discutés préalablement.
- Les mélanges M5 et M6 présentent l'effort de cisaillement le plus faible à 0, 2 et 4 h et donc la maniabilité la plus élevée. En comparant ces deux recettes avec la recette M3, on constate que la teneur en eau est entre 2 et 3 fois plus faible. Ceci pourra être la raison de cette meilleure maniabilité des deux mélanges M5 et M6.

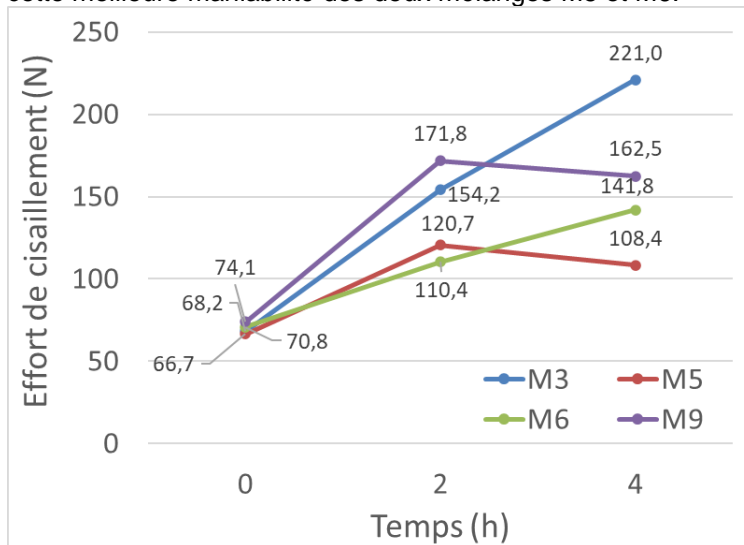


Fig. 52 Résultats des essais de maniabilité

## 4.2.2 Essai en laboratoire

### 4.2.2.1 Teneur en eau

La teneur en eau mesurée pour les trois mélanges M5, M6 et M9 est d'environ 3 % comme illustré dans la Fig. 53. Relevons ici que les enrobés ont été conservés et transportés dans des sceaux métalliques.

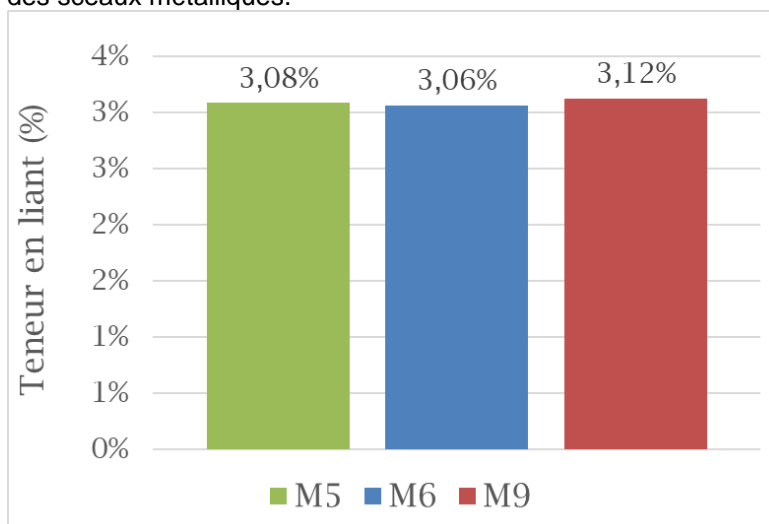


Fig. 53 Teneur en eau

#### 4.2.2.2 Confection des éprouvettes Marshall

Pour chaque mélange préalablement sélectionnés (M5, M6 et M9), 28 éprouvettes ont été confectionnées. 14 éprouvettes ont été compactées en appliquant 25 coups par face et 14 autres éprouvettes ont été compactées avec 50 coups par face. Les éprouvettes du mélange M5, M6 et M9 ont été produites avec une masse initiale de 1000 g, de 1050 g et de 950 g respectivement.

La production des éprouvettes s'est avérée très difficile en raison de la mauvaise qualité de l'adhésion entre les granulats des trois mélanges. Les éprouvettes présentées dans la Fig. 54 montrent un enrobage très faible des granulats et une cohésion très fragile entre les matériaux.



**Fig. 54** Eprouvettes Marshall : a) M5, b) M6, c) M9

#### 4.2.2.3 Conditionnement des éprouvettes Marshall

Deux méthodes de conditionnement ont été appliquées aux différentes éprouvettes Marshall, soit un conditionnement à court terme et un conditionnement accéléré.

Les éprouvettes conditionnées à court terme (normalisé) ont été placées pendant 14 jours sur une surface plane à une température ambiante de 20 °C et une humidité de l'air d'environ 50%. Les spécimens conditionnés pour un murissement accéléré ont été conservés pendant 14 jours dans un four à une température de 35 °C et une humidité de l'air d'environ 30% (Fig. 55).

Pour le mélange M5, les 7 éprouvettes destinées pour le conditionnement à long terme et compactées avec 25 coups n'ont pas pu être produites avec succès (i.e. désolidarisation de l'enrobé).



**Fig. 55** Conditionnement accéléré (température et humidité contrôlées)

#### 4.2.2.4 Teneur en vide

La perte de masse des éprouvettes a été mesurée le jour de la fabrication, puis après 4, 8, 11 et 14 jours afin de vérifier l'évolution de la teneur en vides. Les résultats des teneurs en vides pour les différentes éprouvettes sont illustrés dans la Fig. 56. De manière générale, nous pouvons observer que la majorité de l'eau s'est évaporée ou cristallisée et a par conséquent libéré les vides d'air des éprouvettes, ceci avant le quatrième jour.

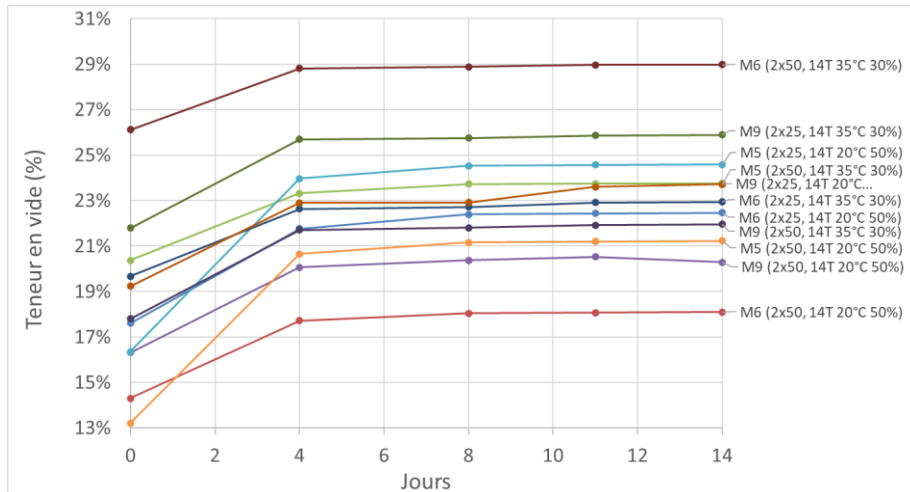


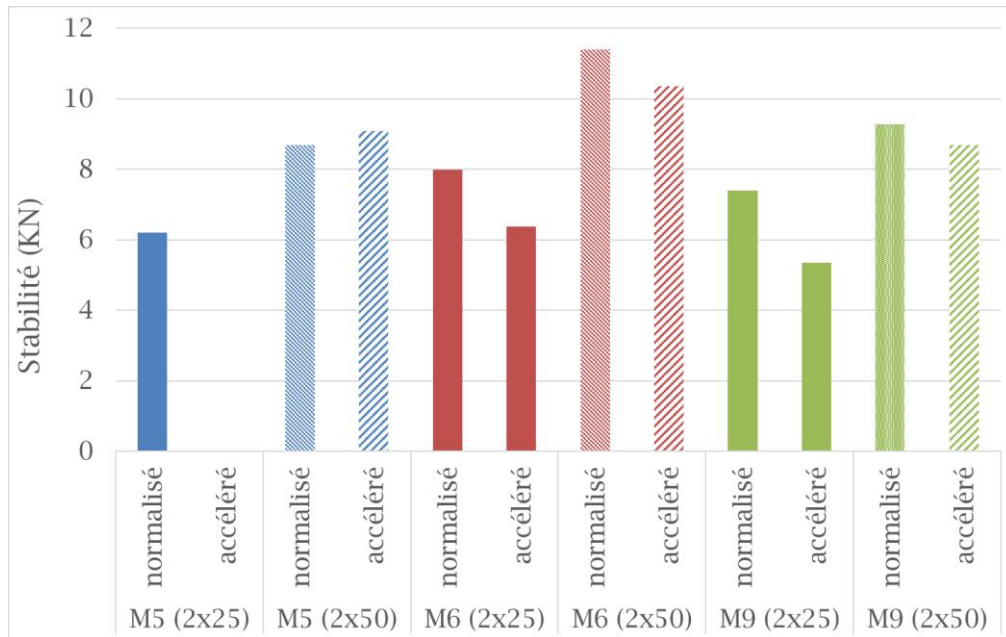
Fig. 56 Evolution de la teneur en vides

#### 4.2.2.6 Stabilité Marshall

L'essai de stabilité Marshall a été réalisé sans placer les éprouvettes dans un bain-marie à une température de 60 °C pendant une heure, ceci à cause de l'état particulièrement fragile des éprouvettes qui n'auraient alors très probablement pas résisté. L'essai a donc été réalisé à une température ambiante de 20°C.

De manière générale, les résultats de la stabilité Marshall (Fig. 57) montrent qu'avec un compactage de 50 coups par face, une valeur plus élevée de la stabilité Marshall peut être obtenue qu'avec 25 coups par face. Cela pouvait être légitimement attendu. L'ensemble des mélanges compactés avec 50 coups par face respectent les exigences normatives d'un minimum de 7 kN pour un enrobé AC T. Le mélange M6 (sans RAP) présente les valeurs de stabilité Marshall les plus élevées.

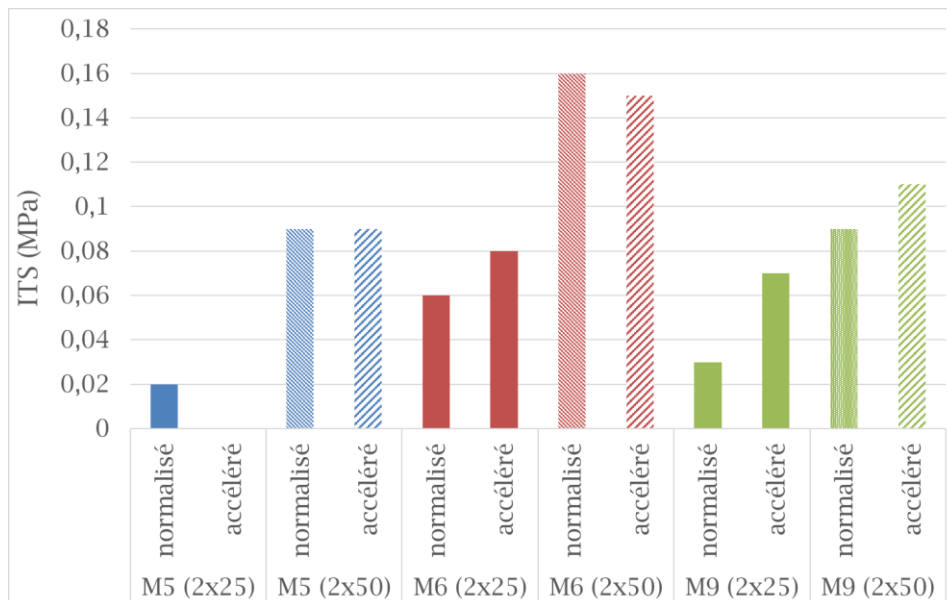
Les résultats des deux mélanges M6 et M9 montrent que les éprouvettes conditionnées pour un murissement accéléré ont une stabilité plus faible que les éprouvettes testées après un conditionnement normalisé. En revanche, le mélange M5 qui contient moins d'eau et une teneur en liant plus élevée présente une amélioration de la stabilité avec un murissement accéléré, soit une tendance inverse.



**Fig. 57** Stabilité Marshall

#### 4.2.2.6 Résistance à la traction indirecte (ITS)

Les résultats de la Fig. 58 relative à la traction indirecte démontrent l'impact du compactage (nombre de coups) sur la résistance à la traction indirecte des éprouvettes, tout comme celui du mode de conditionnement. Le mélange M6 présente à nouveau la meilleure résistance mécanique, ceci bien que les trois mélanges présentent des valeurs globalement relativement basses.



**Fig. 58** Essai de traction indirecte (ITS)

#### 4.2.2.7 Presse à Cisaillement Giratoire PCG

Pour chaque mélange, une éprouvette PCG a été fabriquée (Fig. 59). L'objectif du compactage était d'atteindre 150 mm de hauteur de l'éprouvette à 200 girations. Les photos des éprouvettes fabriquées montrent un enrobage relativement moyen des granulats, mais une meilleure cohésion que pour les éprouvettes Marshall. Ceci montre que la méthode de



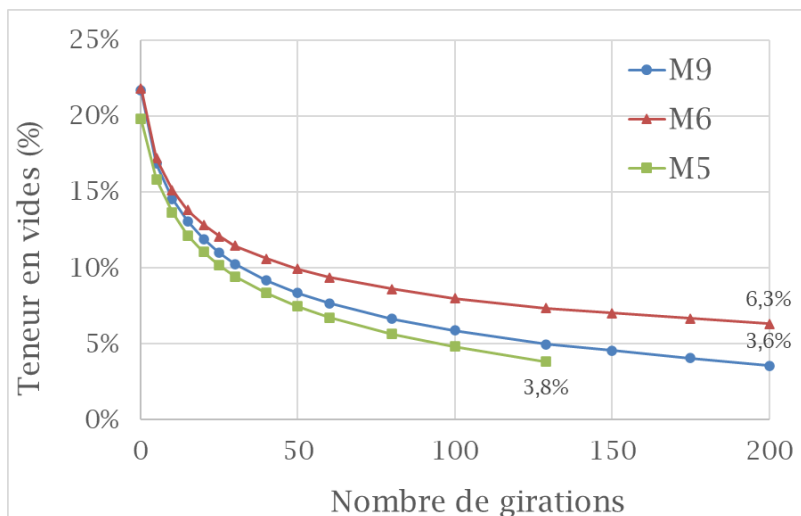
compactage PCG est sans aucun doute davantage adaptée que le compactage Marshall dans le cas des enrobés à froid.



**Fig. 59** Eprouvettes PCG: M5 (gauche), M6 (centre) et M9 (droite)

La Fig. 60 illustre la variation de la teneur en vides en fonction du nombre de girations, ceci pour les trois mélanges. La courbe d'évolution de la teneur en vides fournit une information intéressante relative à la maniabilité des enrobés. On peut observer que la meilleure maniabilité est obtenue pour le mélange M5, suivi du mélange M9 et du mélange M6. Lors de l'essai de maniabilité, nous avons également pu observer le classement M5 / M6 / M9, l'enrobé M5 étant sensiblement plus bas (i.e. davantage maniable) que les enrobés M6 et M9.

Il est encore utile de relever que dans le cas de la PCG, l'eau peut moins bien s'échapper que lors de l'essai avec maniabilimètre Nynas et cela est peut-être une explication des quelques différences de classement observées entre les mélanges testés.



**Fig. 60** Teneur en vides (PCG)

#### 4.2.2.8 Densité maximale

La densité maximale de chaque mélange a également été mesurée et les résultats sont consignés dans le Tab. 20.

**Tab. 20** Densité maximale des différents mélanges

Mélange	Densité maximale (kg/m <sup>3</sup> )
M5	2435
M6	2454
M9	2336

#### 4.2.2.9 Teneur en liant

La teneur en liant a été vérifiée pour les deux mélanges M5 et M6 ; le mélange M9 n'ayant pas fait l'objet d'une mesure.

La teneur en liant soluble du mélange M5 est de 8,28 %. Cette teneur est plus élevée que la valeur cible de 6,8 %. Cet écart pourrait être dû à un séchage insuffisant du matériau avant de réaliser la mesure de la teneur en liant et les résultats doivent donc être considérés avec précautions.

La teneur en liant cible pour le mélange M6 était de 5,8 % ; le résultat obtenu est de 5,93 %.

#### 4.2.2.10 Analyse granulométrie

L'analyse granulométrique a été effectuée pour les mélanges M5 et M6 (Fig. 61). La courbe du mélange M6 est légèrement en dehors des limites pour la fraction de 0,5 mm. La courbe de l'enrobé M5 est en dehors de la plage autorisée entre les tamis de 0,25 et 2 mm.

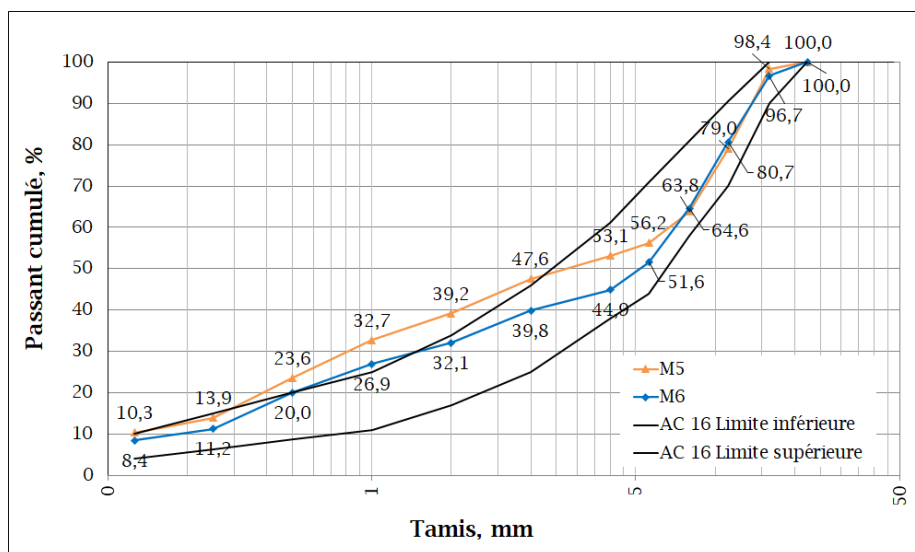


Fig. 61 Courbes granulométriques

#### 4.2.2.11 Essai Duriez

Des éprouvettes ont été fabriquées avec la méthode Duriez de compactage, ceci également pour les enrobés prélevés au poste d'enrobage. Cependant, considérant l'état des éprouvettes au moment du démoulage (Fig. 62) l'essai de compression n'a pas pu être effectué pour ces différents enrobés.



Fig. 62 Echantillons Duriez

### 4.3 Bilan de la production au poste d'enrobage

La technique à la mousse a été utilisée dans le cadre de ce projet pour la fabrication des enrobés à froid dans une centrale d'enrobage traditionnelle (discontinue). Après la réalisation de différentes itérations au poste d'enrobage et une sélection sur la base d'inspections visuelles essentiellement, divers essais de caractérisations ont ensuite été effectués en laboratoire.

Sur la base des essais réalisés, nous pouvons relever :

- L'enrobé à la mousse présente un aspect visuel fragile avec un manque notable d'enrobage des granulats, ceci pour l'ensemble des fabrications.
- Cette constatation est à pondérer et elle ne concerne que les mélanges produits dans le cadre de ce projet soit avec une centrale destinée aux enrobés à chaud. L'objet de ces productions était donc essentiellement lié à une étude de faisabilité. Relevons encore que des expériences positives ont été faites à l'étranger, ceci avec des postes d'enrobage spécifiquement dédiés aux enrobés à froid.
- Les valeurs ITS sont globalement faibles ( $\approx 0.16$  MPa) (76%), ceci par comparaison avec la méthode des enrobés à l'émulsion ( $\approx 0.67$  MPa)
- Les différents échantillons réalisés n'étant pas suffisamment stables, des essais mécaniques approfondis (par ex. Duriez) n'ont pas pu être réalisés.
- Les enrobés produits lors de ces essais préliminaires de faisabilité au poste d'enrobage ne présentaient finalement pas des performances mécaniques suffisantes permettant de réaliser des essais étendus et/ou de prévoir des planches d'essais.



## 5 Procédure de dimensionnement

Outre les performances mécaniques, la prise en compte des enrobés à froid dans une procédure de dimensionnement / renforcement est un aspect déterminant afin de favoriser la bonne pratique avec ce type de matériaux.

Différentes recherches peuvent être trouvées sur la thématique des enrobés à froid et de leur prise en compte dans une procédure de dimensionnement ; la thématique étant particulièrement complexe ceci notamment au niveau du comportement en fatigue du matériau et de son influence sur le dimensionnement mécanique. Le présent chapitre ne se veut donc pas exhaustif mais il est à interpréter comme une piste de réflexion dans le but de considérer les enrobés à froid dans une perspective de dimensionnement. Les résultats doivent par conséquent être considérés avec une certaine précaution.

La procédure proposée se base sur les résultats obtenus en laboratoire dans le cadre de cette recherche (rigidité). Sur la base de ces différents éléments, des modélisations ont été effectuées selon une approche multicouche permettant de calculer l'état de contrainte/déformation en fonction des caractéristiques géométriques de la chaussée et des caractéristiques des matériaux. Les différentes investigations sont réalisées en adéquation avec la méthode analytique multicouche de dimensionnement recommandée par le projet REDIRE [41].

Une correspondance avec les coefficients d'équivalence « a » selon SN 640 324 [1] sera également proposée, ceci en appliquant une approche analogue à celle proposée dans le projet [44].

### 5.1 Hypothèses de base

L'approche de dimensionnement proposée se base sur un cas d'étude « fictif » pour lequel les hypothèses de base sont présentées dans ce chapitre.

#### 5.1.1 Trafic

Le choix de la structure s'est porté sur celles qui supportent les types de trafic T2, T3, T4 reposant sur un sol de fondation de portance moyenne S2.

Le trafic pondéral équivalent journalier selon la norme VSS 40 324 pour les deux types de trafics T3 et T4 est respectivement  $TF_{20max} = 300$  ESAL/j et  $TF_{20max} = 1000$  ESAL/j.

Le coefficient d'agressivité CAM est calculé selon l'essieu de référence de 13 to proposé par la méthode française de dimensionnement. Dans notre cas le CAM est 0.5 pour la classe de trafic T2, T3+ et 0.4 pour T3-. En effet, l'équivalence de ces classes de trafic T3- et T2, T3+ de la méthode française est T3 et T4 pour la normalisation suisse.

#### 5.1.2 Matériaux

Les caractéristiques des matériaux retenus sont données dans le Tab. 21 ci-après.

La structure de chaussée sélectionnée est composée des couches suivantes :

- Couche de sol support de classe S2. Pour un sol de classe de portance S2 l'indice de portance Californien CBR est entre 6 % et 12%. Ceci correspond un module de sol entre 50 MPa et 80 MPa. Le choix est porté sur une valeur moyenne de 65 MPa pour le sol support.
- Une couche de grave divisée en deux couches dont le module est croissant de bas en haut. La première couche a un module de 195 MPa soit trois fois celui du sol support, la seconde couche de grave a un module de 360 MPa soit la valeur maximale pour une

couche de grave. Cette décomposition est effectuée en accord avec la méthode française de dimensionnement.

- Couche de base AC T avec un module de 9'000 MPa à 15°C et 10 Hz et un coefficient de poisson de 0,35.
- Une couche de liaison de référence AC B avec un module de rigidité de 5500 MPa à 15°C et 10 Hz et un coefficient de poisson de 0,35.
- Une couche de roulement AC avec un module de rigidité de 5'500 MPa à 15°C et 10 Hz et un coefficient de poisson de 0,35.

Pour ce travail de dimensionnement il a été décidé de travailler avec l'enrobé à froid contenant l'émulsion Ea et 50% RAP avec et sans ciment. La rigidité de ce matériau testé dans le cadre du présent projet avec l'essai IT -CY est :

- AC B 16 50% sans ciment : 3'181 MPa (20°C, 2Hz)
- AC B 16 50% avec ciment : 5'572 MPa (20°C, 2Hz)

**Tab. 21** Caractéristiques des matériaux pour modélisations analytiques

Matériaux	Module (15°C, 10Hz) (MPa)	Coeff. Poisson
AC	5'500	0,35
AC B réf	5'500	0,35
AC T	9'000	0,35
Grave	360	0,35
	190	0,35
Sol support S2	65	0,35

## 5.2 Méthode Française de dimensionnement

Le dimensionnement routier fait appel à une méthode dite rationnelle pour le calcul de l'épaisseur de chaque couche de la chaussée. Cette méthode mécanico-empirique consiste à évaluer le niveau de sollicitation de la structure (contrainte et déformation) et de déterminer les épaisseurs nécessaires aux différentes couches de la chaussée afin de réduire les contraintes et déformations à des valeurs admissibles pour un trafic donné [69]. Le principe de cette méthode est de comparer les sollicitations admissibles et les sollicitations calculées à différentes profondeurs de la chaussée. Pour les matériaux traités aux liants hydrauliques, le critère de dimensionnement est la contrainte horizontale à la base de la couche. Le modèle est celui de l'endommagement par fatigue sous sollicitations répétées de traction par flexion exercées par le trafic. Les déformations admissibles sont ensuite déterminées à partir de la loi de fatigue établie par des essais en laboratoire sur des éprouvettes trapézoïdales. Cette loi permet de déterminer  $\varepsilon_6$ , qui correspond la déformation de rupture de l'éprouvette après  $10^6$  cycles de sollicitation.

La modélisation des différentes structures présentées dans ce document est effectuée à l'aide du logiciel Alizé® qui permet l'application de cette méthode normalisée en France (NF P98-086 "Dimensionnement structurel des chaussées routières – Application aux chaussées neuves"). La modélisation de la chaussée pour les calculs mécaniques selon la démarche du dimensionnement rationnel s'appuie sur la représentation de la structure par un massif multicouche semi-infini à comportement élastique, isotrope et linéaire. Les différentes couches de matériau constituant la structure possèdent une épaisseur constante, et leur extension dans le plan horizontal XY est infinie. De plus, l'extension selon la direction verticale ZZ de la couche inférieure du massif multicouche, représentant en général le substratum ou le sol support, est supposée infinie.

Le Tab. 22 présente les différentes structures de chaussées à modéliser à l'aide d'Alizé®.

**Tab. 22** Différentes planches modélisées

Planche 1-Ref	Planche 2	Planche 3	Planche 4
AC, chaud	AC, chaud	AC chaud	AC chaud
AC B, chaud	AC B froid	AC B chaud	AC B froid
AC T, chaud	AC T chaud	AC T froid	AC T froid
Fondation	Fondation	Fondation	Fondation

Dans ce projet et en l'absence de résultats d'essai de fatigue, une valeur de  $90\mu\text{déf}$  est sélectionnée à partir de la bibliothèque matériaux d'ALIZE pour un enrobé AC T de module 9'000 MPa (15°C, 10 Hz). Pour l'application de la méthode française il est finalement nécessaire de définir les coefficients suivants :

- Coefficient de risque «  $K_r$  » : il permet d'ajuster la valeur de déformation au risque de calcul retenu. Dans cette étude ce coefficient est de 0.843.
- Coefficient de support «  $K_c$  » : il permet d'ajuster la déformation admissible au comportement réel des chaussées. Dans ce présent cas ce coefficient vaut 1.3.
- Coefficient de support «  $K_s$  » : il prend en compte les éventuelles hétérogénéités au niveau de la couche de support. Ce dernier est égal à 1.1.

La structure de chaussée devant supporter un trafic de type T4 est composée d'une couche de roulement en enrobé AC 8 d'une épaisseur 3 cm, d'une couche de liaison AC B 16 de 6 cm d'épaisseur, de 8 cm d'épaisseur d'enrobé AC T 22 pour la couche de base. La couche de grave est subdivisée en couches d'épaisseur 25 cm et 15 cm. Les interfaces entre les couches sont considérées comme collées pour ce travail de modélisation.

La structure de chaussée devant supporter un trafic de type T3 est composée d'une couche de roulement en enrobé AC 11 d'une épaisseur 4 cm, de 9 cm d'épaisseur d'enrobé AC T 22 pour la couche de base et d'une couche du grave de 35 cm. Cette couche de grave est subdivisée en couches d'épaisseur 25 cm et 10 cm. Les interfaces entre les couches sont considérées comme collées pour ce travail de modélisation.

Les modules de chaque couche de la structure de chaussée introduit dans le logiciel Alizé® doivent sur le principe être issus de l'essai de flexion en deux points sur des éprouvettes trapézoïdales (2PB-TR). Etant donné la grande fragilité de l'enrobé à froid développé dans le cadre de ce projet, la fabrication des éprouvettes trapézoïdales n'est pas possible et il a été choisi de réaliser un essai de traction indirecte sur éprouvettes cylindrique (IT-CY). Selon l'expérience du laboratoire, une corrélation entre ces deux essais peut être proposée, soit :

- Un module de 5'500 MPa à 20°C, 2 Hz (IT-CY) correspond à un module de 4'000 MPa  $\pm 10\%$  à 15°C, 10 Hz (2PB-TR).
- Un module de 3'181 MPa à 20°C, 2 Hz (IT-CY) correspond à un module de 2'313 MPa  $\pm 10\%$  à 15°C, 10 Hz (2PB-TR).
- Un module de 5'572 MPa à 20°C, 2 Hz (IT-CY) correspond à un module de 4'052 MPa  $\pm 10\%$  à 15°C, 10 Hz (2PB-TR).

La modélisation est ensuite effectuée en variant une fois le module de rigidité de la couche AC B de 5'500 MPa à 3'000 Mpa (Tab. 23), puis une fois la couche de base AC T 22 de 9'000 MPa à 2'000 MPa (Tab. 24), et une fois le module des deux couches AC B et AC T (Tab. 25).

