



Paquet de recherche: Revêtements peu bruyants EP1: Formulation des revêtements peu bruyants

**Forschungspaket Lärmarme Beläge innerorts
EP1: Rezeptierung von Lärmarme Beläge**

**Research Package: Low-noise Pavements in Urban Area
EP1: Mix design of low-noise asphalt**

**Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
Laboratoire des voies de circulation (LAVOC)
P. Rychen, Dr. ès sc EPF
M. Pittet, Techn. chef de Laboratoire
M.-A. Féart, Ing. EPF
A.-G. Dumont, Professeur EPF**

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

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

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

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

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

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

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

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



Paquet de recherche: Revêtements peu bruyants EP1: Formulation des revêtements peu bruyants

**Forschungspaket Lärmarme Beläge innerorts
EP1: Rezeptierung von Lärmarme Beläge**

**Research Package: Low-noise Pavements in Urban Area
EP1: Mix design of low-noise asphalt**

**Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
Laboratoire des voies de circulation (LAVOC)
P. Rychen, Dr. ès sc EPF
M. Pittet, Techn. Chef de Laboratoire
M.-A. Féart, Ing. EPF
A.-G. Dumont, Professeur EPF**

**Projet de recherche ASTRA 2010/010 sur demande de l'Office fédéral des
routes (OFROU)**

Impressum

Instance de recherche et équipe de projet

Direction du projet
André-Gilles Dumont

Membres

Patrick Rychen
Michel Pittet
Marc-Antoine Fénart

Commission de suivi

Présidente
Luzia Seiler

Membres

Sabine Würmli
Hans-Peter Beyeler
Sophie Hoehn
André Magnin
Olivier Jacobi
Benedikt Eberle
Cyril Durussel
Nicolas Gouneaud
Martin Bürgi
Hanspeter Gloor
Dejan Lukic

Auteur de la demande

Office fédéral des routes (OFROU)

Source

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

Table des matières

Impressum	4
Résumé	7
Zusammenfassung	9
Summary	11
1 Introduction	13
1.1 Problématique	13
1.2 Objectifs de la recherche	14
1.3 Considérations générales – Paquet de recherche "Revêtements peu bruyants à l'intérieur des localités"	14
1.3.1 TP1 "Recherche et innovation"	15
1.3.2 TP2 "Validation"	15
1.3.3 TP3 "Monitoring à long terme et contrôle" et TP4 "Programme d'incitation pour des revêtements peu bruyants (RPT)"	16
1.4 Liens entre le EP1, les projets individuels et les projets partiels	16
1.5 Centre de recherche responsable pour le EP1	17
1.6 Méthodologie – Programme de la recherche	17
1.6.1 Etape 1 : Etat des connaissances	17
1.6.2 Etape 2 : Paramètres de base et priorités de la recherche	18
1.6.3 Etape 3 : Formulation	18
1.6.4 Etape 4 : Optimisation de la formule	18
1.6.5 Etape 5 : Méthodologie d'aide à la décision	19
1.6.6 Etape 6 : Recommandations pour l'élaboration de revêtements peu bruyants innovants	19
1.6.7 Etape 7 : Conclusions	19
1.7 Implications pour la pratique – Contributions	19
2 Etat des connaissances	21
2.1 La problématique du bruit routier	21
2.1.1 Provenance du bruit routier	21
2.1.2 Méthodes de mesure du bruit routier	22
2.2 Revêtements peu bruyants à l'intérieur des localités	23
2.2.1 Recherches nationales	24
2.2.2 Recherches internationales	33
2.3 Formulation des revêtements peu bruyants	41
2.3.1 Principaux types de revêtements peu bruyants	41
2.3.2 Paramètres et caractéristiques d'un revêtement intervenant dans la réduction/augmentation du bruit de roulement	49
3 Paramètres de base de la recherche	53
3.1 Définition des revêtements peu bruyants	53
3.2 Matériaux	54
3.2.1 Choix du type de formules	54
3.2.2 Choix des paramètres principaux des LNA	54
3.2.3 Choix des matériaux	55
3.2.4 Formulation des LNA et analyse de sensibilité	56
3.3 Optimisation mécanique et acoustique des LNA	56
3.4 Méthodes d'essais	57
3.4.1 Teneur en vides des LNA	57
3.4.2 Compactage des LNA	58
3.4.3 Simulateur de trafic léger	59
3.4.4 Essai Cantabro	60
3.4.5 Détermination des performances acoustiques – Tube d'impédance	60

4	Formulation	65
4.1	Démarche et méthode de formulation	65
4.1.1	Phase 1 : Définition du besoin en performance.....	67
4.1.2	Phase 2 : Sélection des composants.....	67
4.1.3	Phase 3 : Formulation volumique	67
4.1.4	Phase 4 : Validation et optimisation.....	68
4.1.5	Phase 5 : Vérification – Performances	68
4.1.6	Phase 6 : Choix de la formule et performances secondaires	68
4.2	Caractéristiques des matériaux	69
4.3	Low Noise Asphalt (LNA) 4.....	70
4.3.1	Caractéristiques visées des LNA 4.....	70
4.3.2	Validation de la formulation volumique	71
4.3.3	Formulation des LNA 4 ₁₆	72
4.3.4	Formulation des LNA 4 ₁₂	76
4.4	Low Noise Asphalt (LNA) 8.....	79
4.4.1	Caractéristiques visées des LNA 8.....	79
4.4.2	Validation de la formulation volumique	80
4.4.3	Formulation des LNA 8 ₁₆	81
4.4.4	Formulation des LNA 8 ₁₂	84
4.5	Analyse de sensibilité	87
4.5.1	Changement du type de granulats.....	87
4.5.2	Ajout d'additifs.....	90
5	Méthodologie d'aide à la décision	97
5.1	Paramètres d'aide à la décision.....	97
5.2	Méthodologie d'aide à la décision.....	98
5.2.1	Etape 1 : Choix du paramètre principal	98
5.2.2	Etape 2 : Optimisation par rapport au paramètre secondaire.....	99
5.2.3	Etape 3 : Choix des matériaux de base.....	99
5.2.4	Etape 4 : Choix des additifs	100
6	Recommandations pour l'élaboration de revêtements peu bruyants innovants.....	101
6.1	Matériaux	101
6.2	Choix du type de formules	101
6.3	Méthode de formulation	101
6.4	Formulation	102
6.5	Essais et manipulations en laboratoire	102
6.6	Fabrication	103
7	Conclusions	105
7.1	Conclusions générales.....	105
7.2	Propositions pour l'adaptation des normes.....	105
7.3	Propositions pour des recherches ultérieures	105
	Annexes	107
	Glossaire.....	149
	Bibliographie	153
	Clôture du projet.....	157
	Index des rapports de recherche en matière de route.....	161

Résumé

Le projet de recherche a permis de mettre au point une méthode de formulation adaptée aux revêtements peu bruyants. Cette méthode, basée sur la formulation volumique, permet d'optimiser la démarche générale de formulation d'un nouveau produit. Grâce à une grande partie théorique, il est possible de diminuer au maximum les gâchées d'essais, tout en gardant une très bonne corrélation entre la formulation théorique et la fabrication. La méthode s'appuie sur le logiciel PradoWin qui est basé sur la méthode de formulation du CRR en Belgique.

La formulation de revêtements à granulométrie fine et discontinue, tels que les LNA 4 et LNA 8, est très délicate. Un léger changement de la courbe granulométrique peut avoir des conséquences importantes sur les résultats de teneurs en vides et sur le comportement mécanique et acoustique des revêtements. Ce phénomène est d'autant plus présent pour des grains maximaux faibles (LNA 4). L'utilisation du logiciel PradoWin a démontré ces difficultés et a permis de limiter au maximum les gâchées en laboratoire.

Il est recommandé de viser une granulométrie fortement discontinue pour les LNA. Pour les LNA 4 une cassure à 2 mm, et pour les LNA 8 une cassure à 4 mm doit être appliquée. Pour les LNA 4, une teneur en liant (sur enrobé) visée de 6.5 à 6.8% semble donner des résultats concluants. Pour les LNA 8, une teneur en liant (sur enrobé) visée de 6.2 à 6.5% est recommandée.

L'utilisation de matériaux très performants est indispensable. Le LAVOC recommande d'utiliser des granulats adéquats présentant de bonnes caractéristiques mécaniques (granulats durs, CPA élevé). Il est également recommandé d'utiliser uniquement des liants modifiés par des polymères.

L'utilisation de chaux hydratée peut être recommandée pour le LNA 8₁₂. Par contre pour le LNA 4₁₆ une pesée des intérêts doit être faite, car le recours à cet additif a des conséquences distinctes sur les différentes caractéristiques mécaniques.

L'ajout d'un mélange chaux hydratée – fibres de cellulose n'apporte pas d'améliorations par rapport au comportement mécanique des deux formules testées. Le recours aux fibres de cellulose n'est donc pas nécessaire.

L'utilisation du module de richesse, qui est étroitement lié à la teneur en liant et la granulométrie, pour le choix des formulations s'est avérée concluante. Il est recommandé de viser des valeurs du module comprises entre 3.8 et 4.2. L'ajout de chaux doit être pris en considération et compensé par une diminution de la teneur en filler totale. En première approche, on considéra la surface spécifique équivalente entre la chaux et le filler.

Deux teneurs en vides de 12 et 16% ont été évaluées dans le cadre de ce projet. Une recommandation par rapport à une des deux teneurs en vides n'est pas faite, car celle-ci dépend en premier lieu de l'importance apportée soit au comportement mécanique, soit au comportement acoustique.

Pour mesurer la teneur en vides des revêtements, il est recommandé d'utiliser la méthode de mesure géométrique, plus adaptée aux revêtements à teneur en vides élevée.

Les essais en laboratoire ont permis de détecter une bonne correspondance entre les trois méthodes de compactage usuelles. Les méthodes de compactage suivantes sont recommandées pour fabriquer des éprouvettes :

- Table de compactage : Compactage fort de plaques de 180 x 500 x 35 mm de dimension avec une roue (compactage mixte pneu/rouleau lisse).
- Presse à compactage giratoire : Compactage d'éprouvettes à la PCG avec une hauteur finale visée de 70 mm après 90 girations.
- Compactage Marshall : Compactage d'éprouvettes avec énergies de compactage de 2x40 coups.

Les résultats de l'essai d'orniérage au simulateur de trafic léger sont dépendants de l'épaisseur des plaques testées. Pour une comparaison plus aisée du comportement des LNA par rapport aux enrobés traditionnels ou macro-rugueux, il est recommandé de recourir à des plaques d'une épaisseur de 50 mm.

Les évaluations détaillées des différentes formules testées à l'essai Cantabro ont montré une faible perte de matériaux pour tous les matériaux testés (< 20%). Cet essai ne permet donc pas de distinguer clairement le comportement mécanique des différentes formules.

L'essai acoustique choisi pour cette recherche (tube d'impédance) permet d'effectuer une comparaison relative du comportement acoustique des LNA. Néanmoins, la méthode n'est pas assez sensible pour comparer des formules à caractéristiques proches (teneurs en vides et granulométries identiques) et la corrélation avec les performances acoustiques in situ n'est pas démontrée.

L'homogénéité des matériaux utilisés doit être assurée à tout moment de la fabrication des LNA. Tout particulièrement, les courbes granulométriques des différentes fractions utilisées pour la fabrication doivent être le plus homogène possible. En effet, un léger changement dans les courbes granulométriques peut avoir des conséquences importantes sur les résultats de teneurs en vides et de teneurs en liant et ainsi sur le comportement mécanique et acoustique des revêtements.

L'homogénéité des matériaux a pu être assurée lors des manipulations en laboratoire, néanmoins l'homogénéité dans les centrales doit être évaluée impérativement avant la fabrication d'un tel revêtement. Il est recommandé d'utiliser des fractions 0/2 et 2/4 pour les LNA 4.

Finalement, une simple méthodologie d'aide à la décision a été mise au point, permettant de choisir le type de revêtement adapté à une problématique concrète. Ainsi il est possible de choisir certaines caractéristiques des revêtements en fonction des attentes mécaniques et acoustiques que peut avoir un gestionnaire de réseau.

Mots clés : Revêtements routiers peu bruyants, formulation (volumique), comportement mécanique, comportement acoustique, aide à la décision.

Zusammenfassung

Das Forschungsprojekt hat es erlaubt, ein Verfahren für die Rezeptur von lärmarmen Belägen zu entwickeln. Diese volumetrische Methode ermöglicht es, das Gesamtverfahren der Rezeptur eines neuen Produkts zu optimieren. Durch den theoretischen Ansatz ist es möglich, die Anzahl an Laboranfertigungen zu verringern, unter Beibehaltung einer sehr guten Korrelation zwischen der theoretischen Rezeptur und den Laborproben. Das Verfahren basiert auf der PradoWin Software, welche auf der Methode des CRR in Belgien aufgebaut ist.

Die Rezeptur von Belägen mit einer feinen und diskontinuierlichen Korngrößenverteilung, wie z.B. für die LNA 4 und 8, ist sehr empfindlich. Eine leichte Veränderung der Sieblinie kann erhebliche Konsequenzen auf die Ergebnisse des Hohlraumgehaltes und des mechanischen und akustischen Verhalten haben. Dieses Phänomen noch markanter für feinkörnige Beläge (LNA 4). Die Verwendung der PradoWin Software hat diese Schwierigkeiten hervorgehoben, und half beim Minimieren der Anzahl an Laboranfertigungen mit.

Es wird empfohlen, eine stark diskontinuierliche Korngrößenverteilung für die LNA Beläge anzustreben. Für den LNA 4 sollte eine Bruchstelle bei 2 mm, und für den LNA 8 bei 4 mm, angesetzt werden. Für den LNA 4, ergab ein Bindemittelgehalt (auf Asphalt) von 6.5 bis 6.8%, aussagekräftige Ergebnisse. Für den LNA 8 wird ein Bindemittelgehalt (auf Asphalt) von 6.2 bis 6.5% empfohlen.

Die Verwendung von hochwertigen Baustoffen ist wesentlich. Das LAVOC empfiehlt geeignete Gesteinskörnungen mit guten mechanischen Eigenschaften zu verwenden (harte Körnungen, hoher PSV). Es wird auch empfohlen, nur polymermodifizierte Bindemittel zu verwenden.

Der Einsatz von Kalkhydrat kann für den LNA 8₁₂ empfohlen werden. Hingegen für den LNA 4₁₆ muss eine Interessenabwägung vorgenommen werden, da die Verwendung dieses Zusatzstoffes unterschiedliche Auswirkungen die mechanischen Eigenschaften hat.

Der Zusatz einer Kalkhydrat-Zellulosefasern-Mischung ergibt keine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften der getesteten Rezepturen. Die Verwendung von Zellulosefasern ist somit nicht erforderlich.

Die Verwendung des Module de richesse, welches eng mit dem Bindemittelgehalt und der Korngrößenverteilung verbunden ist, für die Wahl der Rezepturen, erwies sich als beweiskräftig. Es wird empfohlen, Werte zwischen 3.8 und 4.2 anzustreben. Die Zugabe von Kalkhydrat muss durch eine Abnahme des Fülleranteils kompensiert werden. Als erster Ansatz kann eine äquivalente Oberfläche zwischen dem Kalkhydrat und dem Füller berücksichtigt werden.

Zwei Hohlraumgehalte von 12 und 16% wurden im Rahmen dieses Projektes untersucht. Eine Empfehlung zwischen diesen Hohlraumgehalten kann nicht gegeben werden, da diese vor allem von der Wichtigkeit abhängt, welche man dem mechanischen oder akustischen Verhalten gibt.

Für das Messen des Hohlraumgehaltes der Beläge, sollte das geometrische Messverfahren angewendet werden, da dieses geeigneter ist für hohe Hohlraumgehalte.

Labortests haben es erlaubt, eine gute Übereinstimmung zwischen den drei üblichen Verdichtungsverfahren festzustellen. Die folgenden Methoden können für die Herstellung von Proben empfohlen werden:

- Walzenverdichtungsgerät: Schwere Verdichtung von 180 x 500 x 35 mm Platten mit Walze (gemischt Reifen/Glattwalze).
- Gyrator-Verdichter: Verdichtung von Probekörper mit Gyrator-Verdichter; Höhe der Probekörper von 70 mm nach 90 Drehungen.
- Marshall-Verdichter: Verdichtung von Probekörper mit Marshall-Verdichter; Verdichtung mit 2x40 Schlägen.

Die Ergebnisse des Spurbildungstests mit dem leichten Verkehrs-Simulator sind abhängig von der Dicke der getesteten Platten. Zum vereinfachten Vergleich des Verhaltens der LNA Beläge gegenüber traditionellen oder AC MR Belägen, empfiehlt es sich, eine Platten-Dicke von 50 mm beizubehalten.

Der Cantabro-Versuch, welcher an verschiedenen Formeln durchgeführt wurde, zeigt einen geringen Materialverlust auf (<20%). Diese Prüfung erlaubt es nicht, das mechanische Verhalten der unterschiedlichen Beläge zu differenzieren.

Die akustische Prüfung, welche in dieser Forschung angewendet wurde (Impedanzrohr), ermöglicht einen relativen Vergleich des akustischen Verhaltens der LNA Beläge. Allerdings ist diese Methode nicht empfindlich genug, um Rezepturen ähnliche Eigenschaften zu unterscheiden (identischer Hohlraumgehalt und Korngrößenverteilung). Die Korrelation mit dem akustischen Verhalten insitu ist ebenfalls nicht bewiesen.

Die Homogenität der verwendeten Materialien muss zu jeder Zeit der Herstellung der LNA sichergestellt werden. Insbesondere die Korngrößenverteilung der verschiedenen Fraktionen sollte möglichst homogen sein. Tatsächlich kann eine geringe Änderung in der Korngrößenverteilung eine grosse Auswirkung auf die Ergebnisse des Hohlraumgehaltes und des Bindemittelgehaltes, und damit auf das mechanische und akustische Verhalten der Beläge, haben.

Die Homogenität der Materialien wurde bei der Handhabung im Labor gewährleistet, aber die Homogenität im Mischwerk sollte vor der Herstellung eines solchen Belages beurteilt werden. Es wird empfohlen, 0/2 und 2/4 Fraktionen für die Herstellung von LNA 4 Belägen zu verwenden.

Schlussendlich wurde eine einfache Methode der Entscheidungsunterstützung entwickelt, welche es erlaubt, die Wahl des Belag-Typen einer spezifischen Problematik anzupassen. Somit ist es möglich, bestimmte Eigenschaften der Beläge auf Basis des mechanischen und akustischen Verhaltens zu wählen.

Stichworte: Lärmarme Strassenbeläge, (volumetrische) Rezeptur, mechanisches Verhalten, akustisches Verhalten, Entscheidungsunterstützung.

Summary

The research project has enabled the development of a mix design method adapted to low-noise surfaces. This method, based on the volumetric method, allows the optimisation of the general mix design process of a new product. Thanks to a large theoretical component, testing wastage can be reduced to a minimum, whilst maintaining a very good correlation between theoretical mix design and manufacture. The method is established using the PradoWin software, which is based on the mix design method of the CRR in Belgium.

The mix design of fine and discontinuous granulometry surfaces, such as LNA 4 and LNA 8, is very delicate. A slight change in the granulometric curve can have significant consequences with regard to results concerning void content and the mechanical and acoustic behaviour of surfaces. This phenomenon is even more apparent for mixes with small aggregates (LNA 4). The use of the PradoWin software has demonstrated these difficulties and enabled laboratory waste to be reduced to a minimum.

It is recommended to aim at a highly discontinuous granulometry for LNAs. For LNA 4 a discontinuity at 2 mm and for LNA 8 a discontinuity at 4 mm must be applied. For LNA 4, a targeted binder content (on asphalt) of 6.5 to 6.8% seems to give convincing results. For LNA 8, a targeted binder content (on asphalt) of 6.2 to 6.5% is recommended.

The use of high-performance materials is essential. LAVOC recommends using appropriate aggregates offering good mechanical characteristics (hard aggregates, high APC). It is also advisable to use only polymer-modified binders.

The use of hydrated lime can be recommended for LNA 8₁₂. For LNA 4₁₆ however a balance of interests must be established, as resorting to this additive has definite consequences regarding the different mechanical characteristics.

The addition of a hydrated lime/cellulose fibre mixture does not improve the mechanical behaviour of the two formulas tested. The use of cellulose fibres is therefore not necessary.

The use of the richness modulus, which is closely linked to the binder content and granulometry, for the choice of mix designs proved decisive. It is recommended to target modulus values ranging between 3.8 and 4.2. The addition of lime must be taken into account and compensated by a reduction of total filler content. In a first approach, the specific surface was considered equivalent between the lime and the filler.

Two void contents of 12 and 16% were evaluated within the framework of this project. No recommendation concerning either of these two void contents is made, as the latter depends primarily on the importance attached either to mechanical behaviour or acoustic behaviour.

Use of the geometric method is recommended for measuring surface void content, since it is more suitable for high-void-content surfaces.

Laboratory tests showed a good correspondence between the three common compaction methods. The following compaction methods are recommended for producing specimens:

- Compaction table : Strong compaction of 180 x 500 x 35-mm slabs with a wheel (mixed compaction tyre/smooth roller).
- Gyratory shear compactor : Compaction of specimens using GSC with a targeted final height of 70 mm after 90 gyrations.
- Marshall compaction : Compaction of specimens with compaction energies of 2x40 blows.

The results of the wheel tracking test on the light traffic simulator depend on the thickness of the slabs tested. For easier comparison of LNA behaviour in relation to traditional or macro-rough asphalts, the use of 50-mm-thick slabs is recommended.

The detailed evaluations of the different mix designs tested with the Cantabro method showed a slight loss of materials for all the materials tested (< 20%). This test does not therefore allow a clear distinction to be made regarding the mechanical behaviour of the different mix designs.

The acoustic test chosen for this research (impedance tube) allows a relative comparison of the acoustic behaviour of LNAs. Nevertheless, the method is not sufficiently sensitive to compare mix designs with similar characteristics (identical void contents and granulometries) and the correlation with in situ acoustic performances is not shown.

The homogeneity of the materials used must be ensured throughout the manufacture of the LNAs. Very particularly, the granulometric curves of the different fractions used for the manufacture must be as homogenous as possible. Indeed, a slight change in the granulometric curves can have significant consequences with regard to results concerning void content and binder contents and thus concerning the mechanical and acoustic behaviour of surfaces.

Although the homogeneity of the materials could be ensured during laboratory manipulations, it is nonetheless essential that homogeneity be evaluated in mixing plants prior to the manufacture of such a surface. The use of fractions 0/2 and 2/4 is recommended for LNA 4.

Finally, a simple decision support methodology was developed, allowing an appropriate type of surface to be selected for a specific situation. It is thus possible to choose certain surface characteristics in accordance with the mechanical and acoustic expectations of a particular network manager.

Keywords : Low-noise road surfaces, mix design (volumetric), mechanical behaviour, acoustic behaviour, decision support.

1 Introduction

La présente recherche a pour objectif la mise au point d'une approche de formulation des revêtements peu bruyants permettant un compromis raisonnable entre les performances acoustiques et les performances mécaniques du matériau. En particulier une proposition de méthode de travail concrète et des directives et recommandations pour la formulation et l'optimisation des revêtements peu bruyants sont proposées.

Dans ce chapitre introductif sont décrits la problématique générale de la recherche (Chapitre 1.1), les objectifs (Chapitre 1.2), les considérations générales sur le paquet de recherche "Revêtements peu bruyants à l'intérieur des localités" (Chapitre 1.3), les liens avec les autres projets partiels (Chapitre 1.4) et les centres de recherche responsables pour le présent projet partiel (EP1 – Einzelprojekt 1) (Chapitre 1.5). Ensuite, la méthodologie (programme de la recherche) est décrite en détail avec les différentes étapes composant la recherche (Chapitre 1.6) et finalement les implications des résultats de la recherche pour la pratique sont exposées (Chapitre 1.7).

Dans ce rapport nous utiliserons le terme "formulation" pour désigner toutes les opérations théoriques et pratiques visant à définir les paramètres d'une "recette". Celle-ci correspond au terme allemand "Rezeptur" communément retenu en Suisse.

1.1 Problématique

Le choix d'un revêtement routier spécifique peut être une solution efficace en matière de lutte contre le bruit. Cette solution peut s'avérer peu onéreuse comparativement à d'autres mesures aux effets comparables (parois antibruit, isolation acoustique des bâtiments, etc.). La mise en place de revêtements peu bruyants sur des axes à fort trafic est une pratique courante, mais leur utilisation sur des axes moins chargés et à l'intérieur des localités est encore peu courante.

La performance acoustique d'un revêtement peu bruyant est liée à plusieurs paramètres, tels que la qualité de sa texture en surface et sa durabilité dans le temps ou la rigidité globale du matériau. Une amélioration basée uniquement sur l'optimisation des caractéristiques acoustiques peut entraîner une détérioration des caractéristiques mécaniques des matériaux, car certaines propriétés conduisent à des comportements contradictoires. Par exemple, une texture ouverte améliore les performances acoustiques, mais peut réduire les performances mécaniques. Il convient donc de trouver un compromis raisonnable entre performances acoustiques et mécaniques, car il est très difficile d'améliorer simultanément toutes les caractéristiques favorables à un revêtement peu bruyant performant.

C'est pour répondre à cette problématique et analyser les lacunes relatives à la durabilité acoustique et mécanique des revêtements que le projet de recherche "EP1 : Formulation des revêtements peu bruyants (ASTRA 2010/010)" a été lancé au sein du projet partiel "TP1 : Recherche et innovation". Cette recherche de l'OFROU et de l'OFEV fait partie intégrante du nouveau paquet de recherche ayant pour thème les "Revêtements peu bruyants à l'intérieur des localités".

1.2 Objectifs de la recherche

En 2003, deux projets de recherche portant sur le thème des revêtements peu bruyants ont été initiés par l'OFROU [1] [2]. Dans ce cadre, des tronçons d'essais avec des revêtements peu bruyants (existants ou construits durant le projet) ont été étudiés pendant plusieurs années. Les bonnes expériences enregistrées dans le cadre de ce projet ont convaincu l'OFROU et l'OFEV d'entreprendre un paquet de recherche intitulé « Revêtements de routes peu bruyants à l'intérieur des localités » pour poursuivre les travaux effectués à ce jour autour de ce type de revêtement.

Le but de ce paquet de recherche « Revêtements de routes peu bruyants à l'intérieur des localités » est de :

- Favoriser l'utilisation des revêtements peu bruyants et donner une nouvelle impulsion au développement de ces matériaux,
- Accroître l'attractivité de ces revêtements peu bruyants et aboutir à une situation de Win-Win pour les propriétaires de routes.

Dans ce cadre, l'objectif du projet de recherche EP1 consiste en la mise au point d'une approche de formulation des revêtements peu bruyants permettant un compromis raisonnable entre les performances acoustiques et les performances mécaniques du matériau. Pour cela, il est attendu de fournir :

- Une proposition de méthode de travail concrète pour la formulation et l'optimisation des revêtements peu bruyants,
- Des directives et recommandations pour fixer des caractéristiques acoustiques et mécaniques des couches de surface des revêtements peu bruyants.

Pour y parvenir, les objectifs secondaires suivants sont proposés :

- Détermination et quantification des paramètres déterminants et des propriétés critiques pour les performances mécaniques et acoustiques des enrobés de surface peu bruyants,
- Proposition d'une méthode d'évaluation permettant de quantifier le potentiel de réduction et le comportement mécanique de l'enrobé et fournissant ainsi une aide à la décision pour les gestionnaires,
- Appui à la direction générale du projet et appui au projet partiel TP2 sur la mise en place de nouvelles sections tests,
- Coordination avec les autres projets de recherche individuels et fourniture de recettes de revêtements aux EP2 et EP4.

Afin de répondre aux objectifs, plusieurs paramètres relatifs à la recherche ont dû être déterminés au préalable (formules, teneurs en vides, choix des matériaux, caractéristiques des enrobés évaluées, etc.). Ces paramètres sont décrits en détail dans le chapitre 3.

1.3 Considérations générales – Paquet de recherche "Revêtements peu bruyants à l'intérieur des localités"

Le paquet de recherche "Revêtements peu bruyants à l'intérieur des localités" est divisé en trois projets partiels (Teilprojekte – TP) selon l'organigramme ci-dessous (Fig. 1) :

- TP1 : Recherche et innovation
- TP2 : Validation
- TP3 : Monitoring à long terme

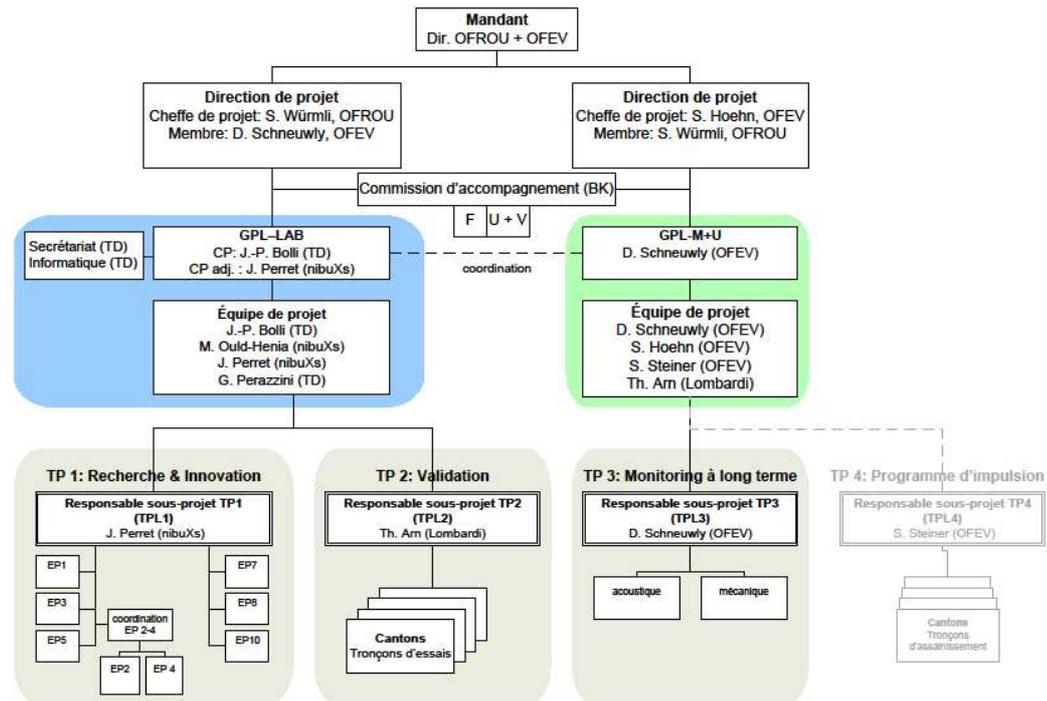


Fig. 1 Contexte général du paquet de recherche.

Le TP4 ne fait pas partie du paquet de recherche.

1.3.1 TP1 "Recherche et innovation"

Dans une première phase, le TP1 "Recherche et innovation" comprenait cinq projets individuels (Einzelprojekte – EP) avec comme objectifs de procéder à des recherches dans différents domaines ayant été sélectionnés :

- EP1 (ASTRA 2010/010) : Formulation des revêtements peu bruyants,
- EP2 (ASTRA 2010/011) : Détermination en laboratoire de la durabilité des revêtements peu bruyants,
- EP3 (ASTRA 2010/012) : Exploitation et entretien des revêtements peu bruyants,
- EP4 (ASTRA 2010/013) : Méthodes de contrôle en laboratoire des performances acoustiques des revêtements peu bruyants,
- EP5 (ASTRA 2010/014) : Amélioration de la qualité des méthodes de mesurages acoustiques.

Dans un second temps, trois autres projets individuels ont été ajoutés au TP1 :

- EP7 (ASTRA 2013/002) : Applicabilité en Suisse des revêtements peu bruyants innovants,
- EP8 (ASTRA 2013/003) : Évaluation de l'efficacité acoustique des mesures d'entretien des revêtements peu bruyants,
- EP10 (ASTRA 2013/004) : Sensibilité des propriétés acoustiques des revêtements peu bruyants à la variabilité de leur production en centrale.

Le présent rapport concerne uniquement le projet individuel EP1, les autres projets étant décrits dans des rapports séparés.

1.3.2 TP2 "Validation"

Le TP2 "Validation" a pour objectif de valider les connaissances acquises et les recommandations établies par les projets de recherches ASTRA 2004/006,

ASTRA2004/007 et ASTRA 2005/006 à travers la construction de sections tests et de leur suivi (comportement acoustique, comportement mécanique). Le TP2 est divisé en deux phases :

- Première phase : Poursuite de la réalisation des mesurages sur les sections existantes (construites en 2004), et organisation de la construction de nouvelles sections et revêtements (2010 et 2011) afin de valider les résultats du rapport final de 2007 [1],
- Deuxième phase : Intégration des travaux préliminaires des projets de recherche du TP1 pour la construction de nouvelles sections à partir de 2012.

1.3.3 TP3 "Monitoring à long terme et contrôle" et TP4 "Programme d'incitation pour des revêtements peu bruyants (RPT)"

Le TP3 "Monitoring à long terme et contrôle" et le TP4 "Programme d'incitation pour des revêtements peu bruyants (RPT)" font partie d'une autre étape de travail pilotée par l'OFEV. Le TP3 concerne le monitoring à long terme des sections tests et dans le cadre du TP4, L'OFEV, avec l'aide des cantons, va encourager dès 2012 l'implication du projet des revêtements peu bruyants sur les autres routes.

1.4 Liens entre le EP1, les projets individuels et les projets partiels

Les différents projets individuels et partiels présentent des liens étroits entre leurs objectifs et méthodologies respectifs. Concernant le présent projet individuel EP1, les liens principaux sont les suivants :

- Le EP1 est responsable de mettre au point une approche de formulation des revêtements peu bruyants permettant un compromis raisonnable entre les performances acoustiques et mécaniques du matériau. Les formules optimisées sont ensuite fabriquées et mises à disposition des différents projets individuels :
 - Le EP2 (Détermination en laboratoire de la durabilité des revêtements peu bruyants) est amené à appliquer les procédures d'essais en laboratoire développées aux échantillons issus du EP1.
 - Le EP4 (Méthodes de contrôle en laboratoire des performances acoustiques des revêtements peu bruyants) est amené à appliquer les procédures d'essais de prédiction des performances acoustiques développées aux échantillons issus du EP1.
- Le EP1 propose les paramètres de base de sa recherche (matériaux, types de revêtements, méthodes d'essais, etc.) et en discute avec les différents projets individuels ainsi que la direction générale du projet, afin de décider, en commun accord, des choix effectués.
- Le EP1 répond aux questions techniques et scientifiques spécifiques par rapport à la problématique de la formulation et de la mise en place de nouvelles sections tests dans le cadre du projet partiel TP2 (Validation).
- Le EP1 propose dans une deuxième phase des formules optimisées en tant que nouvelles sections tests dans le cadre du projet partiel TP2 (Validation).
- Le EP1 participe aux différentes réunions de coordination avec les autres projets individuels et tient le rôle de contact pour toute question relative à la problématique de la formulation.

Une coordination et communication solides sont nécessaires pour le bon déroulement des projets individuels mais également pour le bon déroulement du paquet de recherche global.

1.5 Centre de recherche responsable pour le EP1

Le Laboratoire des voies de circulation (LAVOC) de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) est le centre de recherche responsable pour le EP1. Pour certaines questions relatives à la problématique des mesures acoustiques, le LAVOC est assisté par le Laboratoire d'électromagnétisme et d'acoustique (LEMA) de l'EPFL.

1.6 Méthodologie – Programme de la recherche

Le programme de recherche est divisé en sept étapes majeures (Fig. 2), lesquelles sont décrites plus en détails dans les chapitres suivants (Chapitres 1.6.1 à 1.6.7).

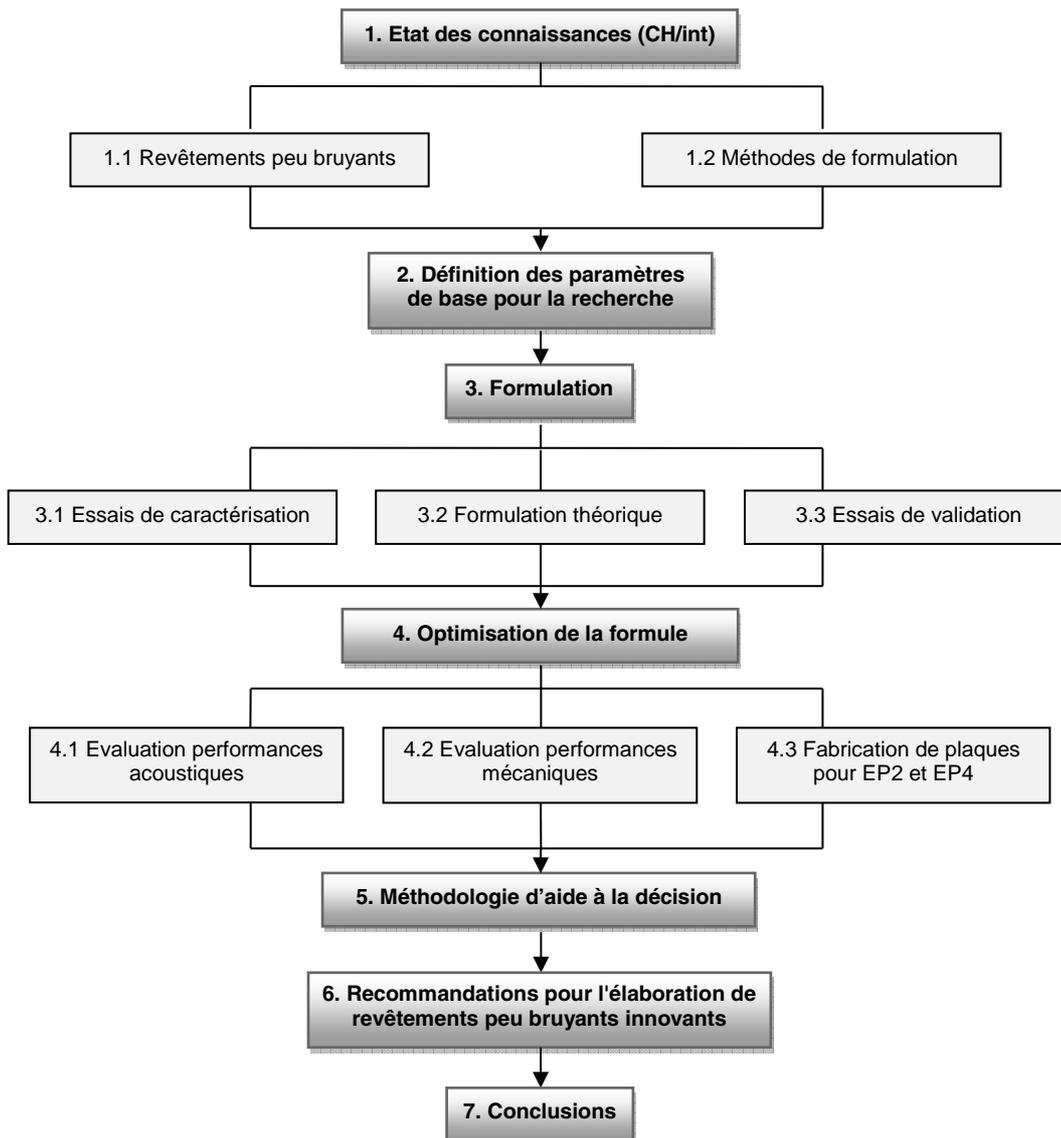


Fig. 2 Démarche générale.

1.6.1 Etape 1 : Etat des connaissances

L'état des connaissances s'est focalisé principalement sur les deux problématiques suivantes :

- Bruit routier et revêtements peu bruyants,
- Formulation des revêtements peu bruyants.

1.6.2 Etape 2 : Paramètres de base et priorités de la recherche

Dans la deuxième étape, les paramètres de base ainsi que les priorités de la recherche ont été discutés et déterminés. Certains paramètres ont été fixés par l'appel d'offre du projet global (p. ex. types de formulation généraux), d'autres ont été discutés lors des réunions entre la direction générale du projet et les représentants des divers projets individuels (p. ex. types de matériaux, caractéristiques évaluées). D'autres encore ont été choisis indépendamment mais en consultant les partenaires du projet (p.ex. types d'essais).

Les paramètres de la recherche englobent aussi bien les paramètres liés aux types de formules (enrobés types macrorugueux, poreux, etc.), aux types de matériaux (granulats, liants, etc.), aux caractéristiques des formulations (teneur en vides, teneur en liant, etc.), aux paramètres et essais d'optimisation mécanique et acoustique (sensibilité à l'eau, absorption acoustique, etc.), etc. Les paramètres de recherche retenus sont décrits en détail au chapitre 3.

Les priorités de la recherche ont également été discutées et choisies en collaboration avec la direction générale du projet et les représentants des projets individuels. Ces priorités ont permis de se focaliser dans un premier temps sur certains types de formules générales afin d'arriver à proposer des recettes pour la mise en place de sections tests.

1.6.3 Etape 3 : Formulation

L'étape de formulation a pour objectif de livrer des recettes de revêtements peu bruyants. Elle se divise en plusieurs parties. Tout d'abord, des essais de caractérisation des matériaux ont été effectués afin de déterminer les paramètres des matériaux nécessaires à la formulation. Il s'agit ici des essais "classiques", tels que la détermination de la pénétration des liants ou de la granulométrie des granulats.

Ensuite, la phase de formulation théorique a été effectuée. Pour ceci, une procédure de formulation basée sur la méthode de formulation volumique développée par le Centre de Recherches Routières (CRR) en Belgique a été utilisée [3]. Cette méthode de formulation analytique se base à la fois sur des observations expérimentales et sur des essais en laboratoire. Une procédure légèrement adaptée par le LAVOC a été employée dans ce projet [4]. Le logiciel PradoWIN, établi sur cette expérience, a été utilisé pour la formulation théorique.

Par la suite, une phase de validation en laboratoire, basée sur la maîtrise de la teneur en vides (valeur cible), a été effectuée. Les essais de validation en laboratoire sont indispensables afin d'évaluer les résultats théoriques obtenus par l'approche théorique (ou analytique). Ils ont également pour objectif d'identifier et quantifier le biais entre la formulation théorique et la réalité obtenue en laboratoire. La validation s'est fait principalement à l'aide de l'essai Marshall et de la Presse à Cisaillement Giratoire (PCG). Cette phase a en outre permis de déterminer certaines conditions de base concernant les essais effectués dans le cadre du projet de recherche (p.ex. choix de la méthode de détermination des vides, correspondance entre différentes méthodes de compactage, etc.).

1.6.4 Etape 4 : Optimisation de la formule

L'optimisation de la formule s'est effectuée sur la base de la formulation théorique et de l'analyse de sensibilité des paramètres déterminants. Pour ceci, l'incidence d'un changement des paramètres déterminants sur les performances relatives au comportement mécanique respectivement au comportement acoustique a été évaluée. Différents paramètres ont été évalués, tels que le type de matériaux (granulats, liants), la teneur en vides, la teneur en liant, etc.

L'optimisation mécanique de la formule a été effectuée en évaluant les performances potentiellement critiques des enrobés préalablement formulés. Pour ceci, différentes caractéristiques et performances ont été analysées (sensibilité à l'eau, maniabilité, stabilité mécanique, résistance à l'orniérage, etc.).

L'évaluation des performances acoustiques et des propriétés critiques relatives au comportement acoustique a été effectuée en laboratoire pour les différentes fabrications. Pour cela, des mesures en tube d'impédance (ISO 10534-1 et ISO 10534-2) ont été réalisées afin d'évaluer l'absorption acoustique des différentes fabrications.

Finalement, les formulations optimisées ont été fabriquées et mises à disposition des projets individuels EP2 et EP4.

1.6.5 Etape 5 : Méthodologie d'aide à la décision

Dans l'étape précédente (étape 4), le comportement mécanique et acoustique des différentes formulations ont été évalués séparément, ceci en vue d'une optimisation. Cependant, certaines propriétés du mélange conduisent à un comportement contradictoire entre les performances acoustiques et le comportement mécanique (texture ouverte, rigidité du matériau). Ainsi, la procédure de choix doit faire l'objet d'une pesée d'intérêts. Selon les conditions relatives au projet, le gestionnaire peut favoriser les critères de comportement mécanique ou alors favoriser les critères relatifs au comportement phonique. Pour cela, une méthodologie simple d'aide à la décision a été proposée. Elle permet de choisir le type de revêtement adapté à une problématique concrète.

1.6.6 Etape 6 : Recommandations pour l'élaboration de revêtements peu bruyants innovants

Les recommandations proposées concernent la méthodologie pour la formulation des enrobés peu bruyants à l'intérieur des localités et la mise en évidence des paramètres importants à maîtriser.

1.6.7 Etape 7 : Conclusions

Sur la base de la méthode de formulation et de la méthodologie d'aide à la décision, des conclusions sur l'élaboration de revêtements peu bruyants innovants sont proposées. Ces conclusions permettent également de mettre en évidence de potentiels axes de recherches futures et proposer des adaptations des normes suisses en vigueur sur cette thématique.

1.7 Implications pour la pratique – Contributions

Les contributions du projet de recherche se traduisent par la mise au point d'une approche de formulation des revêtements peu bruyants et d'une méthodologie d'aide à la décision permettant un compromis raisonnable entre les performances acoustiques et les performances mécaniques du matériau. Le projet vise des contributions très pratiques, permettant une large utilisation des résultats obtenus.

A travers la proposition de recommandations pour l'élaboration de tels revêtements innovants, des adaptations de certaines normes suisses ont également pu être effectuées (valeurs limites, conditions d'essais, etc.).

2 Etat des connaissances

Dans un premier temps, la problématique générale du bruit routier est brièvement abordée (Chapitre 2.1), ensuite, les recherches sur les revêtements peu bruyants au niveau national et international ainsi que les nouvelles tendances sont discutées (Chapitre 2.2), puis la problématique de la formulation des revêtements peu bruyants est examinée plus en détail (Chapitre 2.3).

2.1 La problématique du bruit routier [1] [5] [6] [7]

Le bruit routier est un son provoqué d'une part par les véhicules routiers et d'autre part par l'interaction entre les véhicules et la chaussée. Dans ce chapitre est donné un bref aperçu de la provenance du bruit routier (Chapitre 2.1.1) et des principales méthodes de mesure du bruit (Chapitre 2.1.2).

2.1.1 Provenance du bruit routier

Le bruit routier provient de deux sources différentes :

- Bruit de roulement : Bruit provoqué par l'interaction entre les véhicules et la route, plus spécifiquement par le contact entre les pneus des véhicules et la couche de surface de la chaussée¹.
- Bruit de moteur : Bruit provoqué par le moteur des véhicules.

Le bruit de moteur est prédominant pour des vitesses faibles (inférieures à 35 km/h pour les véhicules légers ; inférieures à 60 km/h pour les poids lourds). À l'intérieur des localités, où les vitesses sont faibles, les véhicules légers sont donc les principaux responsables du bruit de roulement.

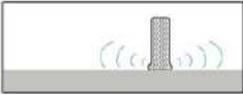
Plusieurs facteurs ont une influence directe sur le bruit de roulement et peuvent faire fortement varier sa formation et sa propagation :

- Facteurs relatifs au véhicule : Vitesse de roulement, charge, catégorie de véhicule, etc.
- Facteurs relatifs à la chaussée : Epaisseur de la couche de roulement, texture, porosité, etc.
- Facteurs relatifs aux pneus : Profil, pression, largeur, etc.
- Facteurs météorologiques : Température, vent, humidité, etc.
- Autres facteurs : Comportement des usagers, etc.

Dans le présent projet, seul le bruit de roulement est discuté. La formulation de revêtements peu bruyants à l'intérieur des localités s'intéresse plus spécifiquement aux facteurs relatifs à la chaussée pour des vitesses de roulement faibles. Il est estimé que le potentiel de réduction du bruit d'une chaussée peut atteindre 10 dB(A), alors que celui des pneus est évalué entre 1 et 3 dB(A) [5].

Les divers effets impliqués dans la formation et la propagation du bruit de contact pneu-chaussée sont énumérés dans la figure ci-après (Fig. 3). Notons que l'importance des différents effets sur le bruit total n'est encore actuellement pas clarifiée de manière formelle dans la littérature.

¹ Pour plus d'informations : <http://www.etiquette-pneus.ch>.

	Effet	Fréquence	Importance		
Formation du son	Impulsions mécaniques	Impulsions exercées sur les pneus par le contact entre la texture du revêtement et les éléments de profil du pneumatique.	dépend de la vitesse, mais en tous les cas inférieure à 1250 Hz.	+++	
		Stick-slip: secousse des éléments de profil du pneu. Dans le cas extrême, audible sous la forme d'un « crissement » dans les virages.	élevée > 1250 Hz	+	
		Stick-Snap: adhésion entre le profil du pneu et la chaussée.	élevée > 1250 Hz	+	
Propagation du son	Impulsions aérodynamiques	Air-Pumping: compression, puis détente soudaine de l'air piégé entre les pneumatiques et les espaces vides non communicants de la chaussée.	élevée > 1250 Hz	++	
					
Propagation du son	Amplification du son	Effet dièdre (horn effect): réflexions successives de l'onde sonore dans le dièdre formé par le pneumatique et la chaussée, dont la conséquence est une amplification du son.	1-3 kHz	+?	
	Absorption du son (acoustique)	Les vides communicants contenus dans le revêtement absorbent non seulement le bruit de contact pneu-chaussée, mais également le bruit de moteur. Cet effet est d'autant plus prononcé que la perméabilité des revêtements est élevée.	Absorption maximale dépend de l'épaisseur de la couche	+++	
	Absorption du son (mécanique)	Les revêtements souples et élastiques ainsi que ceux qui présentent un pouvoir absorbant élevé sont les moins bruyants, car ils réduisent les impulsions sur les pneumatiques et/ou la propagation du son.	Absorption maximale d'env. 1 kHz	++	

Source: Rapport de synthèse 2003, OFEV/OFROU 2004, élargi

Fig. 3 Effets impliqués dans la formation et la propagation du bruit de contact pneu-chaussée [1].

Le revêtement peut influencer directement ces effets impliqués dans la formation et la propagation du bruit de contact pneu-chaussée. Quatre paramètres principaux sont responsables de la génération du bruit de roulement : la rugosité, la granulométrie, la porosité et l'épaisseur de la couche de roulement. Pour la formulation de revêtements peu bruyants, il convient de trouver un bon compromis entre ces paramètres, responsables du comportement acoustique d'une chaussée, et les paramètres mécaniques, responsables du comportement mécanique et ainsi de la durée de vie d'une chaussée.

Les paramètres des revêtements intervenant dans la réduction et/ou de l'augmentation du bruit de roulement sont discutés plus en détail dans le chapitre 2.3.2.

2.1.2 Méthodes de mesure du bruit routier

Il existe plusieurs méthodes de mesure du bruit routier. Il convient dans un premier temps de distinguer les méthodes permettant de mesurer le bruit routier total sur une chaussée et les méthodes mesurant un ou plusieurs paramètres ou caractéristiques intervenant dans la formation du bruit routier total. De même, l'on peut distinguer des méthodes in situ et des méthodes en laboratoire.

À l'échelle européenne, deux niveaux de pression acoustique peuvent être mesurés : le niveau de pression acoustique maximal (L_{max}), surtout utilisé en Allemagne et en France,

et le niveau de pression acoustique continu équivalent (L_{eq}), utilisé en Suisse. La mesure du niveau L_{eq} permet d'intégrer le changement du niveau sonore au passage d'un véhicule, alors que la mesure du niveau L_{max} ne s'intéresse qu'à la pression acoustique maximale. En Suisse, il existe également un modèle de calcul (STL-86+), utilisé comme modèle de référence, permettant d'évaluer le niveau de pression acoustique continu équivalent.

Les principales méthodes de mesure du bruit routier total in situ sont :

- Mesurage statistique au passage (SPB – ISO 11819-1) : Mesurage en champ lointain du niveau de pression acoustique maximal L_{max} et de la vitesse d'un nombre statistiquement suffisant de véhicules isolés, classés selon différentes catégories de véhicules (véhicule léger, poids lourd bi-axes, poids lourd multi-axes), puis interpolation linéaire du niveau de bruit pour une vitesse de référence. À partir de cette interpolation, l'indice statistique au passage SPBI peut être calculé en intégrant une correction liée à la température réelle du revêtement. La mesure se déroule dans des conditions de trafic normales, c.-à-d. durant un trafic fluide et non contrôlé.
- Méthode au passage dans des conditions contrôlées (CPB) : La méthode CPB est une adaptation de la méthode SPB. La différence réside dans le fait que les mesures sont effectuées dans des conditions de trafic contrôlées, c.-à-d. sur un nombre limité de véhicules équipés spécifiquement avec différents pneumatiques connus. Le passage des véhicules peut se faire à moteur éteint, afin de mesurer uniquement le bruit de roulement.
- Close-Proximity Method (CPX – ISO 11819-2) : Mesurage en champ proche du bruit provoqué par le contact pneu-chaussée d'une remorque spécifique. La remorque est équipée de pneumatiques définis et de plusieurs microphones situés proches de l'emplacement de formation du bruit. Le niveau sonore enregistré est par la suite interpolé pour une vitesse de référence et une valeur moyenne est calculée sur le tronçon testé. La moyenne des valeurs calculées pour différents types de pneumatiques correspond au Close-Proximity Sound Index (CPXI), utilisé pour la comparaison du niveau sonore d'une route.

Les méthodes mesurant un ou plusieurs paramètres ou caractéristiques intervenant dans la formation du bruit routier total sont nombreuses. Nous pouvons mentionner ici la méthode du tube d'impédance qui permet de mesurer le spectre d'absorption acoustique d'un revêtement en laboratoire. Il s'agit ici de mesurer l'absorption du son d'un échantillon ou d'une carotte placés dans un tube.

D'autres méthodes s'intéressent à mesurer les caractéristiques de texture d'un revêtement, caractéristiques fortement liées aux performances acoustiques d'une chaussée. L'on peut mentionner la méthode de la tache de sable (mesure de la profondeur moyenne de la texture), la méthode du profilomètre (mesure des caractéristiques de la texture à l'aide d'un appareil de mesure au laser), la mesure d'écoulement (mesure de la porosité d'un revêtement) ou la mesure de la perméabilité (mesure de la porosité (vides connectés) d'un revêtement).

Les méthodes utilisées dans le cadre de ce projet de recherche seront décrites plus en détail dans le chapitre 3.3.

2.2 Revêtements peu bruyants à l'intérieur des localités

La problématique des revêtements peu bruyants a déjà été largement étudiée dans la littérature. Néanmoins, une grande majorité des recherches concernent la mise en place de revêtements hors localités. La spécificité des revêtements à l'intérieur des localités réside principalement dans la différence des conditions de trafic (vitesses inférieures, manœuvres plus fréquentes, etc.).

Dans le présent chapitre, certains projets de recherche importants sur cette thématique et leurs résultats sont brièvement discutés. Dans un premier temps, les principales recherches au niveau suisse sont décrites (Chapitre 2.2.1), puis quelques recherches au

niveau international et quelques projets européens (Chapitre 2.2.2) sont exposés. Une importance toute particulière est portée à la problématique des revêtements à l'intérieur des localités.

Des considérations plus spécifiques par rapport aux types de revêtements et leurs paramètres intervenant dans les performances acoustiques sont discutées dans le chapitre 2.3.

2.2.1 Recherches nationales

Au niveau suisse, plusieurs recherches existantes concernent la problématique des revêtements peu bruyants. Il convient de distinguer les projets s'intéressant aux revêtements à l'intérieur des localités, des revêtements hors localités. En effet, ces derniers sont sollicités de manière différente (différentes vitesses, différentes charges, etc.), et ils sont surtout sujets à un phénomène d'auto-nettoyage des vides à la surface due à la vitesse de roulement élevée des véhicules sur les revêtements.

Si plusieurs revêtements peu bruyants ont déjà été mis en place à l'intérieur des localités en Suisse, leur utilisation est encore très limitée actuellement. Certains cantons ont pris le devant sur le domaine de la recherche et ont mis en place ces revêtements déjà avant l'année 2003, mais sans suivi détaillé du comportement acoustique et mécanique. Ce n'est qu'en 2003 qu'un grand projet d'envergure a été lancé sur les revêtements peu bruyants en localité (Chapitre 2.2.1.1).

2.2.1.1 Revêtements peu bruyants à l'intérieur des localités [1] [2] [7]

Le projet de recherche "Revêtements peu bruyants à l'intérieur des localités" a été lancé en 2003 suite à la publication d'un rapport commun OFROU/OFEV en 2002 sur la problématique du bruit routier dans les localités [5]. Le projet avait comme objectif d'étudier les différents paramètres des revêtements peu bruyants à l'intérieur des localités sur des tronçons existants et des tronçons neufs, mis en place spécifiquement pour cette recherche. Une grande importance a été portée à la notion de durabilité des revêtements, aussi bien au niveau acoustique que mécanique, en effectuant un suivi continu de différentes sections tests.

Différents types de revêtements peu bruyants (plus de détails sur les différents types de revêtements existants sont donnés au chapitre 2.3.1) ont été choisis pour les sections pilotes (enrobés drainants, enrobés macrorugueux, Splittmastixasphalt, produits d'entreprises, etc.). Un aperçu des sections qui ont été choisies pour le projet sont énumérées dans les figures ci-après (Fig. 4, Fig. 5).

Le suivi de ces sections pilotes et existantes s'est intéressé aussi bien au comportement acoustique qu'au comportement mécanique. Les relevés acoustiques ont été effectués à l'aide de la méthode de mesurage statistique au passage (SPB) et la comparaison s'est faite à l'aide du modèle STL-86+. Concernant le comportement mécanique, plusieurs caractéristiques ont été mesurées, dont certaines uniquement au moment de la pose (analyse de carottes, qualité antidérapante, etc.) et d'autres tout au long du suivi (texture, rugosité, etc.).

Types de revêtements posés sur les tronçons pilotes nouveaux.

Tronçon pilote	Nouveau revêtement pilote	Provenance des grains	Longueur [m]	TJM	Date de pose
Kreuzlingen TG	PA 4/PA 8 bicouche ³	Walliswil	150	11500	04.08.2004 ³
Sargans SG	PA 8/PA 16 bicouche ¹	Hagerbach	320	6170	17.09.2004 ¹
Tourtemagne VS	SPA 4	Famsa	550	14500	28.09.2004
	AC MR 4 EOS granulats caoutch.	Stahl Gerlafingen	250		29.09.2004
	AC MR 4 EOS	Stahl Gerlafingen	250		29.09.2004
	AC MR 4	Famsa	550		30.09.2004
Sargans SG	AC MR 4	Gasperini	300	6170	20.09.2004
	AC MR 8 EOS granulats caoutch.	Stahl Gerlafingen	300		13.09.2004
Zuchwil SO	AC MR 8 EOS	Stahl Gerlafingen	180	8924	31.08.2004
Lucerne LU	Whisper-Grip [®] ²	Chromerzschlacke	150	16100	31.08.2004 ²
Altendorf SZ	SPA 8 épaisseur 15 mm ²	Gasperini	110	14500	06.10.2005 ²
	SPA 8 épaisseur 20 mm ²	Gasperini	130		06.10.2005 ²

¹ Supprimé de la campagne de mesurage à partir de 2006 en raison d'un important arrachement de grains ou du remplacement du revêtement.

² Supprimé de la campagne de mesurage à partir de 2007 en raison d'une réduction insuffisante du bruit.

³ PA4 / PA8 remplacé à l'été 2011.

Fig. 4 Sections pilotes évaluées dans le projet "Revêtements peu bruyants à l'intérieur des localités" [2] (2010).

Revêtements silencieux existants intégrés dans le programme.

Tronçon pilote	Nouveau revêtement pilote	Provenance des grains	Longueur [m]	TJM	Date de pose
Leuggern AG	PA 8 ⁵		90	2000	2004
	SPA 8		90	2000	
	MA 8 gravillonnage 2/4		60	2000	
	MA 8 gravillonnage 3/6		60	2000	
Sargans SG	AC 11		320	6170	2004
Sessa TI	AC 11 Leca	Gasperini	1000	1086	2002
Bellinzona TI	AC 11 Leca	Gasperini	320	19800	2004
Les Evouettes VS	Colsoft 8 [®] ⁴			6000	2002 ⁴
Grossgurmels FR	Wecophone 6 [®]	Famsa	600	10400	2003

⁴ Mesurages pas effectués tous les ans en raison d'une réduction insuffisante du bruit.

⁵ PA8 plus mesuré en 2010 en raison d'un important arrachement de grains.

Fig. 5 Sections existantes évaluées dans le projet "Revêtements peu bruyants à l'intérieur des localités" [2] (2010).

Si certains revêtements ont montré de bons comportements acoustiques, d'autres ont rapidement montré une détérioration de ces caractéristiques. La même constatation a pu être faite pour le comportement mécanique des différents types de revêtements. En ce qui concerne le comportement acoustique, l'évolution des performances acoustiques entre 2003 et 2008 respectivement 2010 est donnée dans les figures ci-après (Fig. 6, Fig. 7 et Fig. 8).

Le graphique présente les écarts par rapport au modèle STL-86+ utilisé en Suisse. Les valeurs sont corrigées en température. Les mesurages pour les revêtements n'atteignant plus l'objectif de -1 dBA pour le trafic VL ou mixte ont été interrompus (tronçons pilotes entre parenthèses). Les tronçons où les valeurs reposent sur moins de 10 passages de PL sont marqués d'un astérisque (*); ceux où les passages de PL étaient inférieurs à 4 ne sont pas représentés.

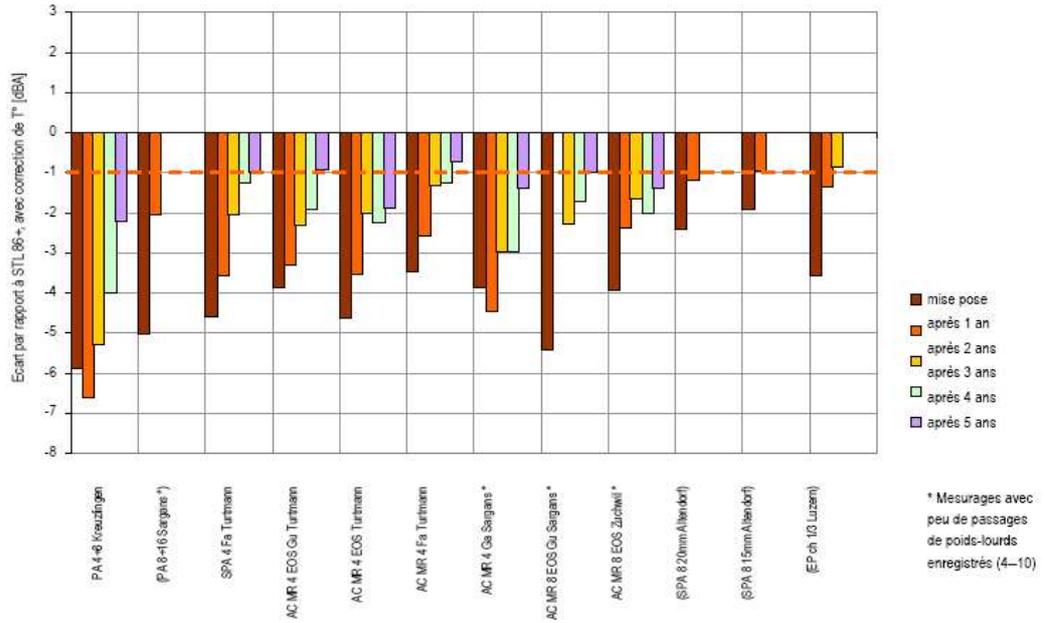


Fig. 6 Evolution du comportement acoustique des sections pilotes évaluées dans le projet "Revêtements peu bruyants à l'intérieur des localités" [2] (2008 & 2010).

Le graphique présente les écarts par rapport au modèle STL-86+ utilisé en Suisse. Les valeurs sont corrigées en température. Les mesurages pour les revêtements n'atteignant plus du tout l'objectif de -1 dBA pour le trafic VL ou mixte ont été interrompus (tronçons pilotes entre parenthèses). Les tronçons où les valeurs reposent sur moins de dix passages de PL sont marqués d'un astérisque (*); ceux où les passages de PL étaient inférieurs à quatre ne sont pas représentés.

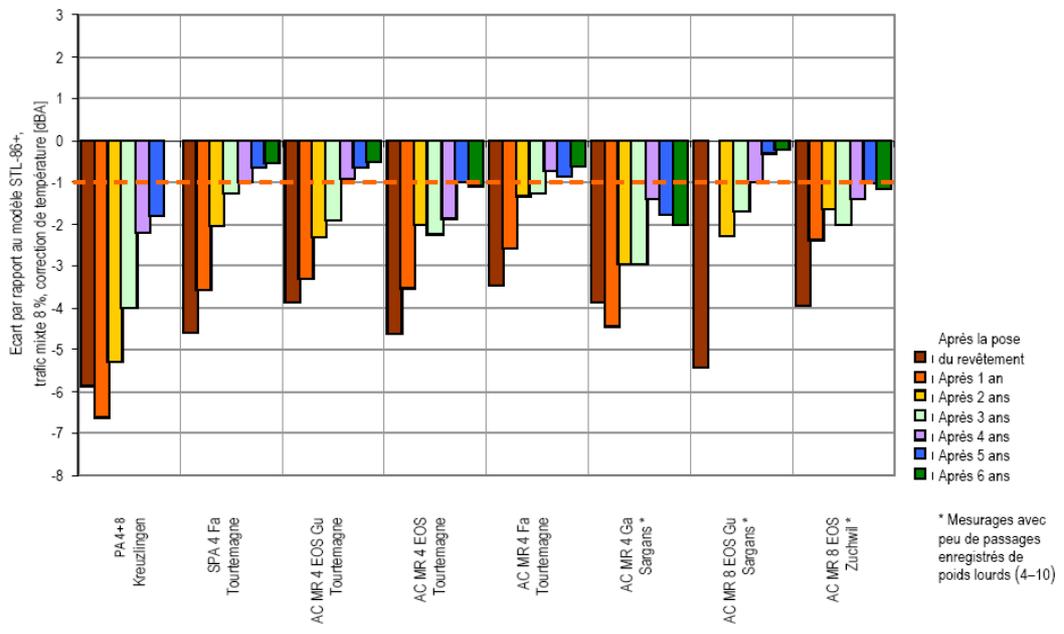


Fig. 7 Evolution du comportement acoustique des sections pilotes évaluées dans le projet "Revêtements peu bruyants à l'intérieur des localités" [2] (2008 & 2010).

Le graphique présente les écarts par rapport au modèle STL-86+ utilisé en Suisse. Les mesurages pour les revêtements n'atteignant plus l'objectif de -1 dBA pour le trafic VL ou mixte ont été interrompus (tronçons pilotes entre parenthèses). Les valeurs sont corrigées en température. Les tronçons où les valeurs reposent sur moins de 10 passages de PL sont marqués d'un astérisque (*); ceux où les passages de PL étaient inférieurs à 4 ne sont pas représentés.

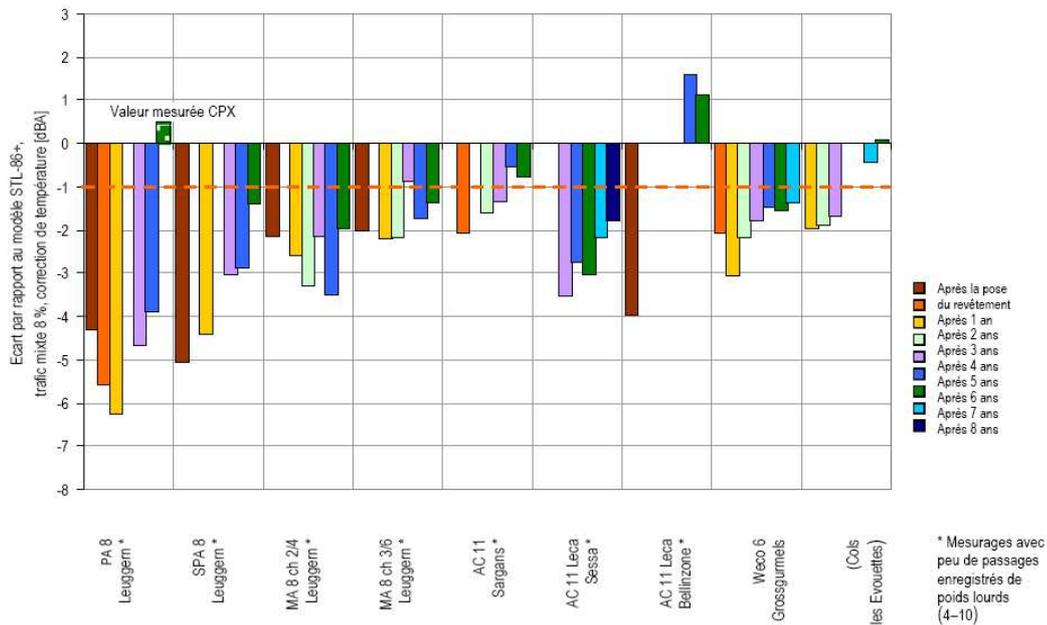


Fig. 8 Evolution du comportement acoustique des sections existantes évaluées dans le projet "Revêtements peu bruyants à l'intérieur des localités" [2] (2010).

Concernant le comportement mécanique, les constatations suivantes ont pu être faites :

- Les contraintes mécaniques modifient significativement la surface de la chaussée avec le temps. De manière générale, une densification et un lissage de la texture de surface ont surtout été observées. Deux tendances principales se dégagent :
 - Diminution de la profondeur moyenne du profil due aux déformations thermomécaniques permanentes de la matrice et abrasion des grains (revêtements denses et semi-denses) et ainsi diminution des caractéristiques acoustiques.
 - Augmentation de la profondeur moyenne du profil due à l'arrachement de grains dans un premier temps (revêtements poreux et avec grains de caoutchouc), puis tendance similaire à celle des revêtements denses et semi-denses. Les deux phénomènes sont accompagnés d'une diminution des caractéristiques acoustiques.
- Le MA 8 avec un gravillonnage 3/6 à Leuggern présente une profondeur moyenne du profil relativement importante et stable dans le temps, ainsi qu'une qualité acoustique stable.
- Les autres valeurs caractéristiques de la macrotecture (facteur de forme g et longueur d'ondes pour la profondeur de profil maximale λ (A_{max})) ne sont pertinentes que dans certaines conditions.
- Le gain acoustique initial est fonction de la teneur en vides des revêtements. Une teneur élevée correspond à un gain plus élevé.

Les conclusions principales qui ont pu être tirées de cette recherche sont les suivantes :

- De manière générale, les revêtements présentent une diminution asymptotique des performances acoustiques.
- Les revêtements avec une granulométrie fine (4 mm) présentent les meilleures qualités acoustiques.
- Des expériences positives ont été faites sur les tronçons pilotes avec des enrobés contenant un volume de vides de 8 à 16 % (revêtements semi-denses).
- Les propriétés acoustiques des revêtements ont été mieux conservées dans le cas de tronçons à faible trafic (Leuggern, Sessa) que dans le cas de tronçons soumis à un trafic dense.
- Dans le cas des revêtements semi-denses, le vieillissement acoustique évolue de manière asymptotique en fonction de la charge de trafic, c'est-à-dire que la détérioration ralentit avec le temps. Les enrobés de granulométrie fine (4 mm) conservent mieux leurs qualités acoustiques que ceux aux grains plus gros (8 mm).
- Le revêtement AC MR 8 de Zuchwil a été nettoyé après le passage de 3 millions de véhicules (après 3 ans). Une amélioration acoustique a été obtenue grâce au nettoyage, mais uniquement à court terme.
- Dans le cas des revêtements drainants, les revêtements présentent une excellente réduction du bruit après la mise en place et selon le type pendant les premières années, mais perdent ensuite rapidement leurs caractéristiques acoustiques favorables. Des pores bouchés et des arrachements de grains semblent être responsables de cette diminution. Le PA 8 de Leuggern a complètement perdu son bon comportement acoustique suite à des arrachements de grains importants. Le PA 4+8 de Kreuzlingen a, lui, dû être remplacé.
- Au cours des premiers mois, l'abrasion du film de liant bitumineux superficiel des revêtements drainants libère, sous l'action du trafic, davantage de pores communicants et améliore l'absorption acoustique du revêtement durant les premières années.
- Un nettoyage intensif à haute pression/succion a été effectué sur un revêtement drainant (PA 4+8 Kreuzlingen) mais sans résultats positifs.
- Le revêtement drainant bicouche de Sargans a présenté un gain acoustique initial très favorable mais a été détruit rapidement en raison de défauts de construction (compactage insuffisant), combinés à d'importantes contraintes de cisaillement.
- Parmi les revêtements pour lesquels la circulation est intense, seul le Weco 6 de Grossgurmels est en mesure de respecter l'objectif fixé de -1 dB(A). Son comportement au vieillissement correspond à celui des revêtements nouveaux avec granulats de calibre 4 mm.
- Les tronçons pilotes de Leuggern présentent des caractéristiques particulières. Ils se situent en dehors de localités, où les véhicules roulent à des vitesses plus élevées que sur les autres tronçons pilotes, et en zone rurale (présence de boue). Il est donc possible de comparer les revêtements de cette commune entre eux. En revanche, la comparaison avec les autres tronçons pilotes requiert une certaine prudence.

Le projet de recherche préconise les solutions suivantes pour des revêtements peu bruyants à l'intérieur des localités :

- Solution normalisée : AC MR 4 ou AC MR 8 conformément à SN 640 431-1b-NA [35] avec une teneur en vides située entre 6 et 10 vol.-%.
- Solution non normalisée : AC MR 4 ou AC MR 8 avec une teneur en vides élevées située entre 10 et 14 vol.-%.
- L'utilisation généralisée des revêtements PA à l'intérieur des localités n'est actuellement pas recommandée. La durabilité technique de ce type de construction doit encore être optimisée.

2.2.1.2 Autres recherches

Plusieurs recherches dans le domaine du bruit routier ont été menées ou sont encore en cours d'investigation en Suisse. On peut mentionner des projets s'intéressant à l'émission du bruit (moteur, pneus, ponts, carrefours, etc.), à la propagation du bruit (mesures antibruit, mesures du niveau acoustique, facteurs d'influence, modèles de calcul, etc.), mais également à la problématique plus spécifique de l'interaction bruit de roulement – chaussée. Dans ce chapitre sont décrits certains résultats intéressants par rapport à ce dernier sujet.

Lärmverhalten verschiedener Belagsoberflächen – VSS 1992/006 – Rapport n°462 [8]

Cette recherche avait pour objectif d'évaluer les émissions de bruit de différentes surfaces routières et d'analyser leurs facteurs d'influence à l'aide d'un Lärmessanhägrer (LMA). Environ 4000 mesures ont été effectuées sur presque 500 tronçons de 1985 à 1999. Différentes surfaces ont été évaluées du point de vue de leur niveau de bruit mais également pour analyser les fréquences déterminantes. Les surfaces ont par la suite été classées en quatre catégories :

- Surfaces avec un niveau de bruit "bas à moyen" et un maximum de la gamme à 1.6 kHz (AC 11, AC 16, AC MR 11, SMA 11, SMA 16, etc.).
- Surfaces avec un niveau de bruit "haut" et un maximum de la gamme proche de 1.0 kHz (béton de ciment, GA, etc.).
- Surfaces drainantes avec un niveau de bruit "bas" pour des revêtements neufs et un niveau "haut" pour des revêtements colmatés et un maximum de la gamme proche de 1.0 kHz. Les enduits superficiels se trouvent dans la même catégorie.
- Surfaces avec un niveau de bruit "très bas" et un maximum de la gamme à 1.6 kHz (SMA 6, SMA 8, enduit superficiel 3/6, etc.).

Parmi différents facteurs d'influence examinés, plusieurs ont un impact direct sur le comportement acoustique des revêtements dont les plus importants sont :

- Température de surface : La température de surface s'est avérée être le facteur le plus important. En effet, le niveau de bruit augmente fortement pour des températures plus faibles. Cette influence est la plus marquée pour les revêtements drainants.
- Grain le plus grand : Surtout pour les SMA, une diminution du grain le plus grand a comme influence une diminution du niveau acoustique.
- Vitesse : A vitesse de mesure plus faible, le niveau de bruit est plus faible.
- Age du revêtement : Pour les revêtements denses, l'âge n'a aucune influence significative sur le niveau de bruit et les fréquences déterminantes. Pour les revêtements drainants et semi-denses, une diminution du niveau de bruit avec l'âge des revêtements a été constatée, mais sans changement distinctif des fréquences déterminantes.
- Planéité et adhérence : Aucune influence significative entre la planéité et l'adhérence d'un revêtement et son niveau de bruit n'a été détectée.

Mechanische Eigenschaften von Drainasphalt, Grundlagen für Normierung – VSS 1999/280 – Rapport n°1185 [9]

Cette recherche avait pour objectif d'évaluer le comportement mécanique des revêtements drainants (PA) à l'aide d'essais mécaniques sélectionnés. Finalement des recommandations sur les caractéristiques des PA ont pu être déterminées. La problématique du bruit de roulement n'a pas été abordée dans cette recherche, mais des directives importantes sur le comportement mécanique des revêtements drainants y sont décrites.

La recherche a confirmé les performances requises suivantes pour les PA :

- Teneur en vides : PA 8 \geq 20% ; PA 11 \geq 22% ; compactage Marshall 2x50 coups pour la détermination du compactage maximum et 2x25 coups pour l'examen des caractéristiques mécaniques.
- Teneur en liant : PA 8 \geq 5% ; PA 11 \geq 4%.
- Sensibilité à l'eau : ITS \geq 70%.

En outre la recherche a conduit à recommander les modifications suivantes :

- Réduction du compactage Marshall à 2x25 coups ou 40 girations pour le compactage à la presse à cisaillement giratoire (PCG) pour la détermination des performances mécaniques.
- Perméabilité à l'eau verticale et horizontale > 1 (10^{-3} m/s).
- Perte de matériau : \leq 20% (25°C, 300 cycles) ; \leq 50% (-10°C, 300 cycles).

Et les directives supplémentaires suivantes pour les essais mécaniques des PA ont été définies :

- Vides communicants \geq 70%.
- Perméabilité in situ : \geq 15 l/min (initiale) ; \geq 10 l/min.
- Perte de matériau : comportement au froid : \leq 50% (-10°C, 300 cycles).
- Rigidité \geq 3200 MPa (25°C, 4 Hz).
- Résistance à la traction indirecte : ITS = 1.5 MPa (5°C) ; ITS = 0.5 MPa (25°C).
- Essai de traction directe : DTT = 1.5 MPa.

Lärmverhalten von Deckschichten im Vergleich zu Gussasphalt mit konstruierter Oberfläche – VSS 2003/503 – Rapport n°1262 [10]

Cette recherche avait pour objectif d'évaluer le comportement acoustique de différents types de revêtements sur une planche d'essai à l'aide de la méthode de mesurage statistique au passage (SPB). Six types de revêtements ont été mis en place pour cette recherche sur une route cantonale dans le canton d'Argovie :

- Splittmastixasphalt SMA 8.
- Béton bitumineux AC 8.
- Revêtement macrorugueux AC MR 8 (selon ancienne norme en vigueur ; teneur en vides maximale de 7%).
- Revêtement drainant PA 8.
- Asphalte coulé avec gravillonnage 3/6 mm MA 8 (3/6).
- Asphalte coulé avec gravillonnage 2/4 mm MA 8 (2/4).

Les conclusions qui ont pu être tirées du suivi de cette planche d'essai sont les suivantes (Fig. 9) :

- Les couches de surface en SMA et AC sont les plus bruyantes.
- Les couches de surface en AC MR et en PA sont les plus silencieuses.
- Les couches de surface en MA se situent entre les deux premiers groupes.

Ces résultats ont été obtenus aussi bien à vitesse élevée (≈ 80 km/h) qu'à vitesse faible (≈ 50 km/h).

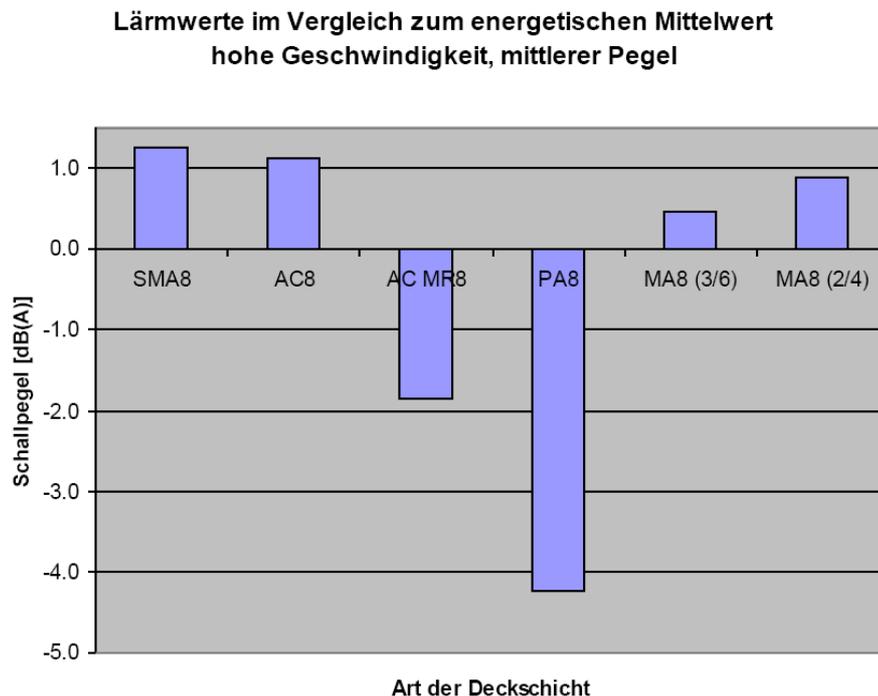


Fig. 9 Comparaison du niveau acoustique des différents types de revêtements [10].

Stripping bei lärmindernden Deckschichten unter Überrollbeanspruchung im Labormaßstab – VSS 2007/502 – Rapport n°1335 [11]

Cette recherche avait pour objectif d'évaluer la durabilité des couches de roulement peu bruyantes (PA et AC MR) par rapport au phénomène de désenrobage. Pour ce faire, des carottes ont été sollicitées à l'aide d'un simulateur de trafic à l'échelle 1:3 (Model Mobile Load Simulator MMLS3) sous l'eau et à sec. Le simulateur permettait de simuler l'effet de pompage se produisant lors du passage des roues sur une surface mouillée. Ensuite, l'endommagement de la zone proche de la surface a été contrôlé à l'aide de plusieurs essais.

Les carottes ont été prélevées sur huit différents tronçons de route en Suisse, et étaient de types :

- 3 revêtements macrorugueux AC MR 6 et 8.
- 5 revêtements drainants PA 11 avec liant modifié par polymères et liant caoutchouc.

Les conclusions qui ont pu être tirées de ces essais sont les suivantes :

- L'action de l'eau ne provoque pas dans tous les cas une diminution de la résistance à la flexion des PA et des AC MR. Le risque de désenrobage et ainsi d'une perte de capacité portante de ces matériaux est relativement faible avec un liant PmB.
- Aucune tendance claire par rapport à la différence de drainabilité entre les PA avec ou sans conditionnement dans l'eau n'a pu être détectée.
- Aucune tendance claire par rapport à la différence de résistance à l'arrachement (pull-out) entre les revêtements avec ou sans conditionnement dans l'eau n'a pu être détectée, que ce soit pour les PA ou les AC MR.

Lärmmarme Oberflächen bei Gussasphalt-Deckschichten auf Brücken – ASTRA 2009/007 – en cours [12]

Cette recherche a comme objectif de développer une couche de roulement peu bruyante en asphalte coulé (GA) pour une utilisation ciblée sur les ouvrages d'art. En effet, la mise en place de couches en GA sur les ponts permet d'éviter le contact entre le tablier du pont avec de l'eau de surface, contrairement aux PA, tout en gardant des propriétés acoustiques intéressantes.

Zusammenhang Textur und Griffigkeit von Fahrbahnen und Einflüsse auf die Lärmmission – VSS 2009/703 [13]

Cette recherche a comme objectif d'évaluer la correspondance entre la texture et l'adhérence de différents types de revêtement, ainsi qu'entre la texture et l'émission acoustique de ces revêtements.

Expériences particulières des cantons

Certains cantons ont procédé à des recherches ou études spécifiques par rapport aux revêtements peu bruyants, tels que les cantons de Berne, du Tessin, d'Argovie ou de Vaud. Certaines expériences sont décrites dans [7].

2.2.2 Recherches internationales

Au niveau international, plusieurs recherches se sont intéressées et s'intéressent encore à la problématique des revêtements peu bruyants à l'intérieur des localités. Dans les chapitres suivants, plusieurs tendances dans ce domaine sont décrites de manière non exhaustive. Dans un premier temps, des recherches nationales sont discutées (Chapitres 2.2.2.1 à 2.2.2.10), puis des projets européens traitant de cette problématique sont décrits (Chapitre 2.2.2.11).

2.2.2.1 Expériences aux Pays-Bas [14] [15] [16]

Les Pays-Bas font office de pionniers dans le domaine des revêtements peu bruyants. Ce sont principalement les revêtements drainants (PA) qui sont largement utilisés pour lutter contre le bruit de roulement des véhicules. Leur développement et leur amélioration ont été très marqués par les recherches menées et les différentes sections tests posées au Pays-Bas. En effet, les PA recouvrent actuellement presque l'intégralité du réseau routier néerlandais et leur utilisation pour des routes en milieu urbain a également été largement évaluée. Dans le domaine des PA, ce sont actuellement les revêtements bicouche qui semblent montrer les meilleurs comportements phoniques au niveau des routes à faible vitesse.

Dans le programme de recherche "Noise Innovation Programme" (ou Innovatieprogramma Geluid – IPG) [16], la problématique du bruit routier et ferroviaire est discutée en détail et des recommandations sont faites pour réduire les nuisances sonores dans les domaines concernés. Le développement des PA bicouche a été largement accéléré grâce à ce programme qui indique des considérations pratiques pour leur mise en place.

L'université de Delft s'est également intéressée aux Splittmastixasphalt (SMA) [15]. Suite à plusieurs problèmes rencontrés avec certains SMA par rapport à l'orniérage, une nouvelle méthode de formulation a été développée. Cette méthode volumique a été mise au point en se basant sur des essais en laboratoire et le suivi de sections tests in situ.

Une nouvelle méthode de détermination du pourcentage de vides dans le squelette granulaire (HRS) a été développée pour cette recherche. La méthode utilise des considérations similaires à la méthode mise au point par le Centre de Recherches Routières (CRR) en Belgique. Deux types de SMA 11 ont été évalués afin d'adapter la nouvelle méthode aux résultats issus des essais en laboratoire (Marshall, presse à cisaillement giratoire). Une analyse paramétrique a également été menée afin d'apprécier l'évolution des vides HRS par rapport à différentes granulométries et types de granulats. Par la suite, la validation de la méthode s'est basée sur des essais triaxiaux et des essais au simulateur de trafic. De même, des formules optimisées ont été testées in situ (essais sur carottes, essais lors de la production, etc.).

D'autres types de revêtements phonoabsorbants de 3^{ème} génération ont également été développés aux Pays-Bas, tel que les revêtements Rollpave (Fig. 10) [14]. Il s'agit ici d'un tapis de revêtement préfabriqué de 30 mm d'épaisseur composé d'une couche de PA et d'une couche de collage, constituée d'une membrane bitumineuse renforcée par une membrane synthétique. Ce système peut être mis en place très rapidement en "déroulant" le tapis sur une couche de base. Une interface continue entre les couches en place et le tapis est obtenue par le chauffage de la couche de collage par ondes électromagnétiques. Ce système étant réversible, un changement rapide du tapis peut être effectué lorsque celui-ci nécessite d'être remplacé.



Fig. 10 Mise en place d'un revêtement Rollpave [14].

Les Rollpaves permettent de diminuer le bruit de roulement jusqu'à 6 dB(A) par rapport à un revêtement dense classique. Le système peut être mis en place aussi bien sur autoroute que sur des routes à plus faible vitesse. La formulation de la couche de PA composant le tapis a été optimisée en laboratoire. Des granulats avec des tailles maximales de 6 mm ont été choisis pour une épaisseur du tapis de 30 mm. Concernant les caractéristiques mécaniques et fonctionnelles, l'adhérence, la résistance à l'orniérage et la résistance à l'arrachement ont été évaluées et ont servi à optimiser le produit final.

D'autres types de revêtements phonoabsorbants de 3^{ème} génération sont en cours d'évaluation [16]. L'on peut mentionner le système Modieslab, système bicouche de dalles en béton de ciment très ouvert sur pilotis, ou le système Quiet Transport, système bicouche avec une couche en « very quiet asphalt » (ZSA) posée sur une couche en « very porous asphalt » (ZOAB) avec une membrane bitumineuse à l'interface.

2.2.2.2 Expériences au Danemark [17] [18] [19]

Après avoir testé des revêtements drainants monocouche à l'intérieur des localités, les recherches au Danemark ont par la suite porté sur les revêtements drainants bicouche. En effet, les sections tests en PA monocouche mises en place dans les années '90 ont certes montré des améliorations du niveau acoustique à l'état neuf (jusqu'à -3 dB(A)), mais après moins de 3 ans, tout avantage avait déjà disparu. C'est pourquoi l'on s'est intéressé aux PA bicouche aux caractéristiques issues des expériences néerlandaises.

Une recherche menée par le Danish Transport Research Institute (DRI) avait pour objectif de comparer le comportement mécanique et acoustique de différents types de revêtements drainants bicouche. Les conclusions suivantes ont pu être tirées de cette recherche :

- La texture de surface change rapidement sur les tous les types de revêtements PA bicouche, une diminution de la profondeur moyenne de texture (MPD) est constatée,
- La teneur en vides des couches supérieures à grains fins (grain maximal de 5 mm) diminue avec le temps, alors qu'elle augmente pour les couches supérieures à grains grossiers (grain maximal de 8 mm),
- La perméabilité des différents types de PA bicouche peut être tenue constante dans le temps avec un nettoyage biannuel à haute pression des revêtements,
- Les sections tests en PA bicouche voient leurs surfaces se colmater rapidement en raison de l'effet de transport de salissures des revêtements denses vers les PA par les véhicules,
- Le niveau acoustique des PA à grains fins (grain maximal de 5 mm) est plus bas juste après la pose des revêtements. Ce niveau a par la suite augmenté pendant la première année pour tous les types de revêtements, mais de manière plus marquée

pour les PA à grains fins jusqu'à un niveau équivalent aux PA à grains grossiers (grain maximal de 8 mm),

- Les revêtements avec une épaisseur plus élevée montrent un niveau acoustique plus faible à l'état neuf, l'écart vis-à-vis des revêtements à épaisseur plus faible diminue néanmoins avec le temps.

Le DRI s'est également associé au programme de recherche néerlandais IPG, s'intéressant principalement au problème de durabilité acoustique et mécanique des revêtements minces (Splittmastixasphalt – SMA, Béton Bitumineux Très Mince – BBTM, Béton Bitumineux Ultra Mince – BBUM et Open Graded Asphalt Concrete – ACo) [19]. Plusieurs recommandations ont pu être tirées de ce programme :

- L'adhérence des revêtements minces est généralement meilleure par rapport à celle d'un revêtement classique. Néanmoins, cette adhérence diminue faiblement avec le temps. L'adhérence a tendance à être plus élevée pour des revêtements à grains plus fins.
- Après la mise en place, les revêtements minces présentent des niveaux acoustiques plus faibles avec une réduction du bruit pouvant atteindre -5 dB(A) (ACo) par rapport à un revêtement classique (mesures effectuées par des véhicules légers sur autoroutes et sur routes urbaines). Pour des mesures effectuées avec des poids lourds, des réductions de bruit plus faibles ont été mesurées (max. -4 dB(A) pour un SMA 8).
- Le niveau acoustique des revêtements minces augmente plus rapidement par rapport à un revêtement classique (augmentation de +2 dB(A) respectivement +1 dB(A) pour une période de deux ans).

D'autres recherches menées au DRI ont montré que l'ajout de granulats plus grossiers dans un mélange fin peut mener à des comportements acoustiques très intéressants, si le mélange est bien optimisé [18]. Par exemple des SMA 0/4 ou et 0/6 ont été modifiés en ajoutant une certaine quantité de granulats 5/8 et leurs comportements acoustiques ont été suivis sur des routes urbaines (Fig. 11).

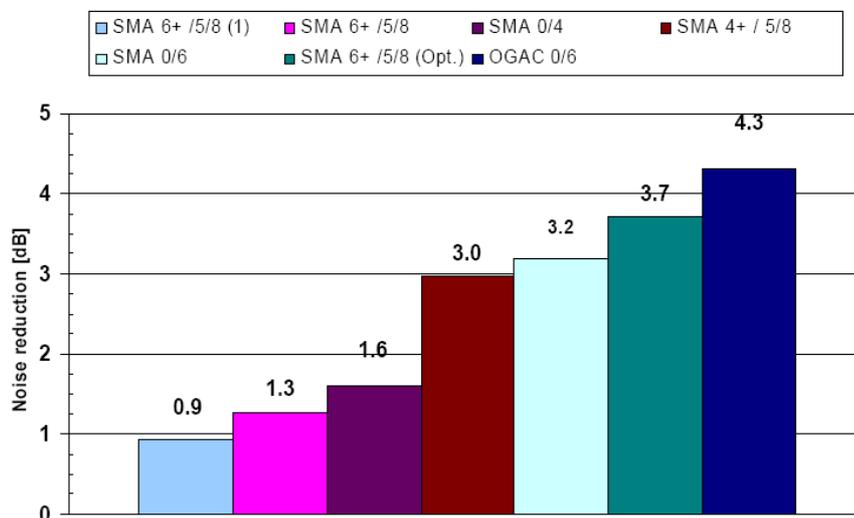


Fig. 11 Réduction du niveau acoustique avec la méthode SPB de différents types de revêtements par rapport à un revêtement classique AC 11 [18].

2.2.2.3 Expériences en Allemagne [20] [21] [22]

L'Allemagne a mis en place des revêtements phonoabsorbants depuis plus de 25 ans. Ce sont aussi bien des revêtements ouverts que semi-denses et denses qui ont été évalués et optimisés. Des projets de recherches d'envergure ont été menés en Allemagne sur la problématique du bruit lié au transport routier. Les projets "Leiser Strassenverkehr" et "Leiser Strassenverkehr 2" ont permis, entre autres, de mettre au point de nouveaux types de revêtements peu bruyants et de les tester à travers différentes sections tests [22].

Les revêtements drainants (PA) ont été les premiers revêtements phonoabsorbants à être testés en Allemagne. Différentes générations de PA ont été testées depuis plus de 25 ans, mais leur utilisation a principalement été limitée aux routes à grande vitesse. Ces revêtements présentent des caractéristiques de réduction du bruit très intéressantes, mais leur durabilité, à la fois mécanique et acoustique, continue à poser problème. C'est pourquoi des recherches sont encore en cours pour améliorer les caractéristiques de ces revêtements.

Les dernières études s'intéressent surtout aux PA bicouche à grain maximal variable qui permettent de réduire le niveau acoustique jusqu'à -10 dB(A) par rapport aux revêtements classiques. En même temps, des procédés d'auto-nettoyage permettant de lutter contre le phénomène de colmatage des pores sont en cours d'évaluation. Des techniques rendant la surface des PA hydrophobe (peinture polymère) ou hydrophile (bitume fortement dosé en polymères) semblent prometteuses pour réduire le colmatage des vides par des saletés provenant de l'environnement.

Des recherches sur des revêtements semi-denses (Splittmastixasphalt (SMA) et Gussasphalt (GA)) ayant à la fois des propriétés acoustiques et mécaniques favorables ont également été menées en Allemagne. Ce sont principalement les SMA qui ont connu un grand succès, avec leur texture de surface très spécifique. La formulation de ces types de revêtements reste néanmoins problématique, surtout à cause des étapes de mise en place sur chantier. En effet, les avantages d'une formule optimisée peuvent complètement disparaître lors d'une mauvaise réalisation du revêtement (compactage). Des recherches sont encore actuellement en cours dans ce domaine.

Les Gussasphalt sont également des revêtements de surface communs sur les autoroutes en Allemagne. Ils correspondent aux asphaltes coulés routiers en Suisse. L'aptitude des GA à réduire le bruit de roulement est moindre comparée aux SMA, mais ils bénéficient de caractéristiques de surface très intéressantes (bonne adhérence, bonne durabilité). Ces types de revêtements sont également encore en cours d'optimisation, en suivant plusieurs pistes possibles (gravillonnage sans compactage, utilisation de grains plus fins, etc.).

2.2.2.4 Expériences en France [23]

La France s'est intéressée principalement à deux types de revêtements phonoabsorbants :

- Revêtements drainants (PA) : Comme dans les autres pays européens, les PA ont principalement été testés pour des routes à grande vitesse. Ils permettent d'atteindre des réductions du bruit de roulement très intéressantes, mais posent encore certains problèmes par rapport à leur durabilité mécanique et acoustique (colmatage des pores, arrachements, etc.).
- Bétons bitumineux très minces ou ultraminces (BBTM ou BBUM) : La France a mis au point des revêtements phonoabsorbants très minces ou ultraminces ayant des propriétés acoustiques très prometteuses. Les caractéristiques de ces revêtements sont décrites ultérieurement (Chapitre 2.3.1.4).