**Tab. 23** Structure des planches 1 et 2 (itérations)

Matériaux	Module(15°C, 10Hz) (MPa)	Coef. Poisson	Epaisseur de chaussée (cm)		
			T4	T4	T3
AC 8-11	5'500	0,35	3	4	4
AC B16	5'500...3'000	0,35	6	5	
ACT 22	9'000	0,35	8	8	9
Grave	360	0,35	15	15	10
	195	0,35	25	25	25
Sol support	65	0,35	infini	infini	infini

**Tab. 24** Structure des planches 1 et 3 (itérations)

Matériaux	Module(15°C, 10Hz) (MPa)	Coef. Poisson	Epaisseur de chaussée (cm)		
			T4	T4	T3
AC 8-11	5'500	0,35	3	4	4
AC B16	5'500	0,35	6	5	
ACT 22	9'000...2000	0,35	8	8	9
Grave	360	0,35	15	15	10
	195	0,35	25	25	25
Sol support	65	0,35	infini	infini	infini

**Tab. 25** Structures des planches 1 et 4 (itérations)

Matériaux	Module(15°C, 10Hz) (MPa)	Coef. Poisson	Epaisseur de chaussée (cm)		
			T4	T4	T3
AC 8-11	5'500	0,35	3	4	4
AC B16	5'500...3'000	0,35	6	5	
ACT 22	9'000...2000	0,35	8	8	9
Grave	360	0,35	15	15	10
	195	0,35	25	25	25
Sol support	65	0,35	infini	infini	infini

### 5.3 Résultats du dimensionnement analytique

Le Tab. 26 présente les différents résultats de dimensionnement pour les planches 1 et 2. Une étude de sensibilité est également réalisée concernant l'épaisseur des couches AC et AC B ainsi que pour la variation du module de rigidité de l'enrobé AC B de 5'500 MPa (ref) à 4'000 MPa (var1) et à 3'000 MPa (var2).

Les résultats montrent que :

- Les deux structures de chaussée sont admissibles pour un nombre de 547'500 essieux de 13 to avec un risque de 25 %, ceci pour les deux valeurs de rigidité de l'enrobé mesurées dans le cadre de ce projet.
- Les deux structures de chaussées contenant de l'enrobé AC B 16 50% avec ciment (5'572 MPa) sont admissibles pour un nombre de de 730'000 essieux de 13 to avec un risque de 25%.



**Tab. 26** Récapitulatif des résultats du dimensionnement pour les planches 1 et 2

Chaussée T4 (T2 Fr)	AC 8 (cm)	AC B 16 (cm)	AC T 22 (cm)	Grave (cm)	TF20 Su=>Fr	*NE (13t) max	Risque (%)	$\epsilon_{adm}$ ( $10^{-6}$ )	$\epsilon_{calc-ref}$ ( $10^{-6}$ )	$\epsilon_{calc-var1}$ ( $10^{-6}$ )	$\epsilon_{calc-var2}$ ( $10^{-6}$ )
	3	6	8	40	150	547'500	12	116,2	115,0	117,3	119,9
							25	124,9	115,0	117,3	119,9
							12	109,7	115,0	117,3	119,9
							25	117,9	115,0	117,3	119,9
					200	730'000	12	109,7	115,0	117,3	119,9
							25	117,9	115,0	117,3	119,9
Chaussée T4 (T2 Fr)	AC 11 (cm)	AC B 16 (cm)	AC T 22 (cm)	Grave (cm)	TF20 Su=>Fr	NE (13t) max (cm)	Risque (%)	$\epsilon_{adm}$ ( $10^{-6}$ )	$\epsilon_{calc-ref}$ ( $10^{-6}$ )	$\epsilon_{calc-var1}$ ( $10^{-6}$ )	$\epsilon_{calc-var2}$ ( $10^{-6}$ )
	4	5	8	40	150	547'500	12	116,2	115,0	117,0	119,3
							25	124,9	115,0	117,0	119,3
							12	109,7	155,0	117,0	119,3
							25	117,9	115,0	117,0	119,3
					200	730'000	12	109,7	155,0	117,0	119,3
							25	117,9	115,0	117,0	119,3

Le Tab. 27 présente les différents résultats de dimensionnement pour les planches 1 et 3. Une étude de sensibilité est réalisée concernant l'épaisseur des couches AC et AC B ainsi que pour la variation du module de rigidité de l'enrobé AC T de 9'000 MPa à 5'500 MPa et 3'000 MPa.

Les résultats obtenus montrent que :

- Les deux structures sont admissibles pour un nombre de 547'500 essieux de 13 to avec un risque de 12 et 25 %, ceci pour un module de 9'000 MPa. Elles sont aussi admissibles pour un nombre d'essieu de 730'000 essieux de 13 to avec un risque de 25% pour un module de 9'000 MPa.
- Les deux structures contenant une couche d'enrobé AC T de rigidité 5'500 MPa (var1) ou 3'000 MPa (var2) ne sont pas admissibles pour les deux charges de trafic soit 547'500 et 730'000 essieux 13 to.

**Tab. 27** Récapitulatif des résultats du dimensionnement pour les planches 1 et 3

Chaussée T4 (T2 Fr)	AC 8 (cm)	AC B 16 (cm)	AC T 22 (cm)	Grave (cm)	TF20 Su=>Fr	*NE (13t) max	Risque (%)	$\epsilon_{adm}$ ( $10^{-6}$ )	$\epsilon_{calc-ref}$ ( $10^{-6}$ )	$\epsilon_{calc-var1}$ ( $10^{-6}$ )	$\epsilon_{calc-var2}$ ( $10^{-6}$ )
	3	6	8	40	150	547'500	12	116,2	115,0	142,6	179,8
							25	124,9	115,0	142,6	179,8
							12	109,7	115,0	142,6	179,8
							25	117,9	115,0	142,6	179,8
					200	730'000	12	109,7	115,0	142,6	179,8
							25	117,9	115,0	142,6	179,8
Chaussée T4 (T2 Fr)	AC 8 (cm)	AC B 16 (cm)	AC T 22 (cm)	Grave (cm)	TF20 Su=>Fr	*NE (13t) max	Risque (%)	$\epsilon_{adm}$ ( $10^{-6}$ )	$\epsilon_{calc-ref}$ ( $10^{-6}$ )	$\epsilon_{calc-var1}$ ( $10^{-6}$ )	$\epsilon_{calc-var2}$ ( $10^{-6}$ )
	4	5	8	40	150	547'500	12	116,2	115,0	142,6	179,8
							25	124,9	115,0	142,6	179,8
							12	109,7	155,0	142,6	179,8
							25	117,9	115,0	142,6	179,8
					200	730'000	12	109,7	155,0	142,6	179,8
							25	117,9	115,0	142,6	179,8

Le Tab. 28 présente les différents résultats de dimensionnement pour les planches 1 et 4. Une étude de sensibilité est réalisée concernant l'épaisseur des couches d'enrobé AC et AC B ainsi que pour la variation simultanée du module de rigidité de l'enrobé AC B et AC T :

- Cas 1 : AC B 5'500 MPa et AC T 5'500 MPa.
- Cas 2 : AC B 3'000 MPa et AC T 5'500 MPa
- Cas 3 : AC B 3'000 MPa et AC T 3'000 MPa

Seul le cas 1 a été étudié et les résultats montrent que les deux structures de chaussées ne sont pas admissibles avec l'usage des deux couches AC B et AC T en enrobé à froid d'un module de 5'572 MPa. Partant de ce constat, il apparaît évident que les cas 2 et 3 ne sont le cas échant pas admissible i.e. ils ne permettent pas de supporter les charges de trafic sur la durée de service prévue.

**Tab. 28** Récapitulatif des résultats du dimensionnement pour les planches 1 et 4

Chaussée T4 (T2 Fr)	AC 8 (cm)	AC B 16 (cm)	AC T 22 (cm)	Grave (cm)	TF20 Su=>Fr	*NE (13t) max	Risque (%)	$\epsilon_{adm}$ ( $10^{-6}$ )	$\epsilon_{calc-ref}$ ( $10^{-6}$ )	$\epsilon_{calc-var1}$ ( $10^{-6}$ )
<b>Cas1</b>										
	3	6	8	40	150	547'500	12	116,2	115,0	142,6
							25	124,9	115,0	142,6
					200	730'000	12	109,7	115,0	142,6
							25	117,9	115,0	142,6
Chaussée T4 (T2 Fr)	AC 8 (cm)	AC B 16 (cm)	AC T 22 (cm)	Grave (cm)	TF20 Su=>Fr	*NE (13t) max	Risque (%)	$\epsilon_{adm}$ ( $10^{-6}$ )	$\epsilon_{calc-ref}$ ( $10^{-6}$ )	$\epsilon_{calc-var1}$ ( $10^{-6}$ )
	4	5	8	40	150	547'500	12	116,2	115,0	142,6
							25	117,9	115,0	142,6
					200	730'000	12	109,7	155,0	142,6
							25	117,9	115,0	142,6
Chaussée T3 (T2 Fr)	AC 8 (cm)	AC B (cm)	16AC T 22 (cm)	Grave (cm)	TF20 Su=>Fr	*NE (13t) max	Risque (%)	$\epsilon_{adm}$ ( $10^{-6}$ )	$\epsilon_{calc-ref}$ ( $10^{-6}$ )	$\epsilon_{calc-var1}$ ( $10^{-6}$ )
	4		9	35	85	248'200	25	146,3	145,1	190,2
							25	155,3	145,1	190,2

## 5.4 Détermination du coefficient « a »

Selon la norme VSS 40 324, la portance de la chaussée routière pour la méthode de construction souple ou semi-rigide peut être exprimée (caractérisée) par la valeur Structurelle  $SN$  (Structural Number). La valeur  $SN$  est définie en tant que la somme du produit entre les différentes épaisseurs de couches  $d$  et leur valeur respectives de coefficient d'équivalence (ou coefficient de portance) « a ».

Selon la normalisation suisse, le coefficient  $a$  de nouvelles couches bitumineuses est égal à:

- AC, AC B, AC T, AC MR :  $a = 4$
- PA, PA B :  $a = 2,6$
- AC EME 22 C1:  $a = 4,4$
- AC EME 22 C2:  $a = 5,6$
- AC F:  $a = 3,2$

Les enrobés à froid testés dans cette étude possèdent un module de 5'572 MPa avec ajout de ciment et un module de 3'181 MPa sans ciment. L'objectif de cette partie est d'estimer l'effet structurel d'une couche de liaison ou de base en enrobé à froid sur une structure classique de chaussée de type 1 (VSS 40 324), ceci afin d'en déduire une approximation de coefficient  $a$ .

Le principe consiste donc à vérifier l'effet de cette couche à froid sur les déformations horizontales au bas des couches bitumineuses, avec un enrobé à froid dont le module de rigidité varie ; ceci selon l'approche décrite dans [77]. Pour ce faire le logiciel Alizé est utilisé et les différentes structures étudiées précédemment ont été choisies pour l'estimation du coefficient d'équivalence  $a$ .

La modélisation s'effectue en variant le module de rigidité de la couche de liaison AC B de 5'500 MPa à 3'000 MPa et de 9'000 MPa à 2'000 MPa pour une couche de base AC T.

**Tab. 29** Coefficient de portance « a »

Structure	Module de la couche ACB 16 (MPa)	Déformation au bas des couches bitumineuses ( $10^{-6}$ )	Variation (%)	a
Planche 1 et 2 T4	<b>5500</b>	-115,0	+0,00	<b>4,00</b>
	5000	-115,6	+0,52	3,97
	4500	-116,4	+1,20	3,95
	4000	-117,3	+1,99	3,92
	3500	-118,5	+2,95	3,88
	<b>3000</b>	-119,9	+4,09	<b>3,84</b>
Planche 1 et 3 T3	9000	-154,1	+0,00	4,00
	8000	-162,4	+5,38	4,00
	7000	-172,3	+11,81	3,78
	6000	-184,2	+19,53	<b>3,53</b>
	5000	-199,1	+22,60	3,22
	4000	-218,3	+41,66	3,09
	<b>3000</b>	-244,4	+58,59	<b>2,33</b>
Planche 1 et 3 T4	2000	-296,9	+92,66	1,66
	9000	-115,0	+0,00	4,00
	8000	-121,2	+5,11	3,79
	7000	-128,6	+11,82	3,53
	6000	-137,4	+16,30	3,35
	5000	-148,4	+22,50	3,1
	4000	-162,1	+29,06	2,84
	3000	-179,9	+36,07	2,56
2000	-202,9	+43,32	2,27	

Les résultats du Tab. 29 montrent une augmentation de la déformation horizontales au bas des couches bitumineuse avec l'utilisation des enrobés à froid, ce qui pouvait être légitimement être attendu :

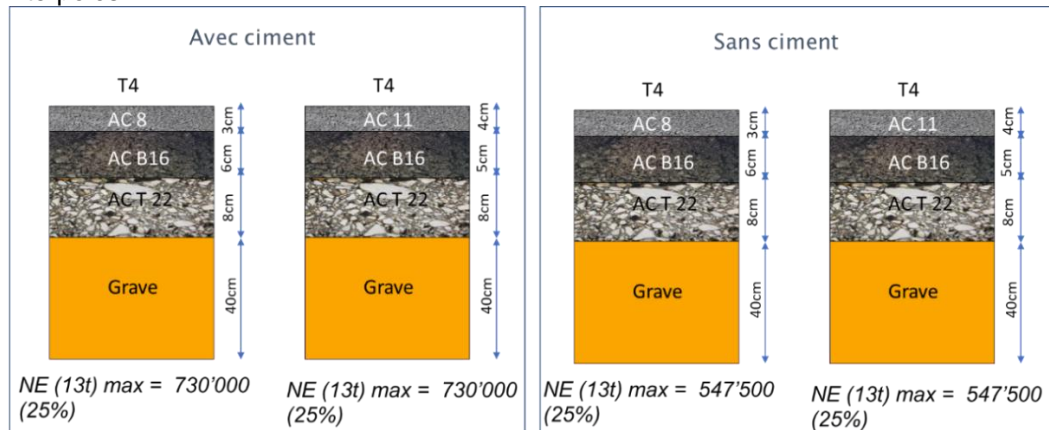
- Augmentation de déformation jusqu'à 43% pour une couche de base en enrobé bitumineux avec un module variant de 9'000 MPa à 2'000 MPa. En faisant l'hypothèse que le coefficient d'équivalence  $a$  varie linéairement avec les déformations horizontales, il est possible d'estimer que la fourchette dans laquelle évolue ce dernier pour les enrobé à froid est située entre 2,3 et 4.0.
- Augmentation de déformation jusqu'à 4% pour une couche AC B avec un module variant de 5'500 MPa à 3'000MPa. En faisant l'hypothèse que le coefficient d'équivalence  $a$  varie linéairement avec les déformations horizontales, il est possible d'estimer que la fourchette dans laquelle évolue ce dernier pour les enrobé à froid est situé entre 3,8 et 3,9.
- Pour l'enrobé développé dans le cadre de ce projet, le coefficient d'équivalence pourra ainsi être estimé à 3,9 dans le cas d'ajout de ciment et à 3,8 dans le cas sans ciment.

## 5.5 Enseignements

Comme indiqué précédemment, ce chapitre n'a pas vocation à fournir des solutions de dimensionnement pouvant être unilatéralement utilisées, le but étant d'illustrer la problématique du dimensionnement de chaussées avec recours aux enrobés à froid. Les résultats doivent donc être considérés comme illustratifs d'une méthodologie et ne peuvent être réutilisés sans vérifications préalables.

Les conclusions préliminaires suivantes peuvent être finalement faites :

- La Fig. 63 présente les schémas des structures de chaussées retenues pour l'enrobé à froid développé dans le cadre de ce projet ; les résultats ne pouvant être sans autre interpolés.



**Fig. 63** Schéma des structures retenues pour l'enrobé à froid AC B 16 (50% RAP)

- Des valeurs de portance pour les techniques à froid ont pu être estimées. Ces valeurs sont purement indicatives.
- La valeur de portance pourra être estimée à 4 dans le cas d'ajout de ciment et à 3,8 dans le cas sans ciment. L'ajout de ciment permet d'augmenter la valeur de portance pour les mélanges à l'émulsion.
- Les valeurs de portance issues de la norme [1] sont cohérentes avec les valeurs proposées dans le présent rapport ; bien que ces dernières soient relativement élevées. Les valeurs proposées dans ce rapport sont valables uniquement pour les enrobés testés dans le cadre de ce projet et ces exemples précis de calcul. Ils ne peuvent être sans autre interpolés pour des calculs de dimensionnement. Selon le type de produit, une étude spécifique sera recommandée ainsi qu'une détermination spécifique des performances de l'enrobé en termes de module de rigidité et résistance à la fatigue.

## 6 Evaluation globale des performances

L'évaluation globale des performances est un élément important, une aide aux décideurs pouvant ainsi être fournie. Etant donné les ressources limitées et les nombreux travaux récents dans le domaine, l'approche proposée se basera sur des travaux déjà menés au niveau national [34], [35] et international [78]. On consultera ces éléments de littérature pour de plus amples informations, le présent chapitre ayant pour vocation d'illustrer la méthodologie sur la base des résultats obtenus dans le cadre du présent projet.

Le principe de base consiste à prendre en compte différents critères, pour ensuite proposer une évaluation globale et une aide à la décision. Les critères suivants sont généralement considérés, le choix des critères pouvant varier selon les projets et les données à disposition : inventaire du cycle de vie (ICV), performances mécaniques, risques inhérents à la technologie, coûts, consommation d'énergie, complexité du processus de fabrication et pose. On relèvera qu'une approche par ICV est souvent privilégiée par rapport à l'analyse du cycle de vie (ACV) qui implique une étape supplémentaire relatives à l'évaluation des catégories de dommages, ce qui revêt de facto une certaine subjectivité (différentes méthodologies).

Une approche d'évaluation multicritère est appliquée dans ce projet selon la méthodologie développée dans [34], ce qui comprend :

- Analyse du cycle de vie afin d'identifier les étapes déterminantes ; approche Pareto.
- Evaluation des données brutes pour l'ensemble des critères quantitatifs. Réalisation de comparatifs à l'aide de représentations graphiques spécifiques.
- Aide à la décision pour le choix des technologies d'enrobage, avec prise en compte des différents critères préalablement définis. Pour cela, il est envisagé d'appliquer des techniques d'aide à la décision soit de l'agrégation partielle et/ou de l'agrégation complète. Notons que, à défaut de données suffisantes, l'approche spécifique d'aide à la décision ne sera pas appliquée dans le présent chapitre.

En fin de processus, une évaluation globale des performances des enrobés à froid est effectuée, tout en les comparant avec d'autres techniques (chaud, avec additif, ...).

L'architecture de la démarche étant basée sur des travaux existants, cette dernière est alors adaptée afin de correspondre au cas spécifique du projet de recherche sur les enrobés à froid.

### 6.1 Principes et architecture de la méthodologie

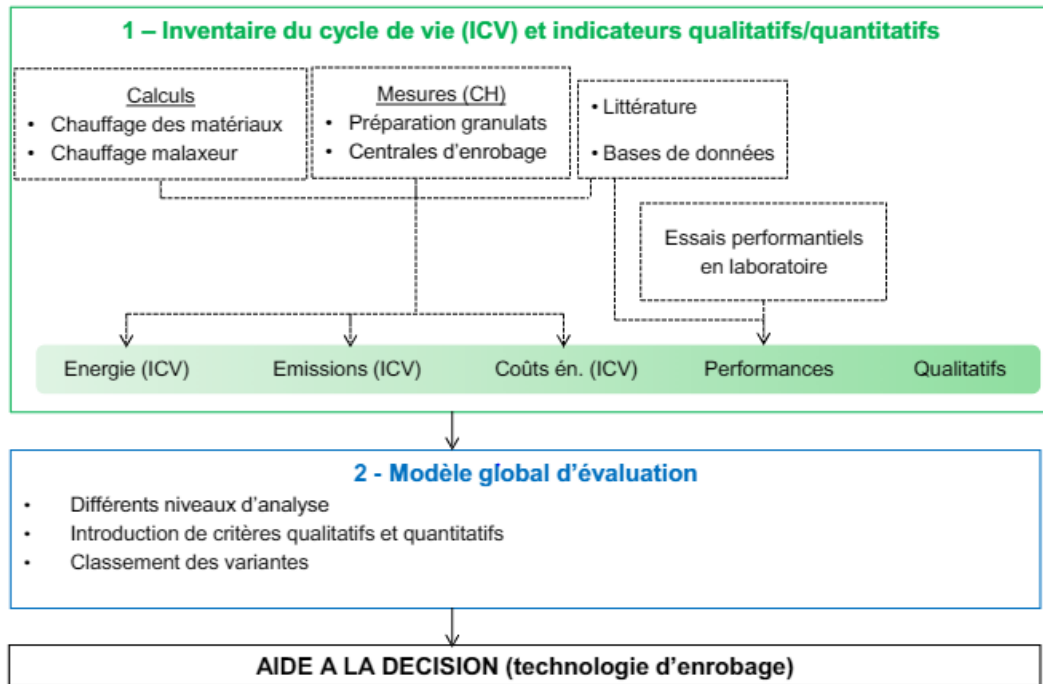
L'architecture générale du modèle est présentée dans la Fig. 64. Ce modèle est positionné à l'échelle des matériaux bitumineux. Ceci permettra aux décideurs de choisir la technologie d'enrobage. Il se décompose en deux parties essentiellement :

- Inventaire du cycle de vie ICV et indicateurs de performances

L'objectif de cette première partie de modèle est de définir l'ensemble des données nécessaires au modèle d'évaluation multicritère. L'inventaire de cycle de vie permet de fournir les indicateurs concernant l'énergie les émissions et les coûts. Les aspects performanciers et autres critères qualitatifs sont également considérés.

- Modèle global d'évaluation

Ce modèle permet de fournir une aide à la décision à travers différents niveaux d'analyse. La méthode adoptée prend en compte les indicateurs définis dans la première partie du modèle.



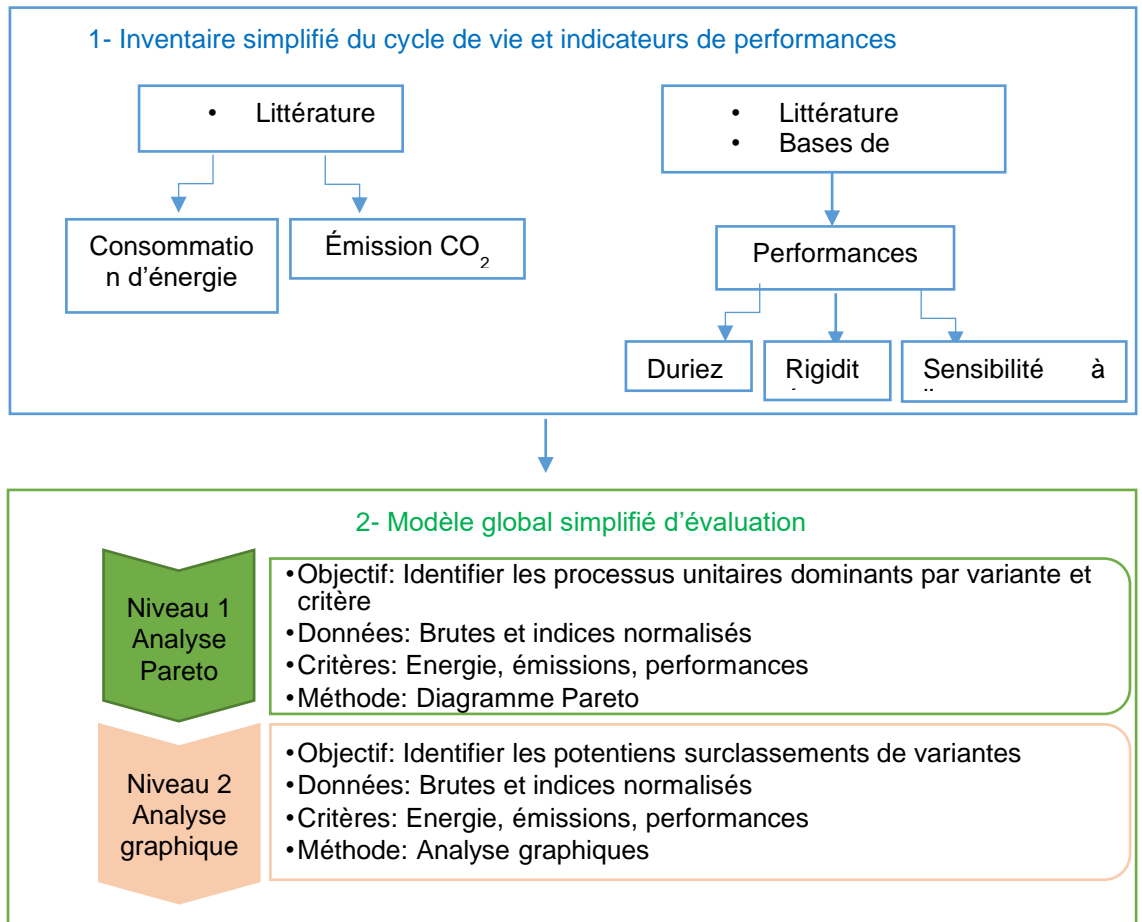
**Fig. 64** Vue générale du modèle multicritère [35]

Ce modèle a été implémenté par Bueche [35] dans un modèle global appelé « Modèle PLANET » dans MS-Excel. Ce modèle est utilisé dans ce projet afin d'évaluer les performances globales des enrobés à froid.

## 6.2 Application de la méthodologie

Vu l'absence de nombreuses données pour la réalisation d'une analyse complète du modèle PLANET, un modèle simplifié a été développé dans le cadre du présent projet (voir Fig. 65). Ce dernier se comporte des étapes suivantes :

- Saisie des résultats de l'analyse de cycle de vie.
- Analyse niveau 1 : Analyse Pareto.
- Analyse niveau 2 : Analyse graphique.



**Fig. 65** Modèle PLANET simplifié issu de [35]

La méthode de Pareto exprime la relation de dominance entre différentes variantes [35], [79]. Elle est également utilisée afin d'identifier les causes principales à un phénomène [35].

### 6.2.1 Choix des matériaux (variantes)

Pour l'étude ACV simplifiée effectuée dans le présent projet, différents matériaux et technologies bitumineux sont considérées.

Quatre types de matériaux ont été sélectionnés pour les raisons suivantes :

- Disponibilité des données nécessaires pour le modèle simplifié.
- Leur relation avec le produit développé dans le cadre de ce projet.
- Leur impact sur la durabilité.

Les quatre matériaux sélectionnés sont les suivants :

#### **Enrobé à chaud (Hot Mix Asphalt – HMA) - Référence**

Le premier cas est celui de l'enrobé à chaud classique (HMA). Ce dernier est le cas de référence puisque l'objectif de la présente méthodologie est d'évaluer si une technique alternative globalement préférée à cette technique de référence.

### **Recyclage à froid en place (Cold in place recycling – CIR)**

La technique de recyclage à froid en place est définie comme une technique de réhabilitation dans laquelle les matériaux de la chaussée existante sont réutilisés sur place. Ce cas de matériau est sélectionné car il ressemble beaucoup à la technologie des enrobés à froid développée dans le présent projet.

### **Enrobé à froid (Cold Mix Asphalt – CMA)**

Le troisième matériau étudié dans cette partie est l'enrobé à froid dénommé ici CMA et faisant l'objet du présent projet. Cette technologie a pour objectif de réduire au maximum le chauffage des matériaux dans le poste d'enrobage et de réduire les émissions de CO<sub>2</sub>. Elle présente une alternative intéressante aux enrobés à chaud. L'évaluation effectuée dans ce chapitre permet de vérifier son bilan global par rapport aux autres alternatives.

#### **CMA + ciment**

Pour améliorer le comportement mécanique de la technologie des matériaux à froid, le ciment pourra être rajouté comme un additif au mélange. Ce cas a été étudié expérimentalement dans le cadre de ce projet dans le chapitre 4 notamment. L'objectif est de pouvoir évaluer sa pertinence énergétique et environnementale par rapport aux autres alternatives, le tout sans négliger son impact sur les performances mécaniques.

## **6.2.2 Inventaire du cycle de vie simplifié et indicateurs de performances**

Les données d'entrée concernant la consommation d'énergie ainsi que les émissions de CO<sub>2</sub> sont issues de la littérature ; des mesures ne pouvant pas être réalisées dans le cadre du présent projet. Plusieurs recherches ont été réalisées sur l'étude de cycle de vie des différentes technologies de construction routière [32], [80], [42]. Dorchies et al. [80] ont étudié en détail la consommation d'énergie et les émissions de divers matériaux de chaussées tels que les enrobés à froid. Dans leur analyse du cycle de vie, tous les matériaux constitutifs d'une chaussée et toutes les phases et étapes de production, fabrication, transport, pose, etc. ont été prises en considération. Les distances moyennes pour fabriquer une tonne d'enrobés considérées par [80] sont les suivantes ; hypothèses jugées réalistes pour notre cas d'étude:

- 300 km entre la raffinerie pour la production de bitume et la centrale d'enrobage ;
- 75 km entre la carrière de granulats et le site de fabrication ;
- 20 km entre le site de fabrication et le site de construction.

#### **Consommation d'énergie et émission de CO<sub>2</sub>**

Les valeurs des consommations énergétiques et des émissions de CO<sub>2</sub> de chaque étape et pour chaque technologie sont présentées respectivement dans le Tab. 30 et Tab. 31 et issues de [32], [80].