2.2.2.5 Expériences en Italie [24]

En Italie, l'influence de l'ajout d'argile soufflée sur les propriétés mécaniques et acoustiques des revêtements drainants a été évaluée dans le cadre d'un projet de recherche. Des revêtements drainants minces (25 mm) avec ajout de différents pourcentages d'argile (entre 0 et 20%) ont été analysés. Le revêtement, de type PA 11, a été optimisé par formulation volumique, basée sur les résultats issus d'essais à la presse à cisaillement giratoire (PCG). Une bonne correspondance entre les résultats de la formulation volumique et les résultats de la PCG (50 girations) a été trouvée pour ce type de matériaux. Finalement, l'ajout d'argile soufflée implique une augmentation de la teneur en vides des formules, mais une diminution des caractéristiques mécaniques des revêtements (traction indirecte). Les caractéristiques restent néanmoins acceptables pour ce genre de revêtement (couche de surface).

Une phase de comparaison in situ d'un revêtement PA sans argile soufflée (teneur en vides de 16% ; teneur en liant de 5%) avec un PA avec 15% d'argile soufflée (teneur en vides de 20% ; teneur en liant de 5.5%) a été menée par la suite, et des essais d'adhésivité et d'absorption acoustique effectués. Le revêtement avec argile soufflée permet d'atteindre une meilleure adhésivité (+20%) et une plus grande absorption acoustique. Le comportement à long terme, n'a par contre pas été analysé.

2.2.2.6 Expériences en Autriche [25]

Plusieurs types de revêtements phonoabsorbants ont également été testés en Autriche. Il s'agit principalement des revêtements drainants (PA) monocouche et bicouche, des revêtements bitumineux très minces (LDD – voir Chapitre 2.3.1.4) et des Splittmastixasphalt (SMA). Des sections tests ont été suivies pendant plusieurs années et l'influence de différents paramètres évalués (taille des plus gros grains : entre 8 et 11 mm ; type de liant : PmB ou bitume caoutchouc ; etc.).

Des diminutions du niveau acoustique entre -2 et -3 dB(A) pour les LDD et SMA et des diminutions jusqu'à -6 dB(A) pour les PA ont été mesurées pendant les premières années de service de ces revêtements spécialement développés. Concernant le comportement à plus long terme, les PA montrent également une diminution du comportement acoustique, alors que les LDD et SMA restent, après plus de 10 ans, parmi les revêtements les plus silencieux.

2.2.2.7 Expériences en Finlande [26]

En Finlande, différents types de revêtements phonoabsorbants (revêtements drainants (PA), Splittmastixasphalt (SMA), etc.) ont été testés en laboratoire et à l'intérieur des localités (projet HILJA). L'usure, en termes de Pavement Wear Ratio (PWR), a été évaluée pour les différents revêtements. Les considérations suivantes ont pu être établies :

- Les SMA présentent les meilleures propriétés mécaniques,
- Les revêtements à grain maximal fin (5 mm) présentent de meilleures performances acoustiques que les revêtements à grain maximal plus grossier (11, 16 et 18 mm), mais de moins bonnes performances mécaniques,
- L'utilisation de bitumes modifiés par polymères (PmB) permet d'améliorer faiblement les propriétés mécaniques,
- L'ajout d'argile soufflée diminue les propriétés mécaniques mais augmente les propriétés phoniques,
- Le passage de véhicules avec des pneus cloutés réduit les avantages acoustiques des SMA. Plus les grains sont fins (5 mm), plus la diminution est marquée. Après un seul hiver, les SMA 5 se trouvaient au même niveau que les SMA 11, SMA 16 et SMA 18.

2.2.2.8 Expériences aux Etats-Unis

Aux Etats-Unis, et principalement en Arizona, des revêtements peu bruyants ont été mis au point et testés de manière positive. Il s'agit de revêtements fortement élastiques grâce à l'ajout de granules de caoutchouc, appelés "Asphalt-rubber friction course" (ARFC). Ces revêtements permettent des réductions importantes du bruit et ceci de manière assez durable. Des diminutions pouvant atteindre -10 dB(A) par rapport à un revêtement rigide en béton de ciment ont été mesurées (diminution d'environ -4 dB(A) par rapport à un revêtement bitumineux classique). La texture de ces revêtements correspond approximativement aux Splittmastixasphalt (SMA), avec des teneurs en vides faibles et des textures ouvertes. L'utilisation des ARFC en Europe doit encore être évaluée en détail. En effet, ces revêtements sont actuellement employés dans des climats plus chauds.

2.2.2.9 Expériences au Canada [27]

Le Centre for Pavement and Transportation Technologies (CPATT) de l'université de Waterloo a testé plusieurs types de revêtements peu bruyants. La recherche, lancée en 2003, s'intéressait principalement aux revêtements drainants (PA) avec ajout de granulats de caoutchouc et aux Splittmastixasphalt (SMA). Les deux types correspondaient plutôt à des revêtements à grains grossiers (~13 mm) avec des teneurs en vides faibles (PA avec granulats de bonne qualité : 7% ; PA avec granulats de moindre qualité : 9% ; SMA : 4%). Les conclusions suivantes ont pu être tirées de la comparaison entre un SMA et deux PA avec différents types de granulats :

- Les revêtements PA présentent les meilleures propriétés acoustiques comparés à un revêtement dense classique (jusqu'à -3 dB(A)), suivis du revêtement SMA (jusqu'à -1 dB(A)), pour des mesures effectuées avec des véhicules moyens et lourds,
- Pour les véhicules légers, les PA présentent toujours les meilleures propriétés acoustiques, mais suivis du revêtement dense classique,
- Aucune différence significative du niveau acoustique des PA pour les différents types de granulats n'a été observée,
- A vitesse faible, le niveau acoustique du SMA est proche de celui du revêtement dense.

2.2.2.10 Expériences au Japon [28]

Le Japon a également largement utilisé les revêtements drainants (PA) dans la lutte contre le bruit routier. Mais suite à des problèmes mécaniques rencontrés sur plusieurs sections posées dans le pays, un nouveau type de revêtement peu bruyant a été développé. Ce revêtement, nommé Porous Surface Mastic Asphalt Course (POSMAC), a pour objectif de garder les performances acoustiques d'un PA, tout en limitant les dégradations habituellement rencontrées pour ce type de revêtement (arrachements, décollage de la couche de surface). En effet, l'interface entre la couche de surface et la couche de base est sujette à l'infiltration de l'eau de surface, provoquant les dégradations mentionnées. Le POSMAC a été mis au point afin d'éviter de remplacer l'intégralité des couches dégradées (surface et base). Ce procédé nécessite en effet uniquement le remplacement de la couche de surface par une couche de revêtement SMA (entre 4 et 5 mm d'épaisseur) composée d'une sous-couche inférieure imperméable en émulsion de bitume modifié (Fig. 12).

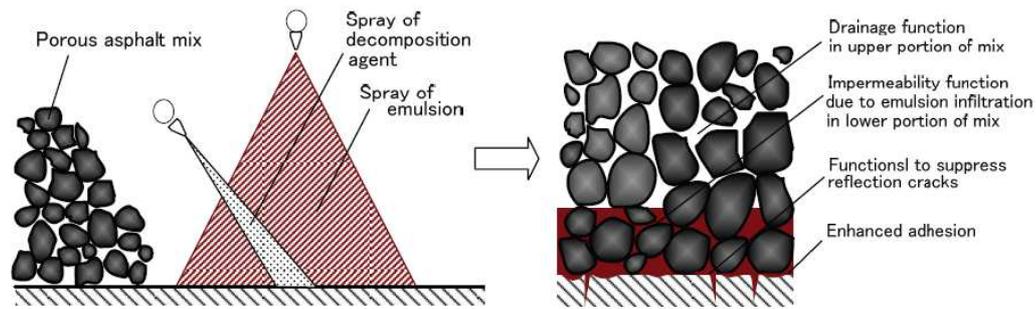


Fig. 12 Porous Surface Mastic Asphalt Course (POSMAC) [28].

Les performances acoustiques sont identiques aux revêtements drainants monocouche classiques, et certaines performances mécaniques améliorées. La sous-couche imperméable permet également de reboucher des fissures existantes dans la couche de base dégradée. L'émulsion fortement dosée ($>1.2 \text{ l/m}^2$) a surtout des conséquences très avantageuses sur les problèmes d'adhésivité à l'interface des deux couches. Ce procédé peut également être appliqué sur d'autres types de couches, telles que les couches en béton, et sur des surfaces inclinées.

2.2.2.11 Projets européens

Plusieurs projets européens traitant de la problématique des revêtements peu bruyants ont été menés, financés par les différents Framework Programme de la Commission Européenne. Ci-après un bref aperçu de certains projets intéressants est donné.

Projet SILVIA [29]

Le projet européen SILVIA initié par le FEHRL (Forum of European National Highway Research Laboratories) avait pour objectif la proposition d'un guide d'implémentation des revêtements peu bruyants. Plusieurs partenaires du secteur académique ont participé à ce projet qui reposait principalement sur leurs expériences nationales respectives acquises. Les résultats du projet complet peuvent être consultés dans [29]. Tout particulièrement le "Guidance Manual" final qui donne des recommandations pour la mise en place de revêtements peu bruyants.

Le projet SILVIA a été divisé en 6 Work Packages (WP). Le WP4 s'intéressait aux différents types de revêtements peu bruyants et leurs caractéristiques à la fois acoustiques et mécaniques. Les recommandations principales qui ont pu être formulées pour les revêtements urbains sont les suivantes :

- A vitesse faible (environ 50 km/h), les revêtements minces et drainants présentent le meilleur comportement acoustique. Des réductions pouvant atteindre les -10 dB(A) par rapport à un revêtement classique ont été rapportées pour ces deux types de revêtements.
- Les revêtements poroélastiques présentent un comportement acoustique très intéressant. Leur durabilité mécanique doit par contre encore être évaluée sur le long terme. Des solutions par rapport au service hivernal doivent également être trouvées, étant donné que ces revêtements ne sont pas adaptés aux engins de déneigement.

Projet SILENCE [30]

Le projet européen SILENCE avait pour objectif la définition de plans d'action pour lutter contre le bruit lié au domaine du transport dans un contexte urbain. Plusieurs partenaires du secteur académique, industriel et administratif ont participé à ce projet. Les résultats du projet complet peuvent être consultés dans [30]. Tout particulièrement le "Handbook" final qui donne des recommandations pour lutter contre le bruit en milieu urbain.

Le sous-projet F "Road Surface" traitait plus spécifiquement des revêtements phonoabsorbants urbains. Des recommandations sur l'utilisation de nouvelles technologies pour lutter contre le bruit y ont été élaborées. Les conclusions majeures par rapport aux revêtements bitumineux phonoabsorbants sont les suivantes :

- Les revêtements minces (max. 30 mm) à granularité fine (0/4 à 0/8) présentent les meilleures caractéristiques de réduction du bruit routier.
- Les revêtements drainants mono- ou bicouches (20 à 25% de vides) présentent des caractéristiques phoniques encore meilleures. Mais à en raison de problèmes de durabilité, d'un coût plus élevé et des problèmes de maintenance hivernale, leur utilisation est non recommandée pour des routes urbaines avec des vitesses inférieures à 60 km/h et un trafic homogène.
- Des solutions sous forme de pavés existent également et ont été optimisées et testées dans le cadre de ce projet. Ces nouveaux systèmes permettent d'atteindre des niveaux acoustiques similaires aux revêtements classiques.
- Un nouveau procédé de mise en place d'un revêtement combiné en Gussasphalt (GA) a également été développé dans le cadre de ce projet. Ce système requiert une préfabrication de la couche de surface dans des conditions contrôlées, ensuite cette couche est posée directement sur une couche de GA.
- L'impact d'un ajout de granules de caoutchouc sur les caractéristiques phoniques des revêtements a aussi été évalué. Ainsi, des résultats très prometteurs ont été obtenus avec un revêtement "Asphalt Rubber Friction Course" (ARFC), développé aux Etats-Unis. Ce revêtement fortement dosé en granules de caoutchouc (environ 15% de masse) et en bitume modifié par des polymères permet d'atteindre des performances phoniques similaires à celles d'un revêtement drainant, mais avec une meilleure durabilité.
- Des revêtements poroélastiques complètement novateurs ont également été testés, tels que les systèmes Spentab, Tokai et Rosehill. Ces systèmes permettent des réductions du bruit pouvant atteindre -12 dB(A) par rapport à un revêtement classique.

Projet HARMONOISE [31] et IMAGINE [32]

Le projet européen HARMONOISE avait pour objectif le développement de méthodes d'estimation des niveaux sonores engendrés par le trafic routier et ferroviaire. Ces méthodes ont par la suite été adaptées au niveau européen pour harmoniser la cartographie des niveaux sonores dans l'Union Européenne. Plusieurs partenaires du secteur académique, industriel et administratif ont participé à ce projet. Les résultats du projet complet peuvent être consultés dans [31]. Tout particulièrement le "Final Technical Report" qui décrit la méthode développée et les résultats obtenus.

Le projet européen IMAGINE avait pour objectif la proposition de recommandations, d'exemples et de bases de données permettant une implémentation rapide et facile des méthodes d'estimation développées dans le projet HARMONOISE. Ainsi des cadastres de bruits harmonisés ont pu être implémentés dans les états membres de l'Union Européenne. Plusieurs partenaires du secteur académique, industriel et administratif ont participé à ce projet. Les résultats du projet complet peuvent être consultés dans [32]. Tout particulièrement le "Final Synthesis Report" qui décrit les résultats obtenus et les adaptations aux méthodes d'estimation apportées. Les méthodes d'estimations finales tiennent compte des caractéristiques des revêtements routiers.

2.3 Formulation des revêtements peu bruyants

La formulation des revêtements peu bruyants est une tâche complexe, faisant intervenir un nombre important de paramètres qui peuvent avoir des impacts divergents sur les performances acoustiques ou mécaniques des revêtements. Dans ce chapitre sont décrits dans un premier temps les principaux types de revêtements peu bruyants (Chapitre 2.3.1), puis les principaux paramètres et caractéristiques d'une chaussée ayant une influence sur la réduction et/ou l'augmentation du bruit sont discutés (Chapitre 2.3.2).

2.3.1 Principaux types de revêtements peu bruyants

Il existe différents types de revêtements, dont les caractéristiques acoustiques permettent de les désigner comme revêtements peu bruyants. Dans la figure ci-après est donné un aperçu des principaux types de revêtements peu bruyants, en se focalisant particulièrement sur les types employés en Suisse (Tab. 1). Des détails par rapport à ces principaux types de revêtements peu bruyants sont donnés dans les chapitres qui suivent (Chapitres 2.3.1.1 à 2.3.1.7).

Tab. 1 Principaux types de revêtements peu bruyants

Type de revêtement	En / Hors de localité	Caractéristiques	Influence sur le bruit	Normes
Revêtement drainant (PA)	Hors localité (En localité)	<ul style="list-style-type: none"> – Courbe granulométrique discontinue – Teneur en vides très élevée – Teneur en vides communicants élevée – Bitumes modifiés par polymères – Pose en mono- et/ou bicouche – Granulats concassés ou semi-concassés – Mise en place assez délicate 	Absorption acoustique élevée	SN 640 431-7a-NA [47]
Revêtement macrorugueux (AC MR) ²	Hors localité En localité	<ul style="list-style-type: none"> – Courbe granulométrique discontinue – Teneur en vides élevée – Bitumes modifiés par polymères – Granulats concassés ou semi-concassés – Grande importance de la qualité de texture de surface – Mise en place suivant certaines règles spécifiques 	Absorption acoustique moyenne à élevée	SN 640 431-1b-NA [35]
Splittmastix-asphalt (SMA)	Hors localité En localité	<ul style="list-style-type: none"> – Courbe granulométrique discontinue – Teneur en vides faible à moyenne – Bitumes modifiés par polymères ou standards – Granulats concassés ou semi-concassés – Grande importance de la qualité de texture de surface – Mise en place suivant certaines règles très spécifiques 	Absorption acoustique moyenne à élevée	SN 640 431-5a-NA [46]
Bétons bitumineux minces	En localité Hors localité	<ul style="list-style-type: none"> – Courbe granulométrique discontinue – Teneur en vides élevée – Bitumes modifiés par polymères ou standards – Granulats concassés ou semi-concassés – Grande importance de la qualité de texture de surface – Mise en place suivant certaines 	Absorption acoustique moyenne à élevée	Différentes normes nationales ; En Suisse non normalisés

² Les SDA (Semidichte Asphalt-schichten) selon SNR 640 436 ont été introduits au cours du mandat. Ces revêtements combrent les gammes de vides entre les AC MR et les PA. Ils ne sont pas abordés dans ce mandat de recherche.

règles très spécifiques				
Revêtements poroélastiques	En localité Hors localité	<ul style="list-style-type: none"> – Revêtements avec une élasticité élevée – Caractéristiques acoustiques proches des PA – Ajout de granules de caoutchouc – Mise en place suivant certaines règles très spécifiques (collage) 	Absorption acoustique élevée	Non normalisés
Produits d'entreprise	Selon le type de produit	– Selon le type de produit	Absorption acoustique faible à élevée	Non normalisés

Selon la définition du terme "peu bruyant", des revêtements "standards" (bétons bitumineux) peuvent également être considérés comme des revêtements peu bruyants. Des revêtements de type AC ne sont généralement pas considérés comme peu bruyants, mais peuvent le devenir si certaines caractéristiques sont adaptées, comme par exemple l'ajout de certains types de granulats (granulats caoutchouc, granulats poreux de type LECA, etc.) ou le changement de la courbe granulométrique du revêtement. Ainsi une diminution du bruit de roulement de - 2-3 dB(A) par rapport au modèle STL-86+ peut être atteinte avec des AC. L'avantage des bétons bitumineux réside dans le fait que le comportement acoustique reste assez stable au fil du temps. Des revêtements en béton de ciment peuvent également être peu bruyants selon le traitement de surface appliqué après la mise en place.

2.3.1.1 Revêtement drainant (PA) [5] [6] [7] [33]

Les revêtements drainants présentent une courbe granulométrique fortement discontinue qui se traduit par une teneur en vides élevée ($\geq 16\%$ pour PA 8 et $\geq 18\%$ pour PA 11) et surtout une teneur en vides communicants élevée. Ceci a comme conséquence qu'un écoulement d'air est possible à travers la matrice du revêtement, ce qui se traduit par une forte absorption acoustique et donc une diminution du bruit de roulement. Les vides communicants permettent également un écoulement d'eau à travers l'épaisseur de la couche de roulement. Cette perméabilité élevée des PA a été l'objectif visé lors de la mise en place des premiers revêtements drainants.

L'absorption du bruit de roulement de ces revêtements peut être assez importante (jusqu'à -6 dB(A) par rapport au modèle STL-86+). Ces caractéristiques acoustiques peuvent être assez stables dans le temps sur des tronçons où la vitesse de conduite est importante (≥ 80 km/h) grâce à un phénomène d'autonettoyage. Ainsi ces revêtements sont largement utilisés sur les routes à grand débit. L'utilisation des PA à l'intérieur des localités pose plus de problèmes du fait du colmatage plus accentué des vides, ce qui se traduit par une perte des avantages acoustiques sur le moyen et long terme.

En même temps, ces revêtements nécessitent des mesures d'exploitation et d'entretien spécifiques (principalement pour l'entretien hivernal et le nettoyage). Ainsi, en Suisse, leur utilisation est déconseillée pour des altitudes supérieures à 600 m.

Les revêtements drainants en couches de roulement utilisent impérativement des bitumes modifiés par des polymères (PmB) avec des teneurs en bitume minimales de 6.0% (PA 8), respectivement 5.5% (PA 11) [47]. Ils présentent une bonne résistance à l'orniérage grâce au squelette minéral constitués de gravillons. Les gravillons doivent être concassés ou semi-concassés et présenter une bonne résistance afin d'atteindre cette caractéristique (bonne résistance contre des chocs, bonne adhérence, coefficient de polissage accéléré (CPA) élevé).

Il est possible de poser ces revêtements en mono- ou en bicouche. La technique des revêtements bicouches, avec une couche plus fine sur une couche plus grossière, convient mieux pour les routes à l'intérieur des localités. Elle présente certains avantages acoustiques intéressants (élargissement du spectre d'absorption du son, couche plus fine qui agit comme un filtre contre le colmatage). Dans le cadre du projet sur les revêtements

peu bruyants à l'intérieur des localités [1] [2] [7], un revêtement drainant en bicouche PA 4 et PA 8 a été posé.

La mise en place de ces revêtements est assez délicate et doit suivre certaines règles spécifiques (température, mise en place continue, matériel de bonne qualité, etc.). De plus, ces revêtements étant très sensibles aux contraintes de cisaillement, leur mise en place est déconseillée à certains endroits spécifiques (croisement, giratoires, tronçons où des chaînes à neige sont régulièrement employées, etc.). Actuellement, l'utilisation des PA est conseillée sur les autoroutes et les routes particulières (contournement, etc.), mais nécessite encore d'avantage d'études pour une mise en place plus large à l'intérieur des localités.

2.3.1.2 Revêtement macrorugueux (AC MR) [1] [7] [33]

Les revêtements macrorugueux sont des produits normalisés, utilisés principalement en Suisse. Ils sont classifiés dans la famille des enrobés denses AC selon les normes SN 640 430 et 640 431-1-NA. En 2002, il existait deux sortes d'AC MR, le 8 et le 11, suivant le diamètre maximum des granulats. En 2008, un AC MR 4 a rejoint la liste mais a été supprimé en 2013 du fait de l'arrivée des enrobés semi denses SDA dans la normalisation.

La courbe granulométrique d'un enrobé macrorugueux présente une discontinuité se situant entre la fraction sable et la fraction la plus grossière des gravillons. Cette discontinuité, quoique moindre que pour les PA, donne aux AC MR une teneur en vides comprise entre celle des AC et des PA. Cette teneur en vides a beaucoup évolué entre 2003 et 2013 comme le montre le tableau ci-dessous avec une augmentation significative de la teneur en vides en 2008 afin d'augmenter les propriétés phoniques de ce type de revêtement mais sans qu'une étude soie réellement menée sur ce sujet et un retour aux anciennes valeurs, en 2013, à la suite de l'arrivée des enrobés semi denses SDA.

Tab. 2 Evolution de la teneur en vides des revêtements macrorugueux

Normes (date)	Teneurs en vides des couches en places					
	AC MR 4		AC MR 8		AC MR 11	
	Valeur Individuelle	Valeur Moyenne	Valeur Individuelle	Valeur Moyenne	Valeur Individuelle	Valeur Moyenne
640 430a (2003)	-	-	2.5...9.0%	3.0...8.0%	2.5...9.0%	3.0...8.0%
640 430b (2008)	6.0...16.0%	6.0...14.0%	5.5...13.0%	6.0...12.0%	5.5...13.0%	6.0...12.0%
640 430 (2013)	-	-	2.5...8.0%	3.0...7.0%	2.5...8.0%	3.0...7.0%

Normes (date)	Teneurs en vides des éprouvettes Marshall		
	AC MR 4	AC MR 8	AC MR 11
640 430-1b-NA (2008)	6.0...10.0%	6.0...10.0%	6.0...10.0%
640 431-1-NA (2013)	3.0...6.0%	3.0...6.0%	3.0...6.0%

Ces revêtements minces à haute performance et adhérence élevée sont principalement appliqués comme couches de roulement sur des routes à fort trafic. Les revêtements macrorugueux sont beaucoup employés par l'OFROU qui les utilise comme matériaux standard pour les autoroutes. De plus, l'OFROU donne quelques exigences sur ces revêtements :

- Teneur en vides de l'ordre de 8.0%.
- Ajout de chaux éteint (1.5%) dans toutes les recettes afin de conserver une meilleure cohésion des matériaux et un vieillissement ralenti de l'enrobé.
- Un minimum de vides communicants afin de garder un revêtement étanche.
- Durée de vie de 15 ans pour ce type de revêtement.
- Poser une épaisseur d'enrobé de 3 cm.

L'évolution de la teneur en vides entre 2003 et 2013 est importante. Cette teneur en vides était comprise entre 6% et 10% selon la norme suisse de 2008 (en vigueur lors du lancement du EP1), mais est passée de 3% à 6% en 2013 alors que les SDA peuvent avoir une teneur en vides allant jusqu'à 22%. Au niveau du fuseau granulométrique, celui des revêtements macrorugueux est plus étroit que celui des SDA, principalement dans la partie des fines et des sables.

De par la discontinuité de leurs courbes granulométriques, les AC MR présentent une bonne absorption acoustique et donc une diminution du bruit de roulement. Cette absorption peut être assez importante (jusqu'à -5 dB(A) par rapport au modèle STL-86+). Les caractéristiques acoustiques ne sont actuellement pas encore assez stables dans le temps, surtout pour des revêtements suivant les limites imposées par les normes [35]. La qualité de la texture de surface des AC MR est primordiale pour montrer des performances acoustiques élevées. Afin de garder des propriétés acoustiques à moyen et long terme, le colmatage des pores et la modification de la texture (p.ex. par arrachement des grains) doivent être limités au maximum.

Les revêtements macrorugueux en couches de roulement utilisent impérativement des bitumes modifiés par des polymères (PmB) avec des teneurs en bitume minimales de 6.2% (AC MR 4), respectivement 5.8% (AC MR 8) et 5.6% (AC MR 11) [35].

Les AC MR présentent également une bonne résistance à l'orniérage grâce au squelette minéral constitués de gravillons. Comme pour les PA, les gravillons doivent être concassés ou semi-concassés et présenter une bonne résistance (bonne résistance contre des chocs, bonne adhérence, coefficient de polissage accéléré (CPA) élevé). Certaines expériences avec l'ajout de granulats spéciaux, tels que des granulats caoutchouc, ont été menées, mais sans apporter un avantage notable aux performances acoustiques des revêtements MR.

La mise en place de ces revêtements doit suivre certaines règles spécifiques (température maximale, base stable et imperméable, matériel de bonne qualité, compactage sans vibrations, etc.). De plus, ces revêtements étant sensibles aux contraintes de cisaillement, leur mise en place est déconseillée à certains endroits spécifiques (croisement, giratoires, tronçons à forte sinuosité, etc.). Par contre les mesures d'exploitation et d'entretien sont similaires à celles d'un enrobé standard. Actuellement, l'utilisation des AC MR est conseillée sur les routes à fort trafic, mais une mise en place plus large à l'intérieur des localités semble également très convaincante.

2.3.1.3 Splittmastixasphalt (SMA) [5] [7] [33]

Les Splittmastixasphalt (béton bitumineux grenu à forte teneur en mastic ou Stone Mastic Asphalt selon la norme européenne) présentent des caractéristiques similaires aux revêtements macrorugueux, c.-à-d. une courbe granulométrique discontinue et des performances élevées. La discontinuité granulométrique des SMA est moins nette et s'inspire plutôt de la technique des asphaltes coulés ce qui se traduit par une teneur en vides faible à moyenne (entre 2% et 5%). La fraction filler est plus importante et la teneur en bitume plus élevée. Ces revêtements minces à haute performance sont principalement appliqués comme couches de roulement sur des routes à fort trafic.

Les SMA présentent des performances acoustiques intéressantes dues aux caractéristiques de surfaces de ces revêtements (texture, etc.). La diminution du bruit de roulement peut atteindre -5 dB(A) par rapport au modèle STL-86+ pour des granulométries fines (SMA 6), mais moins de -3 dB(A) pour les granulométries plus grossières (SMA 8 et 11). Les caractéristiques acoustiques ne sont néanmoins pas stables dans le temps. Les SMA provoquent en même temps un déplacement de la fréquence du bruit vers des fréquences plus "agréables" pour l'être humain.

Les Splittmastixasphalt en couches de roulement peuvent être constitués de bitumes modifiés par des polymères (PmB) ou alors de bitumes standards ou spéciaux. De par la teneur en liant élevée ($\geq 6.4\%$ pour les SMA 8 et $\geq 6.2\%$ pour les SMA 11), il convient d'ajouter des additifs aux SMA afin d'empêcher un égouttage du liant et une ségrégation de l'enrobé (p.ex. fibres) [46].

La tenue du matériau des SMA est, contrairement aux AC MR, assurée par le mastic (filler et bitume), ce qui leur offre une bonne cohésion du matériau. Ceci permet une application des SMA sur des tronçons sinueux ou à déclivité prononcée. De même, grâce à la teneur en vides faible, ces matériaux peuvent être appliqués sur des bases perméables.

Comme pour les PA et les AC MR, les gravillons des SMA doivent être concassés ou semi-concassés et présenter une bonne résistance (bonne résistance contre des chocs, bonne adhérence, coefficient de polissage accéléré (CPA) élevé). Lors de la fabrication de ces revêtements, il convient de bien doser les différents composants, car un léger surdosage de bitume peut avoir des influences très marquées.

La mise en place de ces revêtements doit suivre certaines règles spécifiques (température maximale, base stable, matériel de bonne qualité, compactage sans vibrations, etc.). Concernant le compactage du revêtement, l'utilisation d'un matériel adapté est très importante. Les mesures d'exploitation et d'entretien sont similaires à celles d'un enrobé standard. Actuellement, l'utilisation des SMA est conseillée sur les routes de tout genre.

2.3.1.4 Bétons bitumineux minces [1] [5] [7] [23] [25] [33]

Les bétons bitumineux minces sont des revêtements appliqués en couche de roulement avec des épaisseurs inférieures à 30 mm. Selon les différents pays ils sont appelés Splittasphalt (SPA ou enrobé mince macrorugueux – Suisse), bétons bitumineux très minces ou ultraminces (BBTM ou BBUM – France), Lärmindernde Dünnschichtdecken (LDD – Autriche), etc.

Splittasphalt (SPA)

Les SPA présentent des caractéristiques similaires aux SMA. Leurs courbes granulométriques sont également discontinues, avec une fraction de filler et de gravillons élevée (jusqu'à 15% pour le filler et jusqu'à 80% pour les gravillons) et par conséquent une teneur en liant élevée. Ces revêtements minces sont principalement appliqués comme couches de roulement mais ne sont pas normalisées en Suisse.

Les Splittasphalt présentent des performances acoustiques intéressantes dues aux caractéristiques de surfaces de ces revêtements (texture, etc.) et de la teneur en vides élevée (entre 5 et 10%). La diminution du bruit de roulement peut atteindre -5 dB(A) par rapport au modèle STL-86+, mais ces caractéristiques acoustiques ne sont pas stables dans le temps. Les SPA à granulométrie fine présentent les meilleures performances acoustiques. Afin de garder des propriétés acoustiques à moyen et long terme, le colmatage des pores et la modification de la texture (p.ex. par arrachement des grains) doivent être limités au maximum.

Les SPA en couches de roulement peuvent être constitués de bitumes modifiés par des polymères (PmB) ou alors de bitumes standards. De par la teneur en liant élevée, il convient d'ajouter des additifs afin d'empêcher un égouttage du liant et une ségrégation de l'enrobé (p.ex. fibres). Les gravillons des SPA doivent également être de bonne qualité avec des diamètres maximaux de 11 ou 8 mm.

La mise en place de ces revêtements doit suivre certaines règles spécifiques (température maximale, base stable, matériel de bonne qualité, compactage sans vibrations, etc.). Actuellement, l'utilisation des SPA s'effectue principalement à l'intérieur des localités.

Bétons bitumineux très minces (BBTM)

Employés en France depuis quelques années, les BBTM sont similaires aux SPA. Leurs courbes granulométriques sont également fortement discontinues, avec une teneur en vides se situant entre 6 et 17% (BBTM de type I) ou entre 18 et 25% (BBTM de type II). Ceci leur confère des performances mécaniques et acoustiques très intéressantes. Ces revêtements très minces (15 à 25 mm) sont principalement appliqués comme couches de roulement sur tout genre de routes en France.

Les BBTM présentent des performances acoustiques intéressantes surtout dues aux caractéristiques de surfaces de ces revêtements (texture, etc.), mais également grâce à une teneur en vides élevée. La diminution du bruit de roulement peut être équivalente à celle des revêtements drainants, avec une stabilité acoustique dans le temps encore peu connue mais montrant des tendances très prometteuses. Les BBTM à granulométrie fine présentent les meilleures performances acoustiques. Le colmatage des pores joue un rôle moins important dans la durabilité acoustique que la modification de la texture (p.ex. par arrachement des grains).

Les BBTM en couches de roulement peuvent être constitués de bitumes modifiés par des polymères (PmB – BBTM de type I ou II), de bitumes standards (BBTM de type I) ou alors de bitumes spéciaux (p.ex. caoutchouc), avec des teneurs en liant se situant entre 5.5 et 6%. Les gravillons des BBTM doivent être de bonne qualité et peuvent être de nature artificielle (p.ex. granulats poreux). La fraction de sables peut également être remplacée par de la poudre de caoutchouc. Les granulats utilisés doivent tout particulièrement présenter un coefficient de polissage accéléré élevé (≥ 0.5).

La mise en place de ces revêtements doit suivre certaines règles spécifiques (température maximale, base stable, matériel de bonne qualité, compactage sans vibrations, etc.). Concernant le compactage du revêtement, l'utilisation d'un matériel adapté est très importante, afin d'orienter horizontalement les granulats à la surface. Les BBTM sont souvent mis en place sur des couches de liaison ou de base à module élevé (AC EME). Actuellement, l'utilisation des BBTM s'effectue aussi bien à l'intérieur des localités qu'à l'extérieur sur des routes à grand débit.

Bétons bitumineux ultra minces (BBUM)

Les BBUM sont une évolution des BBTM, avec une épaisseur d'environ 15 mm seulement. Leur pose se fait avec un matériel spécifique permettant un accrochage parfait avec le support et une imperméabilisation complète.

Lärmindernde Dünnschichtdecken (LDD)

Les LDD, employés et normalisés en Autriche, présentent également une courbe granulométrique fortement discontinue. La fraction de sables de ces revêtements est inférieure aux revêtements standards et ils présentent une teneur en vides entre 12 et 15%. Les LDD se composent de granulats avec une taille maximale de 4 ou 8 mm et leurs épaisseurs sont d'environ 20 mm. Leur mise en place doit également suivre certaines règles spécifiques, surtout au niveau du compactage du revêtement. Ces revêtements sont principalement appliqués comme couches de roulement à l'intérieur des localités.

Les Lärmindernde Dünnschichtdecken présentent des performances acoustiques similaires aux revêtements drainants juste après la pose. Les performances acoustiques intéressantes sont obtenues par une absorption importante du bruit de roulement grâce à une surface adaptée (teneur en vides, texture, etc.). La stabilité acoustique de ces revêtements n'a pas encore été suffisamment examinée.

2.3.1.5 Revêtements poroélastiques [7] [34]

Les revêtements poroélastiques sont encore au stade d'essai. L'objectif de ces revêtements est d'associer les avantages des revêtements drainants et des revêtements élastiques (p.ex. avec un ajout de caoutchouc). Grâce à leur élasticité, ces revêtements présentent des caractéristiques acoustiques très intéressantes. Des gains acoustiques initiaux atteignant -7 à -10 dB(A) ont été mesurés. En outre, ces revêtements sont déclarés autonettoyants à un certain degré, ce qui devrait être un atout pour leur durabilité acoustique. Leur application peut se faire, telle que pour les revêtements drainants, en mono- ou bicouche, avec un avantage acoustique aux revêtements bicouches.

La problématique de la durabilité acoustique et mécanique nécessite encore des recherches concernant ce type de revêtements, avant de les mettre en place à grande échelle.

2.3.1.6 Produits d'entreprise

Il existe une multitude de produits d'entreprise pouvant montrer des caractéristiques acoustiques très intéressantes. Les grands laboratoires routiers proposent tous des revêtements peu bruyants, dont certains sont adaptés à une utilisation à l'intérieur des localités :

- Nanosoftware de Colas : Enrobé acoustique mince (BBM) ou très mince (BBTM) à haute adhérence pouvant être mis en place sur tout type de routes. Les épaisseurs varient entre 20 et 30 mm pour les BBM et 30 et 40 mm pour les BBTM. L'épaisseur optimale d'un point de vue acoustique se situe entre 30 et 35 mm. Il a été spécialement conçu pour réduire les bruits provoqués par les pneumatiques sur la chaussée. Les mesures effectuées indiquent des diminutions pouvant atteindre -9 dB(A) par rapport à une couche de roulement classique BBTM 0/10.

Le Nanosoftware est de granularité 0/4 et de granulométrie continue avec une teneur en vides élevée (généralement entre 20 et 25%). Le liant utilisé (Colflex S ou N) est un liant modifié par des élastomères de type SBS.

- Rugosoftware de Colas : Béton bitumineux à chaud, mince (BBM) ou très mince (BBTM) pour couche de roulement pouvant être mis en place sur tout type de routes. Les épaisseurs varient entre 20 et 30 mm pour les BBM et 30 et 40 mm pour les BBTM. Il a été spécialement conçu pour réduire les bruits provoqués par les pneumatiques sur la chaussée. Les mesures effectuées indiquent des diminutions pouvant atteindre -8 dB(A) par rapport à une couche de roulement classique.

Le Rugosoftware est généralement de granularité 0/6 et de granulométrie continue avec une teneur en vides élevée (généralement entre 20 et 25%). Le liant utilisé (Colflex S ou N) est un liant modifié par des élastomères de type SBS.

- Famsiphonogrip de FAMSA : Revêtement phonoabsorbant en couche de surface atténuant durablement le bruit grâce à une composition de granulats fortement performants. En effet, les granulats employés présentent des surfaces micro-rugueuses gardant leur rugosité avec le temps grâce au phénomène d'abrasion différentielle.
- Sapaphone de SAPA : Revêtement phonoabsorbant en couche de surface à macrostructure (type 4-8 ou 11) avec bitume modifié par polymères (PmB), réticulé à haute performance et compatible avec l'environnement.
Le Sapaphone 4 indique les meilleures propriétés acoustiques (jusqu'à -9 dB(A)). Ses micro-vides internes et non-communicants ainsi que sa microtexture de surface permettent une réduction des nuisances sonores provoquées par les pneumatiques sur la chaussée. L'épaisseur optimale du Sapaphone 4 est de 35 mm de façon à assurer un nombre suffisant de micro-vides garants du gain phonique. Des fibres de cellulose sont intégrées dans l'enrobé comme ajout stabilisant.
- Microphone d'Eiffage Travaux Publics : Béton bitumineux de roulement de granularité 0/6 discontinue appliqué en épaisseur de 15 à 30 mm. Il a été spécialement conçu pour limiter le bruit tout en offrant un niveau d'adhérence élevé et une texture régulière et esthétique. Les mesures effectuées indiquent des diminutions pouvant atteindre -6 dB(A) par rapport à une couche de roulement classique.
Le Microphone est constitué de gravillons 4/6 (75 à 85%) et de sables 0/2 (15 à 25%). Le liant utilisé (Piprène) est un liant modifié par des élastomères de type SBS.
- Autres produits d'Eiffage Travaux Publics :
 - Drainophone : Enrobé drainant 0/6 en couche de surface à forte porosité avec des épaisseurs variant entre 30 et 40 mm. Il a été spécialement conçu pour limiter le bruit sur les routes à trafic et à vitesse élevés.
 - Inophone d'Eiffage Travaux Publics : Enrobé coulé à froid à faible niveau sonore, à base de poudrette de caoutchouc.
 - Nanophone : Béton bitumineux pour couches de roulement appliqué en épaisseur de 20 à 30 mm. Il présente des caractéristiques très similaires au Microphone mais avec une granularité plus fine (0/4).
- Viaphone d'Eurovia : Microbéton bitumineux silencieux destiné à répondre aux exigences de bruit en milieu urbain. Les mesures effectuées indiquent des diminutions pouvant atteindre -4 dB(A) par rapport à une couche de roulement classique BBTM 0/10.
Le Viaphone est de granularité 0/6 et de granulométrie fortement discontinue. Le liant utilisé est généralement un liant pur avec ajout de fibres organiques. Suivant le trafic et les contraintes supportées, un liant modifié par des polymères (Polybitume P) peut être employé. Les épaisseurs varient entre 20 et 40 mm.

Ces produits ne peuvent que difficilement être évalués pour des raisons de secret professionnel. Ainsi les descriptions ci-dessus sont tirées des fiches techniques émanant des entreprises commercialisant ces produits.

Dans le domaine des produits d'entreprise, nous assistons actuellement à une forte augmentation du nombre de revêtements peu bruyants proposés sur le marché.

2.3.1.7 Nouvelles tendances

Plusieurs tendances sont actuellement évaluées dans le domaine de la recherche pour mettre au point de nouveaux types de revêtements peu bruyants. Hors localité, les revêtements drainants en bicouches semblent très prometteurs mais certains paramètres doivent encore être analysés plus spécifiquement (courbe granulométrique et teneur en vides optimale, épaisseurs des couches, systèmes de nettoyage, etc.). A l'intérieur des localités, les PA semblent également présenter un potentiel de réduction du bruit intéressant, mais la problématique de la durabilité acoustique pose ici encore plusieurs problèmes.

Autre tendance, l'ajout de matière caoutchouteuse qui permet de rendre les revêtements plus élastiques et donc plus performants d'un point de vue acoustique. Néanmoins, en Suisse, des liants modifiés par caoutchouc ne sont presque plus disponibles sur le marché.

L'ajout de matériaux poreux aux revêtements est également une tendance intéressante suivie par de nombreux produits d'entreprise. L'objectif étant d'ajouter des matériaux tels que l'argile soufflée, des scories ou du tuf andésitique, afin d'améliorer aussi bien les performances acoustiques que les performances mécaniques.

Concernant la teneur en vides des différents revêtements peu bruyants, une tendance à l'augmentation de celle-ci peut être constatée. Ceci s'avère très intéressant d'un point de vue acoustique, mais nécessite une évaluation plus poussée des performances mécaniques des revêtements.

2.3.2 Paramètres et caractéristiques d'un revêtement intervenant dans la réduction/augmentation du bruit de roulement

Une multitude de paramètres et de caractéristiques interviennent dans la réduction ou l'augmentation du bruit de roulement. Les caractéristiques des matériaux une-par-une (liant, granulats, etc.) peuvent avoir un impact direct sur les performances acoustiques d'un mélange final. Les caractéristiques du mélange, de leur côté, interviennent également dans ce phénomène complexe, de même que des paramètres constructifs.

Dans le tableau ci-après est donné un aperçu des principaux paramètres et caractéristiques des revêtements intervenants dans la réduction/augmentation du bruit de roulement (Tab. 3). Ces paramètres sont pris indépendamment du type de revêtement considéré et proviennent de différentes recherches nationales et internationales (Chapitre 2.2).

Tab. 3 Principaux paramètres et caractéristiques d'un revêtement intervenant dans la réduction/augmentation du bruit

Paramètre	Description	Tendance à réduire le bruit	Tendance à augmenter le bruit
Matériaux minéraux	Type de matériel minéral	Granulats durs et résistants au polissage	
	Matériau minéral poreux	Utilisation de matériaux minéraux poreux (argile soufflé, scories, etc.)	Utilisation de matériaux non poreux
	Granulométrie, plus gros grains	0/4, 0/6 et 0/8	0/11 et plus
	Courbe granulométrique	Courbe fortement discontinue	Courbe continue
Liant bitumineux	Type de liant bitumineux	Liant bitumineux modifié par des polymères (PmB) Liant caoutchouc	Liant bitumineux standard
Elasticité	Elasticité des revêtements	Revêtements poroélastiques Utilisation d'additifs de caoutchouc	
Teneur en vides	Teneur en vides du revêtement	Teneur en vides élevée Teneur en vides connectés élevée	Teneur en vides faible Teneur en vides connectés faible
Caractéristiques de surface	Concavité/convexité	Surface concave et compactée	Surface convexe et gravillonnée
	Porosité et perméabilité	Surface poreuse et perméable (drainant)	Surface dense et imperméable
Texture	Microtexture (< 0.5 mm)	Surface anguleuse (matériaux minéraux anguleux)	
	Macrotexture (entre 0.5 et 50 mm)	Amplitude élevée des longueurs d'onde entre 1-10 mm Amplitude faible des longueurs d'onde entre 16-50 mm Calibre de grain de 3 mm pour les VL et de 5 mm pour les PL	Toute autre amplitude des longueurs d'onde Tout autre calibre de grain pour les VL et PL
	Mégatexture	Longueur d'onde des amplitudes faible	Longueur d'onde des amplitudes élevée
	Profondeur moyenne de texture (MPD)	MPD élevée	MPD faible
Couches	Couche de base	Couche plane	Couche irrégulière
	Épaisseur des revêtements	Épaisseur faible (15 à 25 mm) pour les revêtements semi-denses Épaisseur moyenne pour les revêtements drainants (40 à 60 mm)	
	Mono- et bicouches	Revêtements drainants bicouches	
Mise en place	Mise en place du revêtement	Rouleau lisse Compactage statique	Rouleau à pneus lisses Compactage avec vibrations
Colmatage	Colmatage des pores des revêtements	Revêtements poroélastiques Utilisation d'additifs de caoutchouc	

La formulation d'un revêtement peu bruyant utilisé à l'intérieur des localités devrait tenir compte de l'intégralité des paramètres énumérés dans le tableau précédent (Tab. 3). Un compromis doit être trouvé entre les paramètres améliorant le comportement acoustique et les paramètres améliorant le comportement mécanique des revêtements. En effet, certains paramètres (élasticité des revêtements, teneur en vides, etc.) permettent d'assurer des performances acoustiques intéressantes à moyen et long terme mais défavorisent la durabilité mécanique.

Concernant la durabilité acoustique et mécanique des revêtements, il convient tout particulièrement de bien choisir les constituants des mélanges (liants modifiés par polymères, granulats durs et résistants au polissage, bonne adhésivité liant-granulats, etc.).

Afin de garantir une durabilité acoustique souhaitée, les modifications de la texture sont à éviter au maximum (modifications dues aux effets thermiques, au trafic, etc.). Les altérations de la texture peuvent se présenter sous forme de perte de particules (arrachements), de transformation de la texture due au compactage par le trafic, de polissage des grains par l'action des pneumatiques, d'altération chimique par l'entretien hivernal (sel de déverglaçage), de colmatage des pores, etc. Mais avant tout, une mise en œuvre méticuleuse doit être suivie afin d'obtenir une texture de surface avantageuse d'un point de vue acoustique.

A ce jour, aucun paramètre unique n'est capable de prédire de manière globale la durabilité à la fois mécanique et acoustique d'un revêtement peu bruyant. Si certains paramètres, tels que la profondeur moyenne de texture, montrent certaines tendances entre la texture de surface et les performances acoustiques, ces corrélations ne sont pas valables pour tous les types de revêtements. Le même phénomène peut être observé concernant pour d'autres paramètres (facteur de forme, longueur d'onde à la profondeur maximale de texture, etc.).

3 Paramètres de base de la recherche

Un aperçu des principaux paramètres de base retenus pour la recherche, lesquels sont décrits dans les différents chapitres 3.1 à 3.3, est donné dans le tableau ci-après (Tab. 4).

Tab. 4 Aperçu des paramètres de base de la recherche

Famille de paramètres	Paramètres de base choisis	Chapitre correspondant
Type de formules	LNA	Chapitre 3.2.1
Caractéristiques principales des LNA	Plus gros grains de 8 et 4 mm Courbes granulométriques discontinues Epaisseurs des revêtements : 35 mm	Chapitre 3.2.2
Matériaux	Granulats : FAMSA, Balmholz Liant : Styrelf E60 Additifs : chaux hydratée, fibres de cellulose	Chapitre 3.2.3
Analyse de sensibilité	Teneur en vides, teneur en liant, matériaux – granulats, matériaux – liants, matériaux – additifs (chaux hydratée, fibres de cellulose)	Chapitre 3.2.4
Optimisation mécanique et acoustique	Optimisation mécanique et analyse de sensibilité : – Compactabilité et maniabilité (vides Marshall, PCG) – Sensibilité à l'eau (ITSR) – Orniérage (Simulateur de trafic léger) – Cohésivité (Cantabro) – Paramètres secondaires : Résistance à la traction (compression diamétrale), stabilité et fluage (essai Marshall) Optimisation acoustique et analyse de sensibilité : – Absorption acoustique (tube d'impédance)	Chapitre 3.3
Méthodes d'essais	Evaluation des méthodes d'essais spécifiques : – Teneur en vides des LNA – Compactage des LNA – Simulateur de trafic léger – Essai Cantabro – Détermination des performances acoustiques - tube d'impédance	Chapitre 3.4

3.1 Définition des revêtements peu bruyants

Nous allons utiliser dans cette recherche la définition issue du rapport [7] et schématisé à l'aide de la figure ci-après (Fig. 13):

« Un revêtement est dit peu bruyant lorsque son gain acoustique initial est supérieur ou égal à -3 dB(A) par rapport au revêtement de référence du modèle STL-86+ et que la réduction du bruit reste supérieure à -1 dB(A) pendant la durée d'utilisation du revêtement (12 à 15 ans). »

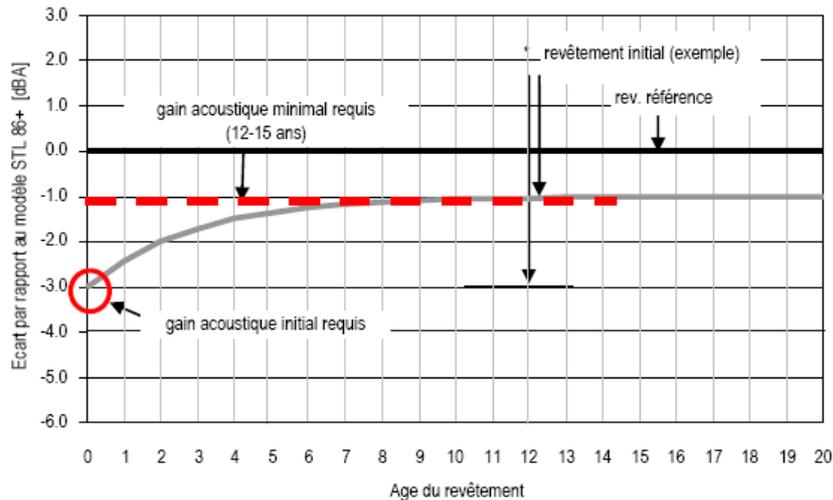


Fig. 13 Définition des revêtements peu bruyants dans les localités [7].

Notons qu'un gain acoustique de -3 dB(A) équivaut à une diminution de moitié de l'intensité du bruit. Ce gain correspond également approximativement à une réduction du trafic de moitié.

Le terme LNA décrit de manière générale les revêtements peu bruyants (Low Noise Asphalt). Plus spécifiquement, les formules sont notées selon le schéma suivant : LNA x_y , où x correspond au grain maximal et y à la teneur en vides visée de la formule. Les LNA peuvent être comparés aux SDA, terme non utilisé lors du lancement du projet de recherche (Annexe I).

3.2 Matériaux

3.2.1 Choix du type de formules

La recherche s'est focalisée sur l'optimisation et l'adaptation des Low Noise Asphalt (LNA). Pour cette recherche ces revêtements seront formulés à partir des revêtements macrorugueux (AC MR), mais en adaptant certaines caractéristiques (teneur en vides, courbe granulométrique, etc.). Ainsi, les LNA ne sont pas forcément conformes aux recommandations des normes sur les enrobés bitumineux [35].

Le choix du type de formules est basé d'une part sur les conclusions tirées de l'état des connaissances (Chapitre 2) et d'autre part sur des considérations pratiques et théoriques. Les recommandations du projet de recherche "Revêtements peu bruyants à l'intérieur des localités" [1] ont été intégrées dans le choix final. De même, des discussions avec la direction générale du projet et les responsables des projets individuels ont été menées afin de décider d'un commun accord du type de formules à optimiser.

3.2.2 Choix des paramètres principaux des LNA

Le choix de la granularité est également basé sur les conclusions tirées de l'état des connaissances et sur des considérations pratiques et théoriques discutées avec les participants du paquet de recherche (Chapitre 1.3).

Concernant le grain maximal des LNA les deux propositions suivantes ont été adoptées :

- Low Noise Asphalt de grain maximal 4 mm (LNA 4).
- Low Noise Asphalt de grain maximal 8 mm (LNA 8).

Ce choix repose sur le fait que les mélanges 0/4 et 0/8 ont déjà été largement testés à l'étranger et en Suisse pour plusieurs types de matériaux. L'optimisation de ces mélanges par rapport aux performances acoustiques et mécaniques, n'a par contre été que très peu abordée. Le choix d'un mélange avec un grain maximal de 6 mm n'a pas été retenu du fait que la fraction 4/8 n'est pas divisée en deux sous-fractions 4/6 et 6/8 en Suisse. Ces fractions spécifiques ne sont donc pas proposées sur le marché.

Concernant les épaisseurs des différents revêtements peu bruyants, il a été décidé en commun accord avec la direction générale du projet et les responsables des projets individuels EP2 et EP4 de choisir dans un premier temps une épaisseur constante de 35 mm pour les différents types de LNA. Cette épaisseur correspond à une épaisseur moyenne appliquée in-situ.

Les LNA optimisés dans le cadre de cette recherche ont été fabriqués en suivant des procédés et des conditions similaires (préparation, procédure de mélange, temps de mélange, températures de mélange, etc.).

3.2.3 Choix des matériaux

Le choix des matériaux représente un point majeur dans la pérennité d'un revêtement peu bruyant, aussi bien au niveau acoustique que mécanique. Il est donc indispensable d'utiliser des matériaux adéquats et de grande qualité pour les LNA.

Le choix des matériaux se base sur les conclusions tirées de l'état des connaissances et sur des considérations pratiques et théoriques. Deux types de granulats, un type de liant et deux types d'additifs ont été proposés et adoptés pour cette recherche :

- Granulats :
 - Famsa-Choëx³ (formulation complète).
 - Balmholz (formulation partielle : analyse de sensibilité).
- Liants :
 - Styrelf E 60 (formulation complète).
- Additifs :
 - Chaux hydratée (formulation partielle : analyse de sensibilité).
 - Fibres de cellulose TOPCEL® (formulation partielle : analyse de sensibilité).

Les granulats Famsa-Choëx et Balmholz présentent des caractéristiques intéressantes pour l'utilisation prévue dans le cadre de ce mandat de recherche. Ces granulats concassés durs présentent surtout une résistance élevée au polissage. Les granulats issus de la carrière Famsa-Choëx sont de type grès de carrière composés de 25 à 30% de quartz. Les granulats issus de la carrière Balmholz sont de type gravillons de calcaire composés de 30 à 45% de quartz.

Il a été question au début de la recherche de s'intéresser également à l'impact des granulats poreux EOS (scories de hauts fourneaux) sur les performances acoustiques et mécaniques des revêtements peu bruyants. En effet, la porosité de ces matériaux leur procure des caractéristiques acoustiques très intéressantes, et dans le même temps, ils présentent une résistance élevée à l'usure. Cette idée n'a cependant pas été suivie dans cette recherche compte tenu des doutes sur l'impact de ces matériaux sur les eaux souterraines (contamination aux métaux lourds). L'OFEV recommande actuellement de ne pas incorporer de tels matériaux dans les mélanges.

Le liant Styrelf E 60 est un liant modifié par polymères (PmB 45/80-65) fortement visqueux contenant un dope d'adhésivité. Son emploi est préconisé pour toute sorte de revêtements, tels que les revêtements minces ou les enrobés macrorugueux.

³ Les granulats Famsa-Choëx ont été généreusement mis à disposition par l'entreprise FAMSA.

L'utilisation d'un liant-caoutchouc a été discutée au début de la recherche étant donné ses tendances à réduire le bruit de roulement. Néanmoins, cette idée a également été abandonnée et le liant-caoutchouc a été remplacé par un PmB comportant des fibres. En effet, ce type de liant n'est plus commercialisé en Suisse.

Deux types d'additifs ont également été choisis pour leurs comportements rhéologiques et mécaniques intéressants. D'une part l'ajout de chaux hydratée permet d'améliorer l'adhésivité liant-granulat, de rigidifier le mastic et de ralentir l'oxydation du liant, et d'autre part l'ajout de fibres de cellulose permet d'améliorer la maniabilité (viscosité) des mélanges bitumineux. L'impact de ces deux additifs d'un point de vue mécanique étant peu connu, une analyse de sensibilité a été menée dans le but de mieux connaître leurs comportements.

Les différents matériaux (granulats et liant) choisis ont été analysés et leurs caractéristiques ont été évaluées par rapport aux prescriptions des normes correspondantes. Les détails des caractéristiques sont donnés au Chapitre 4.2. Les fiches techniques des additifs figurent en annexe (Annexe III).

3.2.4 Formulation des LNA et analyse de sensibilité

Afin de proposer des formules-types et d'analyser la sensibilité de celles-ci, l'impact d'un changement de différents paramètres sur le comportement mécanique et acoustique des LNA a été évalué. Les différents paramètres analysés et optimisés sont les suivants :

- Teneur en vides visées dans la formulation théorique des LNA, par ordre de priorité :
 1. 12% de vides⁴
 2. 16% de vides⁵
- Teneur en liant : Différentes teneurs en liants déterminées selon la formulation théorique et les fabrications en laboratoire.
- Courbe granulométrique : Différentes courbes granulométriques déterminées selon la formulation théorique et les fabrications en laboratoire.
- Module de richesse : Différents modules de richesses déterminés selon la formulation théorique et les fabrications en laboratoire. Le module de richesse se calcule selon la formule donnée dans la norme SN 640 431-1b-NA [35].
- Types de matériaux : Deux types de granulats, un type de liant et deux types d'additifs (voir Chapitre 3.2.3).

3.3 Optimisation mécanique et acoustique des LNA

L'optimisation mécanique a porté sur les propriétés et les essais suivants :

- Compactabilité et maniabilité (Marshall et Presse à Cisaillement Giratoire – PCG) selon EN 12697-30 et EN 12697-31 [42] [43].
- Sensibilité à l'eau (ITSR – Résistance à la traction indirecte (ITS) avec/sans conditionnement dans l'eau) selon EN 12697-12 [37].
- Orniérage (STL – simulateur de trafic léger) selon EN 12697-22 [40] sur certaines formules choisies (formulations à teneurs en liant élevées).
- Cohésivité (Essai Cantabro) à -10°C sur éprouvettes Marshall selon EN 12697-17 [38].
- Paramètres secondaires :
 - Résistance à la traction indirecte ITS (compression diamétrale) à -10 et +45°C selon EN 12697-23 [41].
 - Stabilité et fluage (Essai Marshall) sur éprouvettes Marshall selon EN 12697-34 [45].
 - Essai d'égouttage du liant (Méthode Schellenberg) selon EN 12697-18 [39].

⁴ Valeur moyenne pour un SDA de type B.

⁵ Valeur moyenne pour un SDA de type C.

- Optimisation acoustique :
 - Absorption acoustique (tube d'impédance) selon ISO 10534-2.

La méthode du tube d'impédance est décrite plus en détail dans le Chapitre 3.4.5.

3.4 Méthodes d'essais

Plusieurs méthodes d'essais ont été employées dans le cadre de ce projet. Certaines présentent des conditions difficilement applicables aux enrobés peu bruyants (LNA). Ainsi, certaines analyses par rapport au choix des méthodes d'essais et à la définition des conditions d'essais ont été nécessaires. Les résultats de ces analyses sont exposés dans les chapitres suivants (Chapitres 3.4.1 à 3.4.5).

3.4.1 Teneur en vides des LNA

Il existe plusieurs méthodes de mesure de la teneur en vides selon les normes européennes et suisses en vigueur [36]. Une évaluation de la pertinence de quatre méthodes de mesure de la teneur en vides pour les LNA a été menée sur plusieurs formules avec des teneurs en vides variables (entre 9 et 18% de vides sur éprouvettes Marshall 2x50 coups). Les quatre méthodes analysées sont :

- Méthode géométrique,
- Méthode hydrostatique,
- Méthode avec parafilm,
- Méthode avec paraffine.

Six formules de LNA 4 ont été testées, avec quatre échantillons par formule (Fig. 14 – par ordre croissant de teneur en vides, Annexe I). La méthode avec paraffine n'a été testée que sur deux formules.

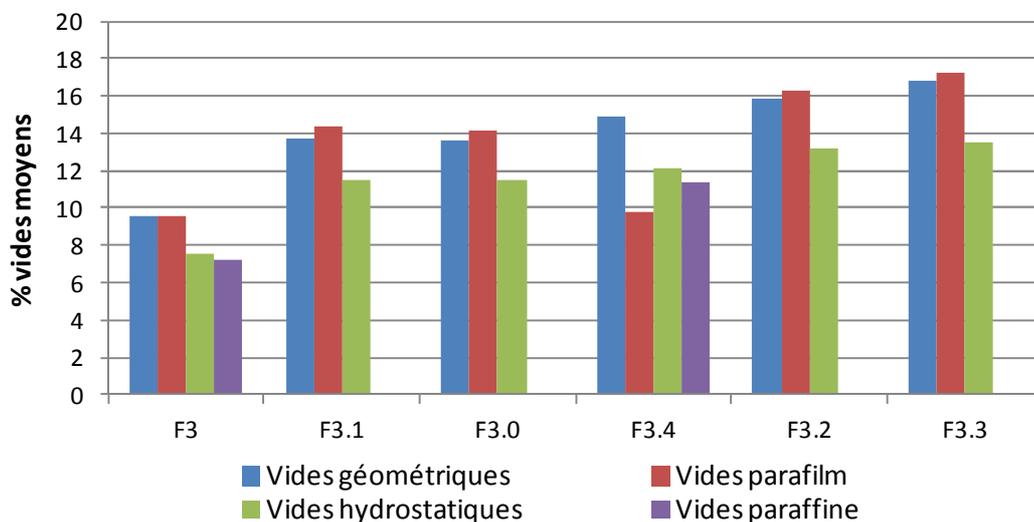


Fig. 14 Vides Marshall (2x50 coups) selon quatre méthodes de mesure de la teneur en vides.

La méthode géométrique de mesure de la teneur en vides et la méthode avec parafilm indiquent des résultats très proches, à l'exception de la formule F3.4. Les méthodes hydrostatiques et avec paraffine fournissent des résultats toujours sensiblement inférieurs aux deux premières méthodes. Des différences entre 2 et 4% sont notées, ce qui montre une sous-estimation continue de la teneur en vides par ces deux méthodes. Ces méthodes sont en effet peu adaptées aux enrobés à teneurs en vides élevées.

Pour le présent projet, c'est la méthode géométrique de mesure de la teneur en vides a été choisie comme méthode de référence. En effet, la méthode fournit des résultats concluants et est avantageuse par sa simplicité et sa rapidité d'application.

3.4.2 Compactage des LNA

Trois méthodes de compactage ont été utilisées dans le cadre de ce projet, il s'agit des méthodes suivantes :

- Table de compactage [44] : Compactage de plaques de 180 x 500 x 35 mm de dimension avec une roue (compactage mixte pneu/rouleau lisse).
- Presse à compactage giratoire [43] : Compactage d'éprouvettes à la PCG avec une hauteur finale visée de 70 mm après 200 girations.
- Compactage Marshall [42] : Compactage d'éprouvettes avec différentes énergies de compactage (2x20, 2x30, 2x40 et 2x50 coups).

La méthode de compactage par compacteur de plaques a été choisie comme méthode de référence, afin de déterminer la correspondance entre cette méthode et les deux autres. Une évaluation de la pertinence des trois méthodes de compactage a donc été menée sur plusieurs fabrications avec des teneurs en vides variables (entre 11 et 18% de vides). Cinq fabrications de LNA 4 ont été testées, avec trois échantillons pour les fabrications à l'aide de la table de compactage, deux à quatre échantillons pour les fabrications Marshall et un ou deux échantillons pour les fabrications par PCG (Fig. 15 – par ordre croissant de teneur en vides).

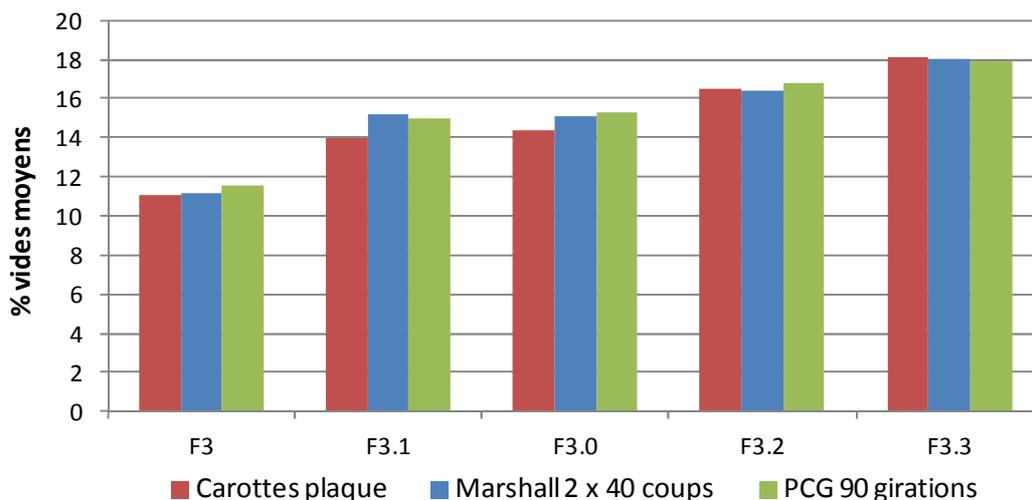


Fig. 15 Vides géométriques selon trois méthodes de compactage (Table de compactage, Marshall, PCG).

Une très bonne correspondance entre les teneurs en vides des échantillons compactés à l'aide de la table de compactage et les échantillons Marshall à 2x40 coups ainsi que les échantillons PCG à 90 girations a été trouvée (Fig. 15). Il est donc proposé de recourir à un compactage 2x40 coups Marshall ou PCG à 90 girations pour la détermination des teneurs en vides réelles des LNA.

Ces résultats montrent bien les spécificités des enrobés à courbe granulométrique fortement discontinue et à teneur en vides élevée. En effet, la fabrication de plaques en LNA ne correspond pas à un compactage 2x50 coups Marshall comme cela est le cas pour les enrobés standards. Des considérations similaires ont déjà pu être établies pour les enrobés drainants dans [9] (Chapitre 2.2.1.2), où un compactage 2x25 coups est préconisé pour la détermination des caractéristiques mécaniques des PA.

3.4.3 Simulateur de trafic léger

L'essai au simulateur de trafic permet de déterminer la résistance à l'orniérage d'un revêtement. Cet essai a été choisi pour la comparaison du comportement des matériaux sous trafic aux températures élevées. Les normes suisses indiquent des valeurs limites d'orniérage pour les revêtements de type AC MR 8 (profondeur d'ornière maximale de 7.5% à 30'000 cycles pour des plaques de 50 mm d'épaisseur), mais aucune prescription n'est donnée pour les AC MR 4 et pour les LNA.

Une évaluation de l'influence de l'épaisseur des plaques sur les résultats de profondeur d'ornières a été menée pour la formule F9.1 (formule de référence pour la formulation LNA 4₁₂). Le but de cette analyse étant d'évaluer l'utilisation de plaques de 20 ou 35 mm d'épaisseur à la place des plaques standard de 50 mm d'épaisseur, et ainsi être en accord avec les paramètres de base de la recherche (Chapitre 3) et avec les épaisseurs des revêtements mis en œuvre in-situ.

L'utilisation de plaques avec une épaisseur de 20 mm s'est tout de suite avérée non concluante. En effet, l'épaisseur trop fine des échantillons a provoqué un soulèvement des bords des plaques pour tous les essais réalisés (Fig. 16). Ainsi, le recours à des plaques avec une épaisseur de 20 mm n'est pas recommandée.



Fig. 16 Phénomène de soulèvement des plaques avec une épaisseur de 20 mm.

Les plaques avec une épaisseur de 35 mm présentent des profondeurs d'ornières plus importantes que les plaques avec une épaisseur de 50 mm, et ceci quel que soit le nombre de cycles appliqués (Fig. 17).

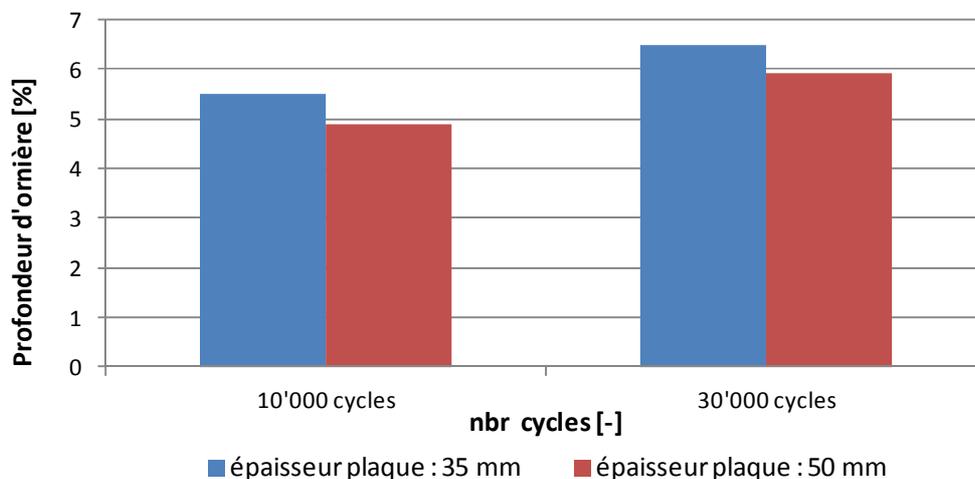


Fig. 17 Profondeur d'ornières mesurée selon deux épaisseurs de plaque différentes.

L'évaluation de l'influence de l'épaisseur des plaques n'a pas eu comme objectif de déterminer des valeurs limites par rapport à l'orniérage des LNA. Pour une comparaison plus aisée du comportement des LNA par rapport aux enrobés traditionnels ou macro-rugueux, des plaques avec une épaisseur de 50 mm ont donc été utilisées dans le cadre de ce projet.

3.4.4 Essai Cantabro

L'essai Cantabro permet de déterminer la perte de matériaux d'un revêtement. Cet essai est particulièrement intéressant pour les revêtements ouverts (AC MR et PA) et consiste en un paramètre d'évaluation du comportement mécanique de ces revêtements. Dans le cadre de ce projet de recherche, l'essai Cantabro a uniquement été effectué à basse température afin de juger du comportement le plus contraignant des matériaux.

Le projet de recherche sur les propriétés mécaniques des enrobés drainants [9] a défini une valeur limite de la perte de matériaux de 50% à -10°C et à 300 cycles pour des éprouvettes Marshall (2x25 coups).

L'influence de la teneur en vides sur la perte de matériaux a été évaluée pour la formule F3 (formule avec forte teneur en vides). Ainsi, des éprouvettes Marshall avec un compactage à 2x20 coups et un compactage à 2x40 coups ont été testées à l'aide de l'essai Cantabro (500 tours). Les résultats ne permettent pas d'indiquer une corrélation claire entre les paramètres teneurs en vides, énergie de compactage et perte de matériaux (Tab. 5). De même, les résultats généraux sont très faibles par rapport aux recommandations faites dans [9].

Tab. 5 Evaluation de l'influence entre la perte de matériaux et la teneur en vides

Fabrication	Energie de compactage Marshall [nb. coups]	Teneur en vides [%]	Essai Cantabro – Perte de matériaux [%]
F3	2x40	11.2	12
	2x20	15.6	13

Afin de tester des matériaux présentant des vides Marshall proches des vides in-situ (voir Chapitre 3.4.2), une énergie de compactage à 2x40 coups a été utilisée pour réaliser les essais Cantabro dans le cadre de ce projet.

3.4.5 Détermination des performances acoustiques – Tube d'impédance

La méthode du tube d'impédance selon la norme ISO 10534-2 a été choisie comme méthode de détermination des performances acoustiques. Le choix de cette méthode a été décidé en commun accord avec la direction générale du projet, l'entreprise Müller-BBM responsable du projet individuel EP4 "Méthodes de contrôle en laboratoire des performances acoustiques des revêtements peu bruyants", et le laboratoire partenaire ayant effectué les mesures acoustiques pour le présent projet de recherche (Laboratoire d'électromagnétisme et d'acoustique – LEMA). Cette méthode simple et rapide permet de classer de manière relative le comportement acoustique des enrobés en mesurant le facteur d'absorption des éprouvettes (facteur α) par la méthode des fonctions de transfert (absorption sous incidence normale). Ce facteur étant déterminant pour les revêtements de type peu bruyants (granulométrie discontinue, teneur en vides élevée, etc.). Les mesures sont effectuées sur des échantillons issus de plaques fabriquées en laboratoire.

Les mesures au tube d'impédance ont toutes été effectuées par le LEMA de l'EPFL. Une brève description du banc de mesure et du protocole expérimental suivi est donnée en annexe (Annexe II).



Fig. 18 Photographie du tube d'impédance et de son porte-échantillon.

Le potentiel de classification de cette méthode d'essai a, dans un premier temps, été évalué en effectuant des mesures au tube d'impédance avec différents types de revêtements. Pour ceci, trois revêtements étant censés avoir des qualités phoniques différentes ont été choisis afin de vérifier que les facteurs d'absorption présentent des résultats bien distincts. Il s'agit (Fig. 19) :

- AC MR 8 avec 8% de vides provenant d'un essai effectué à la halle-fosse à l'EPFL. Il s'agit d'un revêtement non circulé et mis en œuvre selon des conditions réelles in-situ. Echantillons CIIC26 et CIIC28.
- AC MR 8 avec 13% de vides provenant d'un essai effectué à la halle-fosse à l'EPFL. Il s'agit d'un revêtement non circulé et mis en œuvre selon des conditions réelles in-situ. Echantillons CIIC12 et CIIC14.
- PA 11 provenant du contournement de Lausanne. Il s'agit d'un revêtement mis en place selon des conditions réelles in-situ, fortement circulé et dégradé par arrachement de grains. Echantillons 11 et 22.

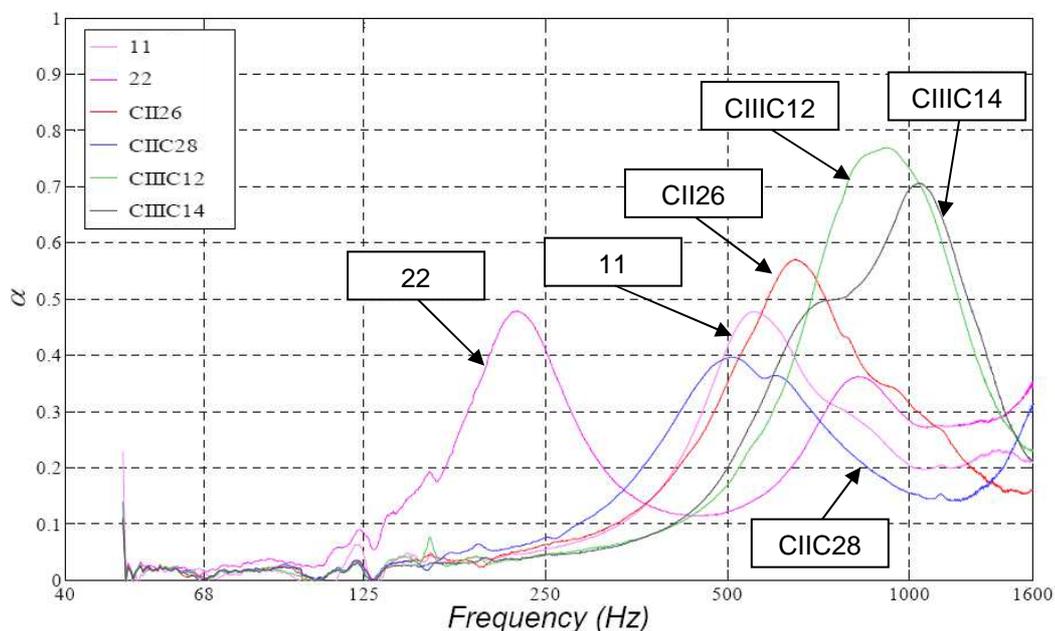


Fig. 19 Facteur d'absorption en bande fine de 6 échantillons expertisés.

Les résultats obtenus (Fig. 19) montrent des facteurs d'absorption plus élevés pour les enrobés avec une teneur en vides plus élevée. Concernant les PA, l'échantillon 11 présente un facteur d'absorption proche du AC MR 8 (8%), ce qui était attendu pour un revêtement ayant été fortement circulé. L'échantillon 22 indique un pic à basse fréquence (inférieur à 250 Hz) qui s'explique par sa texture de surface fortement dégradée.

Des essais croisés sur cinq types d'enrobé présentant des comportements acoustiques distincts ont été effectués entre le LEMA et Müller-BBM. L'objectif était de comparer les résultats de mesure d'absorption acoustique et de valider la procédure d'essais. Une bonne corrélation entre les résultats des deux entités a pu être déterminée pour tous les échantillons testés (Fig. 20).

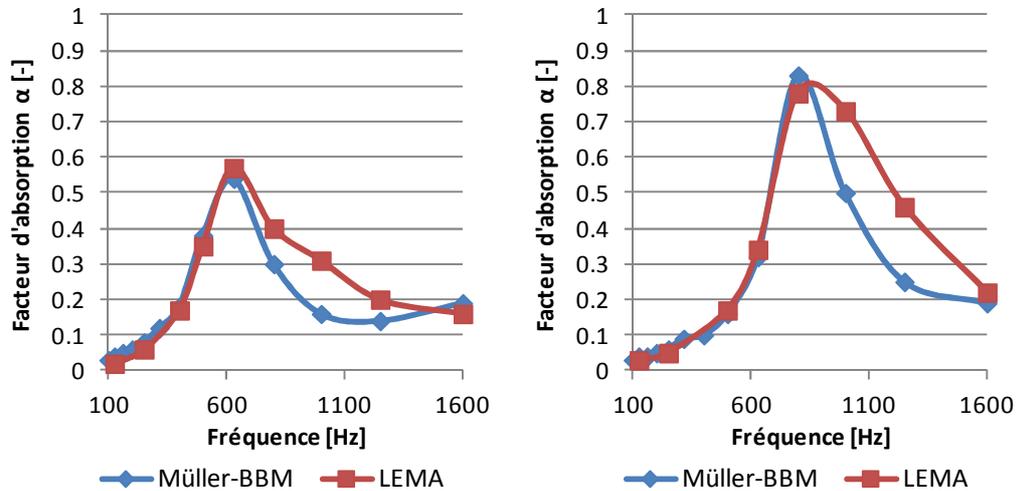


Fig. 20 Comparaison des résultats du LEMA et de Müller-BBM (échantillon CIIC12 – gauche ; échantillon CIIC26 – droite).

Une fois la procédure d'essais déterminée (voir Annexe II), la sensibilité et la répétabilité de la méthode pour des formules de LNA présentant des caractéristiques proches (teneur en vides, courbe granulométrique, etc.) ont été analysées. Les conclusions suivantes ont ainsi pu être tirées :

- Sensibilité : La sensibilité de la méthode de détection des performances acoustiques peut être suffisante pour détecter des différences acoustiques entre les formules d'une même famille de LNA pour certains cas (grain maximal et courbe granulométrique identiques) (Fig. 21).

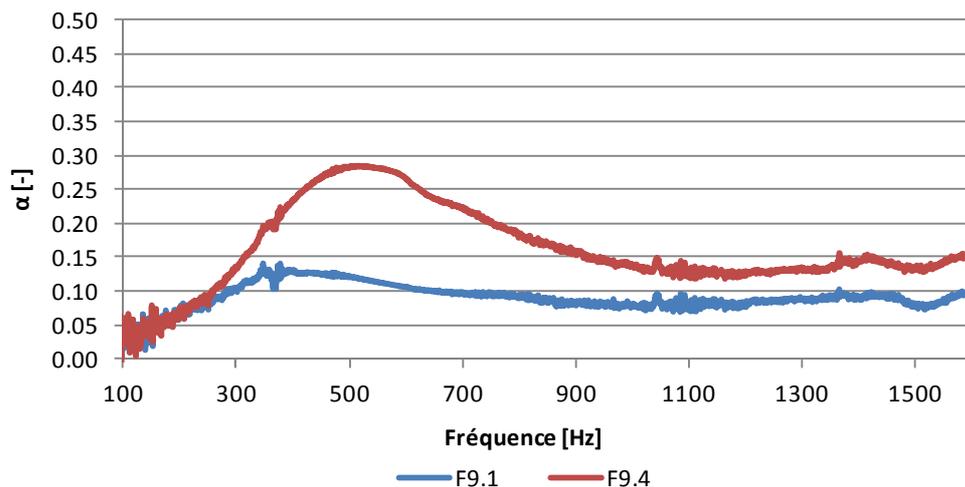


Fig. 21 Évaluation de la sensibilité de l'essai entre deux formules d'une même famille de LNA (échantillons F9.1 et F9.4 de la famille LNA 4₁₂).

Par contre cette sensibilité n'est pas atteinte pour tous les échantillons testés. De même, les différences constatées peuvent être dues à une répétabilité insuffisante (voir ci-dessous).

- Répétabilité : Trois échantillons sont relevés par plaque. La dispersion des mesures sur une seule plaque peut être importante si le compactage de la plaque se fait de manière non uniforme (Fig. 22 – gauche). Lorsque le compactage se fait de manière uniforme, la répétabilité de l'essai est assurée (Fig. 22 – droite).

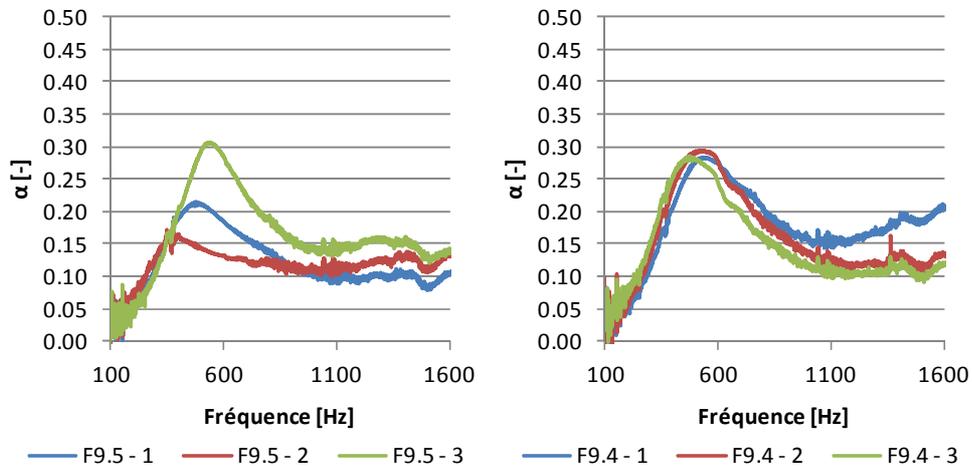


Fig. 22 Evaluation de la répétabilité de l'essai entre trois échantillons issus d'une même plaque (échantillons F9.5 – gauche ; échantillons F9.4 – droite).

Ainsi, la procédure d'essais déterminée durant cette première phase de la recherche (voir Annexe II) a pu être validée et sera appliquée dans la suite de la recherche. Il convient néanmoins de procéder avec beaucoup de soin au compactage des plaques pour l'essai au tube d'impédance.

La méthode du tube d'impédance permet de procéder à une classification acoustique des revêtements testés. Néanmoins la méthode seule est insuffisante pour décrire le comportement acoustique réel d'un revêtement.

4 Formulation

Les matériaux peu bruyants se caractérisent généralement par une courbe granulométrique serrée et discontinue, ce qui rend la formulation très sensible. La proportion de chacun des composants (granulats, liant, additifs) doit être analysée méthodiquement.

La démarche et la méthode de formulation (avec les différents paramètres et données) appliquée dans le cadre de ce projet est décrite dans le Chapitre 4.1. Les caractéristiques des matériaux choisis pour cette recherche font l'objet du Chapitre 4.2. Deux recettes de LNA 4 (12 et 16%) et deux recettes de LNA 8 (12 et 16%), sont formulées dans les Chapitres 4.3 et 4.4. Finalement, l'influence de certains paramètres supplémentaires a été évaluée lors d'une analyse de sensibilité sur certaines formules au Chapitre 4.5.

4.1 Démarche et méthode de formulation

La démarche adoptée dans le cadre de ce projet a été mise au point par le LAVOC dans le projet de recherche Unterhalt 2000 [4]. Elle a ensuite été légèrement adaptée pour introduire le comportement acoustique des enrobés peu bruyants. Cette démarche se base sur la méthode de formulation volumique du CRR [3] en y associant des étapes préliminaires et supplémentaires. L'objectif de la démarche étant de déterminer une composition volumique optimale de granulats, de liants et de vides qui permette d'atteindre les performances visées. Le schéma de la démarche est donné ci-après (Fig. 23).

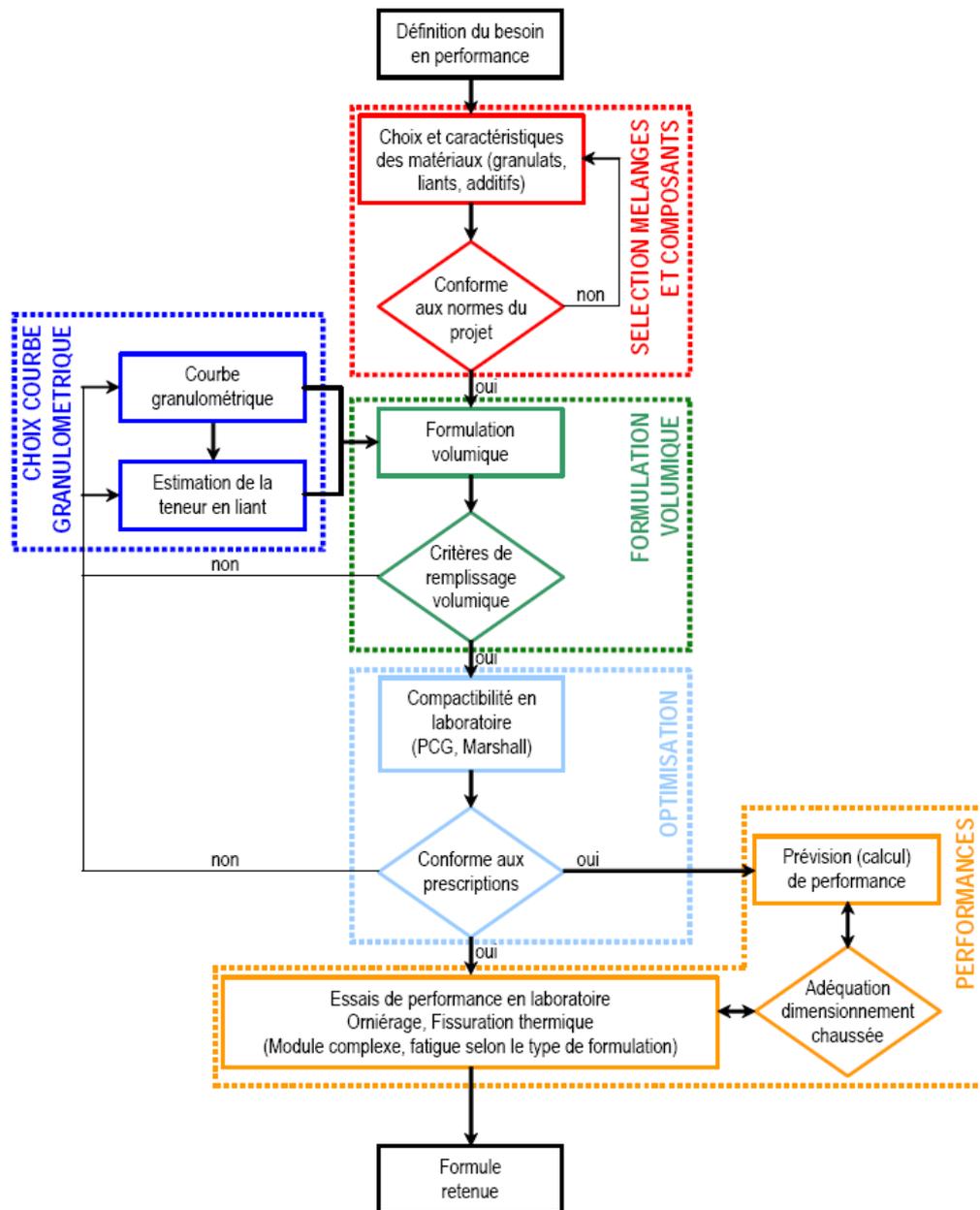


Fig. 23 Schéma de la démarche de formulation utilisée [4].

La démarche de formulation se compose de six phases principales qui sont :

1. Définition du besoin en performance,
2. Sélection des composants,
3. Formulation volumique,
4. Validation et optimisation,
5. Vérification – Performances,
6. Choix de la formule à retenir et performances secondaires.

L'avantage de cette démarche est de limiter par une approche théorique de la formulation (étape de formulation volumique) le nombre de recettes qui doivent être fabriquées en laboratoire.

4.1.1 Phase 1 : Définition du besoin en performance

La première phase consiste à choisir la valeur limite souhaitée vis-à-vis des performances mécaniques du matériau (p.ex. susceptibilité à l'eau, susceptibilité à l'orniérage, résistance à la fatigue, résistance à basse température, etc.). Ces performances doivent être traduites en pourcentage de vides, de teneur en liant et en caractéristiques des agrégats et du liant.

Dans le cadre de ce projet, en plus des performances mécaniques, des performances acoustiques sont intégrées dans la définition du besoin en performance.

4.1.2 Phase 2 : Sélection des composants

La sélection des composants consiste à choisir les granulats, le liant et les ajouts utilisés pour l'enrobé. Ceci sur la base des considérations suivantes :

- Trafic (volume, pourcentage de poids lourds, charge par essieu, etc.),
- Climatologie (pluviométrie, gel-dégel, température, ensoleillement, etc.),
- Position de la couche (roulement, base, fondation liée, etc.),
- Fonction de la couche (adhérence, perméabilité, bruit, orniérage, etc.).

Dans le cadre de ce projet, des composants pour des couches de roulement avec trafic urbain, permettant des performances acoustiques élevées sont à considérer. Le choix des composants est basé d'une part sur les conclusions tirées de l'état des connaissances global et d'autre part sur des considérations pratiques et théoriques. Les recommandations du projet de recherche "Revêtements peu bruyants à l'intérieur des localités" [1] ont tout particulièrement été intégrées dans le choix final. De même, des discussions avec la direction générale du projet et les responsables des projets individuels ont été menées afin de décider d'un commun accord des composants à intégrer (Chapitre 3).

Le choix des composants du mélange est d'une importance primordiale. Surtout pour des enrobés spécifiques, tels que les enrobés peu bruyants, un choix judicieux de ces composants (granulats, liant, ajouts) doit être fait avant de procéder à la phase de formulation.

Il est également essentiel de connaître les caractéristiques principales de ces composants. Ces caractéristiques servent comme données d'input à la formulation volumique (voir Phase 3).

Les caractéristiques principales des matériaux sont :

- Granulats (pour chaque fraction granulométrique) : Granulométrie, Densité – Masse volumique, Angularité (anguleux ou rond).
- Filler : Granulométrie, Densité – Masse volumique, Pourcentage de vides (Rigden).
- Liant : Pénétration à 25°C (et/ou autres températures), Point de ramollissement (température A & B), Densité, Viscosité dynamique et/ou cinématique à différentes températures, Température Fraass.
- Fibres : Densité.

4.1.3 Phase 3 : Formulation volumique

La formulation volumique appliquée est basée sur la méthode de formulation du CRR en Belgique qui est décrite dans le Code de bonne pratique pour la formulation des enrobés bitumineux [3]. On utilise le logiciel PradoWin pour cette phase.

La phase de formulation proprement dite utilise une série de formules théoriques qui prédisent l'arrangement des grains dans l'enrobé en fonction de sa composition

granulométrie. Les paramètres et les étapes qui interviennent lors du calcul sont les suivants :

1. Détermination des vides du squelette minéral,
2. Détermination du volume disponible pour le mastic,
3. Détermination de la composition du mastic en fonction de la nature du bitume et du filler,
4. Détermination de la composition en masse et vérification des critères de remplissage volumique.

Ces différentes étapes de calcul sont intégrées dans le logiciel spécifique PradoWin, lequel peut être employé pour des mélanges à squelette sableux et pierreux. Les enrobés peu bruyants peuvent, de par leur granulométrie à fort pourcentage de granulats pierreux (> 2 mm), être classés dans les mélanges à squelette pierreux.

Le logiciel permet d'analyser un nombre important de formulations présentant des courbes granulométriques variées ainsi que différentes teneurs en vides ou en liant. Pour ce faire, pour chaque cas à analyser, une courbe granulométrique cible avec ses limites à respecter doit être définie. Ensuite PradoWin détermine la composition en volume du mélange à l'aide des diverses fractions granulométriques. L'étape de formulation peut par la suite se faire selon deux cas distincts :

- En imposant un pourcentage de vides à atteindre dans le mélange final,
- En imposant un pourcentage de liant à atteindre dans le mélange final.

Le logiciel détermine par la suite la caractéristique manquante (% de vides ou % de liant). Finalement, la composition en masse des composants est calculée (pierre, sable, filler, bitume).

Un exemple d'une formulation théorique à l'aide de PradoWin est donné en annexe (Annexe IV).

4.1.4 Phase 4 : Validation et optimisation

Les essais de validation en laboratoire sont indispensables afin d'évaluer les résultats issus de l'approche théorique. Ils ont également pour objectif d'identifier et quantifier le biais entre la formulation théorique et la réalité obtenue en laboratoire. Comme mentionné auparavant, la validation se fait principalement à l'aide de l'essai Marshall et de la PCG.

La compactabilité du mélange est un indicateur pertinent des performances in-situ d'un enrobé. Ainsi, en plus de la fabrication de l'enrobé à partir de la teneur en liant déterminée par la formulation volumique, des fabrications avec au moins deux teneurs en liants différentes sont effectuées lors d'une phase d'optimisation. Des teneurs en liant inférieures et supérieures sont choisies avec des facteurs de variation déterminés selon le type de formules. Des gâchées d'essai en laboratoire sont élaborées pour chacune de ces teneurs et compactées en suivant la procédure Marshall et PCG.

4.1.5 Phase 5 : Vérification – Performances

Lors de la phase de vérification, les formules choisies sont soumises aux différents essais mécaniques et acoustiques principaux de laboratoire décrits antérieurement (Chapitre 3.3) afin d'évaluer leurs performances.

4.1.6 Phase 6 : Choix de la formule et performances secondaires

Le choix des formules à retenir se base d'une part sur les résultats de la phase 5 et d'autre part sur des facteurs complémentaires. Dans le cadre de cette formulation, un accent particulier sera porté sur le rôle du module de richesse et sa relation avec les performances mécaniques de l'enrobé.

4.2 Caractéristiques des matériaux

Les caractéristiques des matériaux utilisés dans cette recherche ont été préalablement analysées. Elles ont, par la suite, été utilisées pour la formulation théorique et en laboratoire des différents types de revêtements peu bruyants. La conformité des matériaux a en outre été déterminée à l'aide des essais de caractérisation des normes suisses et européennes en vigueur.

Les tableaux ci-après récapitulent les caractéristiques principales des granulats (Tab. 6) et du liant (Tab. 7) choisis.

Tab. 6 Principales caractéristiques des granulats

Granulat	Caractéristique	Valeur	Norme
Famsa-Choëx	Granularité filler	Annexe III	EN 933-10 / SN 670 902-10b
	Granulométrie :		
	– Fraction 0/2	Annexe III	EN 933-1 / SN 670 902-1b
	– Fraction 2/4		
	– Fraction 4/8		
	Masse volumique filler	2.705 [Mg/m ³]	EN 1097-7 / SN 670 903-7b
	Masse volumique :		
	– Fraction 0/2	2.72 [Mg/m ³]	EN 1097-6 / SN 670 903-6b
	– Fraction 2/4	2.72 [Mg/m ³]	
	– Fraction 4/8	2.72 [Mg/m ³]	
	Coefficient de polissage accéléré	60 [-]	EN 1097-8 / SN 670 903-8b
	Coefficient d'écoulement	37 [s]	EN 933-6 / SN 670 902-6b
Coefficient Los Angeles	19 [-]	EN 1097-2 / SN 670 903-2c	
Filler : Porosité intergranulaire	32 [%]	EN 1097-4 / SN 670 903-4b	
Filler : Pouvoir rigidifiant ΔR&B	17.3 [°C]	EN 13179-1 / SN 670 906-1a	
Balmholz	Granulométrie :		
	– Fraction 0/2	Annexe III	EN 933-1 / SN 670 902-1b
	– Fraction 2/4		

Les granulats Balmholz n'ont été évalués que de manière sommaire pour une formulation partielle. Les deux fractions employées pour ce granulat ont en outre dû être recomposés à partir de la fraction 0/4.

Tab. 7 Principales caractéristiques du liant

Styrelf E 60	Pénétration à 25°C	58·10 ⁻¹ [mm]	EN 1426 / SN 670 511 a
	Point de ramollissement (Température Anneau et Bille)	73.8 [°C]	EN 1427 / SN 670 512
	Indice de pénétrabilité	3.8 [-]	
	Point de fragilité Fraass	-22 [°C]	EN 12593 / SN 670 507
	Viscosité dynamique :		
	– à 90°C	422·10 ⁻¹ [Pa·s]	SN 671 722a
	– à 110°C	62.4·10 ⁻¹ [Pa·s]	
	– à 130°C	16·10 ⁻¹ [Pa·s]	
	– à 150°C	8·10 ⁻¹ [Pa·s]	
Densité	1.031 [t/m ³]	SN 671 713b	

Les fiches techniques des additifs (chaux hydratée et fibres de cellulose) figurent en annexe (Annexe III).