**Tab. 30** Consommation d'énergie pour la fabrication et la pose de technologies de routes sélectionnées [32], [80]

(MJ/t)	HMA	CIR	KMA	KMA + 2%ciment
1- La pose	17	17	17	-
2- Transport	102	34	85	-
3- Fabrication	255		17	-
4- Agrégat	51		34	-
5- Bitume	255	85	300	-
<b>Totale</b>	<b>680(MJ/t)</b>	<b>136(MJ/t)</b>	<b>453(MJ/t)</b>	<b>546.3(MJ/t) (80%HMA)</b>



**Tab. 31** Émissions de gaz à effet de serre liées à la fabrication et à la pose de technologies routières sélectionnées [32], [80]

(Kgco <sub>2</sub> /t)	HMA	CIR	KMA	KMA + 2%ciment
1- La pose	1.3		1.3	-
2- Transport	5.4	5.4	5.4	-
3- Fabrication	21.6	2.7	2.7	-
4- Agrégat	9.3		8	-
5- Bitume	16	6.9	18.7	-
<b>Totale</b>	53.6(Kg/t)	15(Kg/t)	36.1(Kg/t)	53.7 (Kg/t)

La phase de fabrication représente environ 40% des émissions totales engendrées par la fabrication et pose d'un HMA. Pour des températures de production plus basses et comme les agrégats peuvent être utilisés à la température ambiante, la consommation d'énergie de l'enrobé à froid est plus faible. La consommation d'énergie des liants de l'enrobé bitumineux à froid est légèrement supérieure à celle d'un HMA. Cela s'explique par le fait que l'émulsion de bitume contient de l'eau.

Le recyclage in situ à froid CIR présente la plus faible consommation d'énergie puisque moins de liant est nécessaire et les granulats sont récupérés. Pour fabriquer 1 tonne de matériau de chaussée, le HMA conventionnel consomme approximativement 680 MJ d'énergie. L'enrobé à froid et le recyclage in situ à froid ne consomment que 2/3 et respectivement 1/5 de la consommation d'un HMA.

L'enrobé à froid présente des émissions de CO<sub>2</sub> plus faibles qu'un HMA. En revanche, la contribution du ciment, même en petites quantités (dans notre cas 2 % du mélange) augmente considérablement les émissions en carbone de la production d'un enrobé à froid (de 48 %). L'ajout de 2 % de ciment dans l'enrobé à froid entraînera les mêmes émissions de CO<sub>2</sub> qu'un enrobé à chaud (HMA) soit 54 kg/t. La consommation d'énergie correspondante est de 546,3 MJ/t, soit 80 % de celle de la référence à chaud (HMA).

### Performances

La prise en compte de la performance (liée à la durabilité) de la structure construite est déterminante. Les résultats de trois différents essais mécaniques réalisés dans le cadre de cette étude ont été choisis pour l'enrobé à froid (rigidité, la résistance à la compression, sensibilité à l'eau) (voir Tab. 32).

**Tab. 32** Performances mécaniques

	ITSR (%)	Rigidité (Mpa)	Duriez (MPa)
Enrobé à chaud	98%	5'500	11,70
Recyclage à froid en place	77%		
Enrobé à froid	97%	3'181	7,25
Enrobé à froid + ciment	98%	5'572	8,40

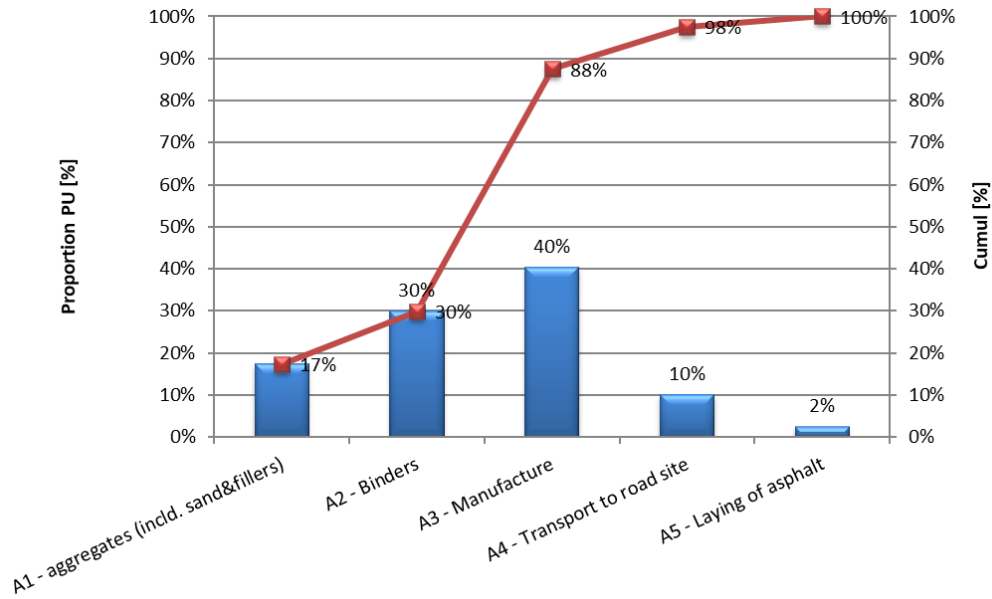
## 6.2.3 Résultats

### Niveau 1 : Analyse Pareto

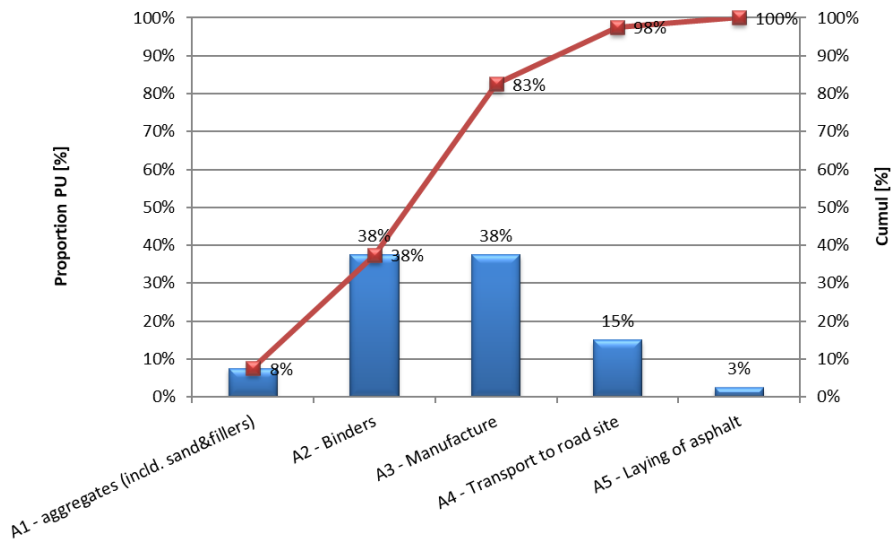
L'objectif de ce niveau d'analyse est d'identifier les principales phases de l'analyse de cycle de vie intervenant dans le bilan global, ceci pour chaque type de matériau séparément. Les données utilisées sont celles présentées dans l'inventaire de cycle de vie.

L'analyse des critères évalués sur le cycle de vie pour l'exemple de l'enrobé HMA est présentée dans les Fig. 66 et Fig. 67.

De cette analyse préliminaire, il est à relever que pour la majorité des enrobés, la phase liée aux matériaux (A1 et A2) est dominante, à l'exception du HMA qui présente une étape de fabrication davantage dominante (A3).



**Fig. 66** Identification du processus unitaire (PU) dominant pour le " Émissions de gaz à effet de serre " dans le cas d'un HMA

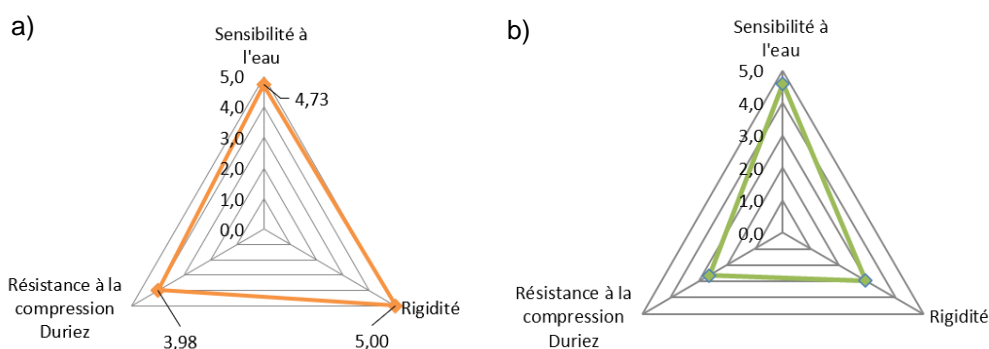


**Fig. 67** Identification du processus unitaire dominant pour le " Potentiel de consommation " dans le cas d'un HMA

Concernant les critères performanciels, les représentations des performances pour les enrobés HMA et CMA sont illustrées dans la Fig. 68. Les indices de performance sont déterminés conformément à la méthode détaillée par [34]. Les différents résultats sont rappelés dans le Tab. 33.

**Tab. 33** Indices de performances bruts et normalisés des enrobés

	Enrobé à chaud	Recyclage à froid en place	Enrobé à froid	Enrobé à froid + ciment
Sensibilité à l'eau (%)				
Indice brut	98%	77%	97%	98%
Indice normalisé	4,74	1,93	4,6	4,73
Rigidité (MPa)				
Indice brut	5'500		3'181	5'
Indice normalisé	5,0		2,9	5,1
Résistance à la compression (MPa)				
Indice brut	11,7		7,3	8,4
Indice normalisé	4,0		2,6	3,0

**Fig. 68** Résultat niveau 1 – Performance (indice normalisé) pour ; a) HMA b) CMA**Niveau 2 : Analyse graphique**

Ce niveau de modèle consiste à comparer les différents variants entre-elles. Ceci permet d'identifier les différences et classement éventuel entre différentes alternatives. L'analyse graphique est effectuée en se basant sur les indicateurs suivants : énergie, émissions et performances mécaniques.

La Fig. 69 présente un exemple de comparatif des indices normalisés de performances de différents enrobés. Ce type de représentation graphique permet de visualiser les différences entre ces enrobés et donc pouvoir identifier l'enrobé le plus performant par rapport à la référence à chaud (HMA). Il est à noter que l'enrobé à froid avec l'ajout de 2% de ciment est le plus performant par rapport aux autres variantes et le plus proche de la référence, du moins pour ce qui concerne les performances mécaniques.

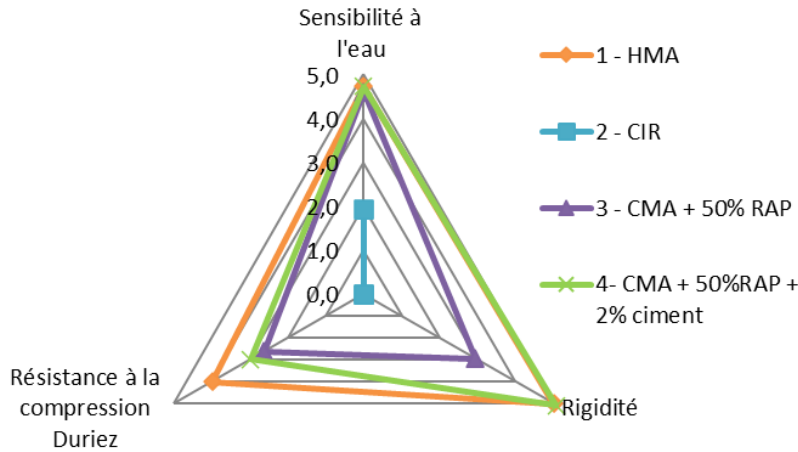


Fig. 69 Comparatif des indices normalisés de performances des enrobés

Par la suite, les performances de ces différents enrobés sont mises en relation avec les autres indicateurs (consommation d'énergie et émission de CO<sub>2</sub>). Les différences de performance pour les différentes alternatives (enrobés) par rapport au cas de référence (HMA) sont normalisées selon les données de ce dernier et représentées dans la Fig. 70. Le cas de référence indique une valeur de 0% pour les trois indicateurs dans ce graphique. Il peut être relevé que pour l'ensemble des indicateurs, l'enrobé CIR présente les performances les plus élevées, à l'exception des performances mécaniques. L'enrobé à froid présente des performances globalement intéressantes par rapport à la référence et semble donc constituer *a priori* une alternative crédible.

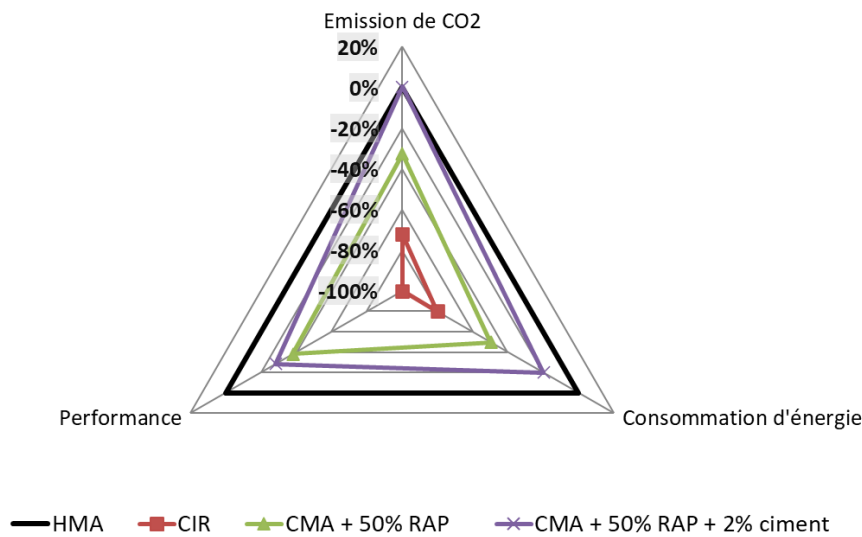


Fig. 70 Comparaison entre les différents cas d'enrobés pour les différents indicateurs

### 6.3 Enseignements

Dans le présent document le modèle PLANET développé par [35] a été repris et simplifié afin de proposer l'illustration d'une approche permettant de comparer différentes variantes. Il est utile de rappeler que cette approche ne se veut qu'illustrative, les performances de l'enrobé à froid étant issues de la présente recherche alors que les performances des autres enrobés (variantes) ont été issues de la littérature. Les valeurs relatives à la consommation énergétique et aux émissions sont quant à elle également issues de la littérature dans le domaine.

Quatre types d'enrobés ont été comparés dans cet exemple :

- HMA : enrobé à chaud classique
- CIR : recyclage à froid sur place
- CMA : enrobé à froid
- CMA + ciment : enrobé à froid + ciment

Dans le cadre de la simplification du modèle PLANET, seuls les deux premiers niveaux d'analyse ont été implémentés. Le premier niveau permet d'analyser pour chaque alternative et processus unitaire les performances de manière séparée afin de définir l'indicateur dominant et les phases essentielles du cycle de vie. Le deuxième niveau d'analyse permet de comparer les différentes alternatives entre-elles selon les indicateurs préalablement sélectionnés. Les résultats indiquent finalement que, dans le cas présent soit avec les données de base utilisées, l'enrobé à froid peut à priori constituer une alternative crédible aux enrobés à chaud. On relèvera également la bonne évaluation globale de la procédure de recyclage à froid sur place pour laquelle les performances mécaniques sont tout de même inférieures aux autres alternatives. L'analyse a finalement permis de quantifier l'important impact sur la consommation d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub> de l'utilisation de ciment dans un enrobé à froid, ceci même pour un dosage faible (2%).



## 7 Conclusions et recommandations

Le présent projet de recherche a pour objectif principal l'évaluation des performances et du domaine d'application des enrobés à froid en tant que couches de portance (AC T) et/ou couche de base (AC B), ceci dans le cadre de chaussées routières. La problématique des enrobés froid étant particulièrement complexe, le projet de recherche n'a pas vocation à résoudre l'ensemble de la problématique, mais principalement de proposer quelques enseignements et pistes en vue d'un approfondissement de la thématique et pouvoir ainsi contribuer si possible à une utilisation plus importante de ces enrobés à faibles impacts énergétiques et écologiques.

La méthodologie appliquée dans le cadre de ce projet a essentiellement concerné des investigations en laboratoire, investigations complétées ensuite par quelques essais de production au poste d'enrobage. Ces différentes analyses du point de vue des matériaux ont ensuite été complétées par quelques études additionnelles relatives au dimensionnement de chaussées avec enrobé à froid et à l'évaluation globale de ce type de matériau comparativement à d'autres technologies d'enrobés bitumineux.

Les principaux enseignements issus de la présente étude peuvent être résumés ainsi :

- Sur le principe, les enrobés à froid peuvent être fabriqués soit sur la base de bitume mousse ou alors avec le recours à des émulsions. Les enrobés à la mousse peuvent être produits dans une centrale « traditionnelle » pour enrobé à chaud, si le poste est équipé avec une unité de moussage pour enrobé tiède (par exemple). Cette procédure n'est cependant pas optimale.
- Le projet a également démontré la très grande difficulté de trouver des émulsions adaptées à la production des enrobés à froid en couche de portance ou de base ; la composition chimique de l'émulsion, son affinité avec les granulats ainsi que le temps de rupture étant certains paramètres déterminants. L'utilisation à grande échelle des enrobés à froid nécessiterait sans aucun doute le développement ou la mise à disposition sur le marché de davantage d'émulsions que dans la situation actuelle qui s'est avérée relativement contraignante pour le projet.
- La production des enrobés en laboratoire (et au poste d'enrobage) nécessite une certaine maîtrise, le processus étant sensiblement différent de celui des enrobés à chaud ou tiède. L'expérience et les itérations nécessaires afin de produire un enrobé à froid de qualité ne sont pas à sous-estimer, comme cela a été démontré dans le cadre du présent projet.
- Du point de vue des postes d'enrobage, l'utilisation de postes spécifiques pour enrobés à froid (par exemple postes mobiles à émulsion) semblent davantage pertinentes et cohérentes que la production d'enrobés à froid avec un poste d'enrobage initialement destiné aux enrobés à chaud. Cela présuppose cependant une demande suffisante de ce type de matériaux.
- Lors de la fabrication des enrobés à froid, on pourra observer que l'interaction entre granulats « froid » et liant n'est pas à négliger, cette dernière ayant un impact considérable sur l'adhésivité liant-granat, comparativement à des mélanges à chaud potentiellement moins affectés par cette problématique de manière globale. Cette interaction plus faible entre liant et granulat doit impérativement être optimisée sous peine de péjorer le comportement mécanique global.
- Outre la production de l'enrobé, la confection des échantillons est un paramètre déterminant dans le cas d'enrobés à froid. En raison de son humidité résiduelle, la réalisation d'éprouvettes Marshall n'est pas adaptée et il est recommandé de procéder à la confection d'échantillons Duriez ou avec la presse à cisaillement giratoire. La confection de plaques d'orniérage s'est, dans le cadre du présent projet, également avérée très complexe voire problématique. L'eau piégée dans l'enrobé à froid rend également plus difficile l'atteinte de la masse volumique réelle cible.
- Toutes les émulsions (cationiques) ne sont pas comparables et le choix de l'émulsion est un paramètre déterminant de la formulation d'un enrobé à froid, ceci tout autant que son dosage et sa compatibilité avec les fractions granulaires utilisées. La teneur en eau provenant de l'émulsion et de l'eau d'apport est également un paramètre déterminant pour

une optimisation de la formulation des enrobés à froid. Il est donc indispensable de bien connaître et caractériser les émulsions, chaque émulsion étant légèrement différente.

- Les méthodes d'essais pour l'évaluation des performances mécaniques doivent également faire l'objet d'une réflexion spécifique. Les essais de compression indirecte ou Duriez fonctionnent de manière satisfaisante avec ce type d'enrobé, de même que les essais de rigidité (IT-CY). Le présent projet a également démontré la très faible résistance des enrobés produits par rapport aux essais dynamiques de type orniéage ou compression cyclique, ce point étant le cas échéant à approfondir.
- De manière générale, les enrobés à froid présentent systématiquement un certain mûrissement, leur résistance mécanique s'améliorant avec le temps.
- Dans le cas d'enrobés à froid, l'ajout d'agrégats d'enrobé (reclaimed asphalt pavement RAP) permet d'améliorer le comportement mécanique global du mélange, avec notamment un effet notable sur la rigidité de l'enrobé et les performances par rapport aux contraintes statiques. L'effet de l'ajout du RAP est probablement lié (entre autres) au liant « dur » provenant des agrégats d'enrobés qui se trouvera alors partiellement mobilisé lors du contact avec l'émulsion.
- Bien qu'ayant un impact énergétique et environnemental conséquent, l'ajout de ciment (dosage 2%) permet d'améliorer la résistance mécanique des enrobés (rigidité) et favoriser ainsi son mûrissement. L'ajout de liant hydraulique n'améliore cependant pas la résistance aux sollicitations dynamiques qui reste très faible pour les matériaux produits en laboratoire dans le cadre de cette recherche.
- Les différentes performances mécaniques obtenues ainsi que l'analyse de la littérature tendent à montrer que de manière globale, des enrobés à froid à base d'émulsion sont davantage prometteurs que des enrobés à froid fabriqués avec des technologies de bitume mousse. Il serait donc recommandé de poursuivre les investigations avec les techniques à base d'émulsion.
- Les différents résultats obtenus dans le cadre du présent projet laissent cependant supposer, dans l'état actuel et pour les enrobés testés ici, un domaine d'application essentiellement lié aux surfaces à faibles sollicitations ou couches profondes. Une utilisation en tant que couche de portance ou de liaison est très probablement possible, mais cela nécessite préalablement une optimisation de l'enrobé ; les matériaux développés dans le cadre de ce projet ne permettant pas (encore) de fournir toutes les garanties malgré des valeurs de rigidité satisfaisantes.
- Une approche relative à la prise en compte des enrobés à froid dans une procédure de dimensionnement est proposée avec également l'illustration d'une démarche afin de déterminer le coefficient d'équivalence « a » de ces enrobés. Les valeurs obtenues doivent cependant être considérées avec précautions et ne peuvent être extrapolées sans précautions à d'autres enrobés à froid. La démarche proposée permet également d'illustrer la problématique complexe du dimensionnement de structures avec enrobés à froid, par exemple la prise en compte des performances en fatigue, des méthodes analytiques (empirique-mécanique) étant vraisemblablement adaptées pour ce type de dimensionnement.
- Une première approche de bilan global permettant de comparer les enrobés à froid avec d'autres matériaux bitumineux a permis d'illustrer la démarche recommandée et mettre également en évidence certains aspects spécifiques tels que l'impact de l'ajout de ciment.
- Bien que répondant à quelques questions et proposant des ébauches de solutions, le présent projet de recherche permet également de soulever des pistes de réflexions et recommandations relatives à d'éventuelles investigations ultérieures :
- La problématique relative à l'optimisation des performances mécaniques des enrobés à froid à base d'émulsion devrait être davantage approfondie, ceci afin de pouvoir étendre davantage leur domaine d'application. Cela nécessite cependant une étroite collaboration avec des fournisseurs/spécialistes en émulsions.
- Une fois les enrobés à base d'émulsion optimisés, une validation en vraie grandeur (planche d'essais) serait recommandée. Cela présuppose a priori l'utilisation de postes spécifiquement dédiés à ces matériaux.
- Le recours à d'autres ajout que le ciment, davantage respectueux de l'environnement, en vue d'améliorer les performances mécaniques des enrobés à froid constitue également une thématique pouvant très probablement être approfondie et optimisée.
- La mise en application pratique et à grande échelle des enrobés à froid nécessitera finalement une mise à jour de la normalisation, ceci tout particulièrement dans le domaine du suivi et contrôle des chantiers.



- Disposer d'un modèle global permettant de comparer différentes technologies d'enrobés bitumineux est finalement un objectif global dont les bases ont été posées lors du projet PLANET. Le présent projet met une fois encore en évidence, le besoin important de générer des données fiables en vue d'une évaluation des produits et procédés sur l'ensemble du cycle de vie. Cela comprend par exemple, les informations relatives à la consommation énergétique et aux émissions.
- Ces différents éléments devront ainsi permettre, sur la base des enseignements du présent projet, d'augmenter le recours aux enrobés à froid, ceci sans prise de risques supplémentaires notamment au niveau de la durée de service et des performances de la chaussée.



## Annexes

<b>I</b>	<b>Annexe A</b> .....	<b>92</b>
I.1	Essais préliminaires : Vérification de la recette .....	92
I.2	Programme initial d'essais .....	93
I.3	Premiers résultats .....	94
I.4	Essais préliminaires complémentaires : Méthode de compactage.....	99
<b>II</b>	<b>Annexe B</b> .....	<b>125</b>
II.1	Essais étendus.....	125
II.2	Analyses des mélanges .....	130
<b>III.</b>	<b>Annexe C</b> .....	<b>134</b>
III.1	Production en centrale .....	134

# I Annexe A

## I.1 Essais préliminaires: Vérification de la recette

### I.1.1 Recettes

Deux recettes d'enrobé à froid fabriquées avec l'émulsion ont été proposées pour des premiers investigations en laboratoire.

Les Tab. 34 et Tab. 35 présentent les recettes des fabrications avec Ea1 et Ea2 respectivement.

<b>Tab. 34 Recette de ACB160-Ea1</b>		
Matériaux :	Filler	3.0%
	Sable concassé 0/4	32.0%
	Sable rond lavé 0/4	16.0%
	Gravillons concassés :	
	4/8	17.5%
	8/11	12.0 %
	11/16	19.5%
RQP	16RA0/11	0 %
Liant	Emulsion CTW / enrobé	3.50%
	Liant RAP	0
Teneur en eau cible		5.5% de la masse totale
Eau émulsion		1.88%
Eau apport		3.62%
Masse volumique [g/cm3]	Granulats	2.7
	Liant	1.03
	Enrobé (calculée)	2.385

<b>Tab. 35</b> Recette de ACB160-Ea2		
Matériaux :	Filler	3.0%
	Sable concassé 0/4	32.0%
	Sable rond lavé 0/4	16.0%
	Gravillons concassés :	
	4/8	17.5%
	8/11	12.0 %
	11/16	19.5%
RAP	16RA 0/11	0 %
Liant	Emulsion CTW / enrobé	4.4%
	Liant RAP	0
Teneur en eau cible		5.5% de la masse totale
Eau émulsion		1.88%
Eau apport		3.62%
Masse volumique [g/cm3]	Granulats	2.7
	Liant	1.03
	Enrobé (calculée)	2.308

### I.1.2 Protocole de fabrication

Le protocole initial de fabrication est effectué selon la norme EN 12697-35 et décrit dans la Fig. 71.

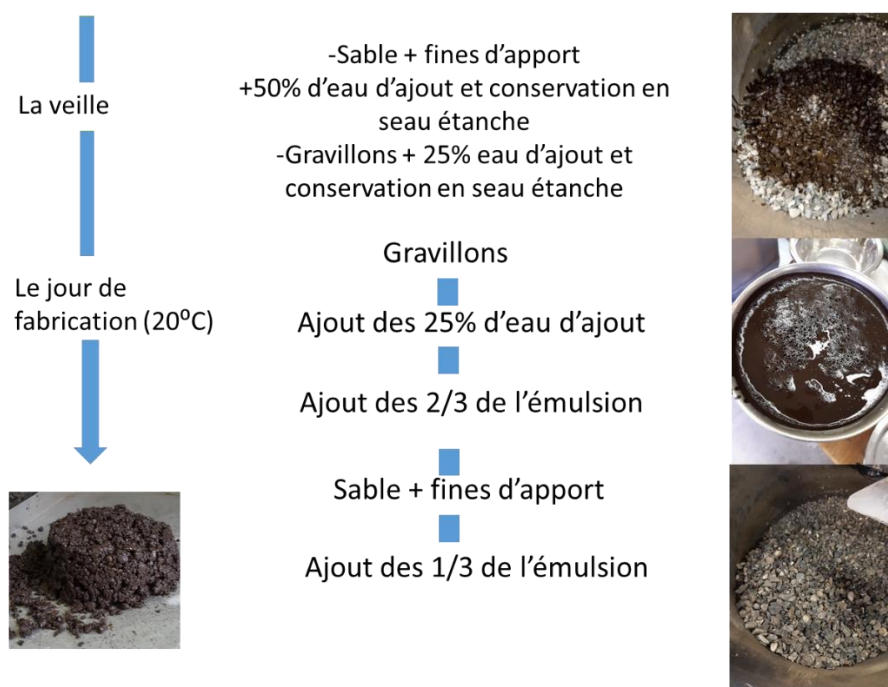


Fig. 71 Protocole initial de fabrication en laboratoire

## I.2 Programme initial d'essais

Le programme d'essai adapté pour ces premières fabrications est le suivant :

- Essai de maniabilité à t0/ immédiatement après fabrication, à t=3h et à t= 6h
- Fabrication de 15 Marshall avec une énergie de compactage de 2.93 MJ/m3 et en appliquant 50 coups par face.
- Fabrication de 5 Marshall avec énergie de compactage de 2.93 MJ/m3 et en appliquant 25 coups par face.
- Essai ITS après 14jours.
- Courbe granulométrique et analyse du liant récupéré
- Mesure de la teneur en eau tous les 2/3 jours. Mesure de la densité volumique et pourcentage de vide tous les 2/3 jours.

## I.3 Premiers résultats

### I.3.1 Maniabilité EN12697-53 [23]

Trois moules ont été préparés de chaque fabrication pour l'essai de maniabilité. Une quantité d'enrobé est ensuite versée dans ces moules sans les compacter. La surface supérieure du moule remplie a été arasée afin d'assurer une épaisseur finale de  $100\pm 2$  mm. La prise de la masse de chaque moule est effectuée avant l'essai. Un premier moule a été directement testé via le maniabilimètre Nynas et les deux autres moules ont été conservés pendant 3 et 6 h à  $20^{\circ}\text{C}$  et 50% d'humidité. La vitesse de l'essai est de 1 cm/s.

La Fig. 72 présente les résultats pour les deux fabrications avec les deux émulsions. La force maximale est le critère de maniabilité utilisé dans ce travail.