4.3 Low Noise Asphalt (LNA) 4

Dans un premier temps, la démarche de formulation présentée au Chapitre 4.1 a été appliquée aux LNA 4. Tout d'abord, les caractéristiques visées sont décrites (Chapitre 4.3.1), ensuite pour valider la méthode de formulation, une comparaison approfondie des résultats issus de l'outil de formulation PradoWin avec des résultats en laboratoire a été menée (Chapitre 4.3.2). Par la suite, les formules LNA 4 à 12 et 16% de vides ont été analysées et optimisées d'un point de vue mécanique et acoustique et deux formules-types ont été proposées (Chapitres 4.3.3 et 4.3.4).

4.3.1 Caractéristiques visées des LNA 4

Tel que décrit dans le Chapitre 3, plusieurs caractéristiques ont été définies afin de choisir les formules adéquates pour un type de formules donné. Il s'agit principalement de la teneur en vides, de la teneur en liant ainsi que du module de richesse.

Les teneurs en vides visées (16 et 12%) ont été choisies en accord avec la direction générale du projet, en se basant sur des expériences nationales et internationales. Ces valeurs visées permettent de s'intéresser à des teneurs en vides intermédiaires aux AC MR et aux PA.

La norme SN 640 431-1b-NA [35] fixe des valeurs limites pour les teneurs en liant des revêtements macrorugueux. Pour un AC MR 4, la teneur en liant minimale est de 6.2% sur enrobé (6.6% sur granulat). Cette valeur a été utilisée comme valeur minimale dans la phase de formulation volumique (phase 4).

La norme SN 640 431-1b-NA [35] fixe aussi les limites du fuseau de la courbe granulométrique des AC MR 4. Ainsi, il est possible de déterminer un fuseau du module de richesse pour la formule normalisée (Fig. 24). On constate que pour un AC MR 4 avec une teneur en liant minimale et une courbe granulométrique épousant la limite supérieure du fuseau normalisé, un module de richesse minimal de 3.7 est obtenu. Cette valeur a également été utilisée comme valeur minimale dans la phase de formulation volumique (phase 4).

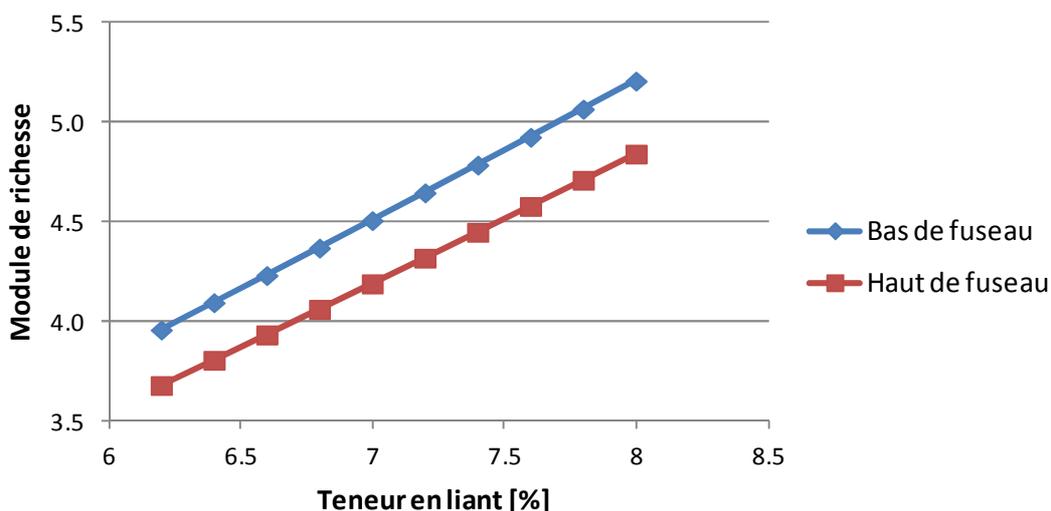


Fig. 24 Fuseau du module de richesse pour les AC MR 4.

L'analyse des revêtements peu bruyants mis en œuvre dans le cadre du projet de recherche "Revêtements peu bruyants à l'intérieur des localités" [1] a montré que pour les revêtements du type AC MR 4, des modules de richesse compris entre 3.8 et 4.2, avec des teneurs en liant sur enrobé correspondantes comprises entre 6.3 et 6.8%, ont été obtenus. Ces valeurs ont par la suite été utilisées comme valeurs de référence pour la formulation.

4.3.2 Validation de la formulation volumique

Dans un premier temps, des conditions maîtrisées ont été visées au niveau des composants granulaires. Ceci dans le but de limiter l'apparition de biais liés à une inhomogénéité des matériaux. Ainsi, les différentes fractions granulométriques ont été tamisées et écrêtées.

Sept recettes (F1 à F7) ont été définies à l'aide du logiciel PradoWin avec une teneur en vides visée de 12% et différentes courbes granulométriques utilisées. Le logiciel a, par la suite, déterminé les teneurs en liant correspondantes et les pourcentages des différents composants granulaires. Les teneurs en liant et les répartitions granulométriques de ces sept recettes sont donnés dans le tableau ci-après (Tab. 8).

Tab. 8 Recettes F1 à F7 pour la validation de la formulation volumique avec teneur en vides visée de 12%

Recette	Teneur en liant sur enrobé [% masse]	Granulométrie PradoWin Passant cumulé [% masse]						
		8 mm	4 mm	2 mm	1 mm	0.5 mm	0.25 mm	0.063 mm
F1	8.00	100	96.1	30.8	18.0	15.5	13.2	8.4
F2	5.65	100	96.4	35.8	22.6	19.3	16.3	10.3
F3	6.70	100	96.2	32.5	20.1	17.5	15.3	10.0
F4	6.90	100	96.3	34.3	20.2	16.6	13.4	7.8
F5	6.12	100	96.3	34.9	21.6	18.4	15.6	9.8
F6	6.64	100	96.1	31.1	19.9	18.3	16.8	11.8
F7	7.38	100	96.0	29.2	18.5	17.3	16.1	11.6

La formulation volumique de la fabrication F3 à l'aide de PradoWin peut être consultée en annexe en tant qu'exemple (Annexe IV).

Pour les sept recettes, des éprouvettes Marshall, des éprouvettes PCG et des plaques ont été fabriquées. Les teneurs en vides, qui ont été déterminées sur des éprouvettes confectionnées à l'aide de ces trois méthodes de compactage, sont synthétisées dans la Fig. 25.

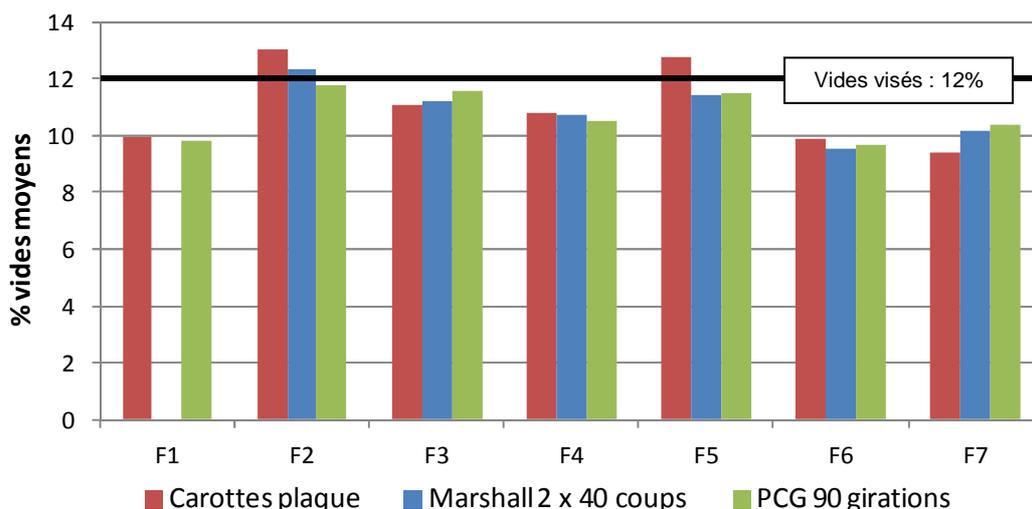


Fig. 25 Vides géométriques des sept recettes selon trois méthodes de compactage.

Les teneurs en vides mesurées se situent toutes entre 9 et 13%, ce qui démontre une bonne corrélation entre la valeur théorique visée dans Prado (12%) et les résultats des essais de validation en laboratoire. On peut également voir que le choix d'un compactage Marshall à 2x40 coups et d'un compactage PCG à 90 girations est comparable.

La bonne correspondance entre la formulation volumique déterminée à l'aide de PradoWin et les mesures de la teneur en vides en laboratoire, permet de valider la méthodologie de formulation utilisée.

4.3.3 Formulation des LNA 4₁₆

Dans un premier temps, plusieurs LNA 4 avec une teneur en vides visée de 16% ont été formulés théoriquement à l'aide de PradoWin. Des fractions non écrêtées et non tamisées (à l'exception du filler) ont été utilisées pour cette étape, afin de se rapprocher au maximum des conditions de fabrication réelles en centrale. Finalement, une recette a été choisie sur la base du module de richesse (entre 3.8 et 4.2) et de la teneur en liant (min. 6.2%). Les caractéristiques principales de la formule choisie sont représentées dans le tableau ci-après (Tab. 9).

Tab. 9 Principales caractéristiques de la formule F3.0

Fabrication	Teneur en liant sur enrobé [% masse]	Granulométrie PradoWin Passant cumulé [% masse]							Module de richesse [-]
		8 mm	4 mm	2 mm	1 mm	0.5 mm	0.25 mm	0.063 mm	
F3.0	6.70	100	96.1	32.1	18.6	15.7	13.1	10.0	4.14

A partir de la formule F3.0, l'optimisation de la formule a été effectuée (phase 4). Il s'agit de fabriquer, en plus de la formule F3.0, une formule F3.1 avec une teneur en liant plus élevée (+0.4%) et deux formules (F3.2, respectivement F3.3) avec des teneurs en liant plus faibles (-0.4%, respectivement -0.8%). Ces trois formules conservent la même granulométrie que celle de la formule F3.0 (Tab. 9).

4.3.3.1 Teneur en vides

L'influence du changement de la teneur en liant sur les teneurs en vides des différentes formules a ainsi pu être déterminée (Fig. 26).

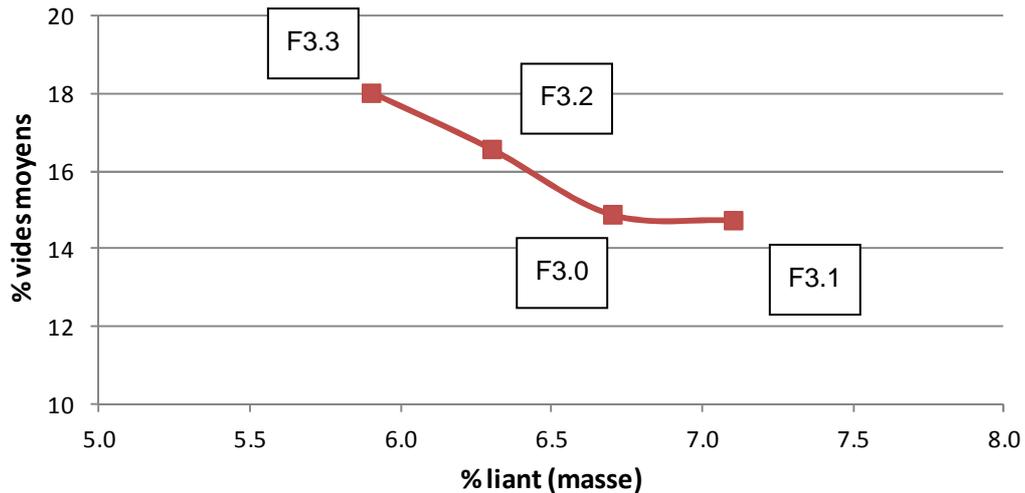


Fig. 26 Vides géométriques des formules F3.0 et F3.1 à F3.3 (valeurs moyennes Marshall 2x40 coups).

4.3.3.2 Granulométrie

Parmi les quatre formules, deux ont été choisies pour analyser l'écart entre la courbe granulométrique visée (Prado) et celle obtenue en laboratoire. Il s'agit des formules F3.0 (référence) et F3.3 (formule avec la teneur en liant la plus faible). Rassemblés dans la figure ci-après (Fig. 27), les résultats montrent une bonne corrélation au niveau des points du tamis à 0.063 mm (filler) et 4 mm. Par contre un léger déplacement de la courbe vers le haut peut être noté au milieu du fuseau (+4% à 2 mm). L'utilisation de fractions non écrêtées et non tamisées (à l'exception du filler) peut expliquer ce décalage.

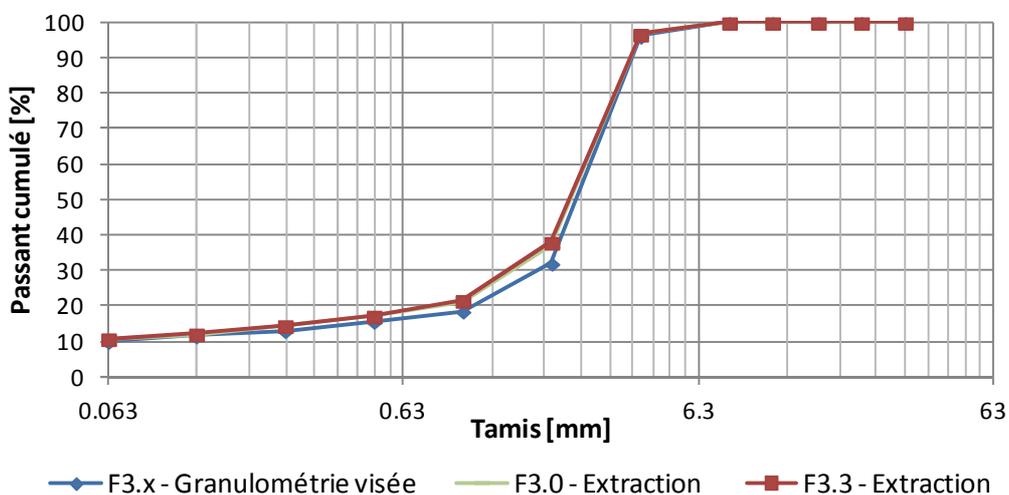


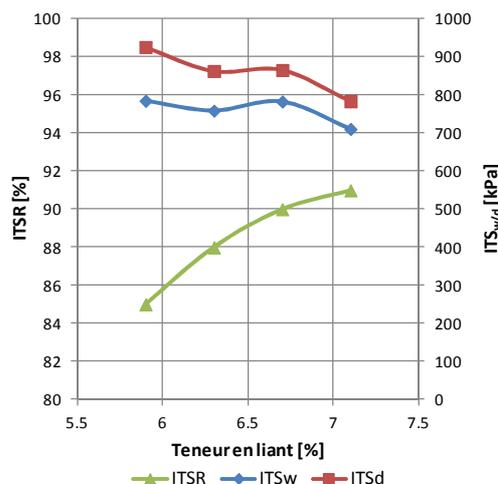
Fig. 27 Courbe granulométrique visée et courbes granulométriques des extractions F3.0 et F3.3.

4.3.3.3 Sensibilité à l'eau

Des essais de résistance à la traction indirecte et de sensibilité à l'eau ont été menés pour les quatre recettes fabriquées en laboratoire. Les résultats sont donnés dans le tableau ci-après (Tab. 10). On peut noter un ratio ITSR élevé (>85%) quelle que soit la teneur en liant. Par rapport à la résistance à la traction indirecte, une tendance à l'augmentation de la résistance à sec (ITS_d) et mouillée (ITS_w) est observée pour une diminution de la teneur en liant.

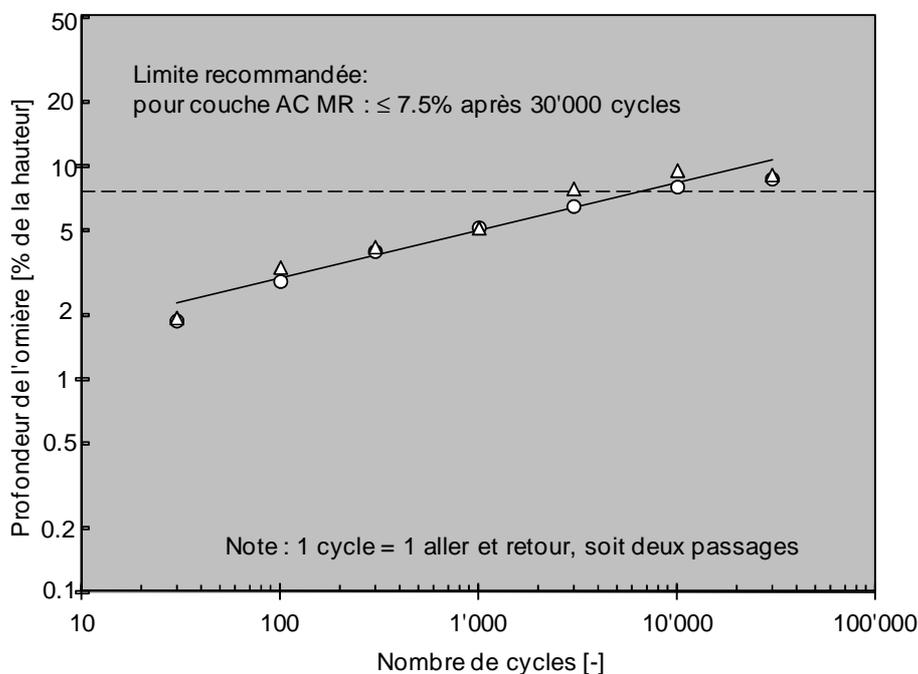
Tab. 10 Résultats de l'essai de sensibilité à l'eau

Fabrication	Teneur en liant sur enrobé [% masse]	Sensibilité à l'eau		
		ITS _d [kPa]	ITS _w [kPa]	ITSR [%]
F3.1	7.10	784	711	91
F3.0	6.70	866	783	90
F3.2	6.30	863	759	88
F3.3	5.90	926	785	85



4.3.3.4 Ornièreage

La formule avec la teneur en liant la plus élevée (F3.1 ; +0.4% par rapport à F3.0 ; cas le plus défavorable) a également été testée au simulateur de trafic léger avec deux plaques de 35 mm (Fig. 28). La profondeur d'ornière à 30'000 cycles (8.9%) dépasse légèrement la limite recommandée pour une couche en AC MR qui est de 7.5% pour des plaques de 50 mm. Notons néanmoins que cette valeur limite n'est pas applicable aux AC MR 4. L'influence de l'épaisseur des plaques sur les résultats du simulateur de trafic léger a été évaluée lors d'une analyse spécifique (Chapitre 3.4.3) et a montré des ornières plus importantes pour les plaques d'une épaisseur de 35 mm.

**Fig. 28** Profondeur d'ornière pour la formule F3.1 (plaques d'épaisseur 35 mm).

4.3.3.5 Facteur d'absorption acoustique

Des mesures du facteur d'absorption acoustique ont également été menées pour les quatre formules. Les résultats sont donnés dans la figure ci-après (Fig. 29). On peut noter un facteur d'absorption α supérieur à 0.3 pour les formules à teneur en vides élevée

et teneur en liant faible (formules F3.2 et F3.3). La formule de base (formule F3.0) présente le facteur d'absorption le plus faible ($\alpha = 0.15$). Les pics des facteurs d'absorption sont atteints pour des fréquences plus élevées pour les formules F3.2 et F3.3 (entre 600 et 800 Hz).

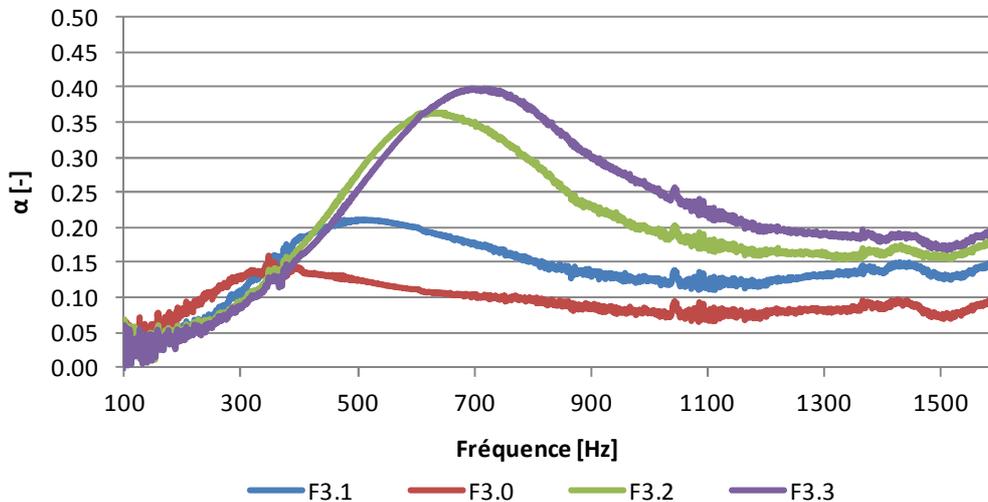


Fig. 29 Facteur d'absorption acoustique (valeurs moyennes par plaque).

4.3.3.6 Formule LNA 4₁₆ finale

Suite aux différents essais mécaniques et acoustiques, le choix final de la formule s'est posé sur une formule intermédiaire aux formules F3.0 et F3.2 avec une teneur en liant de 6.5% permettant d'atteindre la teneur en vides visée de 16%. Cette formule (F3.4 – LNA 4₁₆ finale) présente un module de richesse de 4.0 et a été choisie en tant que première formule de référence. Ses caractéristiques mécaniques et acoustiques principales sont données dans le tableau ci-après (Tab. 11). Les résultats détaillés des essais peuvent être consultés en annexe (Annexe V.1).

Tab. 11 Principales caractéristiques de la formule LNA 4₁₆ finale

Teneur en liant sur enrobé [% masse]	Teneur en vides géom. ¹ [%]	Granulométrie PradoWin Passant cumulé [% masse]						
		8 mm	4 mm	2 mm	1 mm	0.5 mm	0.25 mm	0.063 mm
6.50	15.9	100	96.1	32.1	18.6	15.7	13.1	10.0
Module de richesse [-]	Sensibilité à l'eau			Cantabro	Compression diamétrale			
	ITS _d [kPa]	ITS _w [kPa]	ITSR [%]		Contr. à la rupture -10°C [N/mm ²]	Contr. à la rupture +45°C [N/mm ²]	Δ(D)/D -10°C [10 ⁻³]	Δ(D)/D +45°C [10 ⁻³]
4.00	937	796	85	13.5	3.7	0.26	11.3	24.0
Simulateur de trafic léger		Essai Marshall		Tube d'impédance		¹ Valeur moyenne entre les trois méthodes de compactage : table de compactage, Marshall (2x40 coups), PCG (90 girations). ² Valeur moyenne de 4 éprouvettes Marshall (2x40 coups) à 500 tours dans tambour Los Angeles.		
Ornière 10'000 cycles [%]	Ornière 30'000 cycles [%]	Stabilité [kN]	Fluage [mm]	Facteur d'absorption max [-]	Fréquence correspond. [Hz]			
7.1	8.1	10.0	3.0	0.31	550			

La formule LNA 4₁₆ finale présente un comportement mécanique conforme aux prescriptions normatives en vigueur. Du point de vue acoustique, elle présente un comportement intéressant.

4.3.4 Formulation des LNA 4₁₂

A l'aide de PradoWin, plusieurs LNA 4 avec une teneur en vides visée de 12% ont été formulés. Des fractions non écrêtées et non tamisées (à l'exception du filler) ont à nouveau été utilisées. A l'aide du module de richesse de ces cas, une formule présentant les paramètres souhaités (module de richesse visé entre 3.8 et 4.2, teneur en liant min. de 6.2%) a été sélectionnée. Les caractéristiques principales de la formule choisie sont représentées dans le tableau ci-après (Tab. 12).

Tab. 12 Principales caractéristiques de la formule F9.1

Fabrication	Teneur en liant sur enrobé [% masse]	Granulométrie PradoWin Passant cumulé [% masse]							Module de richesse [-]
		8 mm	4 mm	2 mm	1 mm	0.5 mm	0.25 mm	0.063 mm	
F9.1	6.63	100	96.4	36.3	22.4	18.8	15.7	12.0	3.96

A partir de la formule F9.1, l'optimisation de la formule a été effectuée (phase 4). Il s'agit de fabriquer, en plus de la formule de base, une formule F9.5 avec une teneur en liant plus élevée (+0.4%) et une formule F9.4 avec une teneur en liant plus faible (-0.4%). Ces deux formules conservent la même granulométrie que celle de la formule F9.1 (Tab. 12).

4.3.4.1 Teneur en vides

L'influence du changement de la teneur en liant sur les teneurs en vides des différentes formules a ainsi pu être déterminée (Fig. 30).

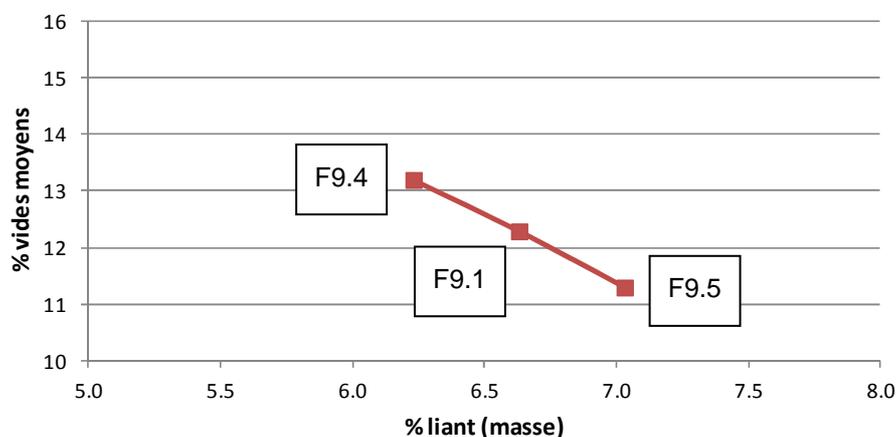


Fig. 30 Vides géométriques des formules F9.1, F9.4 et F9.5 (valeurs moyennes Marshall 2x40 coups).

4.3.4.2 Granulométrie

Parmi les trois formules, la formule F9.1 a été choisie pour analyser l'écart entre la courbe granulométrique visée (Prado) et celle obtenue en laboratoire. Les résultats sont donnés dans la figure ci-après (Fig. 31) et démontrent une excellente corrélation entre les deux courbes granulométriques.

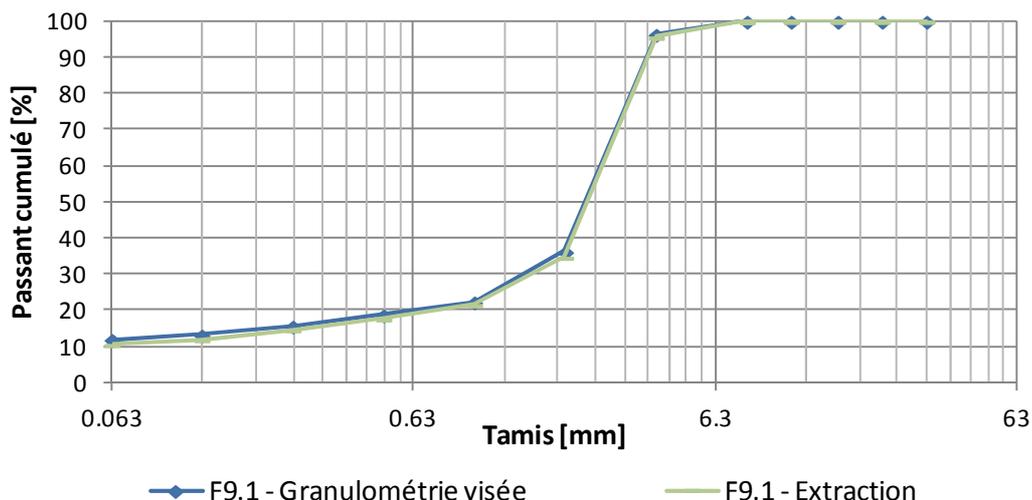


Fig. 31 Courbe granulométrique visée et courbe granulométrique de l'extraction de la formule F9.1.

4.3.4.3 Sensibilité à l'eau

Un essai de résistance à la traction indirecte et de sensibilité à l'eau a été mené pour la formule F9.4, formule ayant la teneur en liant la plus faible (-0.4% par rapport à F9.1 ; cas le plus défavorable). Les résultats sont donnés dans le tableau ci-après (Tab. 13). On peut noter un ratio ITS_R élevé (84%) et des résistances à la traction indirecte, à l'état sec (ITS_d) et humide (ITS_w), très élevées.

Tab. 13 Résultats de l'essai de sensibilité à l'eau

Fabrication	Teneur en liant sur enrobé [% masse]	Sensibilité à l'eau		
		ITS _d [kPa]	ITS _w [kPa]	ITS _R [%]
F9.4	6.23	1103	928	84

4.3.4.4 Orniérage

La formule avec la teneur en liant la plus élevée (F9.5 ; +0.4% par rapport à F9.1 ; cas le plus défavorable) a également été testée au simulateur de trafic léger avec deux plaques de 35 mm (Fig. 32). La profondeur d'ornièrre mesurée à 30'000 cycles (7.1%) est légèrement inférieure à la limite recommandée pour une couche en AC MR qui est de 7.5% pour des plaques de 50 mm. Notons néanmoins que cette valeur limite n'est pas applicable aux AC MR 4. L'influence de l'épaisseur des plaques sur les résultats du simulateur de trafic léger a été évaluée lors d'une analyse spécifique (Chapitre 3.4.3) et a montré des ornières plus importantes pour les plaques d'une épaisseur de 35 mm. Ainsi le comportement à l'orniérage de la formule F9.5 est à priori satisfaisant.

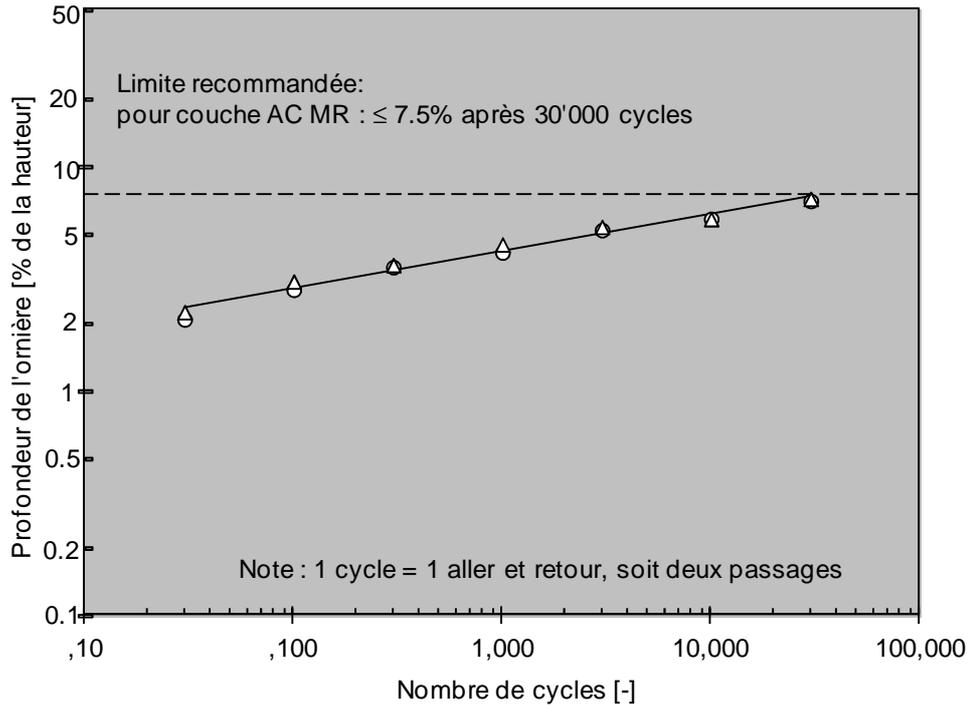


Fig. 32 Profondeur d'ornièrre pour la formule F9.5 (plaques d'épaisseur 35 mm).

4.3.4.5 Facteur d'absorption acoustique

Des mesures du facteur d'absorption acoustique ont également été menées pour les trois formules. Les résultats sont donnés dans la figure ci-après (Fig. 33). On peut noter un facteur d'absorption α supérieur à 0.3 pour la formule à teneur en vides élevée et teneur en liant faible (formule F9.4). La formule de base (formule F9.1) présente un facteur d'absorption intermédiaire ($\alpha = 0.22$). Les pics des facteurs d'absorption sont atteints pour des fréquences se situant entre 350 et 550 Hz.

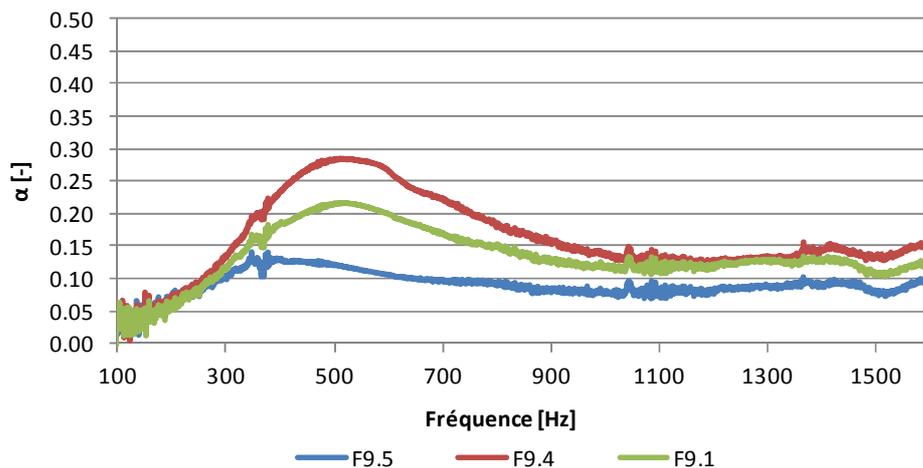


Fig. 33 Facteur d'absorption acoustique (valeurs moyennes par plaque).

4.3.4.6 Formule LNA 4₁₂ finale

Suite aux différents essais mécaniques et acoustiques, le choix final de la formule s'est posé sur la formule F9.1 avec une teneur en liant de 6.63% permettant d'atteindre la teneur en vides visée de 12%. Cette formule (F9.1 – LNA 4₁₂ finale) présente un module de richesse de 3.96 et a été choisie en tant que deuxième formule de référence. Les caractéristiques mécaniques et acoustiques principales de la formule sont données dans le tableau ci-après (Tab. 14). Les résultats détaillés des essais peuvent être consultés en annexe (Annexe V.2).

Tab. 14 Principales caractéristiques de la formule LNA 4₁₂ finale

Teneur en liant sur enrobé [% masse]	Teneur en vides géom. ¹ [%]	Granulométrie PradoWin Passant cumulé [% masse]						
		8 mm	4 mm	2 mm	1 mm	0.5 mm	0.25 mm	0.063 mm
6.63	12.3	100	96.4	36.3	22.4	18.8	15.7	12.0
Module de richesse [-]	Sensibilité à l'eau			Canta-bro	Compression diamétrale			
	ITS _d [kPa]	ITS _w [kPa]	ITSR [%]	Perte de matériaux ² [%]	Contr. à la rupture -10°C [N/mm ²]	Contr. à la rupture +45°C [N/mm ²]	Δ(D)/D -10°C [10 ⁻³]	Δ(D)/D +45°C [10 ⁻³]
3.96	962	761	79	12.0	4.2	0.31	10.0	12.4
Simulateur de trafic léger		Essai Marshall		Tube d'impédance		¹ Valeur moyenne entre les trois méthodes de compactage : table de compactage, Marshall (2x40 coups), PCG (90 girations). ² Valeur moyenne de 3 éprouvettes Marshall (2x40 coups) à 500 tours dans tambour Los Angeles.		
Ornière 10'000 cycles [%]	Ornière 30'000 cycles [%]	Stabilité [kN]	Fluage [mm]	Facteur d'absorption max [-]	Fréquence correspond. [Hz]			
5.9	7.1	11.0	3.7	0.22	500			

La formule LNA 4₁₂ finale présente un comportement mécanique conforme aux prescriptions normatives en vigueur. Du point de vue acoustique, elle présente un comportement intéressant. La formule LNA 4₁₂ finale présente un comportement mécanique et acoustique proche de la formule LNA 4₁₆ finale.

4.4 Low Noise Asphalt (LNA) 8

La prochaine étape consiste à appliquer la méthode de formulation aux LNA 8, avec de nouveau comme formules de base les LNA 8₁₆ et LNA 8₁₂.

L'optimisation des LNA 8 a été effectuée telle que définie dans les paramètres de base de la recherche (Chapitre 3). Tout d'abord, les caractéristiques visées sont décrites (Chapitre 4.4.1) puis la méthode de formulation a été validée (Chapitre 4.4.2). Par la suite, les formules LNA 8 à 12 et 16% de vides ont été analysées et optimisées d'un point de vue mécanique et acoustique et deux formules-types sont proposées (Chapitres 4.4.3 et 4.4.4).

4.4.1 Caractéristiques visées des LNA 8

Les caractéristiques visées des LNA 8 sont identiques aux LNA 4 (Chapitre 4.3.1). Il s'agit principalement de la teneur en vides, de la teneur en liant ainsi que du module de richesse. Des teneurs en vides de 16 et 12% ont également été choisies pour les LNA 8.

Concernant les teneurs en liant, il existe des valeurs limites par rapport aux revêtements macrorugueux, données dans la norme SN 640 431-1b-NA [35]. Ainsi pour un AC MR 8, une teneur en liant minimale de 5.8% sur enrobé (6.2% sur granulat) est proposée. Cette valeur a été utilisée comme valeur minimale dans la phase de formulation volumique (phase 4).

La norme SN 640 431-1b-NA [35] indique également les limites du fuseau de la courbe granulométrique des AC MR 8. Ainsi, il est possible de déterminer un fuseau du module de richesse par rapport à la formule normalisée (Fig. 34). On constate que pour un AC MR 8 avec une teneur en liant minimale et une courbe granulométrique épousant la limite supérieure du fuseau normalisé, un module de richesse minimal de 3.5 est obtenu. Cette valeur a également été utilisée comme valeur minimale dans la phase de formulation volumique (phase 4).

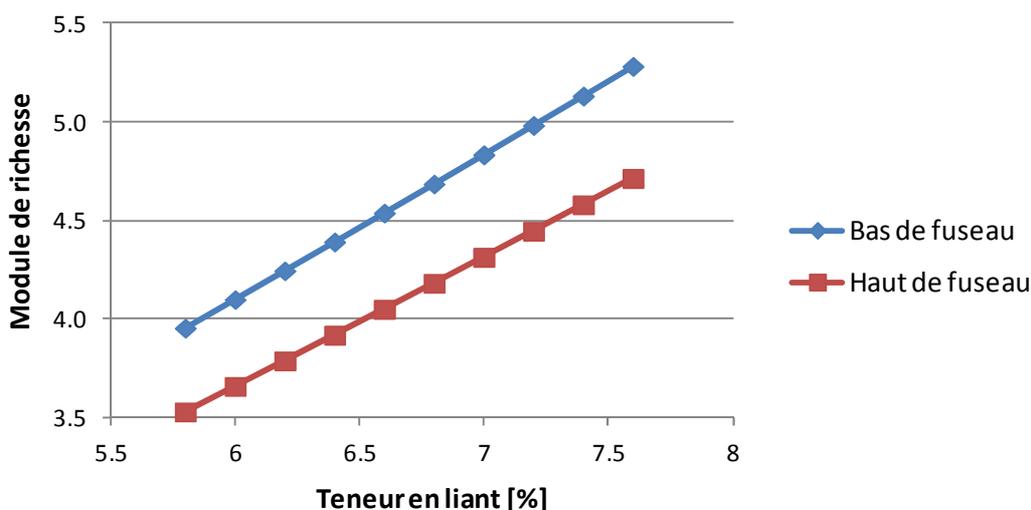


Fig. 34 Fuseau du module de richesse pour les AC MR 8.

L'analyse des revêtements peu bruyants mis en œuvre dans le cadre du projet de recherche "Revêtements peu bruyants à l'intérieur des localités" [1] a montré que pour les revêtements du type AC MR 8, des modules de richesse compris entre 3.5 et 3.6, avec des teneurs en liant sur enrobé correspondantes comprises entre 5.6 et 5.7%, ont été obtenus. Ces valeurs semblent très faibles par rapport aux AC MR 4 posés (module de richesse entre 3.8 et 4.2). Des modules de richesse plus élevés ont été évalués dans le cadre de cette recherche.

4.4.2 Validation de la formulation volumique

La phase de validation pour les LNA 8 s'est faite directement à travers la mise au point de la formule-type LNA 8₁₂. Les premières fabrications effectuées ont montré un certain écart entre la formulation volumique visée à l'aide du logiciel PradoWin et les gâchées produites en laboratoire. Cet écart s'est manifesté par une dispersion des teneurs en vides mesurées par rapport à la teneur en vides visée de 12%. Cette dispersion s'explique probablement par un décalage des courbes granulométriques dû à une inhomogénéité de la fraction granulométrique 4/8. Des extractions ont été menées afin de déceler ce décalage (Fig. 35).

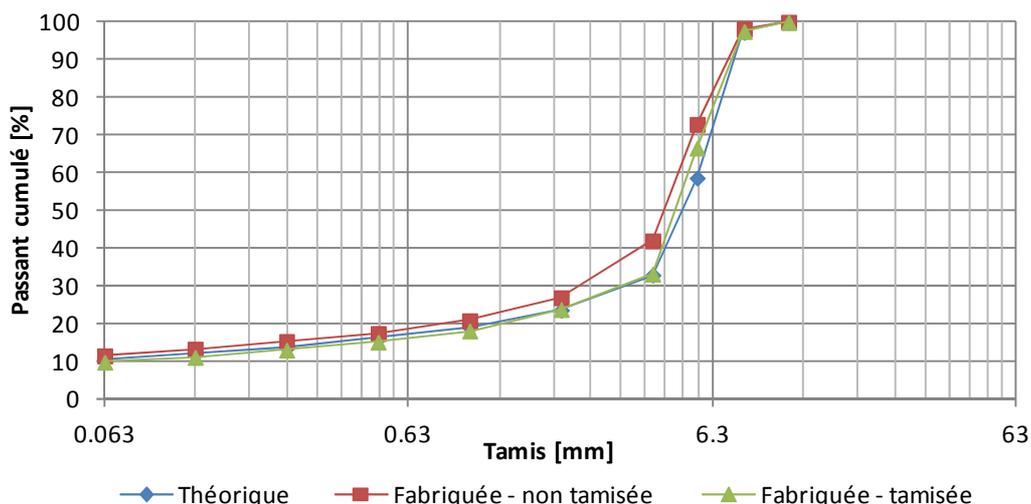


Fig. 35 Courbe granulométrique visée et courbes granulométriques de plusieurs extractions.

Il a donc été décidé de tamiser la fraction 4/8 à 4 mm afin d'assurer une bonne homogénéité de la granulométrie. Pour la fabrication des LNA 8, il est donc primordial d'assurer une bonne homogénéité des matériaux ou le cas échéant de réaliser un tamisage de certaines fractions.

Par la suite, la bonne correspondance entre la formulation volumique déterminée à l'aide de PradoWin et les essais de mesure de la teneur en vides en laboratoire, a permis de valider la méthodologie de formulation utilisée (Chapitre 4.4.4).

4.4.3 Formulation des LNA 8₁₆

A l'aide de PradoWin, plusieurs LNA 8 avec une teneur en vides visée de 16% ont été formulés. Un filler écrêté, des fractions 0/2 et 2/4 mm non écrêtées et non tamisées et une fraction 4/8 uniquement tamisée (voir Chapitre 4.4.2) ont été utilisés. A l'aide du module de richesse de ces cas, une formule a été choisie présentant les paramètres souhaités (module visé entre 3.8 et 4.2 – comme pour les LNA 4, teneur en liant min. de 5.8%). Les caractéristiques principales de la formule choisie sont représentées dans le tableau ci-après (Tab. 15).

Tab. 15 Principales caractéristiques de la formule H2.2

Fabrication	Teneur en liant sur enrobé [% masse]	Granulométrie PradoWin Passant cumulé [% masse]							Module de richesse [-]
		8 mm	4 mm	2 mm	1 mm	0.5 mm	0.25 mm	0.063 mm	
H2.2	6.21	97.2	32.0	21.8	16.6	13.3	10.5	7.0	4.13

L'optimisation de la formule a été effectuée (phase 4) à partir de la formule H2.2. Il s'agit de fabriquer, en plus de la formule de base, une formule H2.1 avec une teneur en liant plus élevée (+0.4%) et une formule H2.3 avec une teneur en liant plus faible (-0.4%). Ces deux formules conservent la même granulométrie que celle de la formule H2.2 (Tab. 15).

4.4.3.1 Teneur en vides

L'influence du changement de la teneur en liant sur les teneurs en vides des différentes formules a ainsi pu être déterminée (Fig. 36).

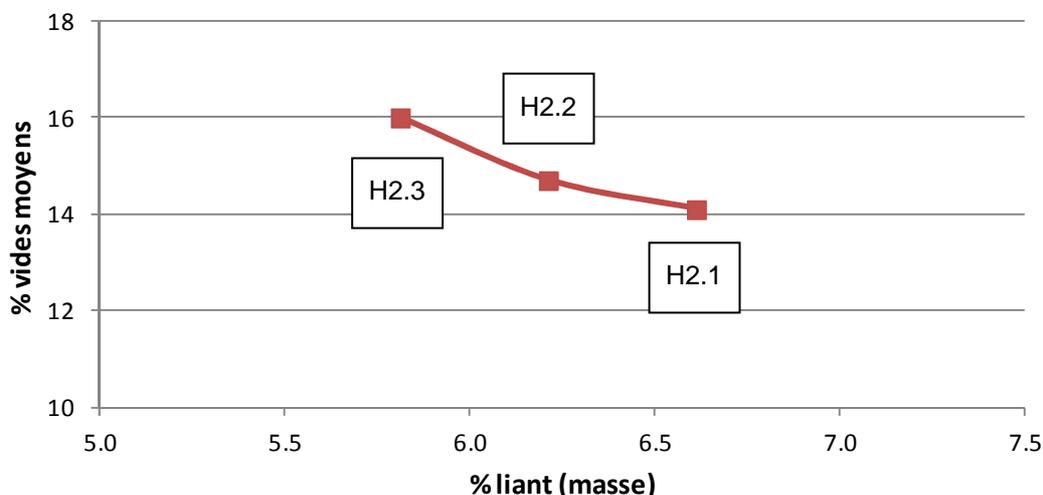


Fig. 36 Vides géométriques des formules H2.2, H2.1 et H2.3 (valeurs moyennes Marshall 2x40 coups).

4.4.3.2 Sensibilité à l'eau

Un essai de résistance à la traction indirecte et de sensibilité à l'eau a été mené pour la formule H2.3, fabrication ayant la teneur en liant la plus faible (-0.4% par rapport à H2.2 ; cas le plus défavorable). Les résultats sont donnés dans le tableau ci-après (Tab. 16). On peut noter un ratio ITS_R (91%) très élevé et des résistances à la traction indirecte, à l'état sec (ITS_d) et humide (ITS_w), élevées.

Tab. 16 Résultats de l'essai de sensibilité à l'eau

Fabrication	Teneur en liant sur enrobé [% masse]	Sensibilité à l'eau		
		ITS _d [kPa]	ITS _w [kPa]	ITS _R [%]
H2.3	5.81	832	757	91

4.4.3.3 Orniéage

La formule avec la teneur en liant la plus élevée (H2.1 ; +0.4% par rapport à H2.2 ; cas le plus défavorable) a été testée au simulateur de trafic léger avec deux plaques de 50 mm (Fig. 37). La profondeur d'ornièrre mesurée à 30'000 cycles (6.2%) est inférieure à la limite recommandée pour une couche en AC MR qui est de 7.5% pour des plaques de 50 mm. Ainsi le comportement à l'orniéage de la formule H2.1 est conforme aux prescriptions des normes.

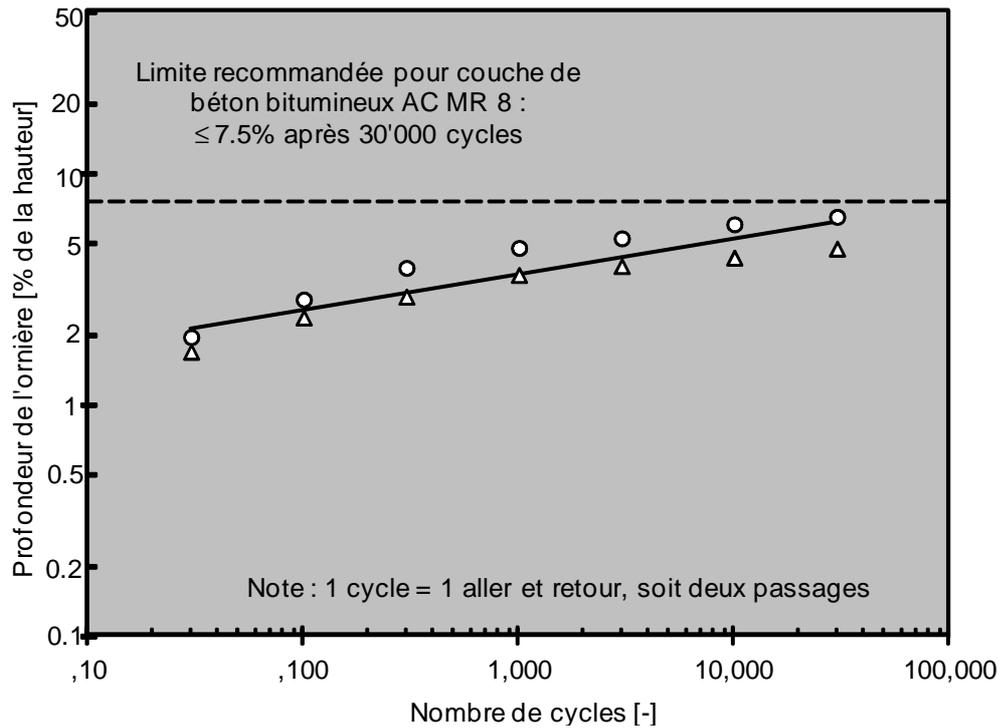


Fig. 37 Profondeur d'ornièrre pour la formule H2.1 (plaques d'épaisseur 50 mm).

4.4.3.4 Facteur d'absorption acoustique

Des mesures du facteur d'absorption acoustique ont également été menées pour les trois formules. Les résultats sont donnés dans la figure ci-après (Fig. 38). On peut noter un facteur d'absorption α supérieur à 0.3 pour les trois formules. La formule avec la teneur en vides la plus élevée (formule H2.3) présente le facteur d'absorption le plus faible, contrairement aux LNA 4. Les pics des facteurs d'absorption sont atteints pour des fréquences se situant entre 650 et 750 Hz pour les trois formules.

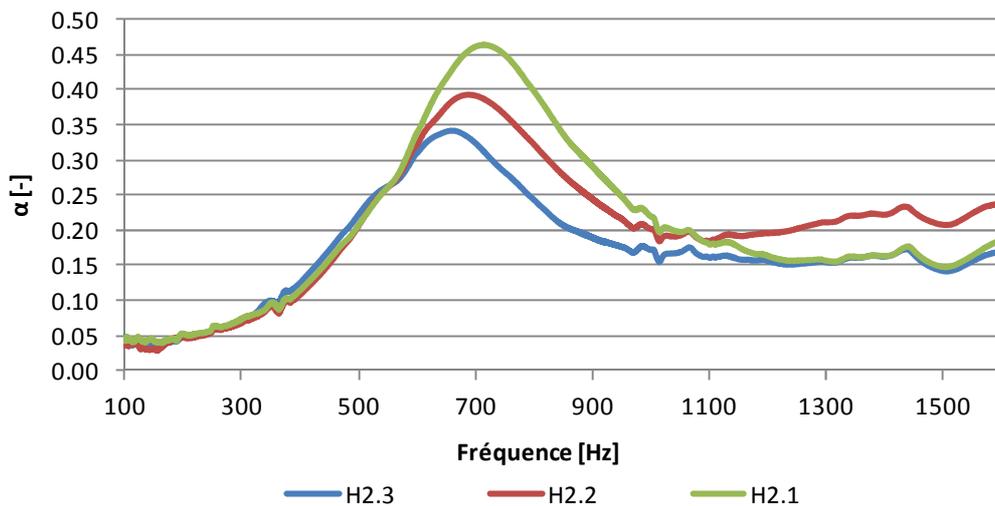


Fig. 38 Facteur d'absorption acoustique (valeurs moyennes par plaque).

4.4.3.5 Formule LNA 8₁₆ finale

Suite aux différents essais mécaniques et acoustiques, le choix final de la formule s'est porté sur la formule H2.2 avec une teneur en liant de 6.21% permettant d'atteindre la teneur en vides visée de 16%. Cette formule (H2.2 – LNA 8₁₆ finale) présente un module de richesse de 4.13 et a été choisie en tant que première formule de référence pour les LNA 8. Les caractéristiques mécaniques et acoustiques principales de la formule sont données dans le tableau ci-après (Tab. 17). Les résultats détaillés des essais peuvent être consultés en annexe (Annexe V.3).

Tab. 17 Principales caractéristiques de la formule LNA 8₁₆ finale

Teneur en liant sur enrobé [% masse]	Teneur en vides géom. ¹ [%]	Granulométrie PradoWin Passant cumulé [% masse]							
		8 mm	4 mm	2 mm	1 mm	0.5 mm	0.25 mm	0.063 mm	
6.21	14.6	97.2	32.0	21.8	16.6	13.3	10.5	7.0	
Module de richesse [-]	Sensibilité à l'eau			Canta-bro	Compression diamétrale				
	ITS _d [kPa]	ITS _w [kPa]	ITSR [%]	Perte de matériaux ² [%]	Contr. à la rupture -10°C [N/mm ²]	Contr. à la rupture +45°C [N/mm ²]	Δ(D)/D -10°C [10 ⁻³]	Δ(D)/D +45°C [10 ⁻³]	
4.13	936	858	92	14.0	4.4	0.29	10.1	18.5	
Simulateur de trafic léger		Essai Marshall		Tube d'impédance		¹ Valeur moyenne entre les deux méthodes de compactage : Marshall (2x40 coups), PCG (90 rotations). ² Valeur moyenne de 3 éprouvettes Marshall (2x40 coups) à 500 tours dans tambour Los Angeles.			
Ornière 10'000 cycles [%]	Ornière 30'000 cycles [%]	Stabilité [kN]	Fluage [mm]	Facteur d'absorption max [-]	Fréquence correspond. [Hz]				
6.3	7.1	10.5	3.1	0.40	700				

La formule LNA 8₁₆ finale présente un comportement mécanique conforme aux prescriptions normatives en vigueur. Du point de vue acoustique, elle présente un comportement très intéressant. La formule LNA 8₁₆ finale présente un comportement mécanique proche des formules LNA 4, et un meilleur comportement acoustique.

4.4.4 Formulation des LNA 8₁₂

A l'aide de PradoWin, plusieurs LNA 8 avec une teneur en vides visée de 12% ont été formulés. Un filler écrêté, des fractions 0/2 et 2/4 mm non écrêtées et non tamisées et une fraction 4/8 uniquement tamisée (voir Chapitre 4.4.2) ont été utilisés. A l'aide du module de richesse de ces cas, une formule présentant les paramètres souhaités (module de richesse visé entre 3.8 et 4.2 – comme pour les LNA 4, teneur en liant min. de 5.8%) a été sélectionnée. Les caractéristiques principales de la formule choisie sont représentées dans le tableau ci-après (Tab. 18).

Tab. 18 Principales caractéristiques de la formule G1.2

Fabrication	Teneur en liant sur enrobé [% masse]	Granulométrie PradoWin Passant cumulé [% masse]							Module de richesse [-]
		8 mm	4 mm	2 mm	1 mm	0.5 mm	0.25 mm	0.063 mm	
G1.2	6.49	97.3	32.9	23.6	19.1	16.1	13.6	10.5	4.02

A partir de la formule G1.2, l'optimisation de la formule a été effectuée (phase 4). Il s'agit de fabriquer, en plus de la formule de base, une formule G1.4 avec une teneur en liant

plus élevée (+0.4%) et une formule G1.5 avec une teneur en liant plus faible (-0.4%). Ces deux formules conservent la même granulométrie que celle de la formule G1.2 (Tab. 18).

4.4.4.1 Teneur en vides

L'influence du changement de la teneur en liant sur les teneurs en vides des différentes formules a ainsi pu être déterminée (Fig. 39). Suite à un comportement atypique des formules, c.-à-d. une augmentation de la teneur en vides avec l'augmentation de la teneur en liant, des gâchées supplémentaires ont été réalisées. Celles-ci ont néanmoins montré un comportement identique aux premières gâchées. Des investigations plus poussées n'ont pas été menées afin de trouver une explication à ce phénomène.

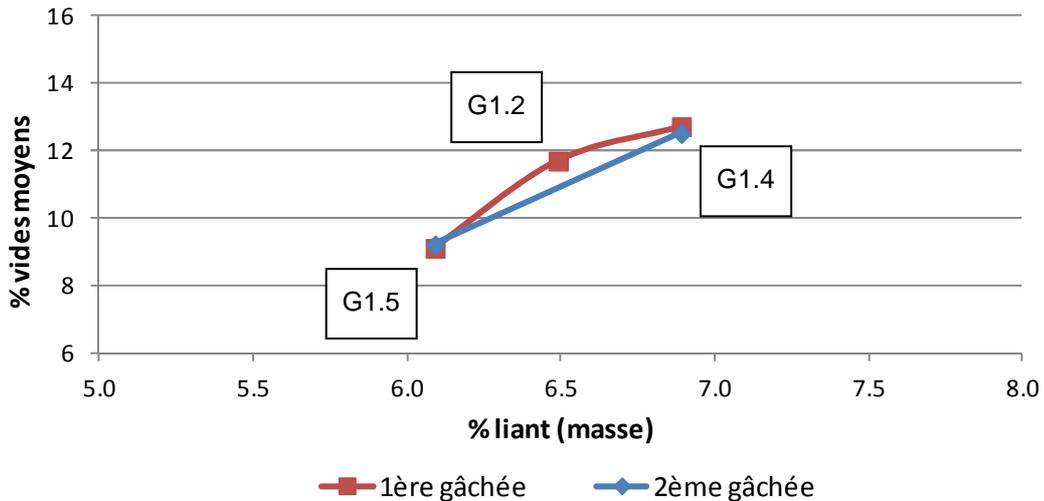


Fig. 39 Vides géométriques des formules G1.2, G1.4 et G1.5 (valeurs moyennes Marshall 2x40 coups).

4.4.4.2 Sensibilité à l'eau

Un essai de résistance à la traction indirecte et de sensibilité à l'eau a été mené pour la formule G1.5, formule ayant la teneur en liant la plus faible (-0.4% par rapport à G1.2 ; cas le plus défavorable). Les résultats sont donnés dans le tableau ci-après (Tab. 19). On peut noter un ratio ITS_R (88%) et des résistances à la traction indirecte, à l'état sec (ITS_d) et humide (ITS_w), très élevés.

Tab. 19 Résultats de l'essai de sensibilité à l'eau

Fabrication	Teneur en liant sur enrobé [% masse]	Sensibilité à l'eau		
		ITS _d [kPa]	ITS _w [kPa]	ITS _R [%]
G1.5	6.09	1237	1094	88

4.4.4.3 Orniérage

La formule avec la teneur en liant la plus élevée (G1.4 ; +0.4% par rapport à G1.2 ; cas le plus défavorable) a également été testée au simulateur de trafic léger avec deux plaques de 50 mm (Fig. 40). La profondeur d'ornièrisme mesurée à 30'000 cycles (7.0%) est inférieure à la limite recommandée pour une couche en AC MR qui est de 7.5% pour des plaques de 50 mm. Ainsi le comportement à l'ornièrisme de la formule G1.4 est conforme aux prescriptions des normes.

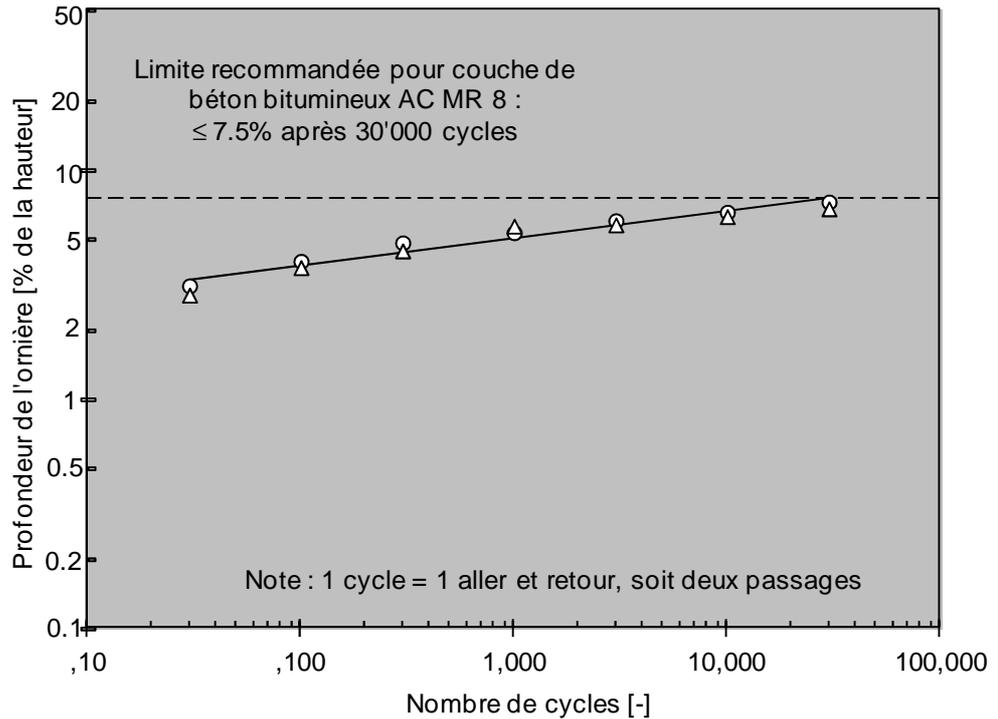


Fig. 40 Profondeur d'ornière pour la formule G1.4 (plaques d'épaisseur 50 mm).

4.4.4.4 Facteur d'absorption acoustique

Des mesures du facteur d'absorption acoustique ont également été menées pour les trois formules. Les résultats sont donnés dans la figure ci-après (Fig. 41). On peut noter un facteur d'absorption α inférieur à 0.2 pour les trois formules. La formule de base (formule G1.2) présente le facteur d'absorption le plus élevé ($\alpha = 0.18$). Notons que la formule avec la teneur en vides la plus élevée (formule G1.4) présente un facteur d'absorption faible. Le pic du facteur d'absorption est atteint pour une fréquence se situant autour des 500 Hz pour la formule G1.2.

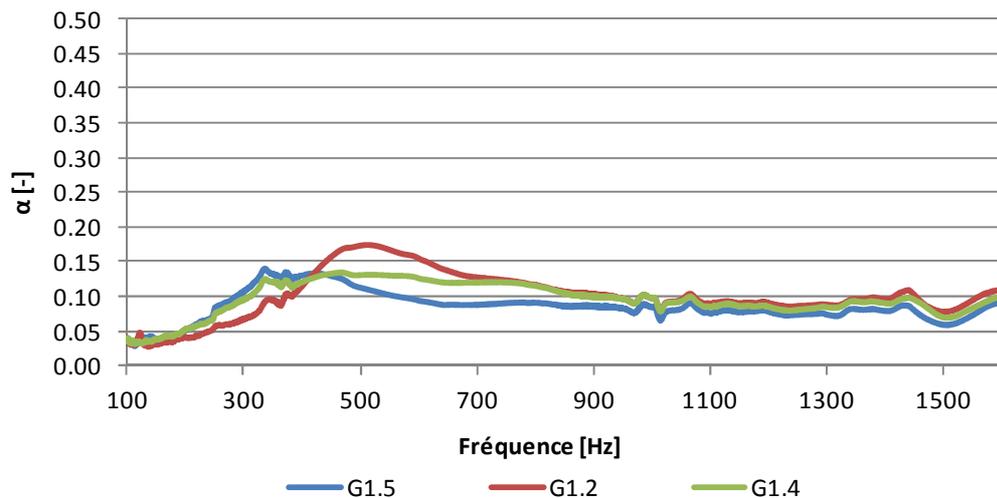


Fig. 41 Facteur d'absorption acoustique (valeurs moyennes par plaque).

4.4.4.5 Formule LNA 8₁₂ finale

Suite aux différents essais mécaniques et acoustiques, le choix final de la formule s'est porté sur la formule G1.2 avec une teneur en liant de 6.49% permettant d'atteindre la teneur en vides visée de 12%. Cette formule (G1.2 – LNA 8₁₂ finale) présente un module de richesse de 4.02 et a été choisie en tant que deuxième formule de référence pour les LNA 8. Les caractéristiques mécaniques et acoustiques principales de la formule sont données dans le tableau ci-après (Tab. 20). Les résultats détaillés des essais peuvent être consultés en annexe (Annexe V.4).

Tab. 20 Principales caractéristiques de la formule LNA 8₁₂ finale

Teneur en liant sur enrobé [% masse]	Teneur en vides géom. ¹ [%]	Granulométrie PradoWin Passant cumulé [% masse]						
		8 mm	4 mm	2 mm	1 mm	0.5 mm	0.25 mm	0.063 mm
6.49	11.7	97.3	32.9	23.6	19.1	16.1	13.6	10.5
Module de richesse [-]	Sensibilité à l'eau			Canta-bro	Compression diamétrale			
	ITS _d [kPa]	ITS _w [kPa]	ITSR [%]	Perte de matériaux ² [%]	Contr. à la rupture -10°C [N/mm ²]	Contr. à la rupture +45°C [N/mm ²]	Δ(D)/D -10°C [10 ⁻³]	Δ(D)/D +45°C [10 ⁻³]
4.02	895	820	92	15.0	4.4	0.30	10.1	13.7
Simulateur de trafic léger		Essai Marshall		Tube d'impédance		¹ Valeur moyenne entre les trois méthodes de compactage : table de compactage, Marshall (2x40 coups), PCG (90 girations). ² Valeur moyenne de 3 éprouvettes Marshall (2x40 coups) à 500 tours dans tambour Los Angeles.		
Ornière 10'000 cycles [%]	Ornière 30'000 cycles [%]	Stabilité [kN]	Fluage [mm]	Facteur d'absorption max [-]	Fréquence correspond. [Hz]			
3.8	4.1	11.0	3.8	0.18	500			

La formule LNA 8₁₂ finale présente un comportement mécanique conforme aux prescriptions normatives en vigueur. Du point de vue acoustique, elle présente un comportement moins intéressant que la formule LNA 8₁₆. La formule LNA 8₁₂ finale présente un comportement mécanique et acoustique proche de celui des LNA 4.

4.5 Analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité a été effectuée sur certaines formules choisies. L'impact d'un changement du type de granulats et de l'ajout d'additifs sur le comportement mécanique des différentes formules a été analysé :

- Changement du type de granulats : Utilisation de granulats Balmholz.
- Ajout d'additifs : Utilisation d'additifs (chaux hydratée, fibres de cellulose).

4.5.1 Changement du type de granulats

Une évaluation sommaire de l'effet du changement du type de granulats sur le comportement mécanique d'une formule choisie a été effectuée. Le choix de la formule s'est portée sur la formule LNA 4₁₆ finale, formule présentant un comportement mécanique et acoustique très prometteur.

Les caractéristiques principales des granulats Balmholz sont décrites aux chapitres 3.2.3 et 4.2.

L'évaluation mécanique a porté sur les propriétés et les essais suivants :

- Compactabilité (Marshall) selon EN 12697-30 [42].
- Sensibilité à l'eau (ITSR – Résistance à la traction indirecte (ITS) avec/sans conditionnement dans l'eau) selon EN 12697-12 [37].
- Orniérage (STL – simulateur de trafic léger) selon EN 12697-22 [40] sur certaines formules choisies (formulations à teneurs en liant élevées).
- Cohésivité (Essai Cantabro) à -10°C sur éprouvettes Marshall selon EN 12697-17 [38].
- Résistance à la traction indirecte ITS (compression diamétrale) à -10 et +45°C selon EN 12697-23 [41].

Compactabilité

L'utilisation des granulats Balmholz fait très légèrement diminuer (différence inférieure à 1.0%) la teneur en vides de la formule testée par rapport à la formule de référence avec des granulats Famsa (Fig. 42).

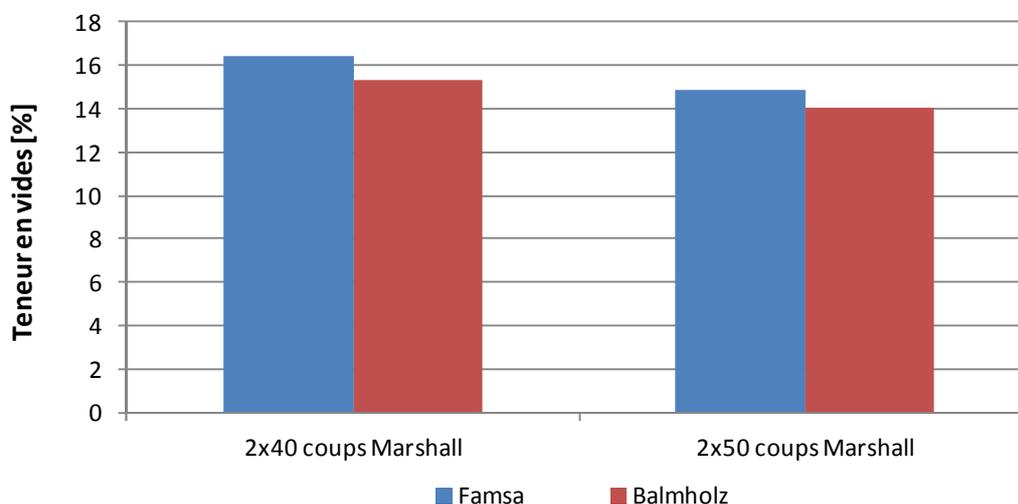


Fig. 42 Teneurs en vides sur Marshall.

Sensibilité à l'eau

L'utilisation des granulats Balmholz diminue considérablement la sensibilité à l'eau de la formule testée par rapport à la formule de référence avec des granulats Famsa (Tab. 21). Les granulats Balmholz présentent un comportement à sec et humide assez proche. Par comparaison avec les formules à base de granulats Famsa, la résistance à la traction indirecte à sec est plus faible. Ce phénomène pourrait s'expliquer par les caractéristiques spécifiques des granulats (composition minéralogique).

Tab. 21 Sensibilité à l'eau

Granulat	Formule type	ITS _d [kPa]	ITS _w [kPa]	ITSR [%]
Famsa	LNA 4 ₁₆	937	796	85
Balmholz	LNA 4 ₁₆	873	837	96

Orniérage

Le comportement à l'orniérage des mélanges obtenus avec les deux types de granulats est sensiblement le même (Tab. 22). Les deux recettes dépassent légèrement les valeurs maximales recommandées pour un AC MR 8 (7.5%).

Tab. 22 Orniérage au simulateur de trafic léger (STL)

Granulat	Formule type	Ornière mesurée 10'000 cycles [%]	Ornière mesurée 30'000 cycles [%]
Famsa	LNA 4 ₁₆	7.1	8.1
Balmholz	LNA 4 ₁₆	7.5	8.0

Cohésivité

L'utilisation des granulats Balmholz diminue légèrement la cohésivité de la formule testée par rapport à la formule de référence avec des granulats Famsa (Tab. 23).

Tab. 23 Cohésivité selon essai Cantabro

Granulat	Formule type	Perte de matériaux [%]
Famsa	LNA 4 ₁₆	13.5
Balmholz	LNA 4 ₁₆	15.5

Résistance à la traction indirecte

La résistance à la traction indirecte des deux types de granulats est très proche au niveau de la contrainte à la rupture (Tab. 24).

Tab. 24 Résistance à la traction indirecte

Granulat	Formule type	Contr. à la rupture -10°C [N/mm ²]	Contr. à la rupture +45°C [N/mm ²]	$\Delta D/D$ -10°C [10 ⁻³]	$\Delta D/D$ +45°C [10 ⁻³]
		Famsa	LNA 4 ₁₆	3.7	0.26
Balmholz	LNA 4 ₁₆	4.5	0.25	8.3	12.1

Conclusions

Un comportement mécanique très proche entre les deux types de granulats peut être noté pour la formule type testée. Ceci indique que la méthodologie de formulation employée dans le cadre de cette recherche peut être utilisée pour différents types de matériaux granulaires.

L'effet du changement du type de granulats sur le comportement acoustique n'a malheureusement pas pu être mesuré mais il devrait être faible.

Le recours à des matériaux granulaires de grande qualité reste recommandé pour les différentes formules de LNA 4 et 8, sachant aussi que le maintien sur le long terme des performances acoustiques y est lié [1].

4.5.2 Ajout d'additifs

L'ajout de deux types d'additifs aux LNA a été évalué par rapport à certaines formules choisies : la chaux hydratée et les fibres de cellulose. L'impact de ces deux additifs d'un point de vue mécanique étant peu connu, une analyse de sensibilité a été menée dans le but de mieux connaître leurs comportements.

Les deux types d'additifs choisis montrent des comportements rhéologiques et mécaniques intéressants. D'une part, l'ajout de chaux hydratée devrait permettre d'améliorer l'adhésivité liant-granulat, de rigidifier le mastic et de ralentir l'oxydation du liant, et d'autre part, l'ajout de fibres de cellulose devrait permettre d'améliorer la maniabilité (viscosité) des mélanges bitumineux.

Dans un premier temps, l'effet de l'ajout de chaux hydratée sur le comportement du filler a été évalué (Chapitre 4.5.2.1). Ensuite, l'effet de l'ajout de chaux et de fibres de cellulose sur le comportement mécanique des LNA a été analysé (Chapitre 4.5.2.2).

4.5.2.1 Effet de l'ajout de chaux hydratée sur le comportement du filler

Trois mélanges de fines ont été évalués, présentant des teneurs en fines de 3.0%, 7.5% et 12%. Ces teneurs en fines sont représentatives des teneurs en fines présentes dans les LNA. Pour chaque mélange, des teneurs en chaux différentes (0.5%, 1.0% et 1.5%) ont été ajoutées au filler Famsa afin d'obtenir les teneurs en fines visées.

L'effet de l'ajout de chaux hydratée sur le comportement du filler a été évalué par rapport à trois caractéristiques distinctes qui sont : la masse volumique des fines, la porosité intergranulaire des fines et le pouvoir rigidifiant $\Delta R\&B$.

Masse volumique des mélanges de fines

Les masses volumiques des mélanges de fines suivantes ont été obtenues (Tab. 25).

Tab. 25 Masse volumique des mélanges de fines [g/cm³]

Filler pur		
2.705		
Mélange de fines à 3%		
2.5% Filler – 0.5% Chaux	2.0% Filler – 1.0% Chaux	1.5% Filler – 1.5% Chaux
2.614	2.527	2.459
Mélange de fines à 7.5%		
6.0% Filler – 1.5% Chaux	5.5% Filler – 2.0% Chaux	5.0% Filler – 2.5% Chaux
2.612	2.585	2.531
Mélange de fines à 12%		
10.5% Filler – 1.5% Chaux	10.0% Filler – 2.0% Chaux	9.5% Filler – 2.5% Chaux
2.641	2.615	2.584

Le remplacement d'une partie du filler par de la chaux hydratée fait baisser la masse volumique du mélange de fines. Cette baisse est plus importante pour des mélanges à forte proportion de chaux.

Porosité intergranulaire des mélanges de fines (vides Rigden)

Les porosités intergranulaires des mélanges de fines suivantes ont été obtenues (Tab. 26).

Tab. 26 Porosité intergranulaire des mélanges de fines [%]

Filler pur		
32		
Mélange de fines à 3%		
2.5% Filler – 0.5% Chaux	2.0% Filler – 1.0% Chaux	1.5% Filler – 1.5% Chaux
35	40	44
Mélange de fines à 7.5%		
6.0% Filler – 1.5% Chaux	5.5% Filler – 2.0% Chaux	5.0% Filler – 2.5% Chaux
36	38	40
Mélange de fines à 12%		
10.5% Filler – 1.5% Chaux	10.0% Filler – 2.0% Chaux	9.5% Filler – 2.5% Chaux
35	36	38

Le remplacement d'une partie du filler par de la chaux hydratée fait augmenter la porosité intergranulaire du mélange de fines. Cette augmentation est plus importante pour des mélanges à forte proportion de chaux.

Pouvoir rigidifiant $\Delta R\&B$

Les pouvoirs rigidifiants $\Delta R\&B$ des mélanges de fines suivants ont été obtenus (Tab. 27).

Tab. 27 Pouvoir rigidifiant $\Delta R\&B$ des mélanges de fines [°C]

Filler pur		
17.3		
Mélange de fines à 3%		
2.5% Filler – 0.5% Chaux	2.0% Filler – 1.0% Chaux	1.5% Filler – 1.5% Chaux
20.7	22.7	28.5
Mélange de fines à 7.5%		
6.0% Filler – 1.5% Chaux	5.5% Filler – 2.0% Chaux	5.0% Filler – 2.5% Chaux
20.7	22.7	23.2
Mélange de fines à 12%		
10.5% Filler – 1.5% Chaux	10.0% Filler – 2.0% Chaux	9.5% Filler – 2.5% Chaux
19.9	20.4	20.8

Le remplacement d'une partie du filler par de la chaux hydratée fait augmenter le pouvoir rigidifiant du mélange de fines. Cette augmentation est plus élevée pour des mélanges à forte proportion de chaux.

Conclusions

L'ajout de chaux hydratée (remplacement d'une partie du filler par de la chaux) permet d'augmenter le pouvoir rigidifiant du mélange de fines. Ce phénomène devrait être bénéfique du point de vue mécanique.

L'effet important de la chaux sur la porosité intergranulaire et la masse volumique du mélange de fines devrait être intégré dans le calcul du module de richesse. Ceci n'est actuellement pas le cas étant donné que pour le calcul du module de richesse, uniquement la teneur en fines intervient et elle ne permet pas de distinguer les différents types de fines entre eux (filler, chaux hydratée, etc.). Cet aspect n'a pas pu être traité plus en détail dans le cadre de cette recherche, mais devrait être évalué dans un futur projet.

4.5.2.2 Effet de l'ajout de chaux hydratée et de fibres de cellulose sur le comportement mécanique des LNA

L'effet de l'ajout de chaux hydratée et de fibres de cellulose sur le comportement mécanique de deux formules a été évalué (formules optimisées LNA 4₁₆ et LNA 8₁₂).

Paramètres d'analyse

Les paramètres d'analyse figurent dans le tableau ci-après (Tab. 28).

Tab. 28 Paramètres d'analyse

Echantillon	Formule type	Teneur en chaux [%-masse]	Teneur en fibres [%-masse]
Référence	LNA 4 ₁₆	0.0	0.0
A	LNA 4 ₁₆	1.5	0.0
B	LNA 4 ₁₆	1.5	0.3
Référence	LNA 8 ₁₂	0.0	0.0
C	LNA 8 ₁₂	1.5	0.0
D	LNA 8 ₁₂	1.5	0.3

Les formules types LNA 4₁₆ et LNA 8₁₂ ont été choisies comme formules de base dans le cadre de cette investigation. La chaux hydratée et les fibres de cellulose TOPCEL® ont été utilisées (voir Chapitre 3.2.3). Les caractéristiques principales des additifs sont données en annexe (Annexes III).

Une teneur en chaux fixe de 1.5% a été choisie pour toutes les fabrications effectuées. Une teneur en fibres fixe de 0.3% a également été choisie pour deux fabrications. Ces valeurs correspondent à des teneurs utilisées usuellement dans le domaine routier.

L'évaluation mécanique a porté sur les propriétés et les essais suivants :

- Compactabilité (Marshall) selon EN 12697-30 [42].
- Sensibilité à l'eau (ITSR – Résistance à la traction indirecte (ITS) avec/sans conditionnement dans l'eau) selon EN 12697-12 [37].
- Orniérage (STL – simulateur de trafic léger) selon EN 12697-22 [40] sur certaines formules choisies (formulations à teneurs en liant élevées).
- Cohésivité (Essai Cantabro) à -10°C sur éprouvettes Marshall selon EN 12697-17 [38].
- Résistance à la traction indirecte ITS (compression diamétrale) à -10 et +45°C selon EN 12697-23 [41].

L'effet de l'ajout de chaux hydratée et de fibres de cellulose sur le comportement acoustique n'a pas été analysé dans le cadre de cette recherche.

Compactibilité

L'ajout de chaux hydratée seule, ou d'un mélange de chaux et de fibres de cellulose fait diminuer la teneur en vides des formules testées par rapport aux formules de référence (Fig. 43).

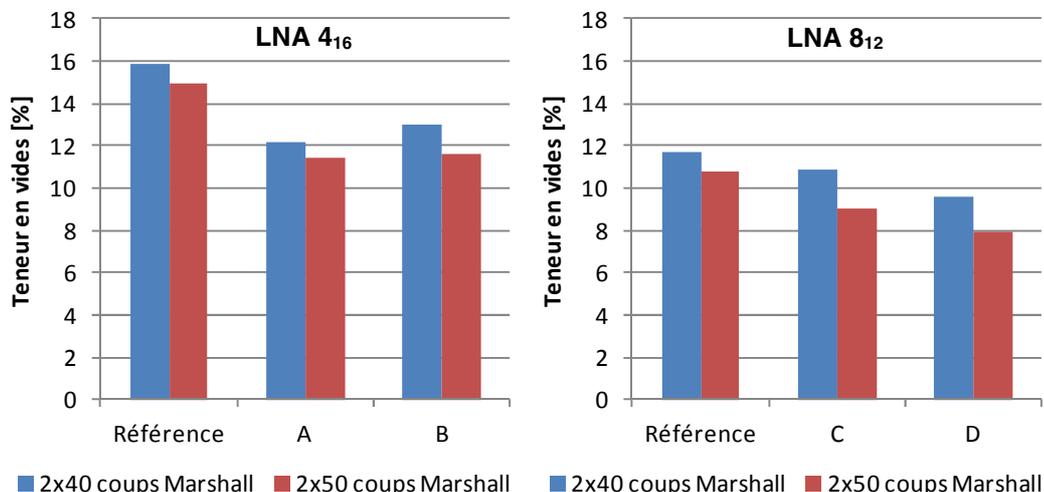


Fig. 43 Teneurs en vides sur Marshall.

Le fait d'ajouter des fibres de cellulose dans le mélange filler-chaux influence de manière différente les deux formules types. En effet, l'ajout de fibres dans les LNA 4₁₆ implique des teneurs en vides légèrement supérieures par rapport à la formule sans fibres. Pour les LNA 8₁₂, l'effet inverse se produit et l'ajout de fibres diminue d'avantage la teneur en vides. Cette constatation peut s'expliquer par une réactivité distincte entre les différentes fractions granulométriques avec les fibres de cellulose.

Sensibilité à l'eau

L'ajout d'un mélange de chaux hydratée et de fibres de cellulose augmente la sensibilité à l'eau de la formule LNA 4₁₆ mais n'a aucun effet décelable sur la sensibilité à l'eau de la formule LNA 8₁₂ (Tab. 29).

Tab. 29 Sensibilité à l'eau

Echantillon	Formule type	Teneur en chaux [%-masse]	Teneur en fibres [%-masse]	ITS _d [kPa]	ITS _w [kPa]	ITSR [%]
Référence	LNA 4 ₁₆	0.0	0.0	937	796	85
A	LNA 4 ₁₆	1.5	0.0	1076	822	76
B	LNA 4 ₁₆	1.5	0.3	1065	761	71
Référence	LNA 8 ₁₂	0.0	0.0	895	820	92
C	LNA 8 ₁₂	1.5	0.0	1070	980	92
D	LNA 8 ₁₂	1.5	0.3	1070	999	93

Le fait d'ajouter de la chaux ou un mélange chaux-fibres dans la formule LNA 4₁₆ testée augmente de manière substantielle la sensibilité à l'eau. La résistance à la traction sans conditionnement dans l'eau augmente dans les deux cas. Par contre, cette résistance avec conditionnement dans l'eau augmente légèrement pour le cas de la chaux seule et diminue pour le cas du mélange chaux-fibres. Ainsi le recours au mélange chaux-fibres n'est pas recommandé pour cette formule.

Pour les LNA 8₁₂ le fait d'ajouter de la chaux ou un mélange chaux-fibres n'a aucune influence sur la sensibilité à l'eau. La résistance à la traction sans et avec conditionnement dans l'eau augmente dans les deux cas. Ainsi le recours au mélange chaux-fibres peut être recommandé pour cette formule.

Orniérage

L'ajout d'un mélange de chaux hydratée et de fibres de cellulose permet de diminuer l'orniérage des formules testées (Tab. 30).

Tab. 30 Orniérage selon simulateur de trafic léger (STL)

Echantillon	Formule type	Teneur en chaux [%-masse]	Teneur en fibres [%-masse]	Ornière mesurée 10'000 cycles [%]	Ornière mesurée 30'000 cycles [%]
Référence	LNA 4 ₁₆	0.0	0.0	7.1	8.1
A	LNA 4 ₁₆	1.5	0.0	4.7	5.3
B	LNA 4 ₁₆	1.5	0.3	4.2	5.3
Référence	LNA 8 ₁₂	0.0	0.0	3.8	4.1
C	LNA 8 ₁₂	1.5	0.0	3.1	3.5
D	LNA 8 ₁₂	1.5	0.3	3.1	3.5

L'ajout de la chaux hydratée dans les formules testées permet de diminuer de manière légère (LNA 8₁₂) ou conséquente (LNA 4₁₆) l'orniérage. Le fait de rajouter encore des fibres de cellulose n'a aucun effet sur l'orniérage. Ainsi le recours à la chaux peut être recommandé pour ces formules. Le rajout de fibres ne permet pas de diminuer d'avantage l'orniérage.

Cohésivité

L'ajout d'un mélange de chaux hydratée et de fibres de cellulose permet d'augmenter la cohésivité des formules testées (Tab. 31).

Tab. 31 Cohésivité selon essai Cantabro

Echantillon	Formule type	Teneur en chaux [%-masse]	Teneur en fibres [%-masse]	Perte de matériaux [%]
Référence	LNA 4 ₁₆	0.0	0.0	13.5
A	LNA 4 ₁₆	1.5	0.0	11.5
B	LNA 4 ₁₆	1.5	0.3	11.5
Référence	LNA 8 ₁₂	0.0	0.0	15.0
C	LNA 8 ₁₂	1.5	0.0	11.0
D	LNA 8 ₁₂	1.5	0.3	10.5

L'ajout de la chaux hydratée dans les formules testées permet de diminuer légèrement la perte de matériaux des formules testées. Le fait de rajouter encore des fibres de cellulose n'a aucun effet sur la cohésivité. Ainsi le recours à la chaux peut être recommandé pour ces formules. Le rajout de fibres ne permet pas d'améliorer la cohésivité mais ne la diminue pas non plus.

Résistance à la traction indirecte

L'ajout d'un mélange de chaux hydratée et de fibres de cellulose a un faible effet sur la résistance à traction indirecte des formules testées (Tab. 32).

Tab. 32 Résistance à la traction indirecte

Echantillon	Formule type	Teneur en chaux [%-masse]	Teneur en fibres [%-masse]	Contr. à la rupture -10°C [N/mm ²]	Contr. à la rupture +45°C [N/mm ²]	$\Delta D/D$ -10°C [10 ⁻³]	$\Delta D/D$ +45°C [10 ⁻³]
Référence	LNA 4 ₁₆	0.0	0.0	3.7	0.26	11.3	24.0
A	LNA 4 ₁₆	1.5	0.0	4.4	0.42	10.8	21.5
B	LNA 4 ₁₆	1.5	0.3	4.3	0.41	10.6	20.9
Référence	LNA 8 ₁₂	0.0	0.0	4.4	0.30	10.1	13.7
C	LNA 8 ₁₂	1.5	0.0	4.7	0.38	11.0	20.3
D	LNA 8 ₁₂	1.5	0.3	4.7	0.42	11.5	23.2

L'ajout de la chaux hydratée dans les formules testées permet d'augmenter légèrement les contraintes à la rupture (basse et haute température). Le fait de rajouter encore des fibres de cellulose n'a aucun effet sur la résistance à la traction indirecte. Ainsi le recours à la chaux peut être recommandé pour ces formules. Le rajout de fibres ne permet pas d'améliorer la résistance à la traction indirecte mais ne la diminue pas non plus.

Conclusions

L'ajout de chaux hydratée dans les formules testées (LNA 4₁₆ et LNA 8₁₂) permet d'améliorer leurs comportements mécaniques, à l'exception de la sensibilité à l'eau des LNA 4₁₆. De même, une diminution des teneurs en vides est observée pour les deux formules ce qui pourrait avoir un effet négatif sur leur comportement acoustique.

L'ajout d'un mélange chaux hydratée – fibres de cellulose n'apporte pas d'améliorations par rapport au comportement mécanique des deux formules testées, vis-à-vis du comportement avec ajout de chaux hydratée. Dans certains cas une diminution des performances est même constatée (sensibilité à l'eau pour les LNA 4₁₆). Le recours aux fibres de cellulose n'est donc pas recommandé.

L'utilisation de chaux hydratée peut être recommandée pour les LNA 8₁₂. Par contre, pour les LNA 4₁₆, une pesée des intérêts doit être faite, car le recours à cet additif permet d'augmenter la résistance à l'orniérage, d'augmenter la cohésivité et la résistance à la traction indirecte, mais augmente la sensibilité à l'eau et diminue les vides.

5 Méthodologie d'aide à la décision

Une esquisse de méthodologie simple d'aide à la décision est proposée dans ce chapitre. Celle-ci permet d'aider le gestionnaire dans son choix d'une formule en incluant les différents critères par rapport au comportement mécanique et acoustique des revêtements. En effet, selon les conditions relatives au projet, le gestionnaire peut favoriser les critères de comportement mécanique ou alors favoriser les critères relatifs au comportement phonique.

La méthodologie est basée sur les expériences acquises à travers ce mandat de recherche et prend en considération différents paramètres. Le nombre limité de formules testées ne permet pas de définir une méthodologie complète, mais donne une première esquisse. Celle-ci pourra, par la suite, être étoffée dans de futurs travaux de recherche.

De manière générale, les différentes formules types élaborées dans le cadre du projet de recherche présentent toutes un comportement mécanique conforme aux prescriptions des normes. Il convient donc de relativiser l'opposition entre comportement acoustique et mécanique par rapport aux choix à prendre au niveau de la méthodologie d'aide à la décision.

5.1 Paramètres d'aide à la décision

Les paramètres de base intervenant dans le choix d'un type d'enrobé sont multiples. Ceux-ci peuvent être regroupés en trois catégories principales :

- Paramètres mécaniques : Paramètres ayant un impact sur la durée de vie mécanique d'un revêtement.
- Paramètres acoustiques : Paramètres ayant un impact sur la durée de vie acoustique d'un revêtement.
- Paramètres externes : Paramètres fixes, tels que le trafic, les conditions climatiques, la géométrie de la chaussée, etc.

Les paramètres principaux sont la durée de vie mécanique et la durée de vie acoustique d'un revêtement. Ces deux paramètres peuvent être contradictoires, c.-à-d. que l'optimisation de l'un peut entraîner la diminution de l'autre. Dans le cadre de cette recherche, les deux paramètres ont été évalués en laboratoire et il a été démontré qu'un bon comportement acoustique peut également se présenter pour des revêtements avec un bon comportement mécanique. Néanmoins, une décision s'impose dans le choix d'un revêtement à mettre en œuvre pour une route, vis-à-vis de l'importance rapportée à ces deux paramètres.

Les paramètres externes sont fixes par rapport à un projet routier. Ces paramètres peuvent néanmoins fortement influencer le choix d'un revêtement à mettre en œuvre. Ils interviennent donc également dans la prise de décision finale. Ces paramètres n'ont, par contre, pas pu être intégrés dans la méthodologie d'aide à la décision. L'impact de ces paramètres doit être évalué à travers la mise en œuvre de planches d'essais in-situ.

Dans le tableau ci-après (Tab. 33) est donné un aperçu du comportement mécanique et acoustique relatif des formules types évaluées par rapport aux paramètres de base de la recherche (Chapitre 3).

Tab. 33 Comportement relatif des formules types par rapport aux paramètres de base

Formule type	Paramètres mécaniques			Paramètres acoustiques	
	Sensibilité à l'eau	Orniérage	Cohésivité	Paramètres secondaires*	Absorption acoustique
LNA 4 ₁₂	+	+	++	+	0
LNA 4 ₁₆	+	0	++	+	+
LNA 4 ₁₆ chaux	+	++	++	+	?
LNA 4 ₁₆ chaux/fibres	0	++	++	+	?
LNA 8 ₁₂	++	++	+	+	0
LNA 8 ₁₂ chaux	++	++	++	+	?
LNA 8 ₁₂ chaux/fibres	++	++	++	+	?
LNA 8 ₁₆	++	+	+	+	++

Comportement par rapport aux paramètres : ++ très bon ; + bon ; 0 moyen ; - mauvais ; -- très mauvais ;

? non testé

* Paramètres secondaires : Résistance à la traction indirecte, stabilité et fluage

L'importance apportée aux différents paramètres dépend fortement des objectifs visés du maître d'ouvrage. C'est pourquoi une méthodologie d'aide à la décision a été proposée dans le chapitre suivant (Chapitre 5.2).

5.2 Méthodologie d'aide à la décision

La méthodologie d'aide à la décision permet de choisir le type de revêtement adapté à une problématique concrète. Il s'agit d'une simple aide pour guider le gestionnaire dans son choix d'une formule à mettre en œuvre. Cette méthodologie est purement indicative et devrait être complétée au fur et à mesure avec d'autres formules types et des résultats issus des autres EPs (principalement par rapport à la durabilité) et issus de mesures in-situ.

La méthodologie est divisée en plusieurs étapes :

- Etape 1 : Choix du paramètre principal
- Etape 2 : Optimisation par rapport au paramètre secondaire
- Etape 3 : Choix des matériaux de base
- Etape 4 : Choix des additifs

Les différentes étapes sont décrites en détail dans les chapitres suivants (Chapitres 5.2.1 à 5.2.4).

5.2.1 Etape 1 : Choix du paramètre principal

De manière générale, les différentes formules types élaborées présentent toutes un comportement mécanique conforme aux prescriptions des normes. Néanmoins, les formules LNA à teneur en vides plus élevée (16%) présentent un comportement mécanique moins bon que les formules à 12% de vides. D'un autre point de vue, le comportement acoustique (mesuré uniquement à travers le facteur d'absorption) est meilleur pour les LNA à 16% de vides. Ainsi, ce comportement contradictoire nécessite un premier choix par rapport au paramètre principal à optimiser, soit le comportement mécanique, soit le comportement acoustique :

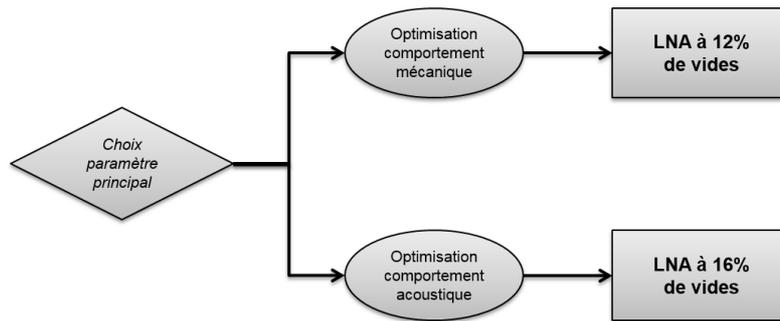


Fig. 44 Etape 1 : Choix du paramètre principal.