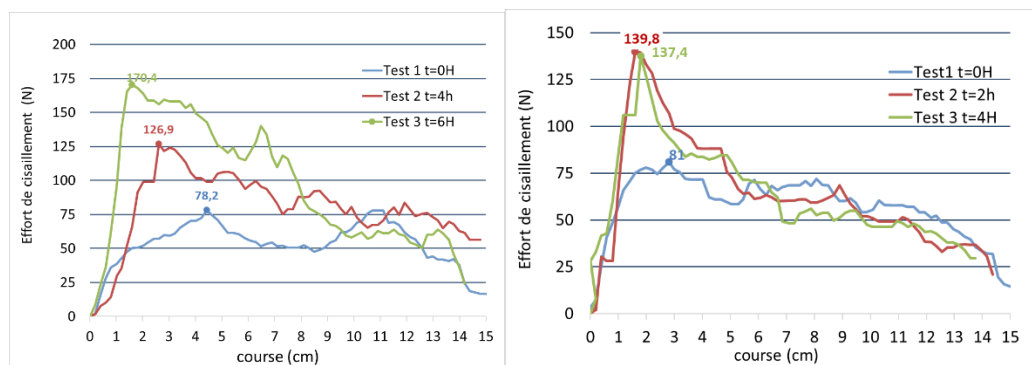


Fig. 72 Courbe de maniabilité a) Emulsion Ea1 b) Emulsion Ea2

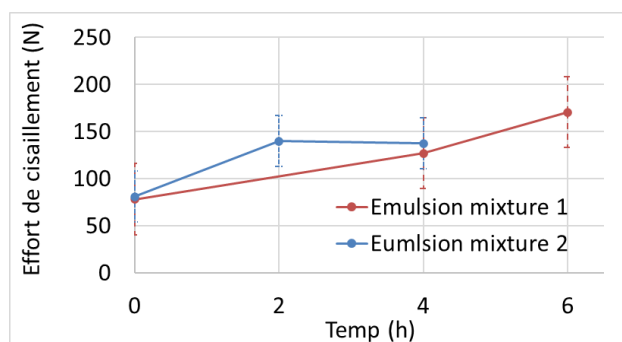


Fig. 73 Evaluation de la force maximale en fonction du temps à  $V= 1\text{cm/s}$

Dans un premier temps, ces résultats montrent une augmentation importante de la force maximale de poussée lorsque le temps de conservation augmente pour les deux fabrications. Plus les matériaux sont mûrs, plus la force de cisaillement est grande plus la maniabilité est faible.

On note qu'à 0h et 4h : les deux enrobés présentent une même maniabilité,

### I.3.2 Marshall SN 670434 / EN 12697-34

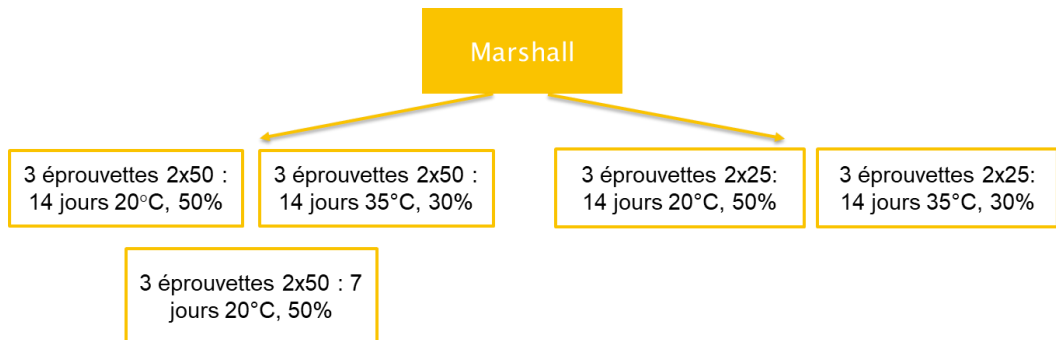
- Fabrication 1 avec émulsion Ea1

Afin d'effectuer les différents essais mécaniques 15 éprouvettes Marshall ont été fabriquées. L'énergie de compactage est de 2.93 MJ/m<sup>3</sup>. Il était choisi d'appliquer 50 coups par côté pour 12 éprouvettes et 25 coups par face pour trois éprouvettes.

Une quantité de 1,2 kg a été appliquée dans un moule. Les échantillons ont été stockés une journée dans les moules pour éviter les potentiels déformations des éprouvettes. Après le démoulage les éprouvettes ont été divisées en 5 groupes pour le programme de stockage indiqué dans la Fig. 75



**Fig. 74** Les éprouvettes Marshall



**Fig. 75** Programme de stockage

- Fabrication 2 avec émulsion Ea2

Pour l'enrobé ACB 16 0% avec Ea2, 15 éprouvettes ont été fabriquées. L'énergie de compactage est de 2.93 MJ/m<sup>3</sup>. Pour l'ensemble des éprouvettes 50 coups par côté ont été appliqués. Le programme de stockage est défini dans la Fig. 77.



**Fig. 76** Les éprouvettes Marshall

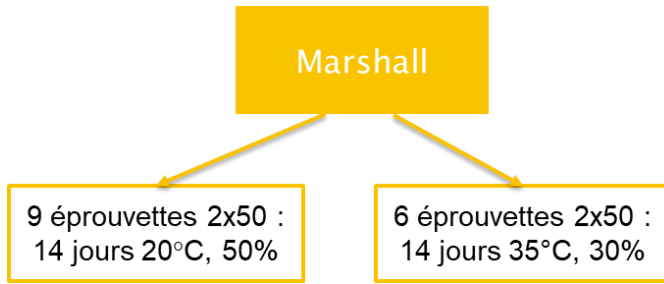


Fig. 77 Programme de stockage

### I.3.3 Teneurs en vides

Les pourcentages de la teneur en vides sont mesurés et présentés dans la Fig. 78.

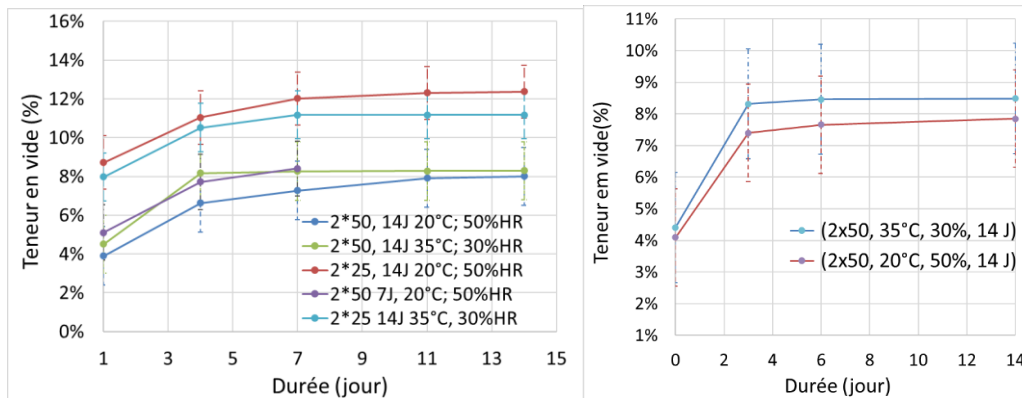


Fig. 78 Teneur en vides en fonction de nombre de jour a) Ea1 b) Ea 2

Les teneurs en vides après 14j de stockage à 20°C, 50% des éprouvettes compactées avec 50 coups par face de la fabrication 1 et 2 sont égales à 7.9% et 7.85% respectivement.

Les éprouvettes conservées 14j à 35°C, 30% ont une teneur en vide de 8.3% et 8.49% pour la fabrication 1 et 2 respectivement.

On peut noter que la teneur en vide est assez élevée et ceci pourra être dû à la méthode de compactage opté dans cette étude préliminaire ou même dû à la quantité des matériaux.

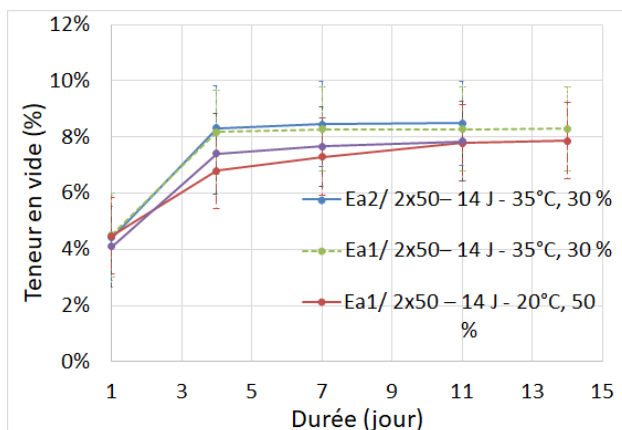


Fig. 79 Comparaison de la teneur en vides pour les deux fabrications

### I.3.4 Perte de masse

La Fig. 80 présente la moyenne de la perte de masse pour les différentes éprouvettes des deux fabrications.

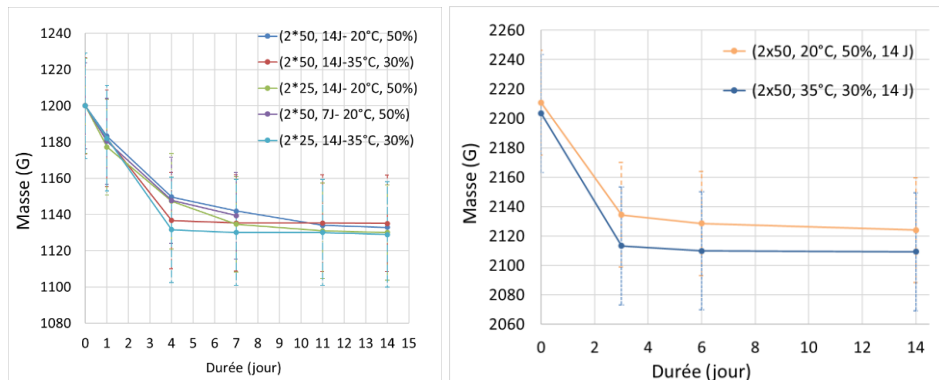


La valeur moyenne de la perte de masse après 14j est de 5.6 % et 3.9% respectivement pour les éprouvettes de la fabrication 1 et 2 conservées à 20°C et 50%.

La valeur moyenne de la perte de masse après 14j est de 4.4 % et 4.4% respectivement pour les éprouvettes de la fabrication 1 et 2 conservées à 35°C et 30%.

Pour la fabrication 1 : On note que la perte de masse, pour les éprouvettes compactées avec 50 coups par face et conservées à 35°C, se stabilise dès le 4<sup>ème</sup> jour de conservation. Tandis que, la perte de masse des éprouvettes conservées à 20°C ne se stabilise pas jusqu'au 14<sup>ème</sup> jour.

Pour la fabrication 2 : on note une stabilisation de la perte de masse a eu lieu le 6<sup>ème</sup> jour de la conservation pour les deux températures 20 et 35°C.

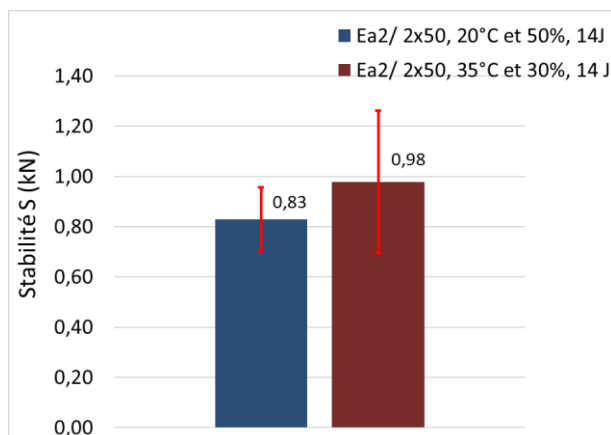


**Fig. 80** Perte de masse a) ACB 16 0% Ea1 b) ACB 16 0% Ea2

### I.3.5 Stabilité Marshall

L'essai de stabilité Marshall a été effectué seulement sur les éprouvettes de la fabrication d'enrobé avec Ea2. L'essai Marshall ne donne pas d'indications sur la résistance aux déformations d'un revêtement : il sert de valeur indicative et fourni des indications sur la régularité d'une production.

La Fig. 81 montre la valeur moyenne de la stabilité pour les éprouvettes Marshall conservées à 20°, 50% et à 35°C, 30%. On note que la stabilité des éprouvettes conservées à 35°C est plus élevée que celle des éprouvettes conservées à 20°C. En revanche les valeurs de stabilité Marshall obtenus pour les deux enrobés ne sont pas satisfaisant et ne respectent pas les exigence normatifs SN 640 431.



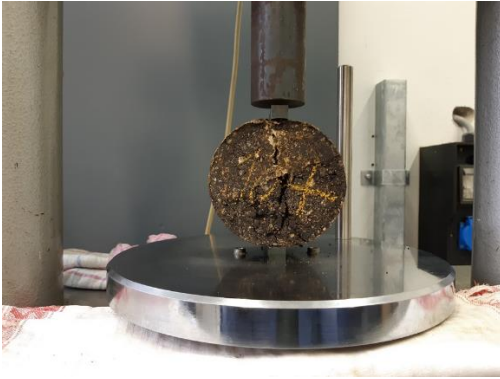
**Fig. 81** Stabilité de la fabrication 2

### I.3.6 Essai de résistance à la traction indirecte ITS (EN 12697-23) [24]

Deux lots d'éprouvettes Marshall de chaque fabrication ont été préparés pour cet essai : Un premier lot d'éprouvettes secs conservées à 20°C et un deuxième lot d'éprouvettes humides.

Les éprouvettes sèches ont été placées dans des sacs plastiques et posées dans le bac d'eau avec les éprouvettes humides pendant 2h avant l'essai.

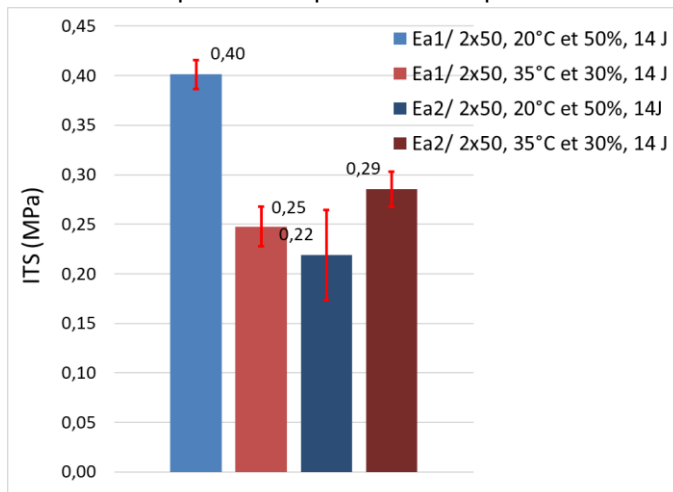
L'essai de traction indirecte a été appliqué selon la norme EN 12697-23 [24] pour l'ensemble des éprouvettes.



**Fig. 82** Essai IST

La Fig. 83 présente les résultats de l'essai ITS pour les différentes éprouvettes des deux fabrications. Il était noté que :

- Pour ACB 16 0% Ea1 : la valeur moyenne ITS pour les éprouvettes conservées à 20°C est 38% plus élevée que celle des éprouvettes conservées à 35°C. En effet l'essai ITS est effectué à 30°C à la place d'une température de 22°C.
- Pour ACB 16 0% Ea2 : la valeur moyenne ITS pour les éprouvettes conservées à 20°C est 34% plus élevée que celle des éprouvettes conservées à 35°C.
- La valeur moyenne ITS des éprouvettes issues de la fabrication 1 avec Ea1 conservées à 20°C est 45% plus élevée que celle des éprouvettes issues de la fabrication 2 avec Ea2.



**Fig. 83** Valeurs moyennes de ITS

### I.3.7 Bilan

On peut noter de cette première étude préliminaire que les résultats ne sont pas satisfaisants pour les deux enrobés à froid fabriqués avec Ea1 et Ea2. En effet les résultats issus de l'essai Marshall sont au-dessous des exigences de la norme SN 640 431-1-NA

pour les deux émulsions. Il était noté que les éprouvettes Marshall ne sont pas compactées correctement et ceci peut être dû à l'eau existant dans l'enrobé. Comme les moules de Marshall ne possèdent pas de système de drainage d'eau, l'eau pourra être bloqué au fond des moules engendrant par la suite des efforts de compression. Les résultats de l'essai ITS ne sont pas satisfaisantes aussi selon les exigences de la norme.

De ces premiers résultats il était conclu que les caractéristiques des enrobés à froid fabriquées à l'émulsion ne sont pas satisfaisantes. Plusieurs raisons peuvent être à l'origine de ces premiers résultats :

- Est-ce que la formule est suffisamment bonne ?
- Est-ce que la méthode Marshall est la méthode adaptée pour la fabrication des éprouvettes des enrobés à froid en laboratoire ?

De ce premier travail nous avons décidé de tester d'autres émulsions et de chercher la méthode adéquate de compactage en laboratoire pour l'enrobé à froid.

## I.4 Essais préliminaires complémentaires : Méthode de compactage

Cette partie est dédiée aux essais effectués avec les émulsions Ea3 et Ea4 et une émulsion de Ec1. L'objectif de cette partie est de définir la méthode adéquate pour la fabrication des éprouvettes.

Le premier type d'émulsion utilisée est un mélange des deux émulsions Ea3 et Ea4:

- 65 % teneur en bitume 160/220/teneur en émulsifiant Polyram (5 kg/t)/pH2
- 65 % teneur en bitume 160/220 /teneur en émulsifiant Polyram (15 kg/t)/pH2

Les deux émulsions contiennent 65% de bitume 160/220 et 35 % d'eau et ont un pH 2. La première étape était de définir la bonne proportion de chaque émulsion pour obtenir l'émulsion finale.

Le deuxième type d'émulsion Ec1 contient 60% de bitume 70/100 et 40 % d'eau.

La Première production de l'enrobé à froid a été effectué avec l'usage des émulsions Ea sans rajouter du RAP nommé ACB16 0%-Ea3&4.

La deuxième production a été effectuée avec l'émulsion Ec et nommée ACB 16 0%-Ec.

### I.4.1 Vérification de la recette en petite quantité

Les Tab. 36, Tab. 37 et Tab. 38 présentent les recettes des différents enrobés fabriquées à l'émulsion Ea 3&4 et Ec respectivement.

<b>Tab. 36 Recette de ACB16 0%-Ea3&amp;4.</b>			
<b>Composants</b>	Filler	1.72%	1.72g
	Sable concassé 0/4	6.95%	6.95g
	Sable rond lavé 0/4	38.97%	38.97g
	Gravillons concassés :		
	4/8	19.25%	19.25g
8/11	14.10 %	14.10g	
11/16	18.40%	18.40g	
<b>Somme de granulats</b>		100.01%	100g*
<b>Agrégats d'enrobés</b>	16RA 0/11	0 %	

<b>Liant/ Emulsion</b>	Teneur en liant/enrobé (cible) Teneur en liant/granulats (cible) Masse totale sans eau (liant +granulat) Teneur en liant émulsion Dosage Emulsion CECA (65% liant 70/100) Masse d'émulsion	4.70%* 4.93%  65%* 7.58% (= 4.93%/65%)	104.93g   7.58g
<b>Eau</b>	Teneur en eau (cible)  Masse d'eau totale (pour 100g de granulats secs)  Teneur en eau émulsion Masse d'eau émulsion Masse d'eau apport	5.5% *de la masse totale (granulats + liant)   35%*	  $5.5\% \times 104.93 = 5.77 \text{ g}$  $0.35 \times 7.58 = 2.65 \text{ g}$ $5.77 - 2.65 = 3.12 \text{ g}$
<b>Masse volumique [g/cm3]</b>	Granulats Liant Enrobé (calculée)	2.7 1.03 2.509	

**Tab. 37** Recette de ACB16 50%-Ea3&4

<b>Composants</b>	Filler Sable concassé 0/4 Sable rond lavé 0/4 Gravillons concassés : 4/8 8/11 11/16	0.38% 27.57% 10.92% 21.29% 16.10 % 23.80%	0g 13.79g 5.76g 10.64g 8.04g 11.88g
<b>Somme de granulats</b>		100.01%	50g*
<b>Agrégats d'enrobés</b>	16RA 0/11	50 %	50g
<b>Liant/ Emulsion</b>	Teneur en liant/enrobé (cible) Teneur en liant/enrobé RAP (mesure) Teneur en liant/granulats (cible) Masse totale sans eau (liant +granulat) Teneur en liant émulsion Dosage Emulsion CECA (65% liant 70/100) Masse d'émulsion	4.70%* 4.37% $80\% \times 4.93 = 3.94\%$  65%* $3.94/0.65 = 6.06\%$	103.94g   6.06g
<b>Eau</b>	Teneur en eau (cible)  Masse d'eau totale (pour 100g de granulats secs)  Teneur en eau émulsion Masse d'eau émulsion Masse d'eau apport	5.5% *de la masse totale (granulats + liant)   35%*	  $5.5\% \times 103.94 = 5.72 \text{ g}$  $0.35 \times 6.06 = 2.12 \text{ g}$ $5.72 - 2.12 = 3.60 \text{ g}$
<b>Masse volumique [g/cm3]</b>	Granulats Liant Enrobé (calculée)	2.7 1.03 2.522	

<b>Tab. 38 Recette de ACB160-Ec</b>			
<b>Composants</b>	Filler	1.72%	1.72g
	Sable concassé 0/4	6.95%	6.95g
	Sable rond lavé 0/4	38.97%	38.97g
	Gravillons concassés :		
	4/8	19.25%	19.25g
	8/11	14.10 %	14.10g
	11/16	18.40%	18.40g
<b>Somme de granulats</b>		100.01%	100g*
<b>Agrégats d'enrobés</b>	16RA 0/11	0 %	
<b>Liant/ Emulsion</b>	Teneur en liant/enrobé (cible)	4.70%*	
	Teneur en liant/granulats (cible)	4.93%	
	Masse totale sans eau (liant +granulat)		104.93g
	Teneur en liant émulsion	60%*	
	Dosage Emulsion CTW (60% liant 70/100)	8.22% (	
Masse d'émulsion	= 4.93%/60%)		8.22g
<b>Eau</b>	Teneur en eau (cible)	5.5% *de la masse totale (granulats + liant)	
	Masse d'eau totale (pour 100g de granulats secs)		$5.5\% \times 104.93 = 5.77 \text{ g}$
	Teneur en eau émulsion	30%*	
	Masse d'eau émulsion		$0.35 \times 8.22 = 2.47 \text{ g}$
	Masse d'eau apport		$5.77 - 2.47 = 3.3 \text{ g}$
<b>Masse volumique [g/cm3]</b>	Granulats	2.7	
	Liant	1.03	
	Enrobé (calculée)	2.509	

Des fabrications manuelles en petite quantité ont été réalisés en premier temps afin de vérifier les recettes.

- Fabrication 1

Afin de vérifier cette recette, une fabrication d'une quantité totale de 1kg a été effectuée. Le premier objectif de cette fabrication était de définir la proportion de chaque émulsion pour composer l'émulsion Ea 3&4. En effet, les essais en gamelle sont indispensables afin de définir les proportions des deux émulsions et déterminer le temps nécessaire avant rupture, un temps qui est très important.

Pour un premier essai, 50% de chaque émulsion était sélectionnée. Les granulats et l'eau d'apport ont été mélangés en premier temps dans le récipient. L'émulsion a été ensuite rajouté et l'ensemble a été mélangé manuellement avec une baguette jusqu'à la rupture. Le temps de malaxage était 38s >20s pour ce premier essai. Ceci est en effet à cause de la difficulté de mélanger 1kg de matériaux dans un petit récipient d'où la nécessité de refaire le test avec moins de quantité.



**Fig. 84** Etape manuelle de fabrication d'enrobé à froid

- Fabrication 2

Un deuxième essai a été effectué mais en réduisant la quantité initiale de 500g. Avec cette quantité le mélange est devenu plus facile.

Les mêmes étapes ont été effectuées et le temps de rupture était de 18 s < 20s (recommandé par l'expert de l'entreprise productrice de l'émulsion Ea). Avec cette production la recette sans RAP a été approuvée.

- Fabrication 3

Une fabrication en petite quantité a été effectuée pour la recette avec 50% de RAP. La même quantité d'eau a été considérée que celle de la recette sans RAP.

Concernant l'émulsion deux hypothèses disponibles :

Hypothèse 1 : aucun liant du RAP ne réagit alors la recette et la quantité de bitume d'apport nécessaire est identique au cas avec 0% RAP. Dans ce cas, le RAP est considéré comme un simple granulat.

Hypothèse 2 : on a environ 20% du liant du RAP qui va réagir et par conséquent nous mettons moins d'émulsion que pour le cas de l'hypothèse 1. Ceci car une partie des gros granulats du RAP sont pré-enrobés ; mais le liant du RAP n'est que très peu active.

*Décision / recommandation* : 80% de la quantité d'émulsion de la recette sans RAP a été choisi.

➔ Le dosage semble cohérent et la rupture semble même un peu plus rapide que la fabrication 2.

- Conclusion.

La teneur en eau cible est fixé à 5.5% pour les deux recettes avec et sans RAP.

Concernant les émulsions Ea 3 et Ea 4 (65/15/2 et 65/5/2) : 50% de chaque type est définie. La rupture du mélange doit être aux alentours de 20s.

Effectuer des essais en petites quantités avant de réaliser la fabrication finale est primordiale.

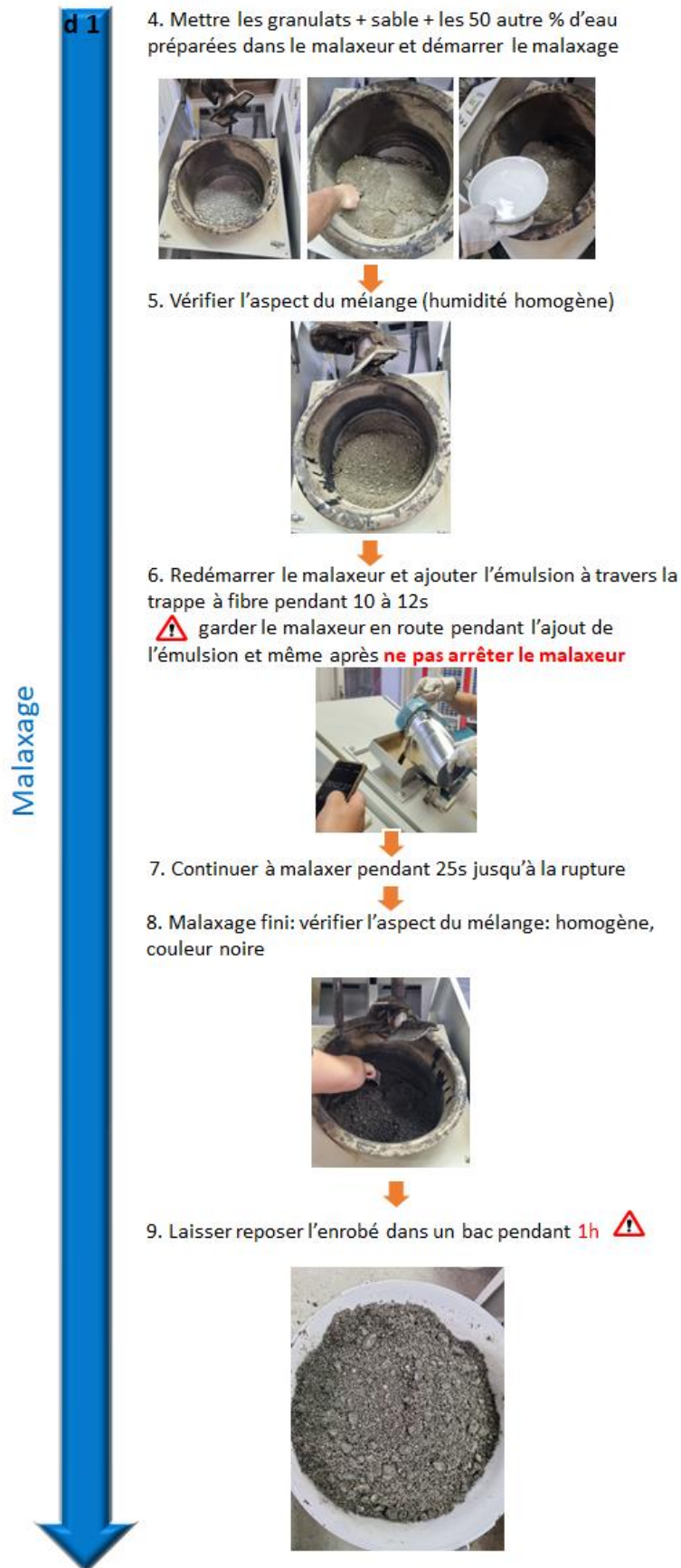
Concernant la fabrication avec 50% de RAP :

- Le même dosage d'eau que celle sans RAP est utilisée.
- 80% de la quantité de l'émulsion du mélange sans RAP est choisie.

## I.4.2 Protocole de fabrication

Un protocole de fabrication en laboratoire de l'enrobé à froid à l'émulsion a été mis en place (voir Fig. 85).





**Fig. 85** Protocole de fabrication de l'enrobé à froid en laboratoire



### I.4.3 Fabrication de la recette sans RAP avec Ea5 et Ec

#### I.4.3.1 Fabrication de la recette sans rap avec Ea5

La recette du Tab. 43 est utilisée pour fabriquer 116238 g de l'enrobé ACB16 0%-Ea5 est avec l'émulsion Ea5. Vu la capacité du malaxeur cette quantité a été divisée en trois gâchées de même quantité.

La fabrication de ces gâchées est effectuée selon le protocole défini dans la Fig. 85. L'aspect visuel de la fabrication est présenté dans la Fig. 86.



**Fig. 86** Aspect visuel du mélange

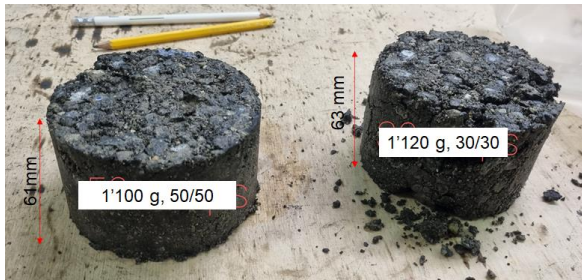
Le Tab. 39 résume les essais effectués pour cette fabrication.