5.2.2 Etape 2 : Optimisation par rapport au paramètre secondaire

Dans la deuxième étape, il convient de choisir le grain maximal à mettre en œuvre, soit du 4 mm, soit du 8 mm. Ceci peut se réaliser par rapport à l'optimisation du paramètre secondaire, c.-à-d. que selon le choix du paramètre principal dans l'étape 1 (Chapitre 5.2.1), il convient soit d'optimiser encore d'avantage le comportement choisi, soit d'optimiser le comportement manquant :

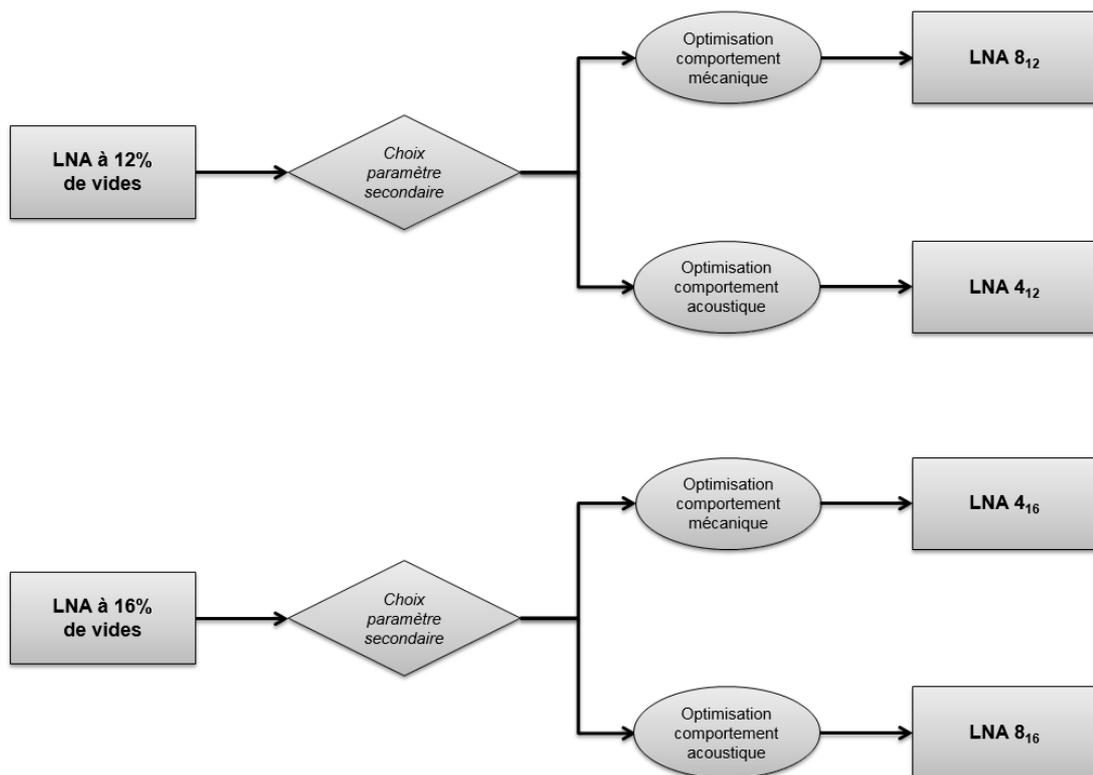


Fig. 45 Etape 2 : Optimisation par rapport au paramètre secondaire.

5.2.3 Etape 3 : Choix des matériaux de base

L'influence du type de granulats sur le comportement mécanique a été évaluée pour deux types de granulats. Ces deux types analysés présentent un comportement mécanique très proche, et peuvent donc être utilisés. Concernant le liant, uniquement un PmB 45/80-65 (Styrelf E 60) a été évalué. Ainsi, dans l'état actuel de la recherche, les choix suivants peuvent être faits :

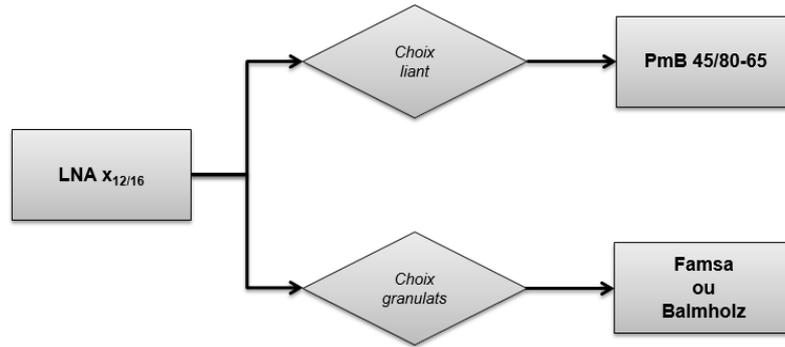


Fig. 46 Etape 3 : Choix des matériaux de base.

L'influence du type de granulats, et du type de liant, sur le comportement acoustique n'a pas été évaluée dans le cadre de cette recherche.

5.2.4 Etape 4 : Choix des additifs

Deux types d'additifs ont été évalués, soit la chaux hydratée et les fibres de cellulose. L'ajout de ces additifs peut amener à un changement du comportement mécanique, principalement par rapport à la sensibilité à l'eau et à l'orniérage. L'ajout des additifs est également accompagné d'une augmentation du coût de fabrication. Pour les deux formules types évaluées, les choix suivants peuvent être faits :

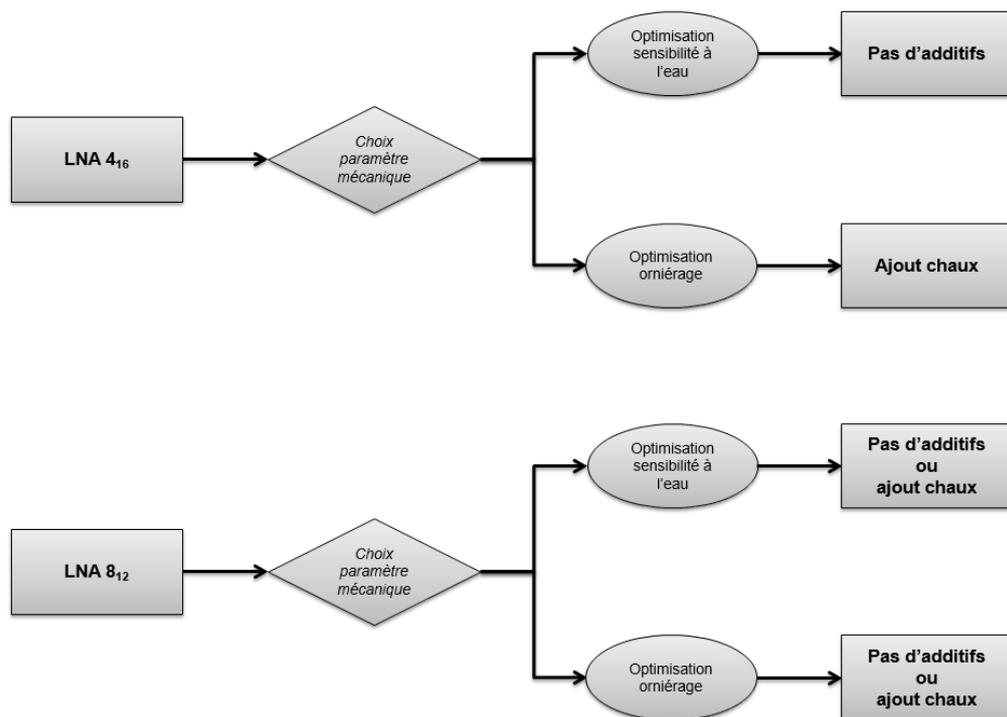


Fig. 47 Etape 4 : Choix des additifs.

L'influence de l'ajout des additifs sur le comportement acoustique n'a pas été évaluée dans le cadre de cette recherche.

6 Recommandations pour l'élaboration de revêtements peu bruyants innovants

Sur la base des résultats obtenus, plusieurs recommandations pour l'élaboration de revêtements innovants peuvent être formulées.

6.1 Matériaux

L'utilisation de matériaux très performants est indispensable. Le LAVOC recommande d'utiliser des granulats présentant de bonnes caractéristiques mécaniques (granulats durs, CPA élevé). Il recommande également d'utiliser uniquement des liants modifiés par des polymères.

L'ajout de chaux hydratée dans les formules testées (LNA 4₁₆ et LNA 8₁₂) permet d'améliorer leurs comportements mécaniques, à l'exception de la sensibilité à l'eau du LNA 4₁₆. Toutefois, une diminution des teneurs en vides est observée pour les deux formules ce qui pourrait avoir un effet négatif sur leur comportement acoustique.

L'utilisation de chaux hydratée peut être recommandée pour le LNA 8₁₂. Par contre, pour le LNA 4₁₆, une pesée des intérêts doit être effectuée, car le recours à cet additif permet d'améliorer la résistance à l'orniérage, la cohésivité et la résistance à la traction indirecte, cependant, il augmente la sensibilité à l'eau et diminue les vides.

L'ajout d'un mélange chaux hydratée – fibres de cellulose n'apporte pas d'améliorations supplémentaires par rapport au comportement mécanique des deux formules testées avec chaux hydratée. Dans certains cas, une diminution des performances est même constatée (sensibilité à l'eau pour le LNA 4₁₆). Le recours aux fibres de cellulose n'est donc pas nécessaire. Un essai d'égouttage devrait cependant confirmer ce choix.

Un comportement mécanique très proche entre les deux types de granulats évalués peut être noté pour la formule type testée (LNA 4₁₆). L'utilisation de matériaux granulaires de grande qualité est recommandée (caractéristiques mécaniques et maintien à long terme des performances acoustiques).

6.2 Choix du type de formules

Une méthodologie simple d'aide à la décision est proposée dans ce rapport. Celle-ci permet d'aider le gestionnaire dans son choix d'une formule en incluant les différents critères par rapport au comportement mécanique et acoustique des revêtements. En effet, selon les conditions relatives au projet, le gestionnaire peut favoriser les critères de comportement mécanique ou alors favoriser les critères relatifs au comportement phonique.

La méthodologie est basée sur les expériences acquises à travers ce mandat de recherche et prend en considération différents paramètres.

6.3 Méthode de formulation

L'utilisation de la méthode de formulation, avec prise en compte du logiciel PradoWin, est concluante. Il convient de faire attention à la plage de validité du logiciel. En effet, ce dernier n'est pas valable pour les revêtements à squelette de filler. Un essai sur un LNA 4 à 12% de vides et avec squelette de filler a indiqué une mauvaise correspondance entre la teneur en vides visée et la teneur en vides mesurée en laboratoire. La méthode du CRR ne s'applique pas à ces types de revêtements.

L'utilisation de la méthode de formulation proposée dans ce rapport est fortement recommandée. Ceci permet entre autre de diminuer au maximum les gâchées d'essais, tout en gardant une très bonne corrélation entre la formulation théorique et la fabrication.

6.4 Formulation

La formulation de revêtements à granulométrie fine et discontinue, tels que les LNA 4 et LNA 8, est très délicate. Un léger changement de la courbe granulométrique peut avoir des conséquences importantes sur les résultats de teneurs en vides et sur le comportement mécanique et acoustique des revêtements. Ce phénomène est d'autant plus présent pour des grains maximaux faibles (LNA 4). L'utilisation du logiciel PradoWin a démontré ces difficultés et a permis de limiter au maximum les gâchées en laboratoire.

Les teneurs en liant minimales prescrites pour les AC MR peuvent être utilisées pour la formulation des LNA. Néanmoins, il est recommandé de viser des valeurs plus élevées que les valeurs minimales. Pour les LNA 4, une teneur en liant (sur enrobé) visée de 6.5 à 6.8% semble donner des résultats concluants. Pour les LNA 8, une teneur en liant (sur enrobé) visée de 6.2 à 6.5% est recommandée.

Il est recommandé de viser une granulométrie fortement discontinue pour les LNA. Pour les LNA 4, une cassure à 2 mm, et pour les LNA 8, une cassure à 4 mm doivent être appliquées.

L'utilisation du module de richesse, qui est étroitement lié à la teneur en liant et à la granulométrie, pour le choix des formulations s'est avérée concluante. Il est recommandé de viser des valeurs du module de richesse comprises entre 3.8 et 4.2. L'ajout de chaux doit être prise en considération et compensée par une diminution de la teneur en filler totale. En première approche, on considérera la surface spécifique équivalente entre la chaux et le filler.

Deux teneurs en vides de 12 et 16% ont été évaluées dans le cadre de ce projet. Une recommandation privilégiant l'une ou l'autre de ces deux teneurs en vides n'est pas donnée, car celle-ci dépend en premier lieu de l'importance apportée soit au comportement mécanique, soit au comportement acoustique.

6.5 Essais et manipulations en laboratoire

La fabrication de revêtements à granulométrie fine et discontinue, tels que les LNA 4 et les LNA 8, présente une bonne répétabilité en laboratoire. La répétabilité pour des fabrications en centrale reste à vérifier.

Pour mesurer la teneur en vides des revêtements, il est recommandé d'utiliser la méthode de mesure géométrique, plus adaptée aux revêtements à teneur en vides élevée.

Les essais en laboratoire ont permis de détecter une bonne correspondance entre les trois méthodes de compactage usuelles. Les méthodes de compactage suivantes sont recommandées pour fabriquer des éprouvettes :

- Table de compactage [44] : Compactage fort de plaques de 180 x 500 x 35 mm de dimension avec une roue (compactage mixte pneu/rouleau lisse).
- Presse à compactage giratoire [43] : Compactage d'éprouvettes à la PCG avec une hauteur finale visée de 70 mm après 90 girations.
- Compactage Marshall [42] : Compactage d'éprouvettes avec énergies de compactage de 2x40 coups.

Les résultats de l'essai d'orniérage au simulateur de trafic léger sont dépendants de l'épaisseur des plaques testées. Ainsi, l'orniérage est plus important pour des plaques avec une épaisseur de 35 mm. Pour une comparaison plus aisée du comportement des LNA par rapport aux enrobés traditionnels ou macrorugueux, il est recommandé de recourir à des plaques avec une épaisseur de 50 mm.

Les évaluations détaillées des différentes formules testées à l'essai Cantabro (voir Chapitres 4.3 et 4.4) ont montré une faible perte de matériaux pour tous les matériaux testés (< 20%). Cet essai ne permet pas de distinguer clairement le comportement mécanique des différentes formules.

L'essai acoustique choisi pour cette recherche (tube d'impédance) permet d'effectuer une comparaison relative du comportement acoustique des LNA. Néanmoins, la méthode n'est pas assez sensible pour comparer des formules à caractéristiques proches (teneurs en vides et granulométries identiques) et la corrélation avec les performances acoustiques in-situ n'est pas démontrée.

6.6 Fabrication

L'homogénéité des matériaux utilisés doit être assurée à tout moment de la fabrication des LNA. Tout particulièrement, les courbes granulométriques des différentes fractions utilisées pour la fabrication doivent être les plus homogènes possibles. En effet, un léger changement dans les courbes granulométriques peut avoir des conséquences importantes sur les résultats de teneurs en vides et de teneurs en liant et ainsi sur le comportement mécanique et acoustique des revêtements.

L'homogénéité des matériaux a pu être assurée lors des manipulations en laboratoire, néanmoins l'homogénéité dans les centrales doit être évaluée impérativement avant la fabrication d'un tel revêtement. Il est recommandé d'utiliser des fractions 0/2 et 2/4 pour les LNA 4.

7 Conclusions

7.1 Conclusions générales

Le projet de recherche a permis de mettre au point une méthode de formulation adaptée aux revêtements peu bruyants. Cette méthode, basée sur la formulation volumique, permet d'optimiser la démarche générale de formulation d'un nouveau produit. Grâce à une grande partie théorique, il est possible de diminuer au maximum les gâchées d'essais, tout en gardant une très bonne corrélation entre la formulation théorique et la fabrication. La méthode s'appuie sur le logiciel PradoWin qui est basé sur la méthode de formulation du CRR en Belgique.

Le projet de recherche a également permis de proposer, à travers de nombreux essais en laboratoire, des recommandations pour l'élaboration de revêtements peu bruyants. Ces recommandations (Chapitre 6) touchent aussi bien aux matériaux à utiliser, aux méthodes d'essais recommandées, à la démarche détaillée de la formulation et à la fabrication et aux manipulations en laboratoire.

En outre, une simple méthodologie d'aide à la décision, permettant de choisir le type de revêtement adapté à une problématique concrète, a été mise au point. Ainsi, il est possible de choisir certaines caractéristiques des revêtements en fonction des attentes mécaniques et acoustiques que peut avoir un gestionnaire de réseau.

7.2 Propositions pour l'adaptation des normes

Les recommandations faites au Chapitre 6 peuvent être utilisées pour l'adaptation des normes. Tout particulièrement les recommandations par rapport aux matériaux et aux méthodes d'essais et les recommandations par rapport aux valeurs visées pour la formulation (teneur en vides, teneur en liant, granulométrie, module de richesse) devraient être intégrées dans les normes suisses.

7.3 Propositions pour des recherches ultérieures

Le passage des fabrications en laboratoire aux fabrications en centrale devrait faire l'objet d'une recherche approfondie. Tout particulièrement la répétabilité des fabrications en centrale devrait être évaluée en détail.

La problématique des vides communicants, qui pourraient apparaître dans certains cas où des teneurs en vides plus élevées seraient visées (>16%), devrait également être évaluée à travers un projet de recherche approprié.

Une dernière proposition pour des recherches ultérieures est la prise en compte de davantage de paramètres acoustiques des revêtements pour l'analyse du comportement acoustiques des LNA. En effet, le facteur d'absorption est certes un facteur prépondérant, mais d'autres facteurs interviennent dans ce comportement atypique (texture, élasticité du matériau, etc.).

Annexes

I	Formules	109
II	Méthode de mesure du facteur d'absorption acoustique – Tube d'impédance	111
III	Caractéristiques principales des matériaux.....	113
IV	Exemple d'une formulation théorique à l'aide de PradoWin – Fabrication F3	119
IV.1	Spécifications du liant	119
IV.2	Mélange de sables	121
IV.3	Granulométrie.....	123
IV.4	Formulation	124
V	Formulation des LNA-types – Caractéristiques mécaniques et acoustiques	127
V.1	LNA 4 ₁₆	127
V.1.1	Sensibilité à l'eau	127
V.1.2	Simulateur de trafic léger	128
V.1.3	Essai Cantabro.....	129
V.1.4	Compression diamétrale	130
V.1.5	Essai Marshall	132
V.1.6	Absorption acoustique.....	133
V.2	LNA 4 ₁₂	133
V.2.1	Sensibilité à l'eau	133
V.2.2	Simulateur de trafic léger	134
V.2.3	Essai Cantabro.....	134
V.2.4	Compression diamétrale	135
V.2.5	Essai Marshall	137
V.2.6	Absorption acoustique.....	138
V.3	LNA 8 ₁₆	138
V.3.1	Sensibilité à l'eau	138
V.3.2	Simulateur de trafic léger	139
V.3.3	Essai Cantabro.....	139
V.3.4	Compression diamétrale	140
V.3.5	Essai Marshall	142
V.3.6	Absorption acoustique.....	143
V.4	LNA 8 ₁₂	143
V.4.1	Sensibilité à l'eau	143
V.4.2	Simulateur de trafic léger	144
V.4.3	Essai Cantabro.....	144
V.4.4	Compression diamétrale	145
V.4.5	Essai Marshall	147
V.4.6	Absorption acoustique.....	148

I Formules

Tab. 1 Formules fabriquées en laboratoire

Formule	Type	Granulats	Courbe granulométrique visée (Tab. 2)	Liant	Teneur en liant sur enrobé calculée [% masse]	Teneur en vides visée [%]	Module de richesse [-]
F1	LNA 4	FAMSA ⁶	1	Styrelf E 60	8.00	12	5.15
F2	LNA 4	FAMSA ⁶	2	Styrelf E 60	5.65	12	3.42
F3	LNA 4	FAMSA ⁶	3	Styrelf E 60	6.70	12	4.14
F3.0	LNA 4	FAMSA ⁷	3	Styrelf E 60	6.70	16	4.14
F3.1	LNA 4	FAMSA ⁷	3	Styrelf E 60	7.10	-	4.36
F3.2	LNA 4	FAMSA ⁷	3	Styrelf E 60	6.30	-	3.90
F3.3	LNA 4	FAMSA ⁷	3	Styrelf E 60	5.90	-	3.67
F3.4	LNA 4	FAMSA ⁷	3	Styrelf E 60	6.50	-	4.00
F4	LNA 4	FAMSA ⁶	4	Styrelf E 60	6.90	12	4.44
F5	LNA 4	FAMSA ⁶	5	Styrelf E 60	6.12	12	3.76
F6	LNA 4	FAMSA ⁶	6	Styrelf E 60	6.64	12	3.97
F7	LNA 4	FAMSA ⁶	7	Styrelf E 60	7.38	12	4.47
F9.1	LNA 4	FAMSA ⁷	1	Styrelf E 60	6.63	12	3.96
F9.4	LNA 4	FAMSA ⁷	1	Styrelf E 60	6.23	-	3.74
F9.5	LNA 4	FAMSA ⁷	1	Styrelf E 60	7.03	-	4.18
G1.2	LNA 8	FAMSA ⁷	8	Styrelf E 60	6.49	12	4.02
G1.4	LNA 8	FAMSA ⁷	8	Styrelf E 60	6.89	-	4.26
G1.4 (fibres + chaux)	LNA 8	FAMSA ⁷	8	Styrelf E 60	6.89	-	4.26
G1.4 (fibres)	LNA 8	FAMSA ⁷	8	Styrelf E 60	6.89	-	4.26
G1.4	LNA 8	FAMSA ⁸	8	Styrelf E 60	6.89	-	4.26
G1.5	LNA 8	FAMSA ⁷	8	Styrelf E 60	6.09	-	3.79
H2.1	LNA 8	FAMSA ⁸	9	Styrelf E 60	6.61	-	4.42
H2.2	LNA 8	FAMSA ⁸	9	Styrelf E 60	6.21	16	4.13
H2.3	LNA 8	FAMSA ⁸	9	Styrelf E 60	5.81	-	3.85

⁶ Granulats tamisés

⁷ Filler tamisé, sable non tamisé

⁸ Filler tamisé, sable non tamisé, faction 4/8 tamisée

Tab. 2 Courbes granulométriques

N°	Granulométrie PradoWin Passant cumulé [% masse]							
	11.2 mm	8 mm	4 mm	2 mm	1 mm	0.5 mm	0.25 mm	0.063 mm
1	100	100	96.1	30.8	18.0	15.5	13.2	8.4
2	100	100	96.4	35.8	22.6	19.3	16.3	10.3
3	100	100	96.2	32.5	20.1	17.5	15.3	10.0
4	100	100	96.3	34.3	20.2	16.6	13.4	7.8
5	100	100	96.3	34.9	21.6	18.4	15.6	9.8
6	100	100	96.1	31.1	19.9	18.3	16.8	11.8
7	100	100	96.0	29.2	18.5	17.3	16.1	11.6
8	100	97.3	32.9	23.6	19.1	16.1	13.6	10.5
9	100	97.2	32.0	21.8	16.6	13.3	10.5	8.4

II Méthode de mesure du facteur d'absorption acoustique – Tube d'impédance

Pour réaliser les mesures du facteur d'absorption acoustique à l'aide de la méthode du tube d'impédance, le matériel suivant a été utilisé :

- Tube d'impédance Bruel & Kjaer type 4206,
- 2 x microphones B&K Type 1225 ¼ " avec préamplificateurs B&K type 2670,
- Analyseur Bruel & Kjaer Pulse 8,
- Amplificateur de puissance QUAD 50E.

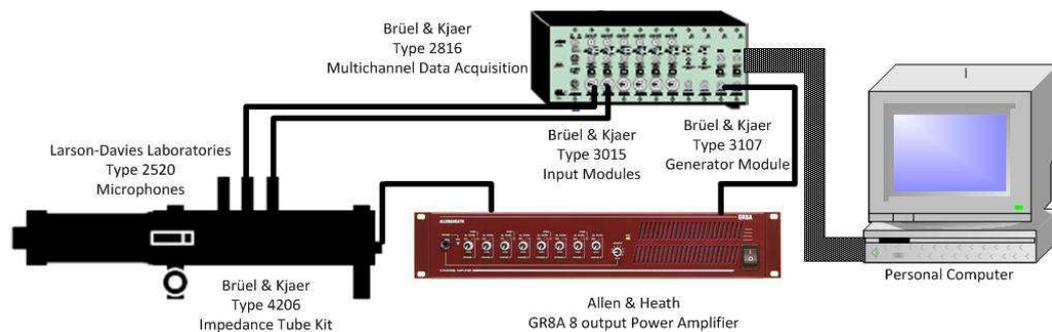


Fig. 1 Dispositif expérimental (schéma de principe, les références de matériel sont inappropriées).

Le tube Bruel & Kjaer permet une qualification de l'absorption sur la bande 50-1650 Hz. Le contrôle de la calibration avec un échantillon normalisé est effectué avant chaque mesure.

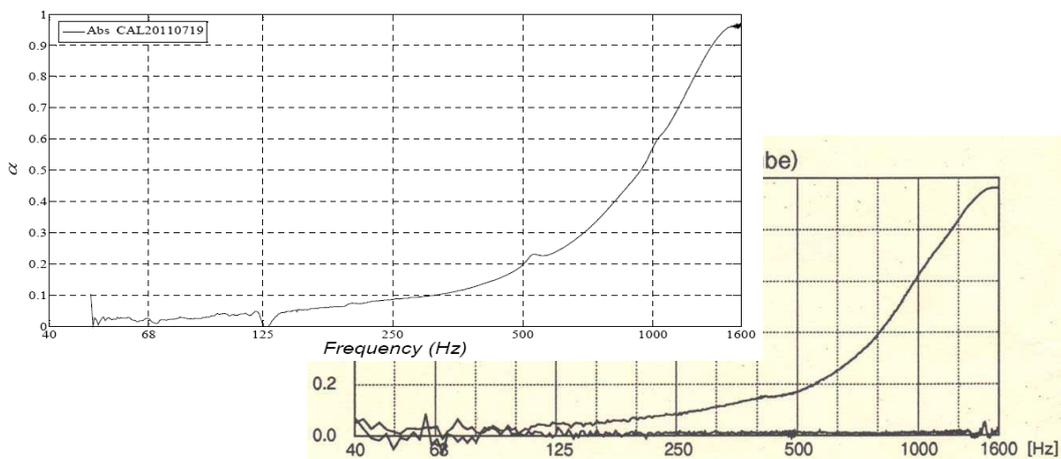


Fig. 2 Mesure du tube de Kundt B&K 4206 avec l'échantillon de calibration (gauche) et courbe de référence (droite).

Mesures sur la bande 50Hz – 1650Hz :

- Positions de microphones 2 et 3,
- Générateur : sinus glissant ; bandwidth [50Hz – 1650 Hz] ; excitation level : 0.4 Vrms,
- Echantillonnage : 25400 Hz,
- Analyseur FFT : 3200 lignes,
- Span: 1600 Hz,
- Δf : 0.5 Hz,
- Nombre de moyennes : 2000.

Le protocole expérimental suivant a été respecté :

1. Calibration des microphones de mesure et du banc-test,
2. Mesure en bandes fines - résolution 0.5 Hz - des fonctions de transfert entre microphones 1 et 2 (analyseur FFT du NetdB),
3. Traitement : calcul des coefficients d'absorption sous incidence normale (resp. coefficient de réflexion) par calcul direct (PL Program).

Le conditionnement des éprouvettes à respecter est le suivant :

- Pose d'un joint d'étanchéité entre l'éprouvette et le tube d'impédance,
- Installation de l'éprouvette au fond du tube d'impédance (pas de cavité).

III Caractéristiques principales des matériaux

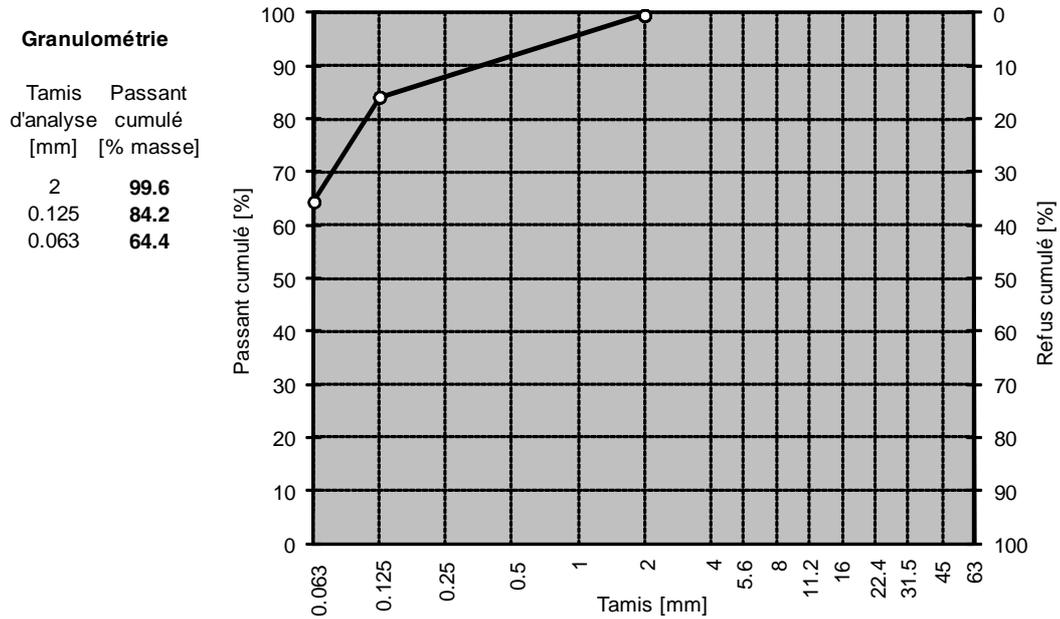


Fig. 3 Granularité Filler – Famsa-Choëx.

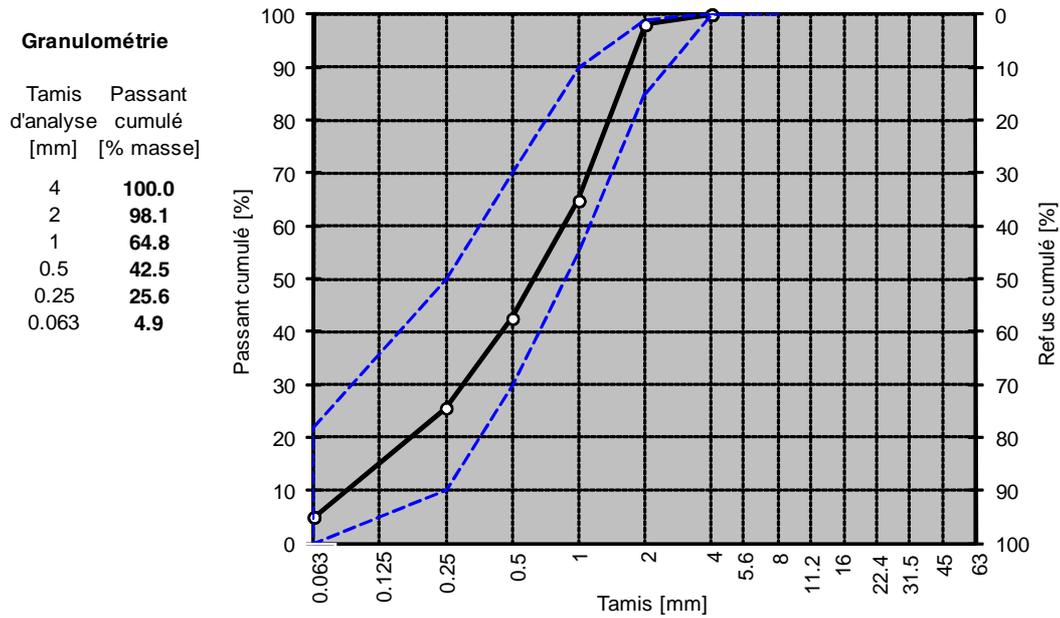


Fig. 4 Granulométrie fraction 0/2 – Famsa-Choëx.

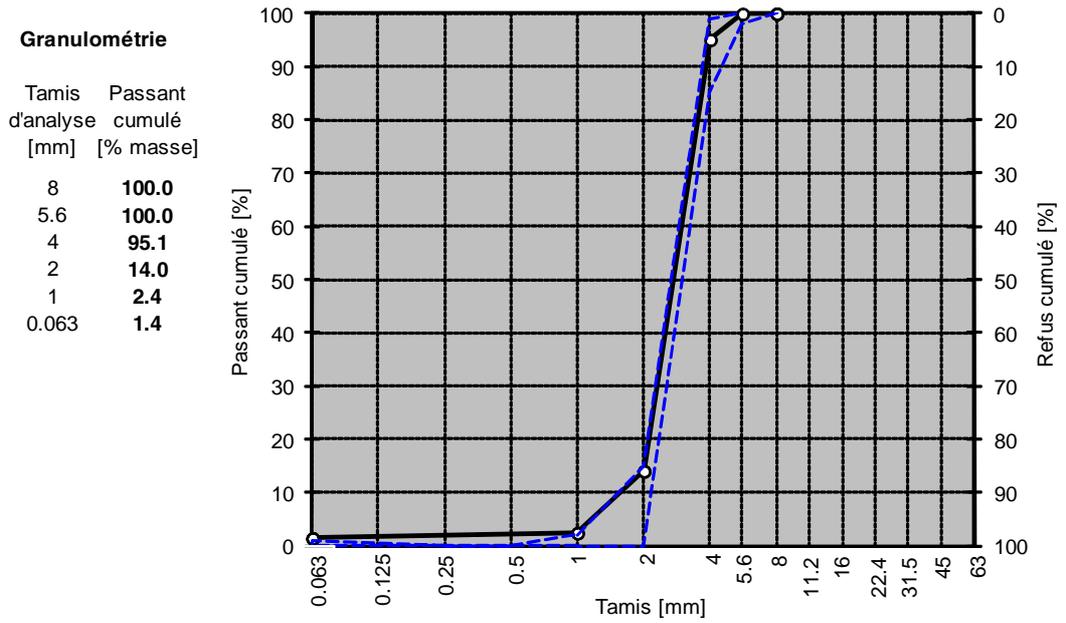


Fig. 5 Granulométrie fraction 2/4 – Famsa-Choëx.

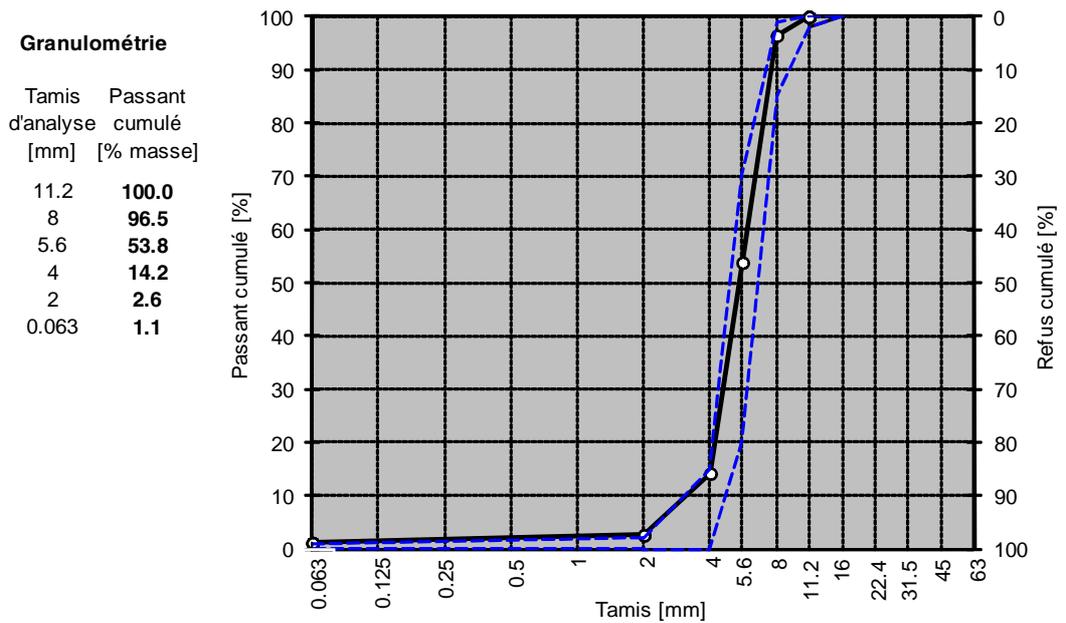


Fig. 6 Granulométrie fraction 4/8 – Famsa-Choëx.

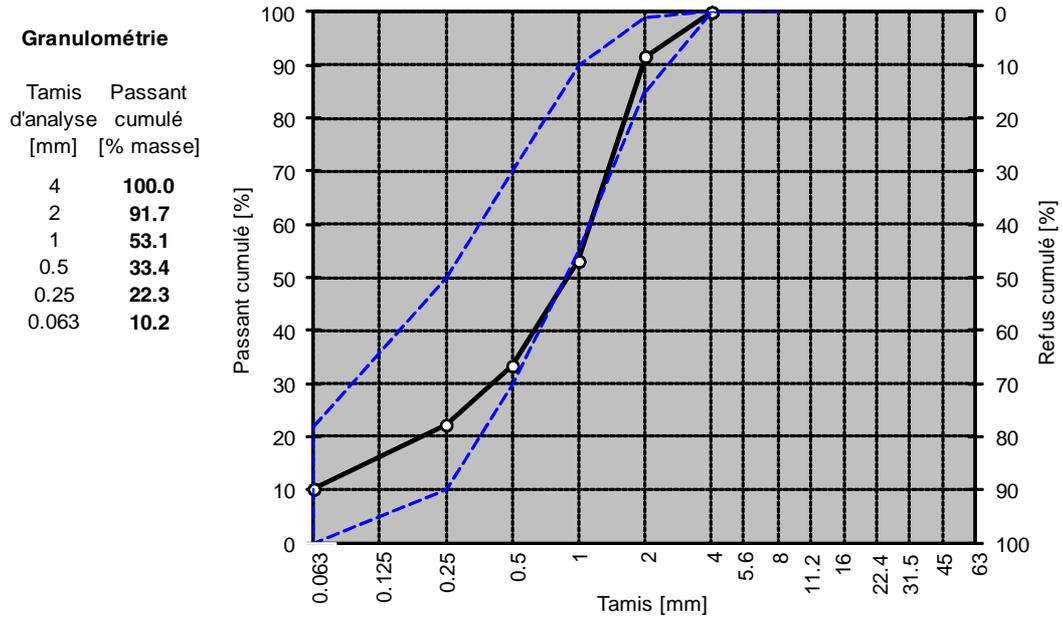


Fig. 7 Granulométrie fraction 0/2 – Balmholz.

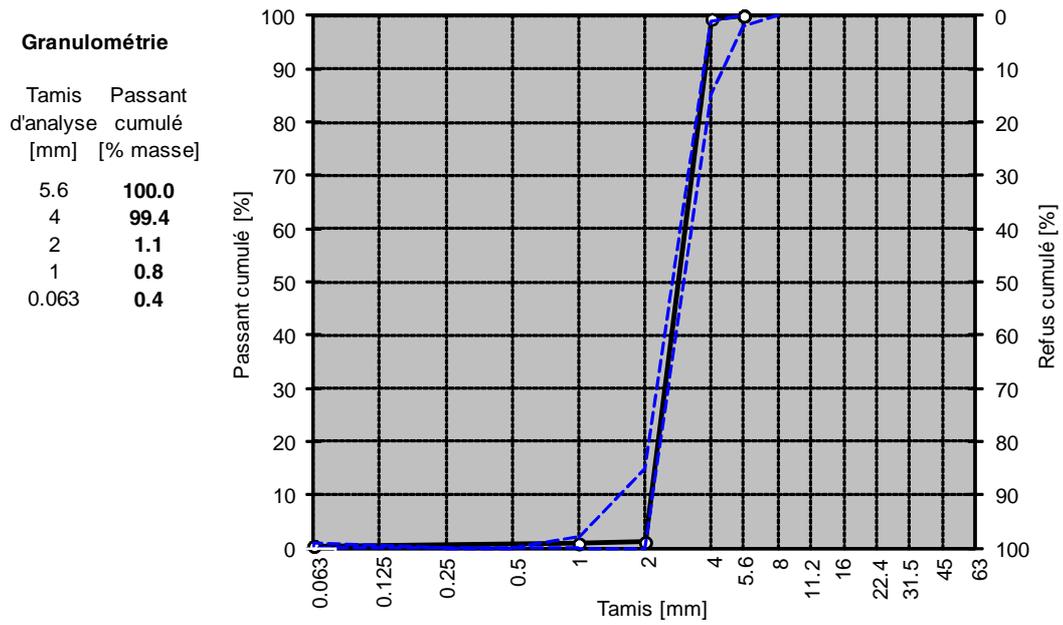


Fig. 8 Granulométrie fraction 2/4 – Balmholz.

Technisches Merkblatt

Baukalkart: Weißkalk 90 /CL 90
Bezeichnung: DIN EN 459-1 CL 90-S
 Kalkhydrat
Produktbenennung: Weißkalk CL 90 Kalkhydrat
Material-/Art.Nr.: 15009 - 15011

Chemische Analyse:

CaO	71,8 %
MgO	1,1 %
SiO ₂	1,1 %
Al ₂ O ₃	0,4 %
Fe ₂ O ₃	0,8 %
Na ₂ O	0,0 %
K ₂ O	0,1 %
SO ₃	0,1 %
 Ca(OH) ₂	 93,8 %
 Glühverlust	 23,9 %
CO ₂	1,1 %
 Restfeuchte	 0,10 %
Weißgrad	72,0 %

Siebanalyse mit Prüfsieben nach DIN 4188:

> 0,090 mm	1,2 %
> 0,200 mm	---
> 0,315 mm	---

Schüttdichte:

~~0,40~~ kg/l
ca. 0,40

Lagerung:

in luftdicht verschlossenen Behältern

Fig. 9 Fiche technique chaux hydratée.

	CAS-Nr. 9004-34-6	EINECS-Nr. 232-679-9																					
	TOPCEL®																						
Produktbeschreibung: Granulat hergestellt aus unserer bewährten Technocel 1004 - Faser																							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">Merkmal</th> <th style="text-align: center;">Wert</th> <th style="text-align: center;">Einheit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Aussehen</td> <td style="text-align: center;">graue Pellets</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Schüttgewicht</td> <td style="text-align: center;">420 - 480</td> <td style="text-align: center;">g/l</td> </tr> <tr> <td>Feuchtigkeit</td> <td style="text-align: center;">Max. 7,0</td> <td style="text-align: center;">%</td> </tr> <tr> <td>Fasergehalt</td> <td style="text-align: center;">min. 97</td> <td style="text-align: center;">%</td> </tr> <tr> <td>Bindemittel CAS Nr. 8002-53-7</td> <td style="text-align: center;">max. 3</td> <td style="text-align: center;">%</td> </tr> <tr> <td>empfohlene Einsatzmenge</td> <td style="text-align: center;">0,3</td> <td style="text-align: center;">%</td> </tr> </tbody> </table>			Merkmal	Wert	Einheit	Aussehen	graue Pellets		Schüttgewicht	420 - 480	g/l	Feuchtigkeit	Max. 7,0	%	Fasergehalt	min. 97	%	Bindemittel CAS Nr. 8002-53-7	max. 3	%	empfohlene Einsatzmenge	0,3	%
Merkmal	Wert	Einheit																					
Aussehen	graue Pellets																						
Schüttgewicht	420 - 480	g/l																					
Feuchtigkeit	Max. 7,0	%																					
Fasergehalt	min. 97	%																					
Bindemittel CAS Nr. 8002-53-7	max. 3	%																					
empfohlene Einsatzmenge	0,3	%																					
<p>Mindesthaltbarkeit: Bei kühler und trockener Lagerung 5 Jahre.</p> <p>Anwendungsspektrum: Alle TOPCEL®-Produkte sind umweltfreundlich, arbeitsmedizinisch unbedenklich und werden aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt. Die Einsatzgebiete sind sehr vielfältig, wie z.B. Splittmastixasphalte (SMA), offenporige Asphalte (OPA), hochstandfeste Binderschichten und Asphaltstrassenbau allgemein</p> <p>Die aufgeführten Daten dienen der technischen Information und basieren auf Durchschnittswerten der laufenden Produktion. Sollten Sie zusätzliche anwendungstechnische Informationen benötigen, kontaktieren Sie bitte unseren Kundenservice unter: Tel.: +49-36783-882-0 Fax: +49-36783-882-252 Internet: www.cff.de E-mail: cff@cff.de</p>																							
 DIN EN ISO 9001:2000 Zertifikat: 01 100 035087	CFF GmbH & Co. KG Amstädter Str. 2 D-98708 Gehren																						

Fig. 10 Fiche technique fibre de cellulose.

IV Exemple d'une formulation théorique à l'aide de PradoWin – Fabrication F3

IV.1 Spécifications du liant

Caractéristiques du liant

Identification:

Nom du produit:	OFBRUEP1 - Styrelf E 60
Date de création:	12-juil-2011 13:25
Dernière mise à jour:	12-juil-2011 13:38
Pénétration (25 °C):	58 (0.1 mm)
Température A et B:	73.8 (°C)
Indice de pénétration:	3.83964
Densité:	1.03 (t/m ³)
Viscosité cinématique (135 °C):	-
Viscosité dynamique (135 °C):	-
Température FRAASS:	-22 (°C)
Prix:	- (€/tonne)
Commentaire:	selon essais de caractérisation OFBRUEP1003ALB-EN

Mesure rhéologique:

Non

Autres pénétrations:

Non

Autres viscosités:

Id	Température	Densité (t/m ³)	Viscosité cinématique (mm ² /s):	Viscosité dynamique (mPa.s):
8	90		40971	
9	110		6058	
10	130		1553	
11	150		777	

Fig. 11 Spécifications du liant. Fabrication F3.

Sortie du cas liant:

Identification:

Nom du cas liant: OFBRUEP1 - Styrelf E 60

Date de création: 19-juil-2011 11:11

Dernière mise à jour:

Commentaire:

Valeurs estimées

A: 0.02335

PI: 3.84

Viscosité (135 °C): 21891.9 (cPoise=mPa.s)

Point de rupture FRAASS: -46.4 (°C)

Température de malaxage: 267.8 (°C)

Température de compactage: 248.8 (°C)

Courbe de consistance

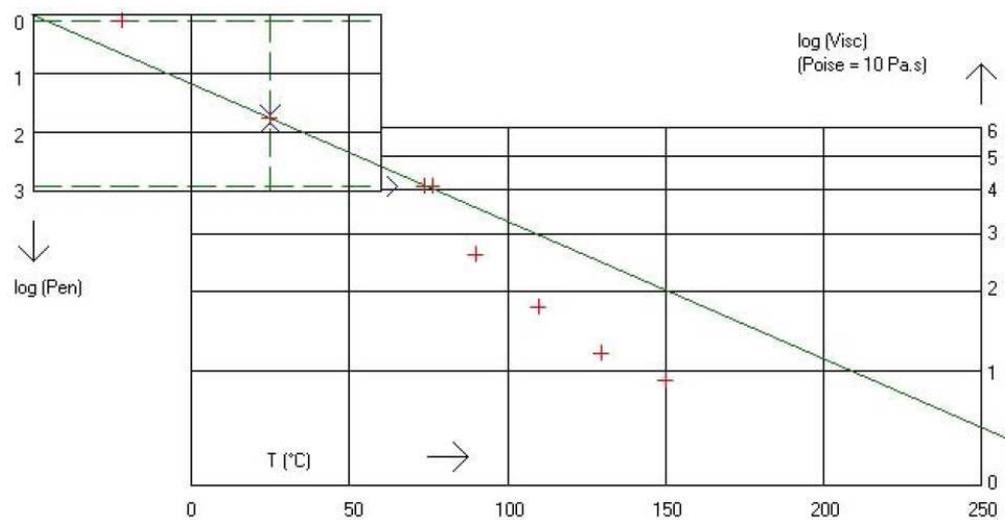


Fig. 12 Spécifications du liant. Fabrication F3.

IV.2 Mélange de sables

Composition du mélange de sables:

1	OFBRUEP1 - Famsa 0/2	100 %
---	----------------------	-------

Granulométrie des sables et du mélange de sable (% de passant)

Tamis (mm)	const. #1	mélange de sables
	OFBRUEP1 - Famsa 0/2 (%)	OFBRUEP1 - Famsa 0/2 (%)
4.000	100.0	100.0
2.000	98.1	98.1
1.000	64.8	64.8
0.800	57.7	57.7
0.400	37.1	37.1
0.320	31.7	31.7
0.250	25.6	25.6
0.180	20.7	20.7
0.120	14.6	14.6
0.063	4.9	4.9

Densité moyenne: **2.70 (t/m³)**

Fractions grossière/moyenne/fine:

%	Sableux	% de pierres	% de moyen	% de fin
100.0	OFBRUEP1 - Famsa 0/2	65.4	17.7	16.9
0.0				
0.0				
100.0	OFBRUEP1 - Famsa 0/2	65.4	17.7	16.9

Diamètre (50 %): 0.62 mm

Epaisseur (D15/D85): 12.34

Uniformité (D40/D90): 3.83

Densité (t/m³) 2.70

Fig. 13 Spécifications du mélange de sables. Fabrication F3.