**Tab. 39** Programme expérimental

Essai à effectuer	Nombre échantillon
Compactage Duriez	15
Stabilité Marshall	10
La densité maximale	-
Rigidité	4
ITS sec	3
ITS humide	6
Récupération et Analyse liant Pénétration, point de ramollissement méthode bille-anneau, fraass	-
Fatigue	1
Maniabilité	3

#### a. Production des éprouvettes Marshall

Afin d'obtenir une hauteur d'environ 64 mm pour les éprouvettes Marshall deux tests ont été réalisés. Un premier essai avec 1100g de matériau et 50 coups par face a été effectué. La hauteur obtenue est de 61mm. On a essayé pour un deuxième essai de réduire le nombre des coups à 30 coups par face avec 1120g de matériau et au démoulage l'éprouvette était très fragile (Fig. 87). Finalement il été décidé de garder 50 coups par face et rajouter plus de matériaux. Avec ce dernier une hauteur d'environ 64mm a été obtenue. Les 28 éprouvettes ont été toutes fabriquées avec 50 coups par face et une énergie de compactage de 2.93MJ/m<sup>3</sup>. (Fig. 88).



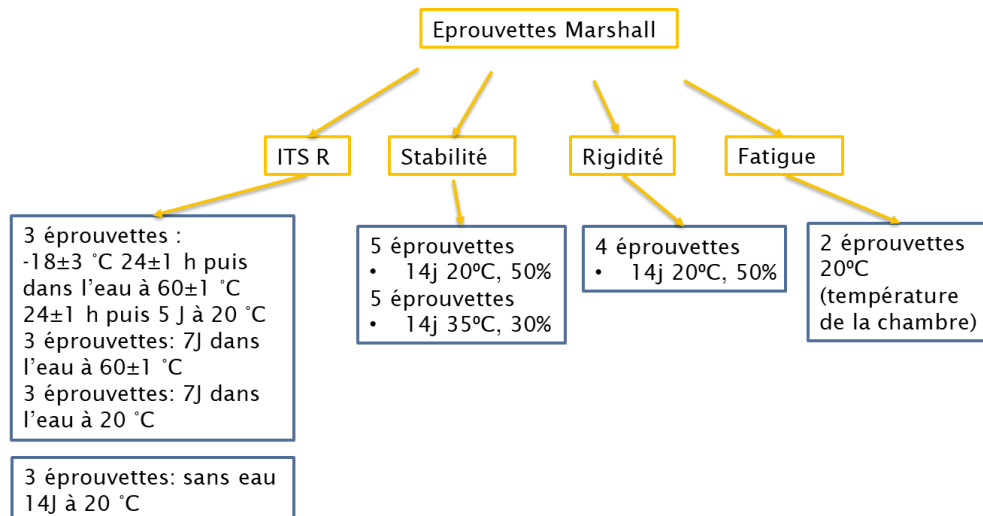
**Fig. 87** Echantillons Marshall : test hauteur

Les échantillons ont été maintenus une journée dans les moules pour éviter les potentiels déformations.



**Fig. 88** Echantillon Marshall

Le programme de stockage des échantillons Marshall est défini dans la Fig. 89. La méthode AASHTO (D4867/D4867M) de stockage des échantillons a été appliquée pour cette fabrication.



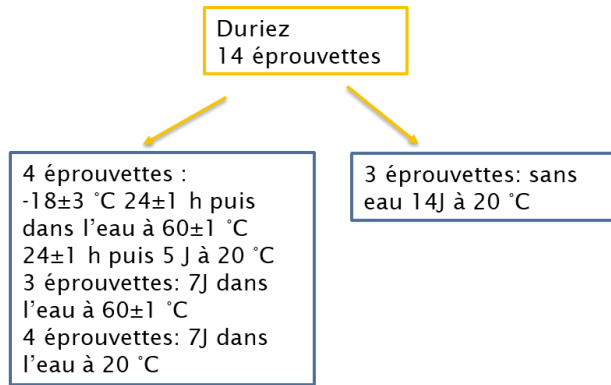
**Fig. 89** Programme de conditionnement pour les différents essais

## b. Production des échantillons Duriez

La méthode française de compactage Duriez est utilisée dans ce projet afin de définir la bonne méthode de compactage pour les enrobés à froid

La préparation des échantillons est effectuée selon la norme EN 12697-12 [25]. Les moules de diamètre 120mm ont été remplis de 3500g d'enrobé. Ils ont été compactés avec une pression de compactage de 120KN. Un total de 14 échantillons Duriez a été fabriqué.

La Fig. 90 montre le programme de conditionnement choisi pour ces échantillons. La méthode AASHTO (D4867/D4867M) de stockage des échantillons a été appliquée pour cette fabrication.



**Fig. 90** Programme de conditionnement des éprouvettes Duriez

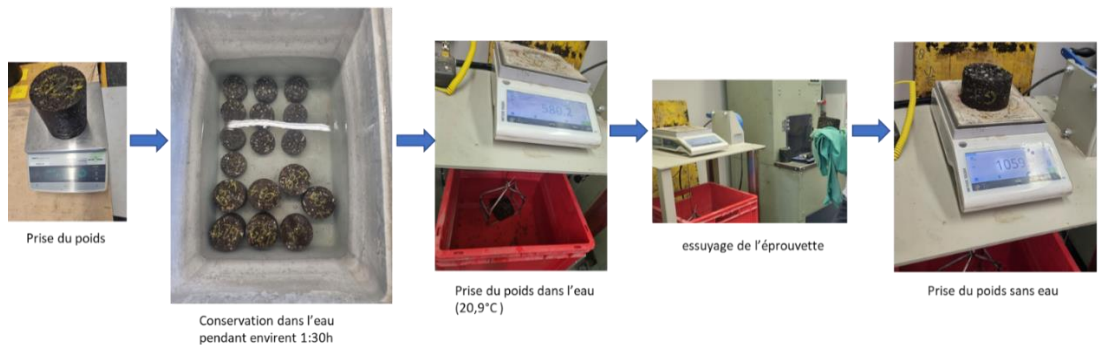
### c. Mesure SSD et conditionnement

Tous les éprouvettes ont été gardées 7 jours à 20°C dans une chambre de stockage. Ils ont été toutes pesées et mesurées par la suite. Puis elles ont été divisées par groupes selon les essais à réaliser.

Pour les essais Duriez et ITSr, les éprouvettes étaient divisées en groupes secs et humides.

Par manque d'un nombre suffisant des éprouvettes duriez seulement 3 à 4 éprouvettes par température ont été préparées.

Toutes les éprouvettes destinées pour une conservation dans l'eau ont passé par l'étape de mesure de la masse Volumique apparente hydrostatique (Fig. 91) et ont été saturées par la suite. Pour les éprouvettes Duriez la pression choisie pour une saturation satisfaisante est de 20KPa pendant environ 5min. Concernant les éprouvettes Marshall une pression de 67KPa pendant 3min est suffisante pour avoir une saturation de plus de 60% (Fig. 92).



**Fig. 91** Mesure de la masse volumique apparente hydrostatique



**Fig. 92** Saturation des éprouvettes Duriez et Marshall

Après les avoir saturés, les éprouvettes ont été conservées par groupe selon la température sélectionnée :

- Un premier groupe de 6 éprouvettes Duriez et 6 Marshall à conserver à 20°C. Trois éprouvettes Duriez et trois Marshall secs ont été conservées dans des sacs plastiques étanches et placées dans l'eau à 22°C avec les éprouvettes humides afin d'avoir la même température de conditionnement (Fig. 93).



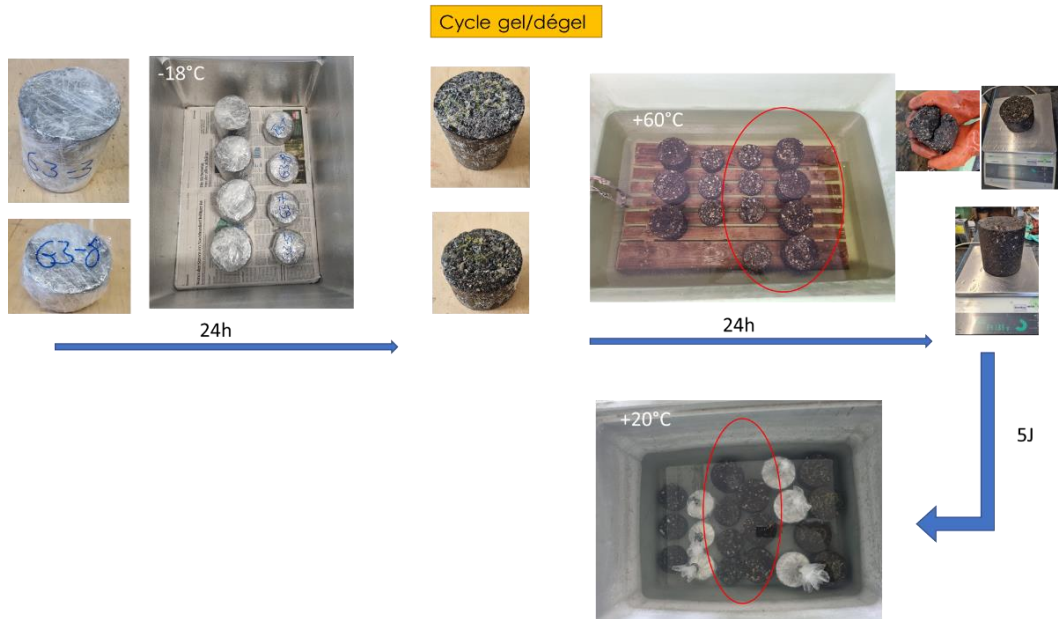
**Fig. 93** Groupe 1: stockées dans l'eau à 20°C

- Un deuxième groupe des éprouvettes Duriez et Marshall conservé dans l'eau à 60°C (Fig. 94).



**Fig. 94** Eprouvette humides stockées à 60°C

- Un troisième groupe des éprouvettes Duriez et Marshall a passé par une méthode agressive de stockage. La résistance au gel-dégel est évaluée en utilisant l'essai répété de Lottman (AASHTO T283) qui mesure l'effet de l'humidité et du gel sur le ITS du mélange bitumineux et a un impact plus agressif sur les spécimens d'asphalte par rapport à la norme européenne de sensibilité à l'eau (EN 12697-12). L'enrobé est soumis à des cycles de gel/dégel successifs (passage de +60°C à -18°C). Un premier cycle gel-dégel a été effectué pour des éprouvettes Marshall et Duriez (Fig. 95). Après un cycle il été constaté que les éprouvettes Marshall ne supportent plus un autre cycle et sont devenue trop fragiles. Les éprouvettes Duriez sont en bon état.



**Fig. 95** Groupe 3 : un cycle gel/dégel

- Le reste des éprouvettes Marshall dédié pour l'essai de fatigue et rigidité ont été conservées dans la chambre de stockage à température ambiante pendant 14jours.

#### I.4.3.2 Fabrication de la recette sans RAP avec Ec

La recette du Tab. 40 a été utilisée pour fabriquer une quantité totale de 85241 g de ACB16 0% avec l'émulsion Ec. Vu la capacité du malaxeur cette quantité a été divisée en deux gâchées. La fabrication de ces gâchées a été effectuée selon le protocole Fig. 85. Pour cette fabrication seulement la méthode Duriez de compactage a été appliquée.

**Tab. 40** Liste des essais effectués

Essai à effectuer	Nombre échantillons
Compactage Duriez	15
Masse volumique apparente	-
Récupération et Analyse liant Pénétration, point de ramollissement méthode bille-anneau, fraass	-
Maniabilité	3

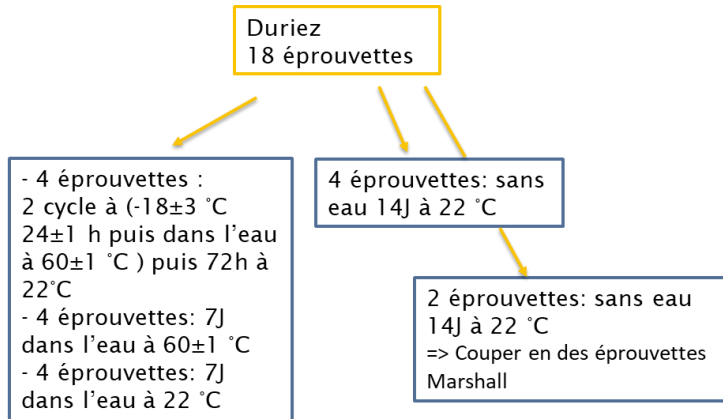
##### a. Compactage Duriez

Les moules de diamètre 120mm ont été remplis chacune de 3500g d'enrobé. Ils ont été après compactés avec une pression compactage de 120KN. Un total de 18 éprouvettes Duriez a été fabriqué. La Fig. 96 présente les différentes étapes de fabrications des éprouvettes Duriez. La taille moyenne des éprouvettes Duriez est de  $D=120\text{mm}$ ,  $h=128\text{mm}$ .



**Fig. 96** Etapes de fabrication des éprouvettes Duriez

La Fig. 97 montre le programme de conditionnement choisi pour ces éprouvettes.



**Fig. 97** Programme de conditionnement des éprouvettes Duriez

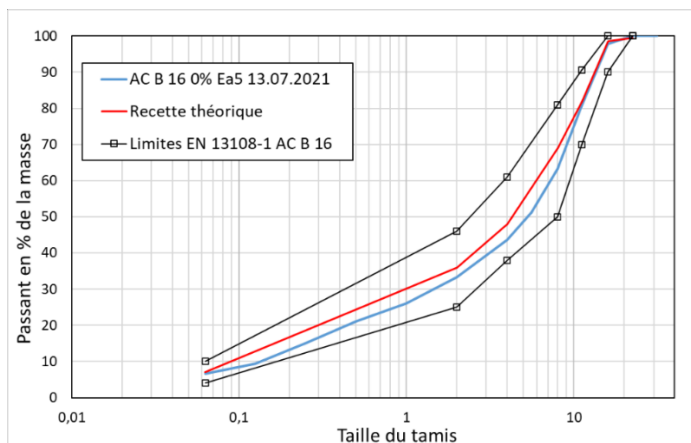
## I.4.4 Résultats des essais pour la fabrication sans RAP avec Ea5 et Ec

### I.4.4.1 Résultats des essais pour l'enrobé ACB16 0%-Ea5

#### a. Courbe granulométrique de l'enrobé

Une quantité de matériaux de l'enrobé ACB16 0%-Ea5 a été dédiée pour effectuer une analyse granulométrique selon la norme SN 670 902-1\_EN-933-1 [59]. La Fig. 98 présente une comparaison des deux courbes granulométriques théorique et celle de la production.

Nous pouvons noter une légère différence entre les deux courbes. En revanche les deux courbes restent acceptables par rapport aux limites décrites par la norme EN 13108-1.



**Fig. 98** Courbe granulométrique ACB16 0%-Ea5

## b. Caractérisation du liant récupérée

L'émulsion récupérée de la fabrication ACB16 0% avec émulsion Ea5 est passée par des essais de caractérisation, tel que : la teneur en liant, la pénétrabilité à l'aiguille (EN 1426), le point de fragilité Fraass (EN 12593) et le point de ramollissement bille-anneau (EN 1427). Le Tab. 41 présente les caractéristiques de ces derniers.

**Tab. 41** Caractéristiques du liant récupéré

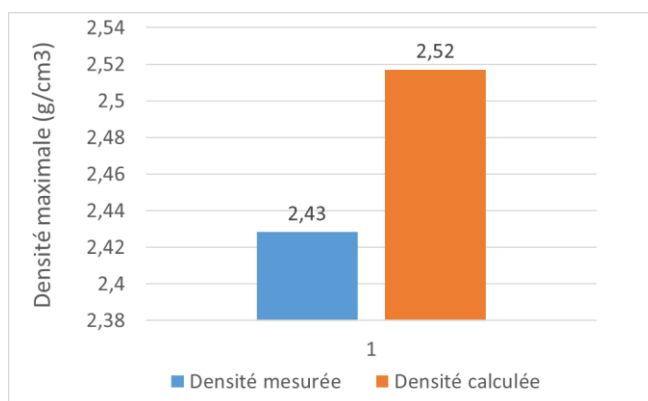
Éligibilité	Norme	Liant
Point de ramollissement bille-anneau (°C)	SN70512	45,2
Pénétrabilité à l'aiguille (1/10mm)	SN70511 A	145
Point de fragilité Fraass (°C)	SN70507	-16

## c. Teneur en liant

La teneur en liant théorique imposée est de 4.7% est plus élevée de 4.68% que celle mesurée après la fabrication (4.48%).

## d. Densité maximale/ masse volumique apparente

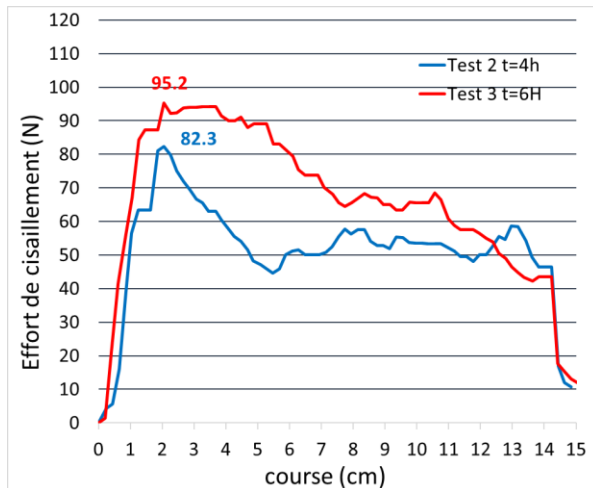
La densité maximale est déterminée par deux méthodes : le calcul théorique en prenant en compte de la teneur en liant mesurée après récupération et en utilisant l'essai en laboratoire selon la norme SN 670 405. La Fig. 99 présente les deux valeurs de la densité maximale de la fabrication sans RAP avec émulsion Ea5 et montre une différence de 4% entre la valeur calculée et celle mesurée. Pour ce projet et pour le reste des fabrications, la valeur calculée avec la bonne teneur en liant est la valeur utilisée pour tous les calculs.



**Fig. 99** Densité maximale mesurée et calculée

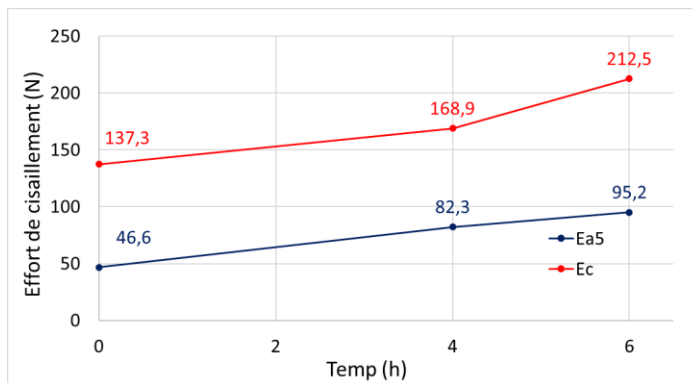
## e. Maniabilité (EN 12697-53) [23]

Les résultats des essais à 0 h sont perdus seulement la valeur maximale de l'effort de cisaillement a été noté. La Fig. 100 présente les courbes de l'effort de cisaillement en fonction de la course du vérin à 4h et 6h de conditionnement.



**Fig. 100** Résultats de l'essai maniabilité à 4h et 6h.

Comme précisé, l'indicateur choisi est l'effort maximal de cisaillement. Fig. 101 résume les valeurs maximales des efforts pour 0, 4 et 6h de conditionnement.



**Fig. 101** Effort de cisaillement maximal en fonction du temps de conditionnement

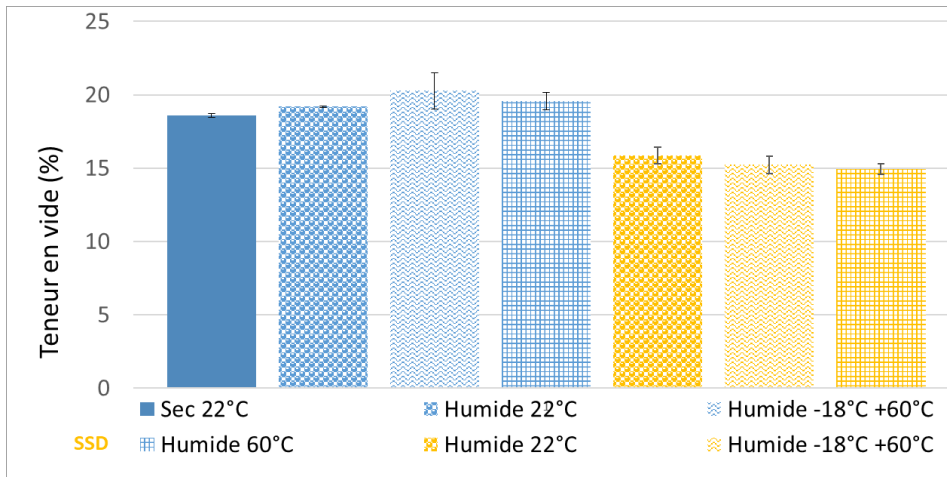
La valeur de l'effort maximale augmente avec l'augmentation du temps de conditionnement. Ce qui veut dire une diminution de la maniabilité après 4 et 6h de conditionnement.

## f. Teneur en vide

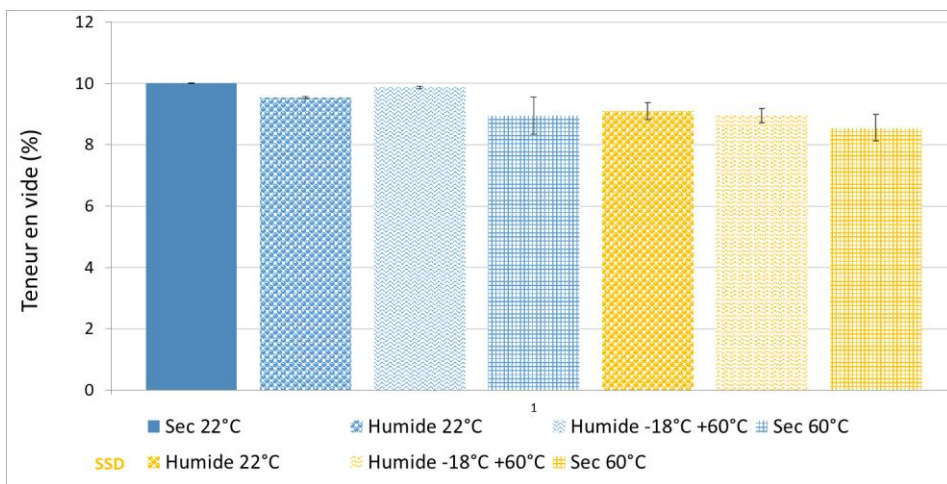
La teneur en vide est déterminée avec les deux méthodes, la méthode géométrique et selon les mesures SSD effectuées pour les éprouvettes Marshall et Duriez.

Les Fig. 102 et Fig. 103 présentent respectivement les valeurs de la teneur en vide pour les éprouvettes Marshall et Duriez des différents groupes. On note des deux figures une différence entre les valeurs calculées selon la méthode géométrique et celles déterminées selon les mesures SSD. Ces résultats confirment notre choix de la méthode à utiliser pour la détermination de la teneur en vide.



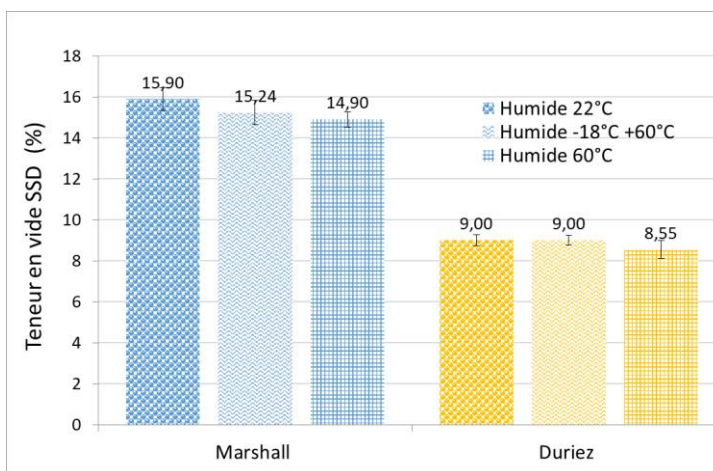


**Fig. 102** Teneur en vide % pour les éprouvettes Marshall



**Fig. 103** Teneur en vide % pour les éprouvettes Duriez

La Fig. 104 présente une comparaison des deux méthodes de compactage au niveau de la valeur de teneur en vide pour chaque groupe d'éprouvettes. Les graphes de cette figure montrent une différence d'environ 6.9% de teneur en vide entre les deux méthodes de compactage. Ceci montre encore une fois que la méthode Marshall de compactage n'est pas adaptée aux enrobés à froid.

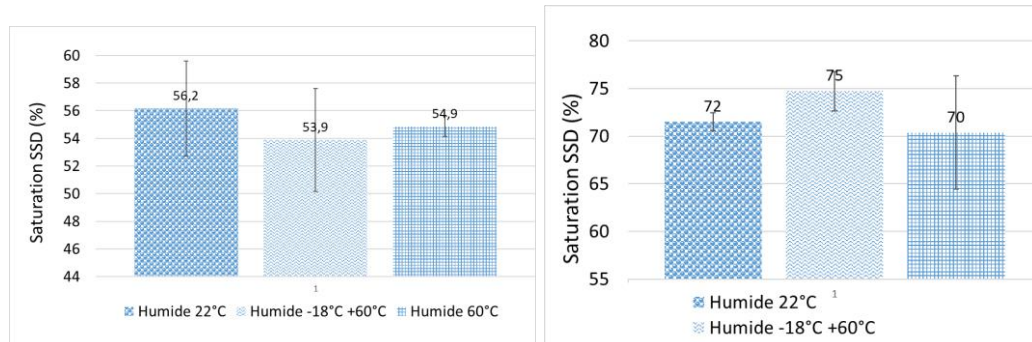


**Fig. 104** Teneur en vide pour les éprouvettes Marshall et Duriez

## g. Saturation

La saturation des éprouvettes Duriez et Marshall a été effectuée selon la norme SN EN 13697-12 [25] et décrite dans la section Mesure SSD et conditionnement.

La Fig. 105 présente les valeurs de saturations pour chaque groupe.

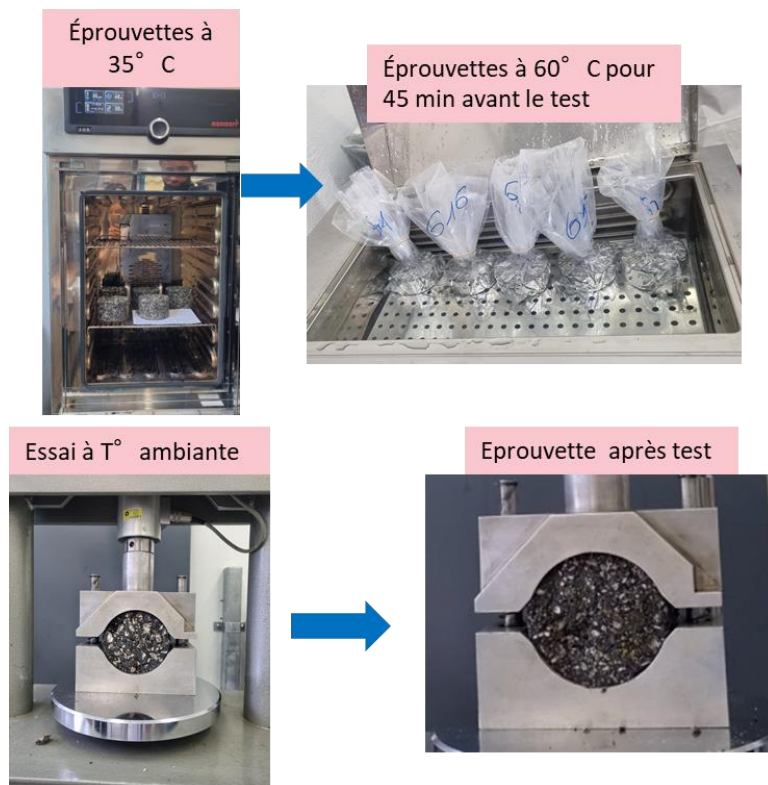


**Fig. 105 Saturation :** a) éprouvettes Marshall b) éprouvettes Duriez

## h. Stabilité Marshall SN 640 431

La stabilité Marshall est mesurée pour deux groupes d'éprouvettes Marshall : un premier groupe de 5 éprouvettes conservé 14j à 35°C et 30% d'humidité et un groupe de 5 éprouvettes conservé 14 j à 20°C et 50%.

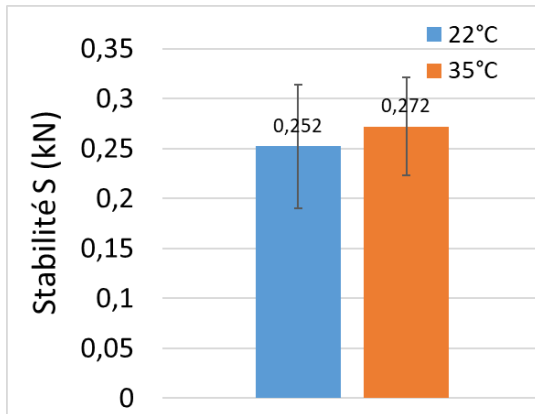
Les éprouvettes sont placées dans l'eau à 60°C pendant 45min avant l'essai (Fig. 106).



**Fig. 106 Etapes de l'essai stabilité Marshall**

La Fig. 107 présente les valeurs de la stabilité Marshall mesurées à 22 et 35°C. Les valeurs pour les deux températures sont très faibles. En revanche, les résultats montrent que la

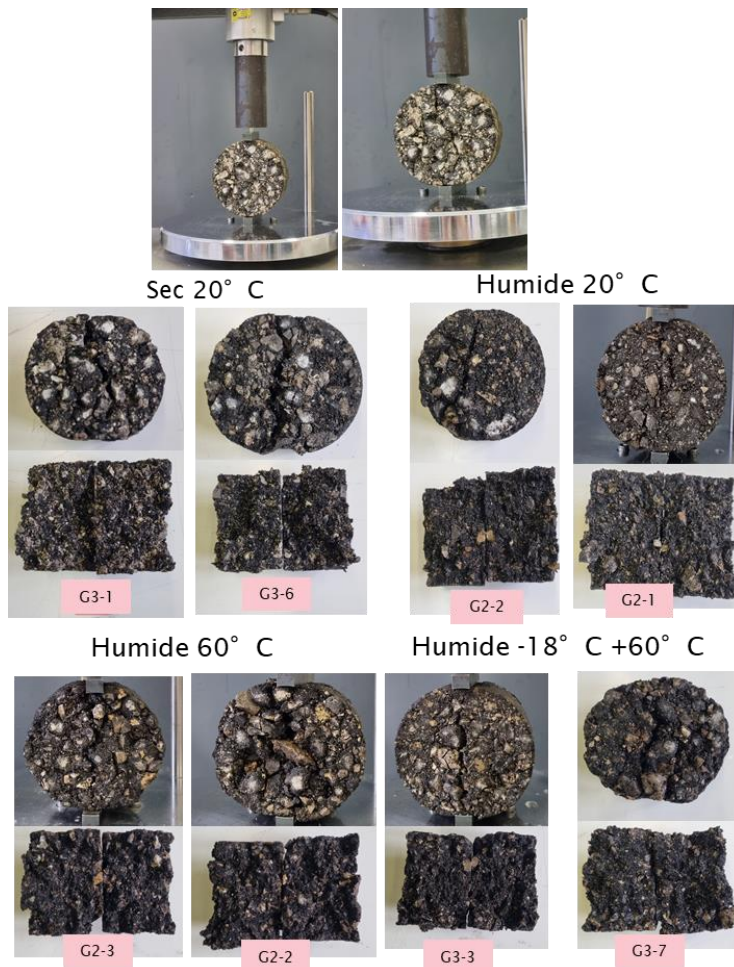
valeur de stabilité déterminée pour les éprouvettes mûries pendant 14j à 35°C est plus importante que celle à 22°C.



**Fig. 107** Stabilité Marshall

### i. Essai ITS EN 12697-23 [24]

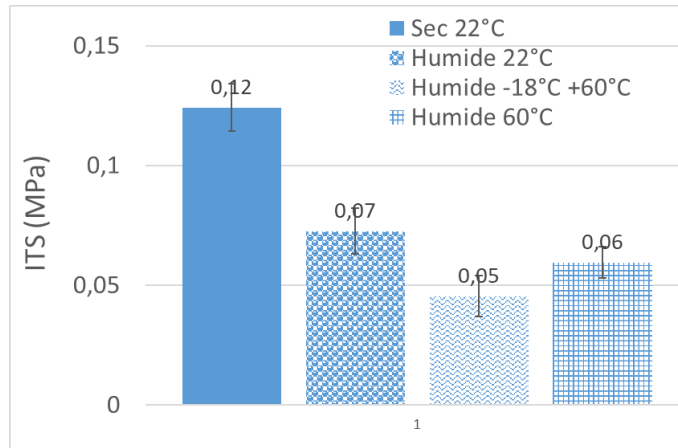
L'essai ITS est effectué selon la norme EN 12697-23 décrit précédemment dans la section (Essai de résistance à la traction indirecte ITS (EN 12697-23)). La vitesse pour cette partie est choisie égal à 50mm/min et la température d'essai est de 22 °C. L'état des éprouvettes et de leurs surfaces de ruptures est présenté dans la Fig. 108.



**Fig. 108** Essai IST et les éprouvettes après essai

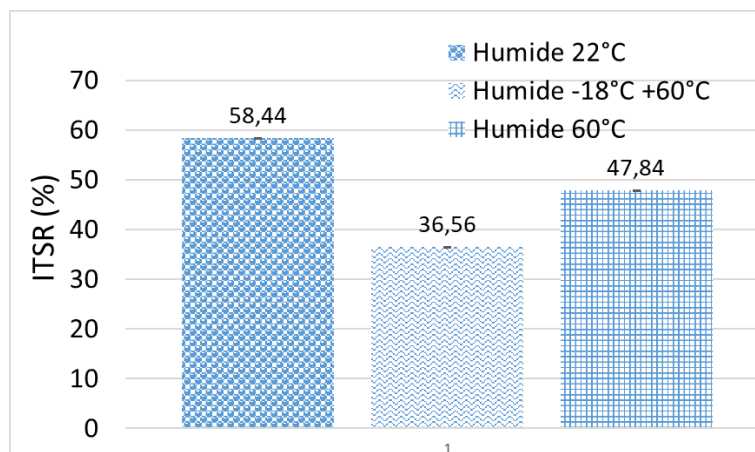
Les résultats de la Fig. 109 montre d'une part l'effet de chaque méthode de conditionnement et d'autre part des valeurs faibles de la résistance à la traction ITS.

La méthode de stockage de gel/ dégel présente la valeur la plus faible par rapport aux autres groupes d'éprouvettes. Cette méthode de conditionnement permet de mieux comparer les différentes fabrications.



**Fig. 109** Les valeurs moyennes de la résistance à la traction indirecte ITS

On remarque que la sensibilité à l'eau pour les différents groupes est plus faible que les recommandations de la norme suisse SN 640 431-1-NA (valeur > 70%) (voir Fig. 110).

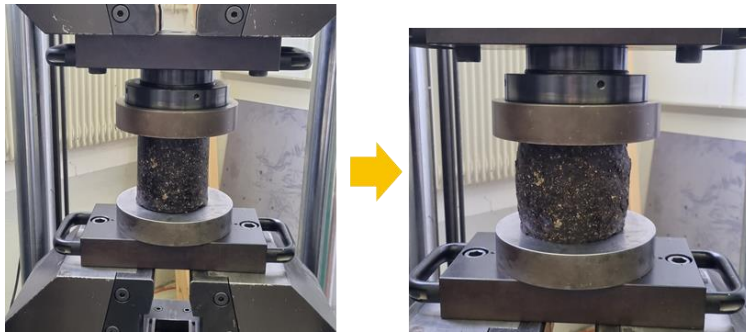


**Fig. 110** Sensibilité à l'eau ITSR

Ces résultats montrent un réel problème lié probablement à la méthode de compactage vue les teneurs en vides élevées des éprouvettes Marshall.

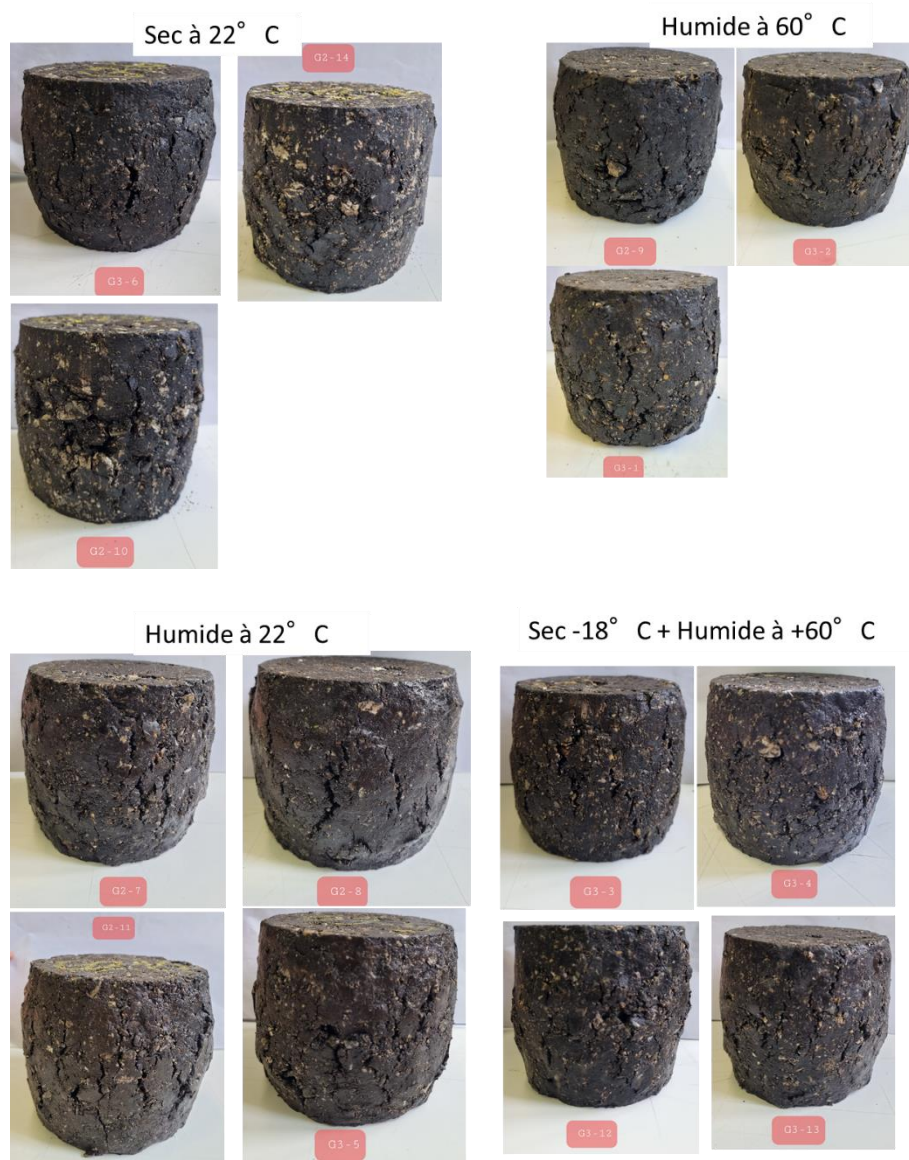
## j. Essai de compression Duriez

Cet essai est un essai de compression simple sur les éprouvettes Duriez (Fig. 111). Il permet d'évaluer la tenue à l'eau d'un enrobé à travers de la mesure de la chute de sa résistance en compression après une période d'immersion de 7 jours. La vitesse pour cet essai est choisie égale à 50mm/min idem que la vitesse de l'essai ITS et la température d'essai est de 20°C.



**Fig. 111** Essai de compression simple sur éprouvette Duriez

L'aspect des éprouvettes après l'essai de compression simple est présenté dans la Fig. 112.

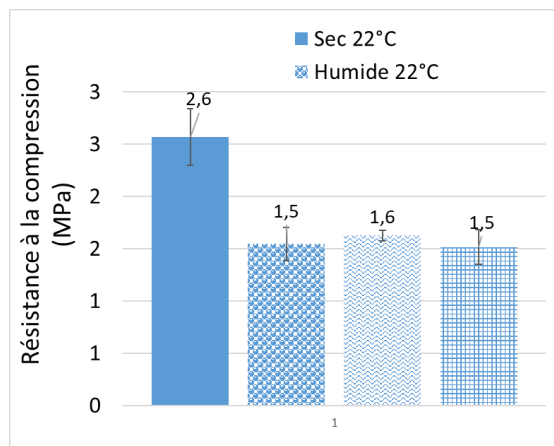


**Fig. 112** Aspect des éprouvettes Duriez après test

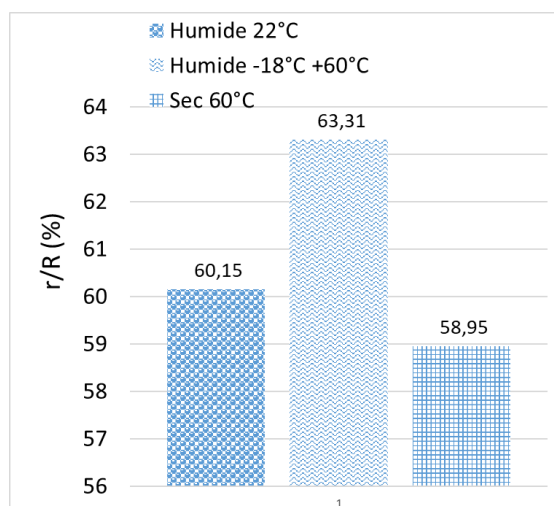
Les résistances à la compression des différents éprouvettes sont résumées dans la Fig. 113. Les résultats montrent l'effet de l'eau sur la résistance quel que soit la méthode de

conditionnement. En plus la valeur moyenne de la résistance à la compression pour les éprouvettes du groupe gel /dégel est légèrement plus élevée que les deux autres groupes.

La sensibilité à l'eau pour les différents groupes est plus faible que les recommandations de la norme suisse SN 640 431-1-NA (valeur > 70%) en revanche les valeurs sont meilleures que celle de l'essai ITSR (Fig. 114).



**Fig. 113** Résistance à la compression (MPa)



**Fig. 114** Rapport des résistances à la compression r/R

## k. Bilan

Les éprouvettes Marshall présentent des valeurs élevées pour la teneur en vide, des valeurs ITS très faibles et des valeurs ITSR au-dessous des exigences de la normalisation suisse. En revanche les éprouvettes Duriez ont montré des valeurs de teneur en vide 43% plus faible que celles des éprouvettes Marshall. Les valeurs de la résistance à la compression sont 20 fois plus grande que les valeurs ITS. Le rapport des résistances en compression à l'eau r et à l'air R est aussi plus élevée que les ITSR cependant les valeurs restent plus faibles que les recommandations de la norme NF P 98-139.

Pour conclure de cette étude préliminaire, la méthode Duriez de compactage semble être plus adapté aux enrobés à froid.

Pour la suite du projet la méthode choisie de compactage et fabrication des éprouvettes en laboratoire est la méthode Duriez.

### I.4.4.2 Résultats des essais pour la fabrication sans RAP avec Ec

#### a. Courbe granulométrique

La Fig. 115 présente une comparaison des deux courbes granulométriques théorique et celle de la production de la recette ACB 16 0%- Ec. Une légère différence est notée entre les deux courbes. En revanche les deux courbes restent acceptables par rapport aux limites décrites par la norme EN 13108-1.

Cette figure montre aussi la différence entre les courbes granulométriques deux fabrications effectuées avec Ea5 et Ec respectivement et leurs positions par rapport à la courbe cible.

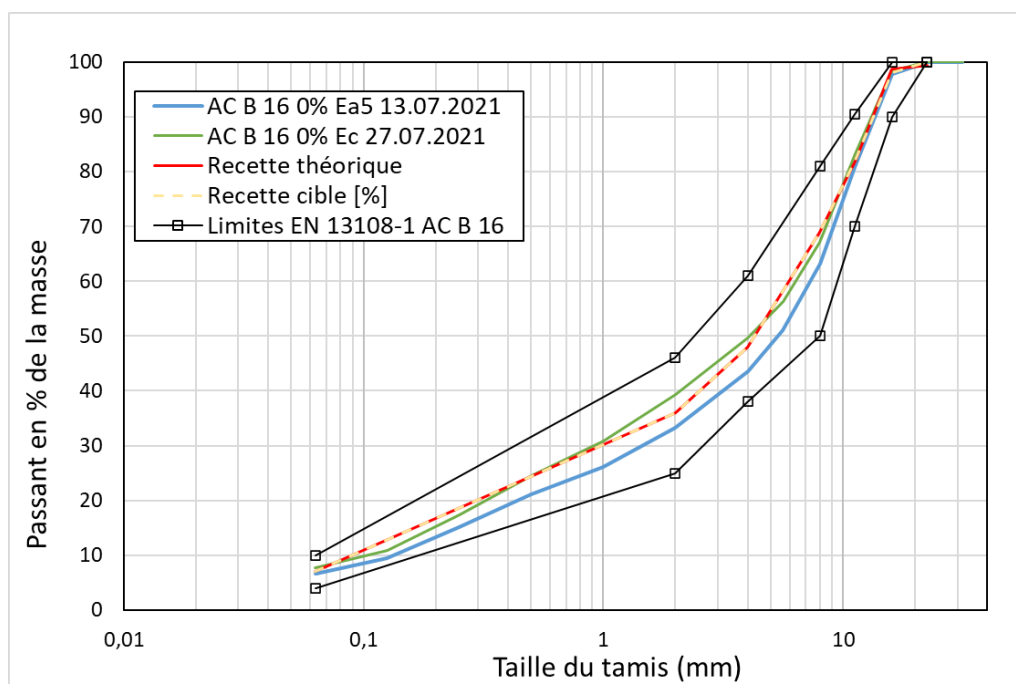


Fig. 115 Courbes granulométriques

#### b. Caractérisation du liant récupéré

Le liant récupéré de la présente fabrication avec émulsion Ec est passée par des essais de caractérisation, tel que : la teneur en liant, la pénétrabilité à l'aiguille [8], le point de fragilité Fraass [16] et le point de ramollissement bille-anneau [7]. Le Tab. 42 présente les caractéristiques de ces derniers.

Tab. 42 Caractéristiques des liants

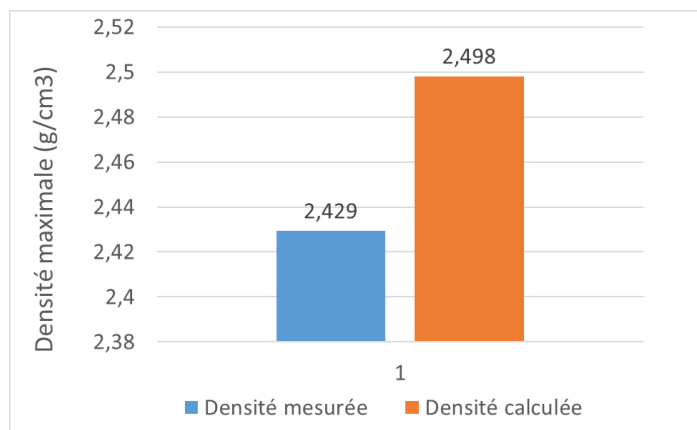
Éligibilité	Norme	Liant ACB 16 0%- Ea5	Liant ACB 16 0%- Ec
Point de ramollissement bille-anneau (°C)	[8]	45,2	52,9
Pénétrabilité à l'aiguille (1/10mm)	[7]	145	64
Point de fragilité Fraass (°C)	[16]	-16	-14

### c. Teneur en liant

La teneur en liant mesurée de la fabrication de 4.98% est plus élevée de 5.6% par rapport à la teneur théorique de 4.7%.

### d. Masse volumique apparente

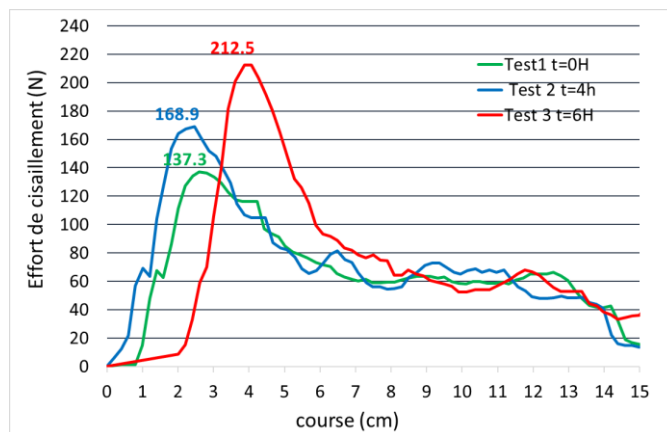
La Fig. 116 présente les deux valeurs de la densité maximale de la fabrication sans RAP avec émulsion Ec et montre une différence de 2.8% entre la valeur calculée et celle mesurée.



**Fig. 116** Densité maximale mesurée et calculée

### e. Maniabilité (EN 12697-53)

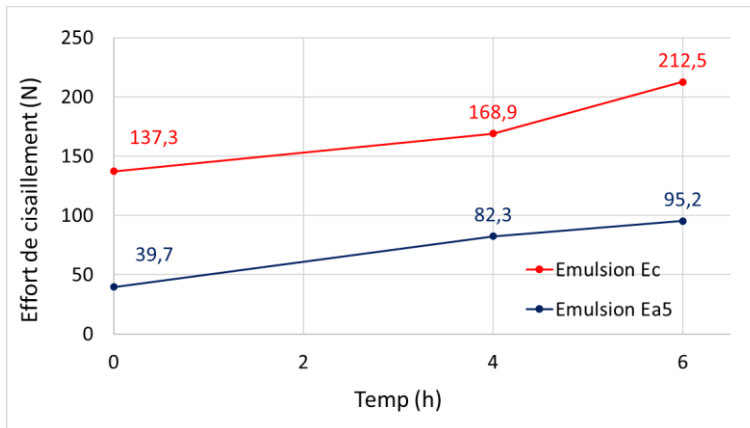
L'essai de maniabilité a été effectué sur trois éprouvettes : 0h, 4h et 6h. La Fig. 117 présente les courbes de l'effort de cisaillement en fonction de la course du vérin à 0h, 4h et 6h de conditionnement.



**Fig. 117** Résultats de l'essai maniabilité à 0h, 4h et 6h.

La Fig. 118 résume les valeurs maximales des efforts pour 0, 4 et 6h de conditionnement.



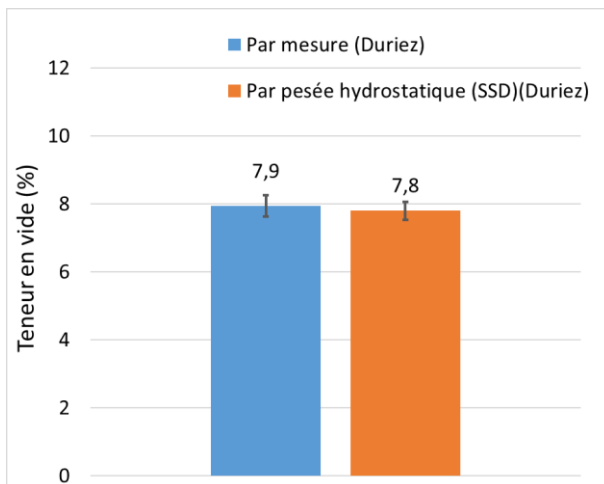


**Fig. 118** Effort de cisaillement maximal en fonction du temps de conditionnement

Il est aussi noté que la maniabilité de l'enrobé fabriquée avec l'émulsion Ec est plus faible que celle de l'enrobé fabriqué avec émulsion Ea5.

#### f. Teneur en vide %

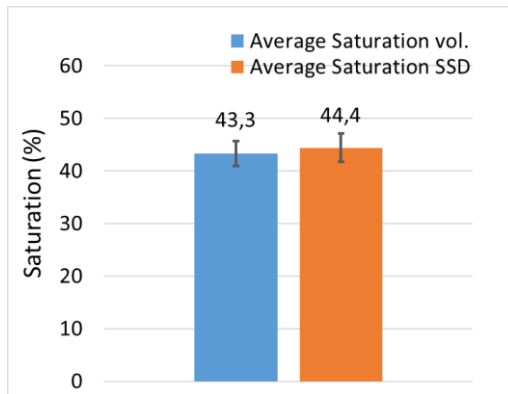
La teneur en vide est déterminée avec les deux méthodes, la méthode géométrique et selon les mesures SSD. La Fig. 119 présente les valeurs de la teneur en vide pour les éprouvettes Duriez. On note que la valeur calculée selon la méthode géométrique et celle déterminée selon les mesures SSD sont très proches.



**Fig. 119** La teneur en vide (%)

#### g. Saturation

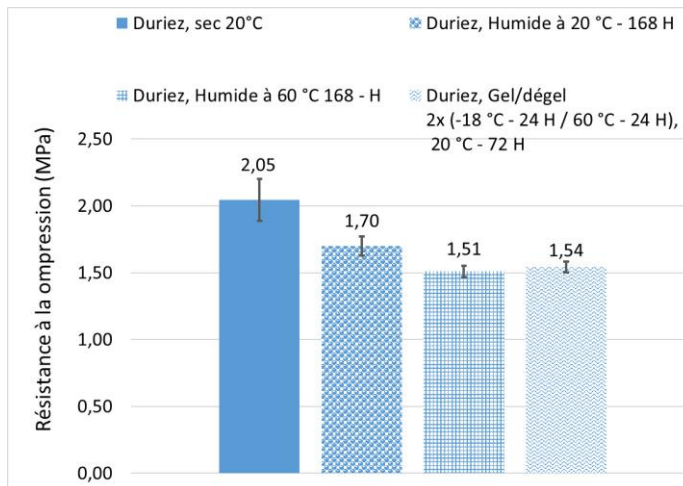
La Fig. 120 présente la valeur moyenne de saturation déterminé avec les deux méthodes volumiques et SSD.



**Fig. 120** Saturation %

## h. Essai de compression Duriez

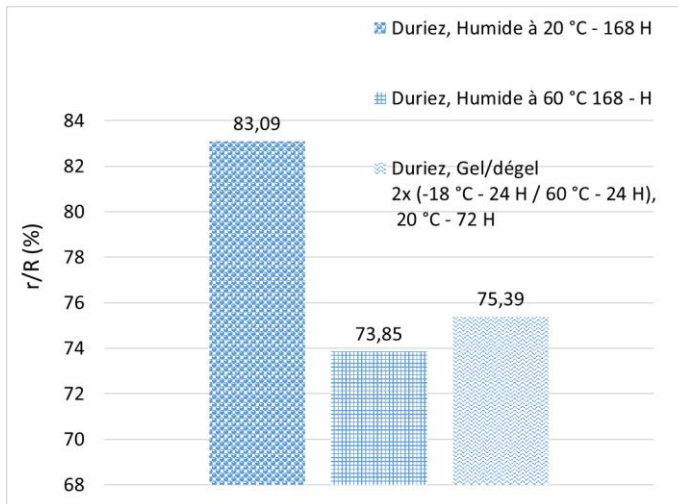
Les valeurs de la résistance à la compression pour les différents groupes montrent l'effet de conditionnement dans l'eau sous différentes températures (Fig. 121). Les éprouvettes Duriez conditionnées à 60°C sont plus fragiles que les autres.



**Fig. 121** Résistance à la compression MPa

La comparaison de ces valeurs avec celles de la Fig. 122 montre que les éprouvettes sèches contenant l'émulsion Ea5 ont une résistance à la compression plus élevée de 21% par rapport aux éprouvettes fabriquées avec Ec.

Contrairement à la fabrication effectuée avec émulsion Ea5, cette fabrication présente un rapport r/R plus élevée que la limite fixée par la normalisation pour tous les groupes et aussi plus élevée que le rapport calculé pour la fabrication avec Ea5.



**Fig. 122** Rapport des résistances à la compression  $r/R$

### i. Essai ITS

Une éprouvette duriez a été coupée en trois parties afin d'effectuer un essai ITS (Fig. 123).

Les trois éprouvettes de taille moyenne (120mm\*74mm) ont été testées comme indiqué dans la section Essai ITS EN 12697-23. Une valeur moyenne ITS de 0.46MPa a été obtenue. Cette valeur est 73% plus élevée que celle des éprouvettes Marshall de la fabrication avec Ea5.

Le résultat de cet essai de faisabilité est intéressant et l'usage des éprouvettes Duriez pour l'essai ITS peut être envisageable.



**Fig. 123** Préparation de l'éprouvette Duriez pour l'essai ITS

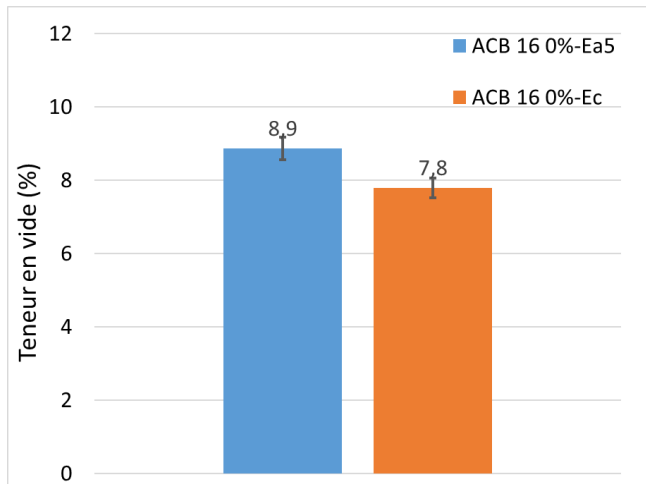
### j. Bilan

Pour cette fabrication seulement la méthode de compactage Duriez a été effectuée. Cette méthode semble être adaptée aux enrobés à froid.

Remarque : L'émulsion Ea5 contient 5% de bitume en plus que l'émulsion Ec

Les premiers résultats de cette étude montrent que :

- La fabrication effectuée avec Ec présente des teneurs en vides moins élevées que celle de la fabrication avec Ea5 (Fig. 124).
- Pour les éprouvettes sèches : La valeur de la résistance à la compression pour ACB 16 0%-Ec est plus faible que celle de la fabrication ACB 16 0%-Ea5
- Le rapport  $r/R$  est plus élevé pour les éprouvettes ACB160-Ec.



**Fig. 124** La valeur moyenne de la teneur en vide pour les deux fabrications

La fabrication ACB 160-Ea5 présente un problème au niveau de compactage, qui pourra être lié à la manière dont laquelle était effectuée. Logiquement si on a plus de bitume on a moins de vide pour une même recette ce qui n'est pas le cas ici.

Pour la suite du projet la méthode Duriez va être utilisée pour la fabrication des éprouvettes en laboratoire. Les deux émulsions sont intéressantes et d'autres essais étendus devra être effectuer.

## II Annexe B

### II.1 Essais étendus

#### II.1.1 Recettes

Une bonne formulation permet de donner au mélange une bonne résistance aux charges de compression, de flexion répétée, à la fatigue et une bonne tenue à l'eau.

À partir des essais d'affinité il est noté que la teneur en liant de 4,7 % est assez satisfaisante pour assurer un bon enrobage des granulats avec l'émulsion. En revanche pour pouvoir confirmer le choix de cette teneur en liant, des fabrications manuelles de l'enrobé ont été effectuées en variant ce dernier. Cette étude est effectuée sur l'émulsion Ea qui semble le plus adapté

Afin de pouvoir comparer les deux émulsions, il a été décidé de fixer une même teneur en liant malgré les résultats insatisfaisants d'affinité sur l'émulsion Ec.