Mélange de sables: figures

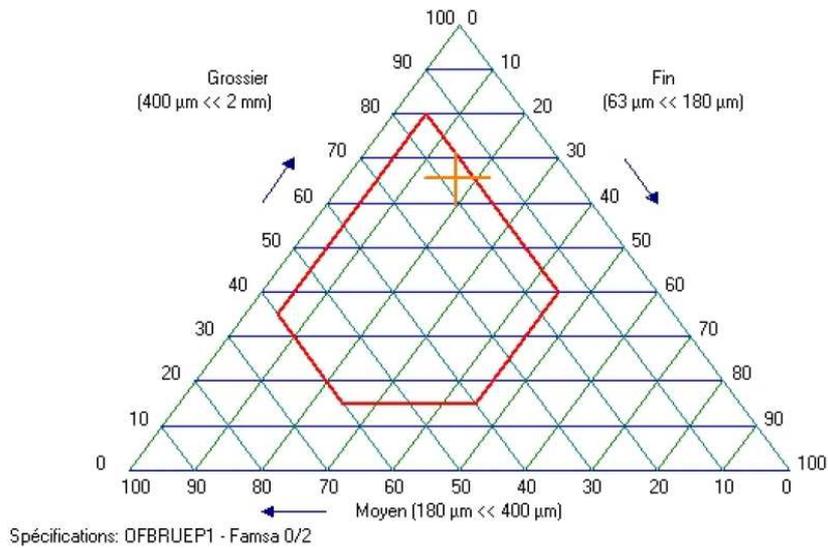
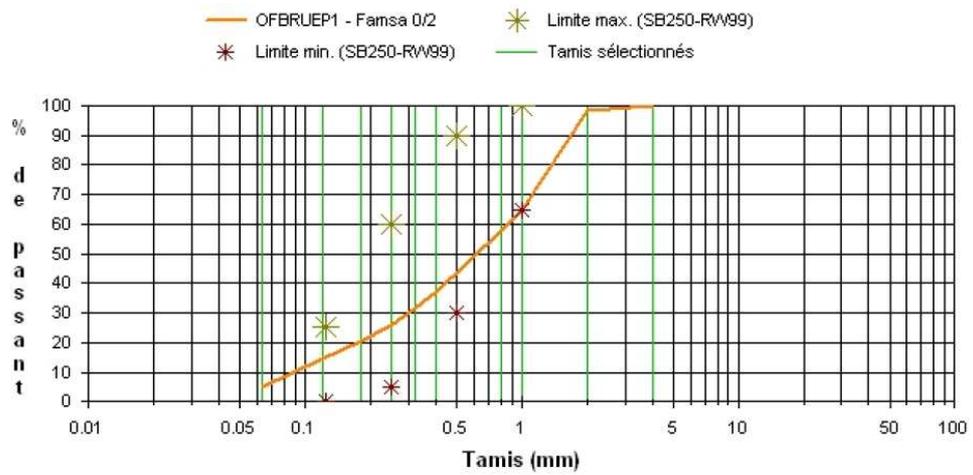


Fig. 14 Spécifications du mélange de sables. Fabrication F3.

IV.3 Granulométrie

Propriétés du mélange:

Squelette: Pierreux

Vides dans les granulats minéraux (VMA): 25.95 %

Matériaux de base:

Type	Composant	Densité (t/m ³)	Volume (%)	Masse (%)
Fillers	OFBRUEP1 - Famsa Filler	2.705	13.11	13.13
Pierres	OFBRUEP1 - Famsa 2/4	2.700	78.28	78.26
Mélange de sables	OFBRUEP1 - Famsa 0/2	2.700	8.62	8.62

Mélange des sables: OFBRUEP1 - Famsa 0/2

Composant	Densité (t/m ³)	Volume (%)	Masse (%)
OFBRUEP1 - Famsa 0/2	2.700	8.62	8.62

Proportions du mélange:

	% de pierres (> 2mm)	% de sable	% de fines
Cible	68.00	22.00	10.00
Mélange (en volume)	67.48	22.55	9.97
Mélange (en masse)	67.47	22.55	9.98

Granulométrie des constituants exprimée en % de passant:

	11.200	8.000	5.600	4.000	2.000	1.000	0.500	0.250	0.125	0.063
OFBRUEP1 - Famsa Filler	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	96.1	92.1	88.1	84.2	64.5
OFBRUEP1 - Famsa 2/4	100.0	100.0	100.0	95.1	14.0	2.4	2.1	1.9	1.6	1.4
OFBRUEP1 - Famsa 0/2	100.0	100.0	100.0	100.0	98.1	64.8	43.7	25.6	15.2	4.9

Granulométrie du mélange sec:

	11.200	8.000	5.600	4.000	2.000	1.000	0.500	0.250	0.125	0.063
Cible (% de passant)	100.0	100.0	100.0	92.0	32.0	20.0	18.0	15.3	12.6	10.0
Cible (% de refus)	0.0	0.0	0.0	8.0	68.0	80.0	82.0	84.7	87.4	90.0
Volume (% de passant)	100.0	100.0	100.0	96.2	32.5	20.1	17.5	15.2	13.6	10.0
Masse (% de passant)	100.0	100.0	100.0	96.2	32.5	20.1	17.5	15.3	13.7	10.0

Fig. 15 Caractéristiques granulométriques. Fabrication F3.

Mélange sec: courbes granulométriques

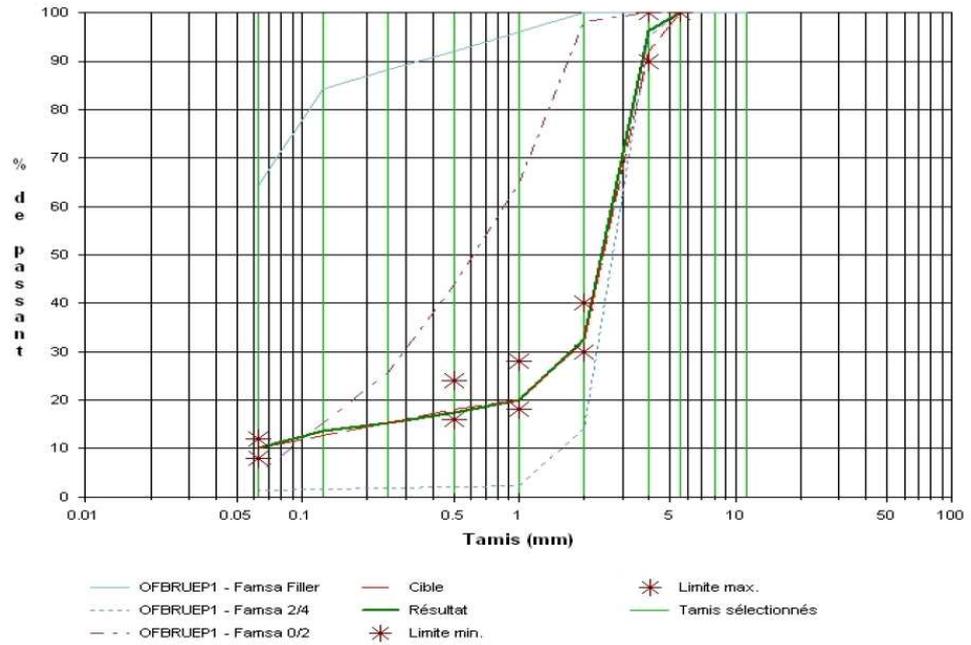


Fig. 16 Caractéristiques granulométriques.

IV.4 Formulation

Mélange sec: type de squelette

Identification:

Nom du cas mélange: LNA4 - Granulom.03 - vides 12%

Date de création: 19-juil-2011 11:11

Dernière mise à jour: 20-sept-2011 09:34

Commentaire:

Propriétés du mélange sec:

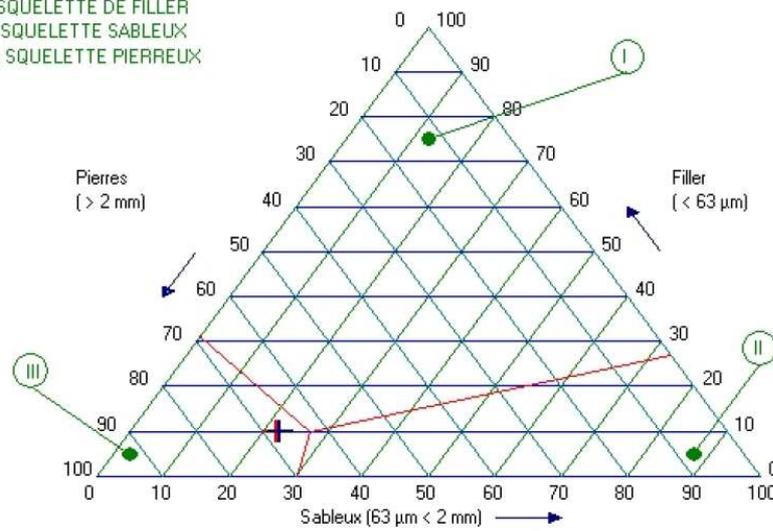
	Cible (% volume)	Réalisé (% volume)	Densité (t/m³)	Vides de Ridgen (%)
Pierres (> 2 mm)	68.0	67.5	2.70	
Sableux	22.0	22.5	2.70	
Fines	10.0	10.0	2.70	32.00

Fig. 17 Formulation de la fabrication F3.

Triangle de Richardson:

Squelette: Pierreux

- I : SQUELETTE DE FILLER
- II : SQUELETTE SABLEUX
- III : SQUELETTE PIERREUX



Indicateur de rigidité du mastic

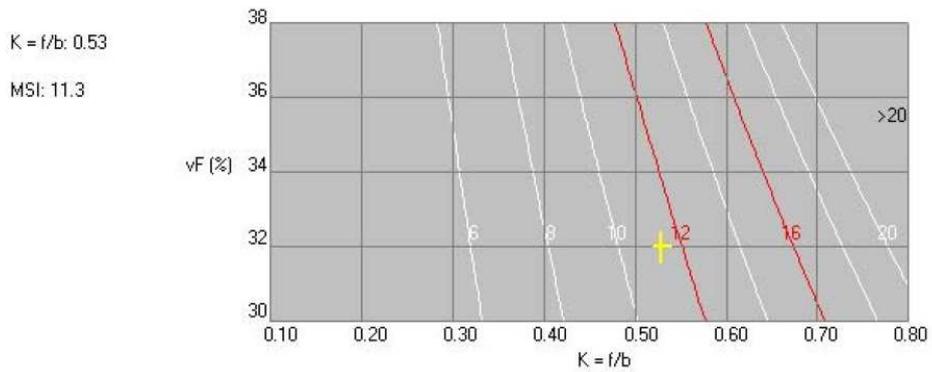


Fig. 18 Formulation de la fabrication F3.

Composition finale du mélange

Choix du degré de compactage: Elevé (100 %)

Composant	Volume (%)	Masse (%)	
	calculé	sur masse granulats	sur masse totale
Pierres > 2 mm (p)	49.97	67.47	62.94
Sable (s)	16.70	22.55	21.04
Fines (f)	7.38	9.98	9.32
Liant(b)	13.95	7.18	6.70
Vides (y)	12.00		

Caractéristiques du liant:

Pénétration: 58.0 (0.1 mm)

Température A et B: 73.8 (°C)

Caractéristiques du mélange:

	Calculés
Volume des granulats (pierres+sable+filler) - Va :	74.05 (%)
Volume de liant - b :	13.95 (%)
Vides - y :	12.00 (%)
Masse volumique maximale:	2.436 (t/m ³)
Masse volumique apparente:	2.144 (t/m ³)
Vides dans les granulats minéraux (VMA):	25.95 (%)
Vides remplis de liant (VFB):	53.75 (%)

Fig. 19 Formulation de la fabrication F3.

V Formulation des LNA-types – Caractéristiques mécaniques et acoustiques

V.1 LNA 4₁₆

V.1.1 Sensibilité à l'eau

Résultats

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

Caractéristiques générale de l'enrobé

Teneur en liant sur enrobé :	5.90 %	MVR du granulat (estimée) :	2.700 g/cm ³
Teneur en liant sur granulats :	6.27 %	MVR de l'enrobé (estimée) :	2.464 g/cm ³
MVR du liant (estimée) :	1.030 g/cm ³		

Caractéristiques des éprouvettes

Mode de fabrication :	Marshall	MVA géométrique ** :	2.025 g/cm ³
Energie de compactage :	2X25 coups	Teneur en vides (géométriques) ** :	17.8 %
Diamètre ** :	101.6 mm	MVA hydrostatique ** :	- g/cm ³
Hauteur ** :	67.3 mm	Teneur en vides (hydrostatiques) ** :	- %

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

Mode de conservation		Air	Eau
		70 h. à 23°C	70 h. à 40°C
Température de l'essai de traction indirecte	[°C]	22	
ITS_w *	[kPa]	-	796
ITS_d *	[kPa]	937	-
Ratio $ITSR$	[%]	85	

* Moyenne de 3 éprouvettes

** Moyenne de 6 éprouvettes

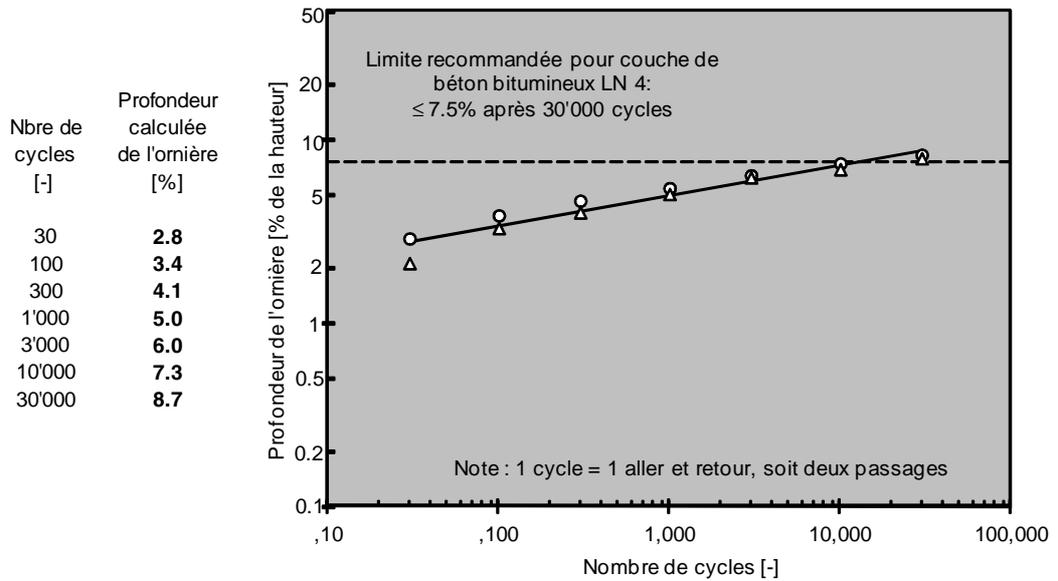
Fig. 20 Sensibilité à l'eau. LNA 4₁₆.

V.1.2 Simulateur de trafic léger

Résultats

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

Teneur en liant sur enrobé :	6.50 % (mesurée)	Épaisseur théorique des plaques :	50 mm
Teneur en liant sur granulats :	6.95 %	Température d'essai :	60 °C
Teneur en vides moyenne :	18.5 %	Pression de gonflage :	0.5 MPa
Degré de compacité Marshall :	- %	Charge par roue :	5'000 N
		Fréquence de chargement :	1 cycle.s ⁻¹



Pente :	0.165	Ornièrè mesurée à 10'000 cycles :	7.1 %
Ornièrè calculée à 10'000 cycles :	7.3 %	Ornièrè mesurée à 30'000 cycles :	8.1 %
Ornièrè calculée à 30'000 cycles :	8.7 %		
Coefficient de corrélation :	0.93		

Fig. 21 Résultats au simulateur de trafic léger. LNA 4₁₆.

V.1.3 Essai Cantabro

Résultats

Mode opératoire: LAVOC

Température de l'essai : **-10 °C**

Teneur en vides moyenne des éprouvettes Marshall : **16.4 %**

	Nombre de tours dans le tambour Los Angeles
	500
Perte en matériaux * [%]	12

* Moyenne de 2 éprouvettes

Résultats

Mode opératoire: LAVOC

Température de l'essai : **-10 °C**

Teneur en vides moyenne des éprouvettes Marshall : **16.5 %**

	Nombre de tours dans le tambour Los Angeles
	500
Perte en matériaux * [%]	15

* Moyenne de 2 éprouvettes

Fig. 22 Résultats de l'essai Cantabro. LNA 4₁₆.

V.1.4 Compression diamétrale

Résultats

Mode opératoire: SN EN 12697-6-8-23

Caractéristiques générale de l'enrobé

Teneur en liant sur enrobé :	6.50 %	MVR du granulat (estimée) :	2.700 g/cm ³
Teneur en liant sur granulats :	6.95 %	MVR de l'enrobé (estimée) :	2.443 g/cm ³
MVR du liant (estimée) :	1.03 g/cm ³		

Caractéristiques des éprouvettes

Diamètre * :	101.7 mm	Masse volumique apparente * :	2.049 g/cm ³
Hauteur * :	66.4 mm	Teneur en vides comblés HR * :	44.5 %
Elancement * :	0.7	Mode de fabrication :	Marshall

Caractéristiques de l'essai de compression diamétrale

Température de l'essai	-10 °C	Valeur minimum	Valeur maximum
Teneur en vides HM [%]	16.1 *	15.5	16.5
Contrainte [N/mm ²]	3.7 *	3.5	3.8
$\Delta(D)/D$ [10 ⁻³]	11.3 *	9.9	12.5
Coefficient de traction [N/mm ²]	517 *	467	604

* Moyenne de 5 éprouvettes

Fig. 23 Résultats de compression diamétrale (essai à -10°C). LNA 4₁₆.

Résultats

Mode opératoire: SN EN 12697-6-8-23

Caractéristiques générale de l'enrobé

Teneur en liant sur enrobé :	6.50 %	MVR du granulat (estimée) :	2.700 g/cm³
Teneur en liant sur granulats :	6.95 %	MVR de l'enrobé (estimée) :	2.443 g/cm³
MVR du liant (estimée) :	1.03 g/cm³		

Caractéristiques des éprouvettes

Diamètre * :	101.8 mm	Masse volumique apparente * :	2.031 g/cm³
Hauteur * :	66.5 mm	Teneur en vides comblés HR * :	43.4 %
Elancement * :	0.7	Mode de fabrication :	Marshall

Caractéristiques de l'essai de compression diamétrale

Température de l'essai	45 °C	Valeur minimum	Valeur maximum
Teneur en vides HM [%]	16.9 *	15.7	20.6
Contrainte [N/mm ²]	0.26 *	0.25	0.28
$\Delta(D)/D$ [10^{-3}]	24.0 *	21.5	28.4
Coefficient de traction [N/mm ²]	17 *	15	20

* Moyenne de 5 éprouvettes

Fig. 24 Résultats de compression diamétrale (essai à +45°C). LNA 4₁₆.

V.1.5 Essai Marshall

Résultats

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

Caractéristiques générale de l'enrobé

Température de compactage	160 °C
Teneur en liant sur enrobé :	6.50 %
Teneur en liant sur granulats :	6.95 %
MVR du liant (estimée) :	1.03 Mg/m³
MVR du granulat (calculée) :	2.701 Mg/m³
MVR de l'enrobé (estimée) :	2.443 Mg/m³
Nombre de coups de dame :	50 / 50

Caractéristiques Marshall

Masse volumique apparente *	2.115 Mg/m³
Teneur en vides Vm *	13.4 %
Teneur en vides comblés VFB *	49.9 %
Teneur en vides du squelette minéral VMA *	26.8 %
Stabilité SM *	10.0 kN
Fluage F *	3.0 mm
Fluage Ft *	1.6 mm
Quotient Marshall S/F *	3.4 kN/mm

* Moyenne de 4 éprouvettes

Fig. 25 Résultats de l'essai Marshall. LNA 4₁₆.

V.1.6 Absorption acoustique

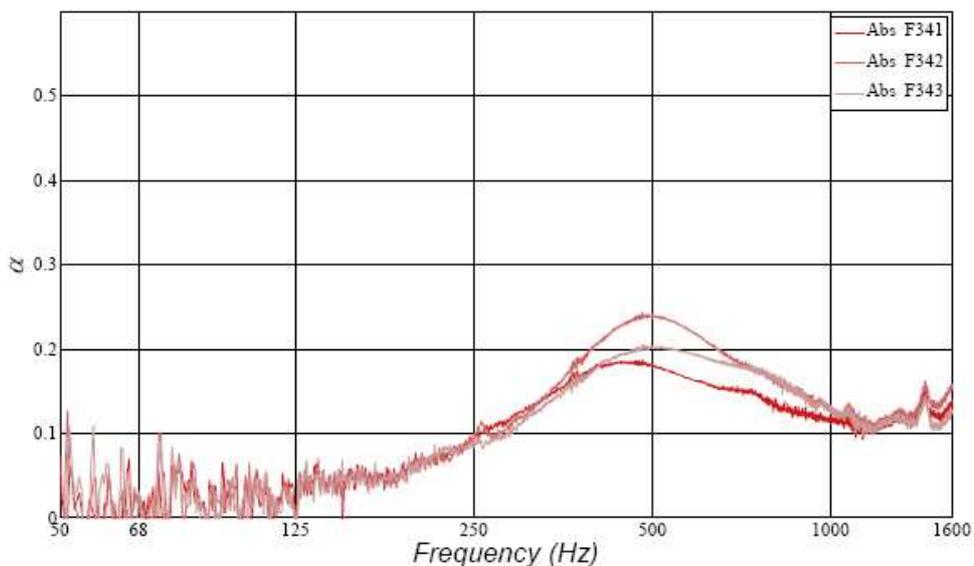


Fig. 26 Résultats d'absorption acoustique. LNA 4₁₆.

V.2 LNA 4₁₂

V.2.1 Sensibilité à l'eau

Résultats

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

Caractéristiques générale de l'enrobé

Teneur en liant sur enrobé :	6.63 %	MVR du granulat (calculée) :	2.700 g/cm³
Teneur en liant sur granulats :	7.10 %	MVR de l'enrobé (estimée) :	2.438 g/cm³
MVR du liant (estimée) :	1.030 g/cm³		

Caractéristiques des éprouvettes

Mode de fabrication :	Marshall	MVA géométrique ** :	2.048 g/cm³
Energie de compactage :	2X25 coups	Teneur en vides (géométriques) ** :	16.0 %
Diamètre ** :	101.6 mm	MVA hydrostatique ** :	2.116 g/cm³
Hauteur ** :	66.2 mm	Teneur en vides (hydrostatiques) ** :	13.2 %

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

Mode de conservation	Air 70 h. à 23°C		Eau 70 h. à 40°C	
	Température de l'essai de traction indirecte [°C]	22		
ITS_w * [kPa]	-		761	
ITS_d * [kPa]	962		-	
Ratio $ITSR$ [%]	79			

* Moyenne de 3 éprouvettes

** Moyenne de 6 éprouvettes

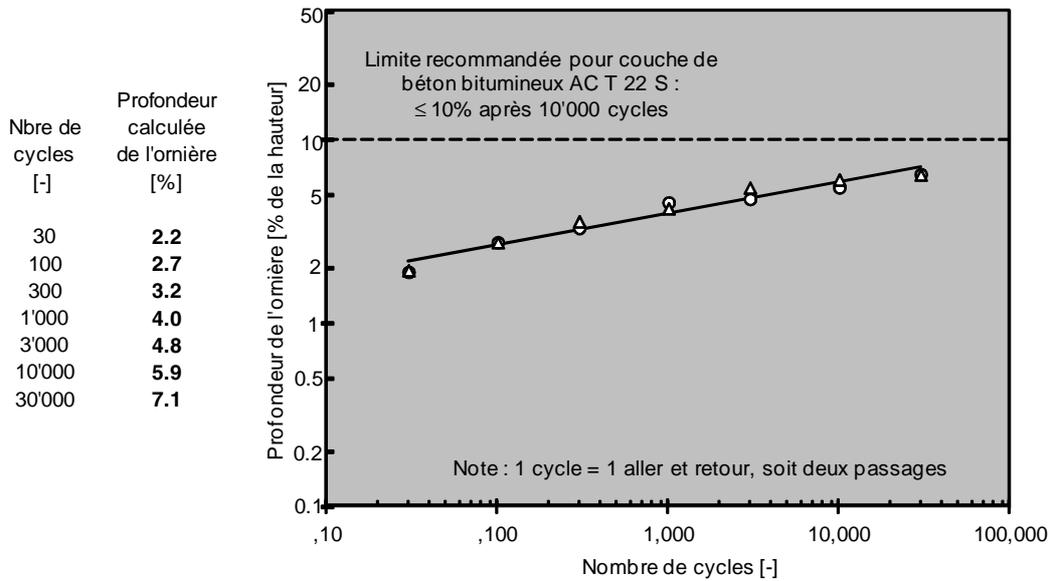
Fig. 27 Sensibilité à l'eau. LNA 4₁₂.

V.2.2 Simulateur de trafic léger

Résultats

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

Teneur en liant sur enrobé :	6.63 % (mesurée)	Épaisseur théorique des plaques :	50 mm
Teneur en liant sur granulats :	7.10 %	Température d'essai :	60 °C
Teneur en vides moyenne :	16.6 %	Pression de gonflage :	0.6 MPa
Degré de compacité Marshall :	- %	Charge par roue :	5'000 N
		Fréquence de chargement :	1 cycle.s-1



Pente : **0.171**
 Ornièr calculée à 10'000 cycles : **5.9 %** Ornièr mesurée à 10'000 cycles : **5.8 %**
 Ornièr calculée à 30'000 cycles : **7.1 %** Ornièr mesurée à 30'000 cycles : **6.5 %**
 Coefficient de corrélation : **0.95**

Fig. 28 Résultats au simulateur de trafic léger. LNA 4₁₂.

V.2.3 Essai Cantabro

Résultats

Mode opératoire: LAVOC

Température de l'essai : **-10 °C**

Teneur en vides moyenne des éprouvettes Marshall : **12.3 %**

	Nombre de tours dans le tambour Los Angeles
	500
Perte en matériaux * [%]	12

* Moyenne de 3 éprouvettes

Fig. 29 Résultats de l'essai Cantabro. LNA 4₁₂.

V.2.4 Compression diamétrale

Résultats

Mode opératoire: SN EN 12697-6-8-23

Caractéristiques générale de l'enrobé

Teneur en liant sur enrobé :	6.68 %	MVR du granulat (calculée) :	2.702 g/cm ³
Teneur en liant sur granulats :	7.16 %	MVR de l'enrobé (estimée) :	2.438 g/cm ³
MVR du liant (estimée) :	1.03 g/cm ³		

Caractéristiques des éprouvettes

Diamètre * :	101.6 mm	Masse volumique apparente * :	2.163 g/cm ³
Hauteur * :	64.4 mm	Teneur en vides comblés HR * :	55.5 %
Elancement * :	0.6	Mode de fabrication :	Marshall

Caractéristiques de l'essai de compression diamétrale

Température de l'essai	-10 °C	Valeur minimum	Valeur maximum
Teneur en vides HM [%]	11.3 *	11.1	11.4
Contrainte [N/mm ²]	4.2 *	3.9	4.5
$\Delta(D)/D$ [10 ⁻³]	10.0 *	9.2	10.6
Coefficient de traction [N/mm ²]	668 *	664	672

* Moyenne de 4 éprouvettes

Fig. 30 Résultats de compression diamétrale (essai à -10°C). LNA 4₁₂.

Résultats

Mode opératoire: SN EN 12697-6-8-23

Caractéristiques générale de l'enrobé

Teneur en liant sur enrobé :	6.68 %	MVR du granulat (calculée) :	2.702 g/cm³
Teneur en liant sur granulats :	7.16 %	MVR de l'enrobé (estimée) :	2.438 g/cm³
MVR du liant (estimée) :	1.03 g/cm³		

Caractéristiques des éprouvettes

Diamètre * :	101.6 mm	Masse volumique apparente * :	2.142 g/cm³
Hauteur * :	64.1 mm	Teneur en vides comblés HR * :	53.4 %
Elancement * :	0.6	Mode de fabrication :	Marshall

Caractéristiques de l'essai de compression diamétrale

Température de l'essai	45 °C	Valeur minimum	Valeur maximum
Teneur en vides HM [%]	12.1 *	11.6	12.4
Contrainte [N/mm ²]	0.31 *	0.28	0.34
$\Delta(D)/D$ [10 ⁻³]	12.4 *	5.0	16.0
Coefficient de traction [N/mm ²]	47 *	32	88

* Moyenne de 4 éprouvettes

Fig. 31 Résultats de compression diamétrale (essai à +45°C). LNA 4₁₂.

V.2.5 Essai Marshall

Résultats

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

Caractéristiques générale de l'enrobé

Température de compactage	160 °C
Teneur en liant sur enrobé :	6.63 %
Teneur en liant sur granulats :	7.10 %
MVR du liant (estimée) :	1.03 Mg/m³
MVR du granulat (calculée) :	2.700 Mg/m³
MVR de l'enrobé (estimée) :	2.438 Mg/m³
Nombre de coups de dame :	50 / 50

Caractéristiques Marshall

Masse volumique apparente *	2.206 Mg/m³
Teneur en vides Vm *	9.5 %
Teneur en vides comblés VFB *	59.9 %
Teneur en vides du squelette minéral VMA *	23.7 %
Stabilité SM *	11.0 kN
Fluage F *	3.7 mm
Fluage Ft *	1.4 mm
Quotient Marshall S/F *	3.0 kN/mm

* Moyenne de 4 éprouvettes

Fig. 32 Résultats de l'essai Marshall. LNA 4₁₂.

V.2.6 Absorption acoustique

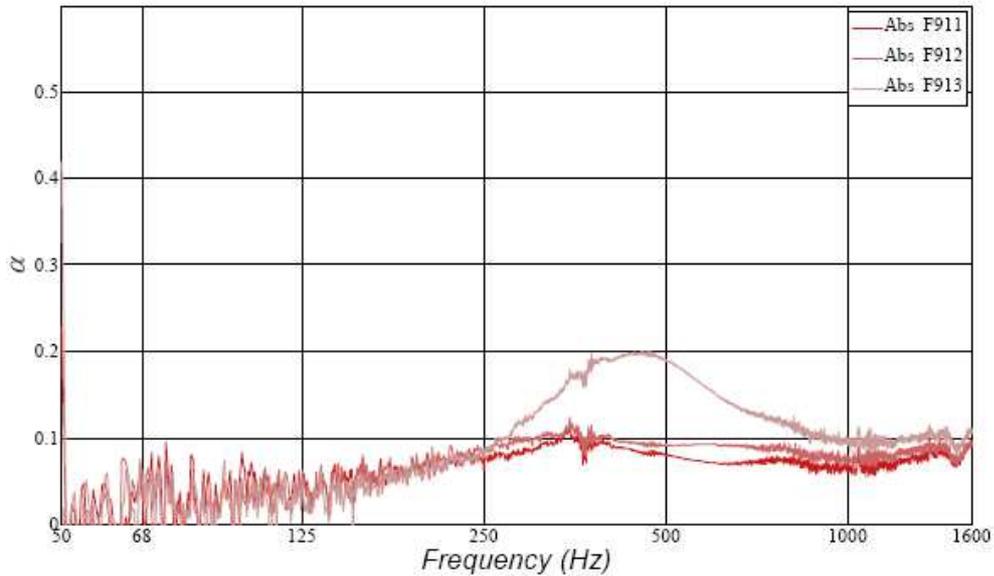


Fig. 33 Résultats d'absorption acoustique. LNA 4₁₂.

V.3 LNA 8₁₆

V.3.1 Sensibilité à l'eau

Résultats

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

Caractéristiques générale de l'enrobé

Teneur en liant sur enrobé :	6.21 %	MVR du granulat (calculée) :	2.700 g/cm³
Teneur en liant sur granulats :	6.62 %	MVR de l'enrobé (estimée) :	2.453 g/cm³
MVR du liant (estimée) :	1.030 g/cm³		

Caractéristiques des éprouvettes

Mode de fabrication :	Marshall	MVA géométrique ** :	2.070 g/cm³
Energie de compactage :	2x25 coups	Teneur en vides (géométriques) ** :	15.6 %
Diamètre ** :	101.6 mm	MVA hydrostatique ** :	- g/cm³
Hauteur ** :	65.7 mm	Teneur en vides (hydrostatiques) ** :	- %

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

Mode de conservation	Air 70 h. à 23°C		Eau 70 h. à 40°C	
	Température de l'essai de traction indirecte [°C]	22		
ITS_w * [kPa]	-	-	858	
ITS_d * [kPa]	936		-	
Ratio $ITSR$ [%]	92			

* Moyenne de 3 éprouvettes

** Moyenne de 6 éprouvettes

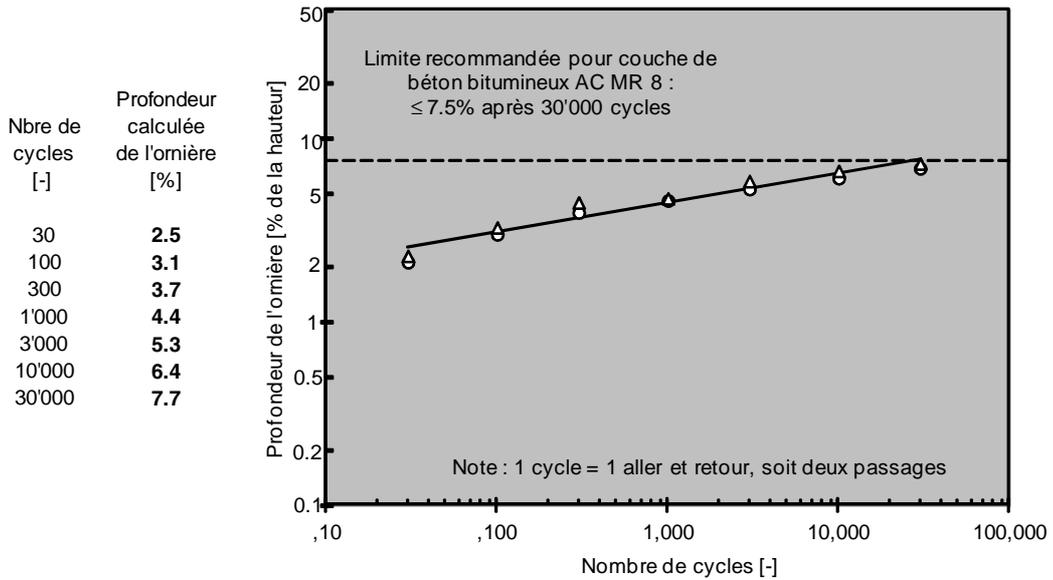
Fig. 34 Sensibilité à l'eau. LNA 8₁₆.

V.3.2 Simulateur de trafic léger

Résultats

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

Teneur en liant sur enrobé :	6.21 %	(mesurée)	Epaisseur théorique des plaques :	50 mm
Teneur en liant sur granulats :	6.62 %		Température d'essai :	60 °C
Teneur en vides moyenne :	14.2 %		Pression de gonflage :	0.6 MPa
Degré de compacité Marshall :	-	(rèf 2x40 coups)	Charge par roue :	5'000 N
			Fréquence de chargement :	1 cycle.s-1



Pente : **0.161**
 Ornière calculée à 10'000 cycles : **6.4** % Ornière mesurée à 10'000 cycles : **6.3** %
 Ornière calculée à 30'000 cycles : **7.7** % Ornière mesurée à 30'000 cycles : **7.1** %
 Coefficient de corrélation : **0.94**

Fig. 35 Résultats au simulateur de trafic léger. LNA 8₁₆.

V.3.3 Essai Cantabro

Résultats

Mode opératoire: LAVOC

Température de l'essai : **-10** °C

Teneur en vides moyenne des éprouvettes Marshall : **15.1** %

	Nombre de tours dans le tambour Los Angeles
	500
Perte en matériaux * [%]	14

* Moyenne de 3 éprouvettes

Fig. 36 Résultats de l'essai Cantabro. LNA 8₁₆.

V.3.4 Compression diamétrale

Résultats

Mode opératoire: SN EN 12697-6-8-23

Caractéristiques générale de l'enrobé

Teneur en liant sur enrobé :	6.49 %	MVR du granulat (calculée) :	2.700 g/cm ³
Teneur en liant sur granulats :	6.94 %	MVR de l'enrobé (estimée) :	2.443 g/cm ³
MVR du liant (estimée) :	1.03 g/cm ³		

Caractéristiques des éprouvettes

Diamètre * :	101.6 mm	Masse volumique apparente * :	2.070 g/cm ³
Hauteur * :	62.8 mm	Teneur en vides comblés HR * :	46.1 %
Elancement * :	0.6	Mode de fabrication :	Marshall

Caractéristiques de l'essai de compression diamétrale

Température de l'essai		-10 °C	Valeur minimum	Valeur maximum
Teneur en vides HM [%]		15.3 *	14.3	16.0
Contrainte [N/mm ²]		4.4 *	4.2	4.6
$\Delta(D)/D$ [10 ⁻³]		10.1 *	9.6	10.6
Coefficient de traction [N/mm ²]		685 *	675	692

* Moyenne de 4 éprouvettes

Fig. 37 Résultats de compression diamétrale (essai à -10°C). LNA 8₁₆.

Résultats

Mode opératoire: SN EN 12697-6-8-23

Caractéristiques générale de l'enrobé

Teneur en liant sur enrobé :	6.21 %	MVR du granulat (calculée) :	2.700 g/cm ³
Teneur en liant sur granulats :	6.62 %	MVR de l'enrobé (estimée) :	2.453 g/cm ³
MVR du liant (estimée) :	1.03 g/cm ³		

Caractéristiques des éprouvettes

Diamètre * :	101.6 mm	Masse volumique apparente * :	2.071 g/cm ³
Hauteur * :	63.2 mm	Teneur en vides comblés HR * :	44.5 %
Elancement * :	0.6	Mode de fabrication :	Marshall

Caractéristiques de l'essai de compression diamétrale

Température de l'essai	45 °C	Valeur minimum	Valeur maximum
Teneur en vides HM [%]	15.6 *	15.3	15.8
Contrainte [N/mm ²]	0.29 *	0.25	0.32
$\Delta(D)/D$ [10 ⁻³]	18.5 *	17.2	19.5
Coefficient de traction [N/mm ²]	24 *	20	27

* Moyenne de 4 éprouvettes

Fig. 38 Résultats de compression diamétrale (essai à +45°C). LNA 8₁₆.

V.3.5 Essai Marshall

Résultats

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

Caractéristiques générale de l'enrobé

Température de compactage	160 °C
Teneur en liant sur enrobé :	6.21 %
Teneur en liant sur granulats :	6.62 %
MVR du liant (estimée) :	1.03 Mg/m³
MVR du granulat (calculée) :	2.700 Mg/m³
MVR de l'enrobé (estimée) :	2.453 Mg/m³
Nombre de coups de dame :	50 / 50

Caractéristiques Marshall

Masse volumique apparente *	2.152 Mg/m³
Teneur en vides Vm *	12.3 %
Teneur en vides comblés VFB *	51.4 %
Teneur en vides du squelette minéral VMA *	25.3 %
Stabilité SM *	10.5 kN
Fluage F *	3.1 mm
Fluage Ft *	1.6 mm
Quotient Marshall S/F *	3.4 kN/mm

* Moyenne de 4 éprouvettes

Fig. 39 Résultats de l'essai Marshall. LNA 8₁₆.

V.3.6 Absorption acoustique

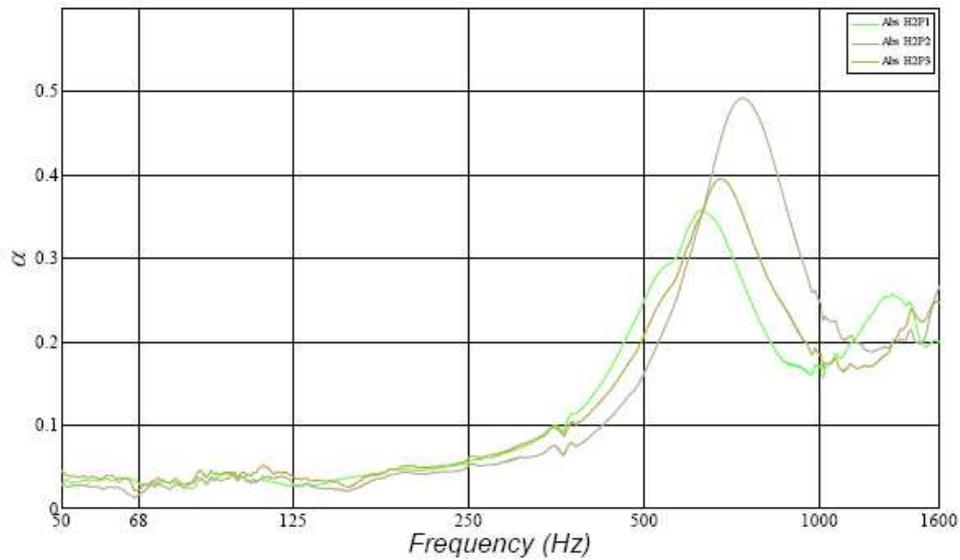


Fig. 40 Résultats d'absorption acoustique. LNA 8₁₆.

V.4 LNA 8₁₂

V.4.1 Sensibilité à l'eau

Résultats

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

Caractéristiques générale de l'enrobé

Teneur en liant sur enrobé :	6.49 %	MVR du granulat (estimée) :	2.700 g/cm³
Teneur en liant sur granulats :	6.94 %	MVR de l'enrobé (estimée) :	2.443 g/cm³
MVR du liant (estimée) :	1.030 g/cm³		

Caractéristiques des éprouvettes

Mode de fabrication :	Marshall	MVA géométrique ** :	2.038 g/cm³
Energie de compactage :	2X25 coups	Teneur en vides (géométriques) ** :	16.6 %
Diamètre ** :	101.6 mm	MVA hydrostatique ** :	- g/cm³
Hauteur ** :	66.6 mm	Teneur en vides (hydrostatiques) ** :	- %

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

Mode de conservation	Air	Eau
	70 h. à 23°C	70 h. à 40°C
Température de l'essai de traction indirecte [°C]	22	
ITS _w * [kPa]	-	820
ITS _d * [kPa]	895	-
Ratio ITS _R [%]	92	

* Moyenne de 3 éprouvettes

** Moyenne de 6 éprouvettes

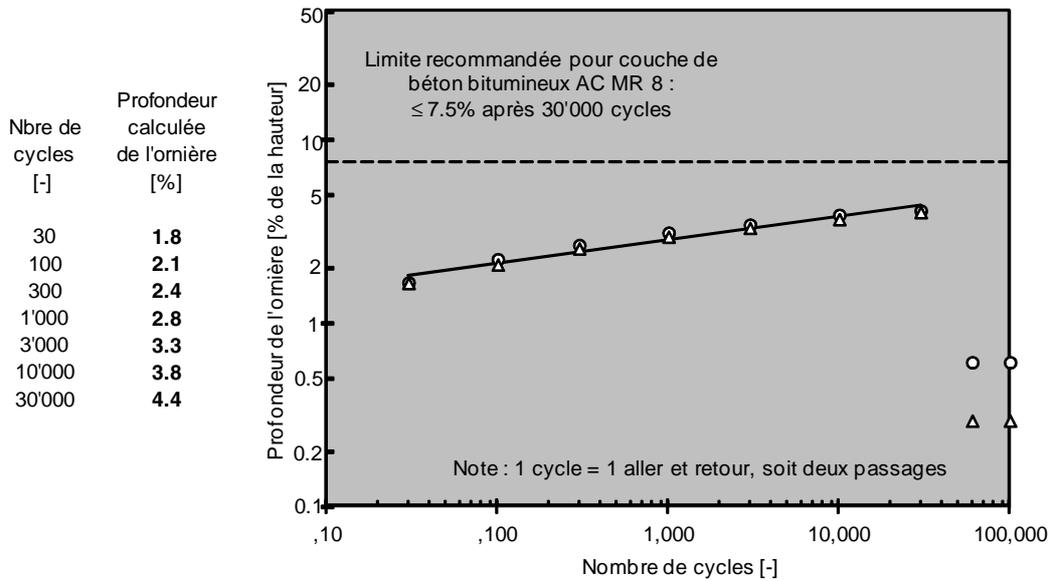
Fig. 41 Sensibilité à l'eau. LNA 8₁₂.

V.4.2 Simulateur de trafic léger

Résultats

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

Teneur en liant sur enrobé :	6.49 % (mesurée)	Épaisseur théorique des plaques :	50 mm
Teneur en liant sur granulats :	6.94 %	Température d'essai :	60 °C
Teneur en vides moyenne :	13.2 %	Pression de gonflage :	0.6 MPa
Degré de compacité Marshall :	- %	Charge par roue :	5'000 N
		Fréquence de chargement :	1 cycle.s ⁻¹



Pente :	0.126		
Ornièr calculée à 10'000 cycles :	3.8 %	Ornièr mesurée à 10'000 cycles :	3.8 %
Ornièr calculée à 30'000 cycles :	4.4 %	Ornièr mesurée à 30'000 cycles :	4.1 %
Coefficient de corrélation :	0.96		

Fig. 42 Résultats au simulateur de trafic léger. LNA 8₁₂.

V.4.3 Essai Cantabro

Résultats

Mode opératoire: LAVOC

Température de l'essai : **-10 °C**

Teneur en vides moyenne des éprouvettes Marshall : **12.3** %

	Nombre de tours dans le tambour Los Angeles
	500
Perte en matériaux * [%]	15

* Moyenne de 3 éprouvettes

Fig. 43 Résultats de l'essai Cantabro. LNA 8₁₂.

V.4.4 Compression diamétrale

Résultats

Mode opératoire: SN EN 12697-6-8-23

Caractéristiques générale de l'enrobé

Teneur en liant sur enrobé :	6.49 %	MVR du granulat (calculée) :	2.700 g/cm³
Teneur en liant sur granulats :	6.94 %	MVR de l'enrobé (estimée) :	2.443 g/cm³
MVR du liant (estimée) :	1.03 g/cm³		

Caractéristiques des éprouvettes

Diamètre * :	101.6 mm	Masse volumique apparente * :	2.174 g/cm³
Hauteur * :	62.8 mm	Teneur en vides comblés HR * :	55.5 %
Elancement * :	0.6	Mode de fabrication :	Marshall

Caractéristiques de l'essai de compression diamétrale

Température de l'essai	-10 °C	Valeur minimum	Valeur maximum
Teneur en vides HM [%]	11.0 *	10.2	11.4
Contrainte [N/mm ²]	4.4 *	4.2	4.6
$\Delta(D)/D$ [10^{-3}]	10.1 *	9.6	10.6
Coefficient de traction [N/mm ²]	685 *	675	692

* Moyenne de 4 éprouvettes

Fig. 44 Résultats de compression diamétrale (essai à -10°C). LNA 8₁₂.

Résultats

Mode opératoire: SN EN 12697-6-8-23

Caractéristiques générale de l'enrobé

Teneur en liant sur enrobé :	6.49 %	MVR du granulat (calculée) :	2.700 g/cm³
Teneur en liant sur granulats :	6.94 %	MVR de l'enrobé (estimée) :	2.443 g/cm³
MVR du liant (estimée) :	1.03 g/cm³		

Caractéristiques des éprouvettes

Diamètre * :	101.6 mm	Masse volumique apparente * :	2.171 g/cm³
Hauteur * :	62.7 mm	Teneur en vides comblés HR * :	55.1 %
Elancement * :	0.6	Mode de fabrication :	Marshall

Caractéristiques de l'essai de compression diamétrale

Température de l'essai		45 °C	Valeur minimum	Valeur maximum
Teneur en vides HM [%]		11.2 *	9.8	11.7
Contrainte [N/mm ²]		0.30 *	0.28	0.32
$\Delta(D)/D$ [10 ⁻³]		13.7 *	12.7	14.4
Coefficient de traction [N/mm ²]		34 *	33	35

* Moyenne de 4 éprouvettes

Fig. 45 Résultats de compression diamétrale (essai à +45°C). LNA 8₁₂.

V.4.5 Essai Marshall

Résultats

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

Caractéristiques générale de l'enrobé

Température de compactage	160 °C
Teneur en liant sur enrobé :	6.49 %
Teneur en liant sur granulats :	6.94 %
MVR du liant (estimée) :	1.03 Mg/m³
MVR du granulat (estimée) :	2.700 Mg/m³
MVR de l'enrobé (estimée) :	2.443 Mg/m³
Nombre de coups de dame :	50 / 50

Caractéristiques Marshall

Masse volumique apparente *	2.287 Mg/m³
Teneur en vides V _m *	6.4 %
Teneur en vides comblés VFB *	69.2 %
Teneur en vides du squelette minéral VMA *	20.8 %
Stabilité SM *	11.0 kN
Fluage F *	3.8 mm
Fluage Ft *	1.3 mm
Quotient Marshall S/F *	3.0 kN/mm

* Moyenne de 4 éprouvettes

Fig. 46 Résultats de l'essai Marshall. LNA 8₁₂.

V.4.6 Absorption acoustique