Une teneur d'eau de 5.5% a été définie pour l'ensemble de ce projet. La quantité d'eau choisie est essentielle. En effet une faible quantité engendre un mauvais enveloppement des agrégats et une grande quantité d'eau pourra provoquer une mauvaise interaction entre le bitume de l'émulsion et les agrégats. Il était décidé de fixer la teneur en liant d'eau à 5,5% et d'étudier seulement la variation de la teneur en émulsion.

La recette est la même pour les deux émulsions Ea et Ec utilisées dans le cadre de ce projet.

Les Tab. 43, Tab. 44 et Tab. 45 présentent respectivement les recettes des enrobés à froid avec 0% RAP, avec 50% RAP et avec 2% ciment.

<b>Tab. 43 Recette AC B 16 0% RAP</b>			
<b>Composants</b>	Filler	5.81%	5.81g
	Sable concassé 0/4	39.57%	39.57g
	Sable rond lavé 0/4	0%	0g
	Gravillons concassés :		
	4/8	24.65%	24.65g
8/11	9.25 %	9.25g	
11/16	20.73%	20.73g	
<b>Somme de granulats</b>		100.01%	100g*
<b>Agrégats d'enrobés</b>	RAP 16RA 0/11	0 %	
<b>Liant/Emulsion</b>	Teneur en liant/enrobé (cible)	4.70%*	
	Teneur en liant/granulats (cible)	4.93%	
	Masse totale sans eau (liant +granulat)		104.93g
	Teneur en liant émulsion	60%*	
	Dosage Emulsion (60% liant 70/100)	8.22% (= 4.93%/60%)	
	Masse d'émulsion		8.22g
<b>Eau</b>	Teneur en eau (cible)	5.5% *de la masse totale (granulats + liant)	
	Masse d'eau totale (pour 100g de granulats secs)		5.5% × 104.93 = 5.77 g

	Teneur en eau émulsion Masse d'eau émulsion Masse d'eau apport	40%*	$0.4 \times 8.22 = 3.29g$ $5.77 - 3.29 = 2.48g$
<b>Masse volumique [g/cm<sup>3</sup>]</b>	Granulats Liant Enrobé (calculé)	2.7 1.03 2.509	

\* valeurs imposées

<b>Tab. 44 Recette de l'enrobé AC B 16 50%RAP</b>			
<b>Composants</b>	Filler Sable concassé 0/4 Sable rond lavé 0/4 Gravillons concassés : 4/8 8/11 11/16	0% 42.41% 11.49% 19.22% 0.24 % 26.62%	0g 21.2g 5.74g 9.61g 0.14g 13.31g
<b>Somme de granulats</b>		100.01%	50g*
<b>Agrégats d'enrobés</b>	RAP 16RA 0/11	50 %*	50g
<b>Liant/ Emulsion</b>	Teneur en liant/enrobé (cible) Teneur en liant/enrobé RAP (mesure) Teneur en liant/granulats (cible)* Masse totale sans eau (liant +granulat) Teneur en liant émulsion Dosage Emulsion (60% liant 70/100) Masse d'émulsion	4.70%* 4.37%* $80\% \times 4.93 = 3.94\%$ 60%* $3.94/0.6 = 6.57\%$	103.94g 6.57g
<b>Eau</b>	Teneur en eau (cible)  Masse d'eau totale (pour 100g de granulats secs)  Teneur en eau émulsion Masse d'eau émulsion ** Masse d'eau apport**	5.5% **de la masse totale (granulats + liant)   40%*	  $5.5\% \times 103.94 = 5.72g$  $0.4 \times 6.57 = 2.63g$ $5.72 - 2.63 = 3.09g$
<b>Masse volumique [g/cm<sup>3</sup>]</b>	Granulats [g/cm <sup>3</sup> ] Liant [g/cm <sup>3</sup> ] Enrobé (calculé) [g/cm <sup>3</sup> ]	2.7 1.03 2.522	

\* Valeurs imposées

\*\*hypothèse : même dosage que celle de la recette de référence avec 0%RAP

<b>Tab. 45</b> <i>Recette de l'enrobé AC B 16 50%RAP avec 2% ciment</i>			
<b>Composants</b>	Filler	0%	0g
	Sable concassé 0/4	42.41%	21.2g
	Sable rond lavé 0/4	11.49%	5.74g
	Gravillons concassés :		
	4/8	19.22%	9.61g
8/11	0.24 %	0.14g	
11/16	26.62%	13.31g	
<b>Somme de granulats</b>		100.01%	50g*
<b>Agrégats d'enrobés</b>	RAP 16RA 0/11	50 %*	50g
<b>Liant/Emulsion</b>	Teneur en liant/enrobé (cible)	4.70%*	
	Teneur en liant/enrobé RAP (mesure)	4.37%*	
	Teneur en liant/granulats (cible)*	$80\% \times 4.93 = 3.94\%$	
	Masse totale sans eau (liant +granulat)	60%*	103.94g
	Teneur en liant émulsion	$3.94/0.6 = 6.57\%$	
Dosage Emulsion (60% liant 70/100)		6.57g	
<b>Eau</b>	Teneur en eau (cible)	5.5% **de la masse totale (granulats + liant)	
	Masse d'eau totale (pour 100g de granulats secs)		$5.5\% \times 103.94 = 5.72g$
	Teneur en eau émulsion	40%*	
	Masse d'eau émulsion **		$0.4 \times 6.57 = 2.63g$
	Masse d'eau apport**		$5.72 - 2.63 = 3.09g$
Teneur en ciment	2%		$0.02 \times 103.94 = 2.08g$
<b>Masse volumique [g/cm3]</b>	Granulats [g/cm3]	2.7	
	Liant [g/cm3]	1.03	
	Enrobé (calculée) [g/cm3]	2.522	

Avant de commencer la phase de fabrication de l'ensemble des enrobés décrits ci-dessus, il est nécessaire de vérifier l'efficacité de chaque paramètre : l'homogénéité du mélange ainsi que la teneur optimale de liant.

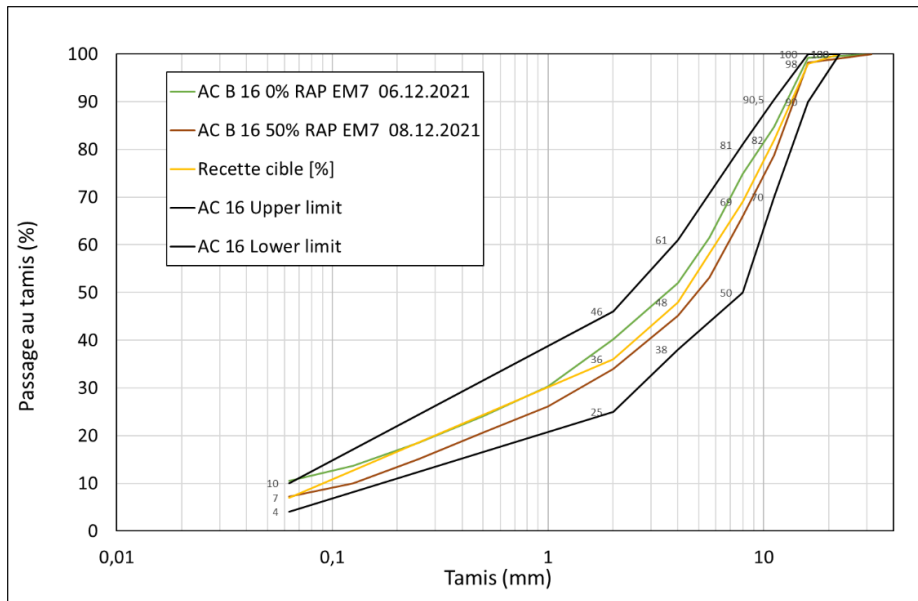
## II.1.2 Production des éprouvettes Duriez avec émulsion Ec

Les résultats issus de la première fabrication avec et sans RAP ne sont pas satisfaisantes (voir section I.4.3). Il était décidé de reproduire les éprouvettes duriez au même endroit que la fabrication de l'enrobé.

Six éprouvettes de chaque type d'enrobé ont été fabriquées et compactées à 120kN (Fig. 125).

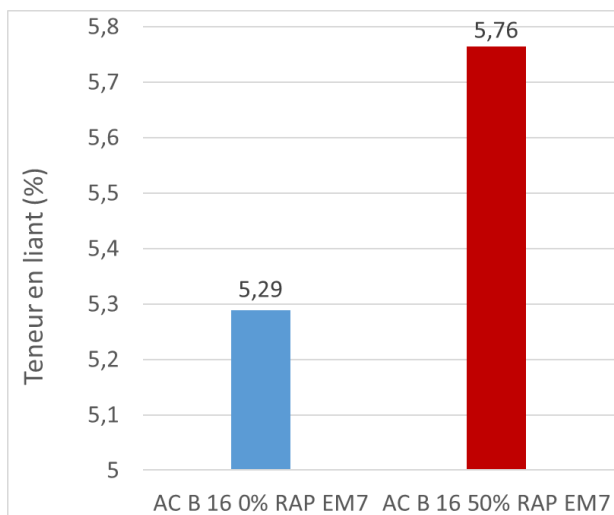


**Fig. 125** *Eprouvettes a) Sans RAP b) avec RAP*

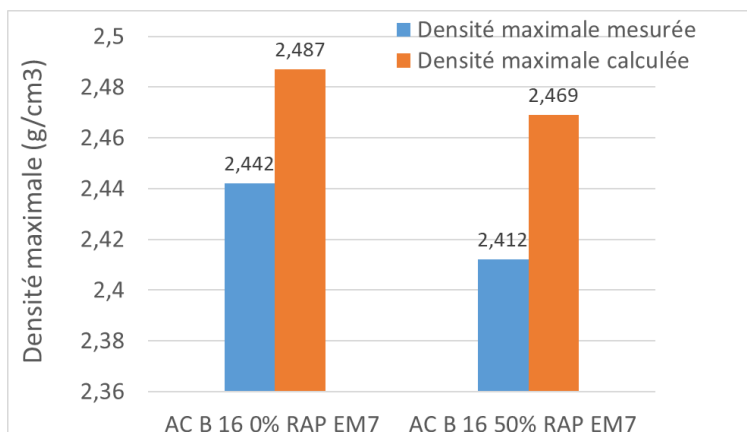


**Fig. 126** Courbes granulométriques

- Teneur en liant récupéré et densité maximale



**Fig. 127** Teneur en liant récupéré



**Fig. 128** Densité maximale mesurée et calculée



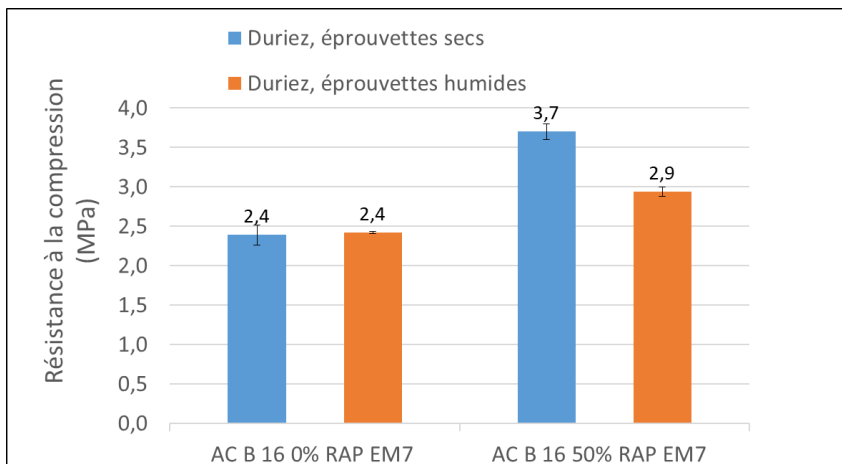
- Stockage des éprouvettes Duriez

14 jours Stockage à 35° C, 20% d'humidité relative      Stockage 7 jours dans l'eau



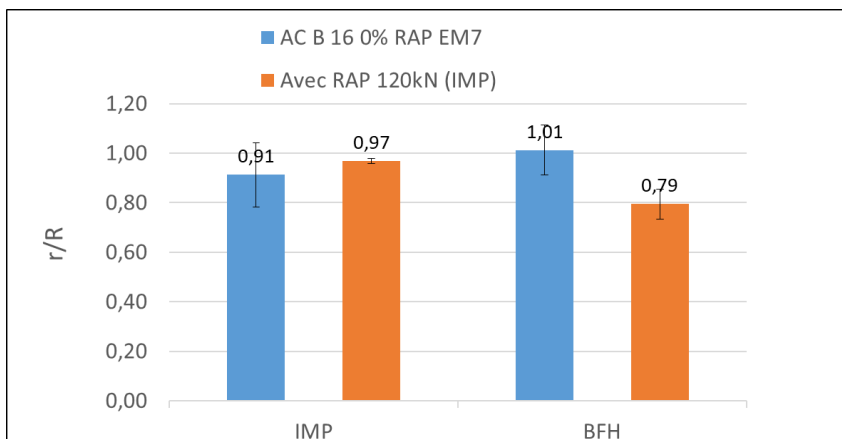
**Fig. 129** Etapes de stockage des éprouvettes duriez

- Résistance à la compression



**Fig. 130** Résistance à la compression (25°C)

- Sensibilité à l'eau



**Fig. 131** Sensibilité à l'eau

## II.2 Analyses des mélanges

### II.2.1 0% RAP, Emulsion Ec. Mélange produit chef BFH et analysée chez IMP



#### Attest

Prüfzeugnisnummer 22-02-5987  
 Gesamtauftrag 02-07-71025-7  
 Probenahme 08.11.2021  
 Probeneingang 04.11.2021  
 Projektleiter Pietro Luraschi  
 Objekt  
 Probenahmeort Burgdorf  
 Bemerkungen Mischung A ohne RAP

Mischgutsorte	AC B 16 H
Norm	SN-EN-13108-1

Berner Fachhochschule  
 Architektur, Holz und Bau  
 Pestalozzistrasse 20, Postfach 1058  
 3401 Burgdorf

Probe-Nr.	21-11728	Probenahme durch	Pietro Luraschi
Probe-Nr. extern	-	Probenahmezeit	
Unternehmung	-	Mischguttemperatur	- [°C]
Aufbereitungsanlage	-	Rezept-Nr.	-
Einbauschicht	-	Lieferschein-Nr.	-
Zielbindemittel	-	Anteil Ausbaupasphalt	0 [M.-%]
Zusätze	-	Zusätze	- [M.-%]

Prüfergebnisse					
Bindemittel	Einheit	Ergebnis	Sollwert gem. EP	Bereich der zul. Abweichung	unzulässige Abweichung
Löslicher Bindemittelgehalt	SN-EN-12697-1	[M.-%]	3.86		
Nadelpenetration	SN-EN-1426	[1/10mm]	58		min. 4.0
Erweichungspunkt Ring und Kugel	SN-EN-1427	[°C]	50.4		
Penetrationsindex	SN-EN-12591	[-]	-0.8		
Elastische Rückstellung	SN-EN-13398	[%]			
Module de Richesse	SN-EN-13108-1	[-]			
PAK in Asphalt	eigenes Verfahren	[mg/kg]			

Marshall-Versuch (SN-EN-12697-30)				
Stahlamboss	1)=bestimmt, Toluol, 25°C	2)=berechnet	Verdichtungstemperatur [°C]:	
Rohdichte Mischgut	1) SN-EN-12697-5	[g/cm³]	2.524	
Raumdichte	SN-EN-12697-6	[g/cm³]		
Hohlraumgehalt	SN-EN-12697-8	[Vol.-%]		
Bindemittelausfüllungsgrad	SN-EN-12697-8	[%]		
Marshall Stabilität S	SN-EN-12697-34	[kN]		
Marshall Fließwert F	SN-EN-12697-34	[mm]		
Tangentialer Fließwert Ft	SN-EN-12697-34	[mm]		
Marshall-Quotient S/F	SN-EN-12697-34	[kN/mm]		

Korngrößenverteilung SN-EN-12697-2					
Sollwertbereich der Korngrößenverteilung	Sieb [mm]	Durchgang M.-%	Sollwerte M.-%	Bereich der zul. Abweichung M.-%	unzulässige Abweichung M.-%
	45.0				
	31.5				
	22.4				min. 100.0
	16.0	100.0			90.0 - 100.0
	11.2	97.0			
	8.0	77.1			58.0 - 81.0
	5.6	63.0			
	4.0	48.8			38.0 - 61.0
	2.0	41.0			25.0 - 46.0
	1.0	33.7			17.0 - 34.0
	0.5	25.2			11.0 - 25.0
	0.25	19.5			
	0.125	13.7			
0.063	8.6			4.0 - 10.0	

Oberbuchsiten, den 12.10.2022

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschliesslich auf die untersuchte Probe.  
 Es gelten die AGB.

Pietro Luraschi

Projektleiter Forschung

IMP Bautest AG  
 www.impbautest.ch

Institut für Materialprüfung,  
 Bauberatung und Analytik

Laborweg 1  
 4625 Oberbuchsiten

Telefon 062 389 98 99  
 info@impbautest.ch



## II.2.2 50% RAP, Emulsion Ec. Mélange produit chef BFH et analysée chez IMP



### Attest

Prüfzeugnisnummer 22-02-5989  
 Gesamtauftrag 02-07-71025-8  
 Probenahme 08.11.2021  
 Probeneingang 04.11.2021  
 Projektleiter Pietro Luraschi  
 Objekt  
 Probenahmeort Burgdorf  
 Bemerkungen Mischung B mit 50% RAP

Mischgutsorte **AC B 16 H**  
 Norm SN-EN-13108-1

Berner Fachhochschule  
 Architektur, Holz und Bau  
 Pestalozzistrasse 20, Postfach 1058  
 3401 Burgdorf

Probe-Nr.	21-11729	Probenahme durch	-
Probe-Nr. extern	-	Probenahmezeit	
Unternehmung	-	Mischguttemperatur	- [°C]
Aufbereitungsanlage	-	Rezept-Nr.	-
Einbauschicht	-	Lieferschein-Nr.	-
Zielbindemittel	-	Anteil Ausbauspalt	50 [M.-%]
Zusätze	-	Zusätze	- [M.-%]

Prüfergebnisse		Einheit	Ergebnis	Sollwert gem. EP	Bereich der zul. Abweichung	unzulässige Abweichung
<b>Bindemittel</b>						
Löslicher Bindemittelgehalt	SN-EN-12697-1	[M.-%]	<b>5.24</b>		min. 4.0	
Nadelpenetration	SN-EN-1426	[1/10mm]	<b>42</b>			
Erweichungspunkt Ring und Kugel	SN-EN-1427	[°C]	<b>54.2</b>			
Penetrationsindex	SN-EN-12591	[-]	<b>-0.6</b>			
Elastische Rückstellung	SN-EN-13398	[%]				
Module de Richesse	SN-EN-13108-1	[-]				
PAK in Asphalt	eigenes Verfahren	[mg/kg]				

**Marshall-Versuch (SN-EN-12697-30)**

Stahlamboss 1)=bestimmt, Toluol, 25°C 2)=berechnet Verdichtungstemperatur [°C]:

Rohdichte Mischgut	1) SN-EN-12697-5	[g/cm³]	<b>2.469</b>			
Raumdichte	SN-EN-12697-6	[g/cm³]				
Hohlraumgehalt	SN-EN-12697-8	[Vol.-%]				
Bindemittelausfüllungsgrad	SN-EN-12697-8	[%]				
Marshall Stabilität S	SN-EN-12697-34	[kN]				
Marshall Fließwert F	SN-EN-12697-34	[mm]				
Tangentialer Fließwert Ft	SN-EN-12697-34	[mm]				
Marshall-Quotient S/F	SN-EN-12697-34	[kN/mm]				

Korngrößenverteilung		SN-EN-12697-2	Sieb	Durchgang	Sollwerte	Bereich der zul. Abweichung	unzulässige Abweichung
			[mm]	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%
Sollwertbereich der Korngrößenverteilung			45.0				
			31.5				
			22.4	<b>100.0</b>		min. 100.0	
			16.0	<b>96.2</b>		90.0 - 100.0	
			11.2	<b>79.1</b>			
			8.0	<b>67.5</b>		58.0 - 81.0	
			5.6	<b>55.5</b>			
			4.0	<b>47.4</b>		38.0 - 61.0	
			2.0	<b>37.4</b>		25.0 - 46.0	
			1.0	<b>29.3</b>		17.0 - 34.0	
			0.5	<b>23.4</b>		11.0 - 25.0	
	0.25	<b>16.4</b>					
	0.125	<b>10.1</b>					
	0.063	<b>7.7</b>		4.0 - 10.0			

Oberbuchsiten, den 12.10.2022

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschliesslich auf die untersuchte Probe.  
 Es gelten die AGB.

Pietro Luraschi  
 Projektleiter Forschung

IMP Bauteag AG  
 www.impbauteag.ch

Institut für Materialprüfung,  
 Bauberatung und Analytik

Laborweg 1  
 4625 Oberbuchsiten

Telefon 062 389 98 99  
 info@impbauteag.ch



## II.2.3 50% RAP, Emulsion Ea, 0% ciment. Mélange produit chef BFH et analysée chez IMP



### Attest

Prüfzeugnisnummer 22-02-6818  
 Gesamtauftrag 02-07-71025-13  
 Probenahme 11.05.2022  
 Probeneingang 09.05.2022  
 Projektleiter Pietro Luraschi  
 Objekt  
 Probenahmeort BFH  
 Bemerkungen Mischung A 50% RAP kein Zement

<b>Mischgutsorte</b>	<b>AC B 16 S</b>
Norm	SN-EN-13108-1

Berner Fachhochschule  
 Architektur, Holz und Bau  
 Pestalozzistrasse 20, Postfach 1058  
 3401 Burgdorf

Probe-Nr.	22-04183	Probenahme durch	LUPI
Probe-Nr. extern	-	Probenahmezeit	
Unternehmung	-	Mischguttemperatur	20°C [°C]
Aufbereitungsanlage	-	Rezept-Nr.	-
Einbauschicht	-	Lieferschein-Nr.	-
Zielbindemittel	B 70/100	Anteil Ausbaupasphalt	50% [M.-%]
Zusätze	- [M.-%]	Zusätze	- [M.-%]

Prüfergebnisse							
Bindemittel		Einheit	Ergebnis	Sollwert gem. EP	Bereich der zul. Abweichung	unzulässige Abweichung	
Löslicher Bindemittelgehalt	SN-EN-12697-1	[M.-%]	<b>5.47</b>		min. 4.0		
Nadelpenetration	SN-EN-1426	[1/10mm]	<b>39</b>				
Erweichungspunkt Ring und Kugel	SN-EN-1427	[°C]	<b>53.8</b>	51.0			
Penetrationsindex	SN-EN-12591	[-]	<b>-0.9</b>				
Elastische Rückstellung	SN-EN-13398	[%]					
Module de Richesse	SN-EN-13108-1	[-]	<b>3.4</b>				
PAK in Asphalt	eigenes Verfahren	[mg/kg]					
<b>Marshall-Versuch (SN-EN-12697-30)</b>							
Stahlamboss		1)=bestimmt, Toluol, 25°C	2)=berechnet	Verdichtungstemperatur [°C]:			
Rohdichte Mischgut	1) SN-EN-12697-5	[g/cm³]	<b>2.438</b>				
Raumdichte	SN-EN-12697-6	[g/cm³]					
Hohlraumgehalt	SN-EN-12697-8	[Vol.-%]					
Bindemittelausfüllungsgrad	SN-EN-12697-8	[%]					
Marshall Stabilität S	SN-EN-12697-34	[kN]					
Marshall Fließwert F	SN-EN-12697-34	[mm]					
Tangentialem Fließwert Ft	SN-EN-12697-34	[mm]					
Marshall-Quotient S/F	SN-EN-12697-34	[kN/mm]					
<b>Korngrößenverteilung</b>		SN-EN-12697-2					
Sollwertbereich der Korngrößenverteilung							
			Sieb	<b>Durchgang</b>	Sollwerte	Bereich der zul. Abweichung	unzulässige Abweichung
			[mm]	<b>M.-%</b>	M.-%	M.-%	M.-%
			45.0				
			31.5				
			22.4			min. 100.0	
			16.0	<b>100.0</b>		90.0 - 100.0	
			11.2	<b>79.3</b>			
			8.0	<b>69.1</b>		58.0 - 81.0	
			5.6	<b>60.2</b>			
			4.0	<b>51.6</b>		38.0 - 61.0	
			2.0	<b>36.0</b>		25.0 - 46.0	
			1.0	<b>27.9</b>		17.0 - 34.0	
			0.5	<b>22.3</b>		11.0 - 25.0	
			0.25	<b>15.7</b>			
			0.125	<b>9.9</b>			
			0.063	<b>7.8</b>		4.0 - 10.0	

Oberbuchsiten, den 10.11.2022

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschliesslich auf die untersuchte Probe.  
Es gelten die AGB.

Pietro Luraschi  
Projektleiter Forschung

IMP Bautest AG  
www.impbautest.ch

Institut für Materialprüfung,  
Bauberatung und Analytik

Laborweg 1  
4625 Oberbuchsiten

Telefon 062 389 98 99  
info@impbautest.ch



## II.2.4 50% RAP, Emulsion Ea, 2% ciment. Mélange produit chez BFH et analysée chez IMP



### Attest

Prüfzeugnisnummer 22-02-6818  
 Gesamtauftrag 02-07-71025-13  
 Probenahme 11.05.2022  
 Probeneingang 09.05.2022  
 Projektleiter Pietro Luraschi  
 Objekt  
 Probenahmeort BFH  
 Bemerkungen Mischung B 50% RAP 2% Zement

<b>Mischgutsorte</b>	<b>AC B 16 S</b>
Norm	SN-EN-13108-1

Berner Fachhochschule  
 Architektur, Holz und Bau  
 Pestalozzistrasse 20, Postfach 1058  
 3401 Burgdorf

Probe-Nr.	22-04184	Probenahme durch	LUPI
Probe-Nr. extern	-	Probenahmezeit	
Unternehmung	-	Mischguttemperatur	20°C [°C]
Aufbereitungsanlage	-	Rezept-Nr.	-
Einbauschicht	-	Lieferschein-Nr.	-
Zielbindemittel	B 70/100	Anteil Ausbaupasphalt	50% [M.-%]
Zusätze	-	Zusätze	- [M.-%]

Prüfergebnisse						
Bindemittel		Einheit	Ergebnis	Sollwert gem. EP	Bereich der zul. Abweichung	unzulässige Abweichung
Löslicher Bindemittelgehalt	SN-EN-12697-1	[M.-%]	5.41		min. 4.0	
Nadelpenetration	SN-EN-1426	[1/10mm]	53			
Erweichungspunkt Ring und Kugel	SN-EN-1427	[°C]	49.6	51.0		
Penetrationsindex	SN-EN-12591	[-]	-1.2			
Elastische Rückstellung	SN-EN-13398	[%]				
Module de Richesse	SN-EN-13108-1	[-]	3.3			
PAK in Asphalt	eigenes Verfahren	[mg/kg]				
<b>Marshall-Versuch (SN-EN-12697-30)</b>						
Stahlamboss		1)=bestimmt, Toluol, 25°C	2)=berechnet	Verdichtungstemperatur [°C]:		
Rohdichte Mischgut	1) SN-EN-12697-5	[g/cm³]	2.448			
Raumdichte	SN-EN-12697-6	[g/cm³]				
Hohlraumgehalt	SN-EN-12697-8	[Vol.-%]				
Bindemittelausfüllungsgrad	SN-EN-12697-8	[%]				
Marshall Stabilität S	SN-EN-12697-34	[kN]				
Marshall Fliesswert F	SN-EN-12697-34	[mm]				
Tangentialer Fliesswert Ft	SN-EN-12697-34	[mm]				
Marshall-Quotient S/F	SN-EN-12697-34	[kN/mm]				
<b>Korngrößenverteilung</b>		SN-EN-12697-2				
Sollwertbereich der Korngrößenverteilung						
		Sieb	Durchgang	Sollwerte	Bereich der zul. Abweichung	unzulässige Abweichung
		[mm]	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%
		45.0				
		31.5				
		22.4	100.0		min. 100.0	
		16.0	98.5		90.0 - 100.0	
		11.2	78.8			
		8.0	70.0		58.0 - 81.0	
		5.6	61.9			
		4.0	53.3		38.0 - 61.0	
		2.0	37.6		25.0 - 46.0	
		1.0	29.5		17.0 - 34.0	
		0.5	23.9		11.0 - 25.0	
		0.25	17.8			
		0.125	11.8			
		0.063	9.8		4.0 - 10.0	

Oberbuchsiten, den 10.11.2022

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschliesslich auf die untersuchte Probe.  
Es gelten die AGB.

Pietro Luraschi  
Projektleiter Forschung

IMP Bautest AG  
www.impbautest.ch

Institut für Materialprüfung,  
Bauberatung und Analytik

Laborweg 1  
4625 Oberbuchsiten

Telefon 062 389 98 99  
info@impbautest.ch



### III Annexe C

#### III.1 Production en centrale

##### III.1.1 Recettes

Les recettes de l'enrobé à froid fabriquées à la centrale de Weibel avec de la mousse de bitume sont présentées dans les tableaux (du Tab. 46 au Tab. 54).

<b>Tab. 46 Recette du mélange M1</b>			
		Quantité	Temps de l'ajout d'additive Dans le mélange
<b>Composants</b>	Filler	2.4 %	0 s
	Sable concassé 0/4	28.1 %	
	Sable rond lavé 0/4	13.3 %	
	Gravillons concassés :		0 s
	4/8	24.3 %	
8/11	10.0 %		
	11/16	17.1 %	
<b>Somme de granulats</b>		95.2 %	
<b>Agrégats d'enrobés</b>	Recyclage 16RA 0/11	0.0 %	
<b>Liant/Mousse</b>	Teneur en liant/enrobé (cible)	8 %	5 s
<b>Total</b>		0.00 %	
<b>Temps après le mélange</b>			180 s

<b>Tab. 47 Recette du mélange M2</b>			
		Quantité	Temps de l'ajout d'additive Dans le mélange
<b>Composants</b>	Filler	0.0 %	25 s
	Sable concassé 0/4	28.1 %	
	Sable rond lavé 0/4	13.3 %	
	Gravillons concassés :		0 s
	4/8	24.5 %	
	8/11	10.1 %	
	11/16	17.2 %	
<b>Somme de granulats</b>		93.2 %	
<b>Agrégats d'enrobés</b>	Recyclage 16RA 0/11	00.0 %	
<b>Liant/ Mousse</b>	Teneur en liant/enrobé (cible)	6.8 %	15 s
<b>Total</b>		100.00 %	
<b>Temps après le mélange</b>			180 s

<b>Tab. 48 Recette du mélange M3</b>			
		Quantité	Temps de l'ajout d'additive Dans le mélange
<b>Composants</b>	Filler	0.0 %	0 s
	Sable concassé 0/4	26.1 %	
	Sable rond lavé 0/4	12.3 %	
	Gravillons concassés :		0 s
	4/8	24.5 %	
	8/11	10.1 %	
	11/16	17.2 %	
<b>Somme de granulats</b>		90.2 %	
<b>Agrégats d'enrobés</b>	Recyclage 16RA 0/11	0.0 %	
<b>Water</b>		3.0 %	110 s
<b>Liant/ Mousse</b>	Teneur en liant/enrobé (cible)	6.8 %	120 s
<b>Total</b>		100.00 %	
<b>Temps après le mélange</b>			90 s

<b>Tab. 49 Recette du mélange M4</b>			
		Quantité	Temps de l'ajout d'additive Dans le mélange
<b>Composants</b>	Filler	0.0 %	
	Sable concassé 0/4	26.1 %	0 s
	Sable rond lavé 0/4	12.3 %	
	Gravillons concassés :		0 s
	4/8	25.0 %	
	8/11	10.3 %	
	11/16	17.5 %	
<b>Somme de granulats</b>		91.2 %	
<b>Agrégats d'enrobés</b>	Recyclage 16RA 0/11	00.0 %	
<b>Water</b>		2.0 %	110 s
<b>Liant/ Mousse</b>	Teneur en liant/enrobé (cible)	6.8 %	120 s
<b>Total</b>		100.00 %	
<b>Temps après le mélange</b>			60 s

<b>Tab. 50 Recette du mélange M5</b>			
		Quantité	Temps de l'ajout d'additive Dans le mélange
<b>Composants</b>	Filler	0.0 %	
	Sable concassé 0/4	26.1 %	30 s
	Sable rond lavé 0/4	12.3 %	
	Gravillons concassés :		0 s
	4/8	25.5 %	
	8/11	10.5 %	
	11/16	17.8 %	
<b>Somme de granulats</b>		92.2 %	
<b>Agrégats d'enrobés</b>	Recyclage 16RA 0/11	00.0 %	
<b>Water</b>		1.0 %	10 s
<b>Liant/ Mousse</b>	Teneur en liant/enrobé (cible)	6.8 %	110 s
<b>Total</b>		100.00 %	1
<b>Temps après le mélange</b>			60 s



<b>Tab. 51 Recette du mélange M6</b>			
		Quantité	Temps de l'ajout d'additive Dans le mélange
<b>Composants</b>	Filler	0.0 %	25 s
	Sable concassé 0/4	26.1 %	
	Sable rond lavé 0/4	12.3 %	
	Gravillons concassés :		0 s
	4/8	25.7 %	
	8/11	10.6 %	
	11/16	18.0 %	
<b>Somme de granulats</b>		92.7 %	
<b>Agrégats d'enrobés</b>	Recyclage 16RA 0/11	00.0 %	
<b>Water</b>		1.5 %	135 s
<b>Liant/ Mousse</b>	Teneur en liant/enrobé (cible)	5.8 %	15 s
<b>Total</b>		100.00 %	1
<b>Temps après le mélange</b>			60 s

<b>Tab. 52 Recette du mélange M7</b>			
		Quantité	Temps de l'ajout d'additive Dans le mélange
<b>Composants</b>	Filler	0.0 %	0 s
	Sable concassé 0/4	0.0 %	
	Sable rond lavé 0/4	0.0 %	
	Gravillons concassés :		0 s
	4/8	14.3 %	
	8/11	5.9 %	
	11/16	10.0 %	
<b>Somme de granulats</b>		30.2 %	
<b>Agrégats d'enrobés</b>	Recyclage 16RA 0/11	65.0 %	25 s
<b>Water</b>		0.0 %	1
<b>Liant/ Mousse</b>	Teneur en liant/enrobé (cible)	4.8 %	15 s
<b>Total</b>		100.00 %	
<b>Temps après le mélange</b>			60 s

<b>Tab. 53 Recette du mélange M8</b>			
		Quantité	Temps de l'ajout d'additive Dans le mélange
<b>Composants</b>	Filler	0.0 %	0 s
	Sable concassé 0/4	0.0 %	
	Sable rond lavé 0/4	0.0 %	
	Gravillons concassés :		
	4/8	14.3 %	
	8/11	5.9 %	
	11/16	10.0 %	
<b>Somme de granulats</b>		30.2 %	
<b>Agrégats d'enrobés</b>	Recyclage 16RA 0/11	63.5 %	35 s
<b>Water</b>		1.5 %	130 s
<b>Liant/ Mousse</b>	Teneur en liant/enrobé (cible)	4.8 %	15 s
<b>Total</b>		100.00 %	1
<b>Temps après le mélange</b>			60 s

<b>Tab. 54 Recette du mélange M9</b>			
		Quantité	Temps de l'ajout d'additive Dans le mélange
<b>Composants</b>	Filler	0.0 %	0 s
	Sable concassé 0/4	0.0 %	
	Sable rond lavé 0/4	0.0 %	
	Gravillons concassés :		
	4/8	14.3 %	
	8/11	5.9 %	
	11/16	10.0 %	
<b>Somme de granulats</b>		30.2 %	
<b>Agrégats d'enrobés</b>	Recyclage 16RA 0/11	62.5 %	0 s
<b>Water</b>		1.5 %	130 s
<b>Liant/ Mousse</b>	Teneur en liant/enrobé (cible)	5.8 %	15 s
<b>Total</b>		100.00 %	1
<b>Temps après le mélange</b>			60 s

## Glossaire

Terme	Signification
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen-und Verkehrsacheleute
SN	Normes suisses (SN)
EN	Norme européenne
CMA	Cold Mix Asphalt
CAM	Enrobé à froid
RAP	Matériaux recyclés
AE	Agrégats d'enrobé
ECF	Enrobés coulés à froid
2PB-PR	Essais de flexion 2 points sur éprouvettes prismatiques
2PB-TR	Essais de flexion 2 points sur éprouvettes trapézoïdales
TBA	Point de ramollissement bille-anneau
HR	Humidité relative
CEDR EDGAR	Evaluation and Decision process for Greener Asphalt Roads
CEDR CEREAL	Evaluation of existing CO2 tools for roads
ITS	Essai de résistance à la traction indirecte
PCG	Presse à cisaillement giratoire
DSV	Essai de compression cyclique
$\delta$	Angle de phase
IT-CY	Essai de traction indirecte sur éprouvettes cylindrique
ICV	Inventaire du cycle de vie
ACV	Analyse du cycle de vie
HMA	Hot Mix Asphalt
CIR	Cold in place recycling
PU	Processus unitaire



## Bibliographie

### Normes suisses

- [1] SN 640 324, « Dimensionnement; superstructures des routes », Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS, 2011.
- [2] SN EN 12697-53, « Mélanges bitumineux; Méthodes d'essai - Partie 53 : Montée en cohésion par la méthode du maniabilimètre », 2020
- [3] SN EN 12697-25, « Mélanges bitumineux – Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie 25: Essai de compression cyclique », 2019.
- [4] SN EN 12697-22, « Mélanges bitumineux; Méthodes d'essai - Partie 22 : Essai d'orniérage », 2020.
- [5] SN 670 902-1\_EN-933-1, « Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1: Détermination de la granularité – Analyse granulométrique par tamisage », 2013.
- [6] SN EN 12697-3-A1, « Mélanges bitumineux; Méthodes d'essai - Partie 3: Extraction des bitumes à l'évaporateur rotatif », 2020..
- [7] SN 670 511\_EN-1426, « Bitumes et liants bitumineux - Détermination de la pénétrabilité à l'aiguille », 2016
- [8] SN 670 512\_EN-1427, « Bitumes et liants bitumineux - Détermination du point de ramollissement – Méthode Bille et Anneau », 2016.
- [9] SN 670 902-3\_EN-933-3, « Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 3: Détermination de la forme des granulats – Coefficient d'aplatissement », 2013.
- [10] SN-670 902-6\_EN-933-6, « Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 6: Evaluation des caractéristiques de surface – Coefficient d'écoulement des granulats », 2016.
- [11] SN 670 585\_EN-1428, « Bitumes et liants bitumineux - Détermination de la teneur en eau dans les émulsions de bitume – Méthode de distillation azéotropique », 2013.
- [12] EN 13075-1\_SN 670 586-1, « Bitumes et liants bitumineux - Détermination du comportement à la rupture – Partie 1: Détermination de l'indice de rupture des émulsions cationiques de bitume, méthode des fines minérales », 2017..
- [13] SN 670 581-1\_EN-12846-1, « Bitumes et liants bitumineux – Détermination du temps d'écoulement à l'aide d'un viscosimètre à écoulement – Partie 1: Emulsions de bitume », 2012
- [14] 13074-1, « Bitumen and bituminous binders; Recovery of binder from bituminous emulsion or cut-back or fluxed bituminous binders; Part 1: Recovery by evaporation », 2019.
- [15] EN-13398\_SN 670 547, « Bitumes et liants bitumineux Détermination du retour élastique des bitumes modifiés », 2018.
- [16] SN 670 507\_EN-12593, « Bitumes et liants bitumineux - Détermination du point de fragilité Fraass », 2016.
- [17] SN 670 559\_EN-14770, « Bitumes et liants bitumineux - Détermination du module complexe en cisaillement et de l'angle de phase – Rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR) », 2013.
- [18] SN 670 103B-NA\_EN-13043, « Exigences Granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels utilisés dans la construction des chaussées, aérodromes et d'autres zones de circulation », 2006
- [19] SN EN 197-1, « Ciment – Partie 1: Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants », 2011
- [20] SN EN 12697-11, « Mélanges bitumineux; Méthodes d'essai - Partie 11 : Détermination de l'affinité granulats-bitume », 2021.
- [21] SN EN 12697-12, « Méthodes d'essai - Partie 12 : détermination de la sensibilité à l'eau des éprouvettes bitumineuses », 2020.
- [22] SN EN 12697-33, « Mélanges bitumineux; Méthodes d'essai – Partie 33: Préparation de corps d'épreuve au compacteur de plaque », 2020.
- [23] SN EN 12697-53, «Mélanges bitumineux; Méthodes d'essai - Partie 53 : Montée en cohésion par la méthode du maniabilimètre», 2020.
- [24] SN EN 12697-23, «Mélanges bitumineux - Méthode d'essais - Partie 23: Détermination de la résistance à la traction indirecte des éprouvettes bitumineuses», 2019.
- [25] SN EN 12697-12, «Mélanges bitumineux; Méthodes d'essai – Partie 12: Détermination de la sensibilité à l'eau des éprouvettes bitumineuses», 2021.
- [26] SN EN 12697-26, «Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai; Partie 26 : Rigidité», 2023.

- [27] SN EN 12697-1, « Mélanges bitumineux; Méthodes d'essai - Partie 1 : Teneur en liant soluble », 2023.
- [28] SN EN 933-6, « Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 6: Evaluation des caractéristiques de surface – Coefficient d'écoulement des granulats », 2014.
- [29] SN EN 933-3, « Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 3: Détermination de la forme des granulats – Coefficient d'aplatissement », 2013.

#### Normes internationales

#### Documentation suisse

- [30] J. L. Cuénoud, P. Rychen, C. Angst, et P. Bürgisser, « Couches liées à froid avec liants hydrauliques et/ou bitumineux ; approche théorique », Mandat de recherche VSS 2010/505, 2018.
- [31] M. Kronig, D. Niederberger, et A. Tobler, « Recyclage à froid des RC-Grave de granulats asphalte avec des liants bitumineux », Office fédéral des routes OFROU, Projet de recherche VSS 2002/401 Rapport N°1450, mars 2014.
- [32] X. Fang, « A fundamental research on cold mix asphalt modified with cementitious materials », Doctoral Thesis, ETH Zurich, 2016. doi: 10.3929/ethz-a-010793699.
- [33] J. Liechti et al., « Programme de recherche PLANET EP-2: Analyse de cycle de vie d'asphalte à basse température », Dezember 2016.
- [34] N. Bueche et A.-G. Dumont, « Paquet de recherche PLANET : RS-5: Modèle global d'évaluation », 2016.
- [35] N. Bueche, « Évaluation des performances et des impacts des enrobés bitumineux tièdes », PhD thesis, École polytechnique fédérale de lausanne, 2011.
- [36] A. Nättorp et F. Dinkel, « Einfluss biogener Öle auf die Ökobilanz von Strassenbaubindemitteln », Office fédéral des routes OFROU, Mandat de recherche VSS 2010/402, 2017.
- [37] A. Gandi, A. Carter, N. Bueche, S. Bressi, et D. Singh, « Retraitement en place des enrobés bitumineux formulation par double enrobage », Revue générale des routes et des aérodromes, vol. 938, p. 82, août 2016.
- [38] A. Gandi, F. Bensalem, S. Bressi, A. Carter, et N. Bueche, Double Coating of Full Depth Reclamation Materials. 2016. doi: 10.14311/EE.2016.227.
- [39] A. Gandi, A. Carter, et D. Singh, « Rheological behavior of cold recycled asphalt materials with different contents of recycled asphalt pavements », Innov. Infrastruct. Solut., vol. 2, no 1, p. 45, juill. 2017, doi: 10.1007/s41062-017-0094-3.
- [40] D. Visscher et al., « EDGAR Evaluation and Decision Process for Greener Asphalt Roads », Energy Efficiency, 2016.
- [41] P. Rossel, R. Galrito, Nicolas Bueche, M. Ould-Henia, et M. Arrigada, « Révision des méthodes de dimensionnement et renforcement des chaussées (DEDIRE) », Office fédéral des routes OFROU, Mandat de recherche VSS 2008//505 VSS 2008//505, oct. 2021.
- [42] W. Matthew et al., « EDGAR, Evaluation and Decision Process for Greener Asphalt Roads », CEDR Call 2013: Energy Efficiency EDGAR, oct. 2016.

#### Documentation internationale

- [43] S. Jain et B. Singh, « Cold mix asphalt: An overview », Journal of Cleaner Production, vol. 280, p. 124378, janv. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124378.
- [44] J. Chehovits et L. Galehouse, « Energy Usage and Greenhouse Gas Emissions of Pavement Preservation Processes for Asphalt Concrete Pavements », présenté à First International Conference on Pavement Preservation California, 2010.
- [45] S. Goyer, M. Dauvergne, L. Wendling, J. C. Fabre, C. De La Roche, et V. Gaudefroy, « Environmental Evaluation of gravel emulsion », in Proceedings of Life cycle assessment and construction international congress, France, juill. 2012, p. 9.
- [46] F. Kaseer, A. E. Martin, et E. Arámbula-Mercado, « Use of recycling agents in asphalt mixtures with high recycled materials contents in the United States: A literature review », Construction and Building Materials, vol. 211, p. 974-987, juin 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.286.
- [47] C. Gassmann, G. Christen, V. Krackler, et C. Ferlin, « Couches liées à froid avec liants hydrauliques et/ou bitumineux, approche pratique », 2018.
- [48] A. Beghin et al., « Comportement et étude des graves-émulsion Coopération public-privé : Mûrissement et évolution temporelle des propriétés de l'enrobé et des caractéristiques du liant », Revue générale des routes, no 902, p. pp 54-64, janv. 2012.
- [49] F. Delfosse, V. Gaudefroy, B. Eckmann, L. Odie, M. Garbay, et F. Le Cunff, « Comportement et étude des graves-émulsion. Coopération public-privé : Caractérisation des liants bitumineux des enrobés à froid », Revue générale des routes, no 900, p. pp 89-94, janv. 2012.
- [50] L. Wendling et al., « Comportement et étude des graves-émulsion. Coopération public-privé : Compactabilité des enrobés à l'émulsion de bitume », Revue Generale des Routes, no 901, 2012,
- [51] M. Lambert, « Comportement mécanique évolutif des enrobés bitumineux à l'émulsion : étude expérimentale et modélisation », These de doctorat, Limoges, 2018.

- [52] Z. Čížková et al., « Report on Durability of cold-recycled mixes : Test procedures for stiffness determination », sept. 2014.
- [53] J. P. Triquigneaux, L. Wendling, L. Odie, D. Claudel, et V. Gaudefroy, « Comportement et étude des graves-émulsion. Coopération public-privé : Essais Duriez : teneurs en vides, performances mécaniques, sensibilité à l'eau et caractérisation des liants extraits », Revue générale des routes, no 901, p. pp 45-58, janv. 2012.
- [54] Centre de recherches routières, « Code de bonne pratique pour la mise en oeuvre des revêtements bitumineux – R 96 | CRR », CRR, 2018.
- [55] G. Ferrotti, E. Pasquini, et F. Canestrari, « Experimental characterization of high-performance fiber-reinforced cold mix asphalt mixtures », Construction and Building Materials, vol. 57, p. 117-125, avr. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.089.
- [56] I. N. Thanaya, S. E. Zoorob, et J. P. Forth, « A laboratory study on cold-mix, cold-lay emulsion mixtures », Transport (proceedings of the ice), vol. 162, no TR1, févr. 2009.
- [57] S. Anastasio et al., « Standardization of the Environmental Information for Asphalt Technologies », Transportation Research Procedia, vol. 14, p. 3542-3551, janv. 2016, doi: 10.1016/j.trpro.2016.05.326.
- [58] M. Wayman et al., Facilitating the adoption of sustainable technologies in the asphalt sector. 2016. doi: 10.14311/EE.2016.133.
- [59] A. James, « Overview of Asphalt Emulsions », Transportation Research Circular, no E-C102, août 2006, Consulté le: 10 octobre 2022.
- [60] J.-S. Lacombe, Caractérisation des enrobés recyclés à froid et dimensionnement de la couche de roulement. Université de Sherbrooke, 2008.
- [61] G. Wirtgen, Cold Recycling Manual, Wirtgen Group. 2004.
- [62] J. A. Cardenas, « évaluation de l'effet de la température de cure sur le comportement des matériaux bitumineux de type mr-5 traités à la mousse de bitume », école de technologie supérieure du québec, 2013.
- [63] Y. Kim et H. "David" Lee, « Development of Mix Design Procedure for Cold In-Place Recycling with Foamed Asphalt », Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 18, no 1, p. 116-124, févr. 2006, doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:1(116).
- [64] X. Fang, A. Garcia-Hernandez, et P. Lura, « Overview on cold cement bitumen emulsion asphalt », RILEM Technical Letters, vol. 1, p. 116-121, déc. 2016, doi: 10.21809/rilemtechlett.2016.23.
- [65] I. N. A. Thanaya, « Review and Recommendation of Cold Asphalt Emulsion Mixtures Caems Design | Civil Engineering Dimension », Civil Engineering Dimension, vol. 9 (1), no (1), p. 49-56, 2007.
- [66] S. S. Dash et M. Panda, « Influence of mix parameters on design of cold bituminous mix », Construction and Building Materials, vol. 191, p. 376-385, déc. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.002.
- [67] S. Al-Busaltan, H. Al Nageim, W. Atherton, et G. Sharples, « Mechanical Properties of an Upgrading Cold-Mix Asphalt Using Waste Materials », Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 24, no 12, p. 1484-1491, déc. 2012, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000540.
- [68] H. Jiang, « Mechanism Analysis of Emulsified Asphalt Cold Recycled Mixture », Applied Mechanics and Materials, vol. 405-408, p. 1761-1766, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.405-408.1761
- [69] G. Flores, J. Gallego, L. Miranda, et J. R. Marcobal, « Cold asphalt mix with emulsion and 100% rap: Compaction energy and influence of emulsion and cement content », Construction and Building Materials, vol. 250, p. 118804, juill. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118804
- [70] Y. Brion, C. Le Roux, R. Linder, et R. Moonen, « Dossier recherches et travaux a travers le monde : mesure de l'evolution de la cohesion a l'emulsion au jeune age par le maniabilimetre Nymas », Revue generale des routes - voirie - equipements - autoroutes - aeroportos, no 769, janv. 1999
- [71] A. F. D. Essarts, « Etude du comportement des enrobés bitumineux aux températures de mise en œuvre », phdthesis, Université Paris-Est, 2016.
- [72] J. P. Serfass, « Enrobés à l'émulsion - particularités et nouvelle méthode d'étude », REVUE GENERALE DES ROUTES (RGRA), no 808, juill. 20021
- [73] Y. Konate, « Étude de choix constructifs pour garantir la mise en œuvre et la durabilité des enrobés neufs et recyclés à l'émulsion de bitume », phdthesis, École des Ponts ParisTech ; Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (Yamoussoukro, Côte d'Ivoire), 2021.
- [74] J.-P. SERFASS, « Recyclage en centrale des matériaux de chaussée », 2008.
- [75] C. Ling, R. Moraes, D. Swiertz, et H. Bahia, « Measuring the Influence of Aggregate Coating on the Workability and Moisture Susceptibility of Cold-Mix Asphalt », Transportation Research Record, vol. 2372, no 1, p. 46-52, janv. 2013, doi: 10.3141/2372-06.
- [76] LCPC-SETRA, « Guide technique, Conception et dimensionnement des structures de chaussée », Cerema, LCPC-SETRA, 1994.
- [77] A.-G. Dumont, B. Schobinger, et M. Féart -A, « Formulation et comportement des enrobés de surface macrorugueux », p. Rapport N° 1565, juin 2016.

- 
- [78] J. De Visscher et al., « A methodology to facilitate the implementation of new sustainable technologies for greener asphalt roads », avr. 2018, doi: 10.24451/ARBOR.14096.
- 
- [79] D. Bouyssou, D. Dubois, M. Pirlot, et H. Prade, Concepts et méthodes pour l'aide à la décision. 1, outils de modélisation. Hermès : Lavoisier, 2006.
- 
- [80] P. Dorchies, M. Chappat, et J. Bilal, « Environmental Road of the Future: Analysis of Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions », présenté à Fiftieth Annual Conference of the Canadian Technical Asphalt Association (CTAA) Canadian Technical Asphalt Association, 2005.
-



# Clôture du projet



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 13.04.2023/22.06.2023

#### Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS 2017/327  
 Projekttitel: Performances et domaine d'application des enrobés bitumineux à froid  
 Enddatum: 30.06.2023

#### Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Les principaux enseignements du projet peuvent être résumés ainsi :

- Que ce soit en laboratoire ou au poste d'enrobage, la fabrication des enrobés à froid est un processus complexe, à appréhender de manière différente de celle des enrobés traditionnels. La qualité de l'enrobage et l'humidité résiduelle des enrobés sont des facteurs déterminants.
- L'optimisation de la formulation devra tout particulièrement prendre en compte le choix de l'émulsion qui dépendra notamment des granulats (polarité), du temps de rupture visé et de sa teneur en eau. La problématique de l'adhésion liant-granulat (froid) est également à approfondir de manière spécifique.
- La fabrication des échantillons de laboratoire a démontré la pertinence des échantillons Duriez ou PCG, le compactage Marshall n'étant pas adapté dans le cas d'enrobés à froid. Le compactage de plaques s'est également avéré complexe et peu satisfaisant.
- Les essais réalisés avec les deux émulsions ont mis en évidence le processus de mûrissement des enrobés ainsi que certaines différences entre les deux émulsions, les résultats étant somme toute conformes aux attentes en ce qui concerne l'essai Duriez, la traction indirecte et les valeurs de rigidité. L'ensemble des enrobés à froid testés dans le cadre de ce projet ont cependant montré de très faibles performances vis-à-vis des sollicitations dynamiques de type compression cyclique ou essai d'orniérage.
- L'ajout d'agrégats d'enrobé permet d'améliorer les performances mécaniques, de même que l'ajout de ciment. Les performances améliorées concernent essentiellement la rigidité et la résistance mécanique, la résistance aux sollicitations cycliques restant faible.
- Sur la base des différents résultats de laboratoire, les performances obtenues avec l'émulsion Ea sont finalement légèrement meilleures que pour la seconde émulsion Ec.
- Les résultats obtenus, ceci tout particulièrement par rapport aux sollicitations cycliques, ne permettent pas (encore) d'envisager une application pour des couches fortement sollicitées de type AC T ou AC B. Ces résultats concernent cependant exclusivement les produits testés dans le cadre de ce projet et ne peuvent être extrapolés sans précautions.
- Une correspondance avec les coefficients d'équivalence « a » selon VSS 40 324 est également proposée et une évaluation globale des performances a été effectuée afin de porter une aide aux décideurs.
- Il est finalement recommandé de poursuivre les investigations avec les enrobés à froid à base d'émulsion qui s'avèrent davantage prometteurs que les enrobés à la mousse. Cela nécessite cependant encore certains travaux notamment au niveau des émulsions et de leur disponibilité en Suisse, de la fabrication en vraie grandeur et de l'établissement de plans d'essais et contrôles avec valeurs limites permettant de garantir une durée de service conforme aux attentes.



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

#### Zielerreichung:

Le présent projet de recherche a pour objectif principal l'évaluation des performances et du domaine d'application des enrobés à froid en tant que couches de portance (AC T) et/ou couche de base (AC B), ceci dans le cadre de chaussées routières. La problématique des enrobés froid étant particulièrement complexe, le projet de recherche n'a pas vocation à résoudre l'ensemble de la problématique. En effet, les résultats obtenus dans le cadre de ce projet et pour les produits testés ne permettent pas encore d'envisager une application pour des couches fortement sollicitées de type AC T ou AC B. En revanche, ce projet permet principalement de proposer quelques enseignements et pistes en vue d'un approfondissement de la thématique telles que l'importance de choix d'émulsion, l'optimisation de la recette, l'usage de RAP et de ciment qui permettent potentiellement d'améliorer les performances de l'enrobé à froid. En outre, il pourrait contribuer à une utilisation plus importante de ces enrobés à faibles impacts énergétiques et écologiques.

#### Folgerungen und Empfehlungen:

Bien que répondant à quelques questions et proposant des ébauches de solutions, le présent projet de recherche permet également de soulever des pistes de réflexions et recommandations relatives à d'éventuelles investigations ultérieures :

- La problématique relative à l'optimisation des performances mécaniques des enrobés à froid à base d'émulsion devrait être davantage approfondie, ceci afin de pouvoir étendre davantage leur domaine d'application. Cela nécessite cependant une étroite collaboration avec des fournisseurs/spécialistes en émulsions.
- Une fois les enrobés à base d'émulsion optimisés, une validation en vraie grandeur (planche d'essais) serait recommandée. Cela présuppose a priori l'utilisation de postes spécifiquement dédiés à ces matériaux.
- Le recours à d'autres ajout que le ciment, davantage respectueux de l'environnement, en vue d'améliorer les performances mécaniques des enrobés à froid constitue également une thématique pouvant très probablement être approfondie et optimisée.
- La mise en application pratique et à grande échelle des enrobés à froid nécessitera finalement une mise à jour de la normalisation, ceci tout particulièrement dans le domaine du suivi et contrôle des chantiers.
- Disposer d'un modèle global permettant de comparer différentes technologies d'enrobés bitumineux est finalement un objectif global dont les bases ont été posées lors du projet PLANET. Le présent projet met une fois encore en évidence, le besoin important de générer des données fiables en vue d'une évaluation des produits et procédés sur l'ensemble du cycle de vie. Cela comprend par exemple, les informations relatives à la consommation énergétique et aux émissions.

#### Publikationen:

Projet de publication en cours de rédaction

#### Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Bueche

Vorname: Nicolas

Amt, Firma, Institut: Berner Fachhochschule

#### Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

#### Beurteilung der Begleitkommission:

##### Beurteilung:

Le projet a été mené en adéquation avec la pratique courante dans le cadre de telles recherches. En raison des difficultés à obtenir des émulsions de qualité suffisantes ainsi que la non-disponibilité de postes d'enrobage spécifiques pour des fabrications d'enrobés à froid à base d'émulsions, la méthodologie a cependant dû être modifiée. Ainsi, des essais étendus ont été réalisés en laboratoire ainsi que des productions (mousse) au poste d'enrobage; mais sans la construction de planche d'essais. Ces différents ajustements en cours de recherche ont toujours été effectués après validation par la commission d'accompagnement qui a eu la possibilité de fournir ses conseils lors des différentes étapes de projet. Le projet s'avère finalement satisfaisant, bien que l'ensemble des questions relatives à la thématique n'aient bien évidemment pas pu être répondues.

##### Umsetzung:

La mise en œuvre concrète concerne essentiellement le fait que les enrobés à froid à l'émulsion semblent davantage adaptés (performants) que les enrobés à froid à la mousse de bitume. Des enseignements importants pour une en œuvre pratique sont fournis dans le cadre de ce projet. Cela concerne notamment: types d'émulsions, méthodes d'essais et de contrôle, performances des enrobés à froid, production des enrobés à froid et dimensionnement de chaussées (pistes de réflexions).

##### weitergehender Forschungsbedarf:

Le projet a finalement davantage permis de détailler le potentiel des techniques à froid ainsi que les défis inhérents à ce type de technologies. Les besoins supplémentaires en matière de recherche concernent essentiellement l'optimisation du comportement mécanique d'enrobés à froid à base d'émulsion, ce qui implique notamment une analyse approfondie au niveau des caractéristiques et performances des émulsions. La technologie est prometteuse, mais il subsiste un important potentiel d'optimisation.

##### Einfluss auf Normenwerk:

L'influence sur la normalisation concerne essentiellement des contributions spécifiques relatifs aux aspects suivants: méthodes de suivi et contrôle des enrobés à froid, identification des performances déterminantes et estimation de valeurs limites, considérations relatives au dimensionnement des chaussées.

#### Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Bücheli

Vorname: Hans-Peter

Amt, Firma, Institut: Implenia

#### Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission: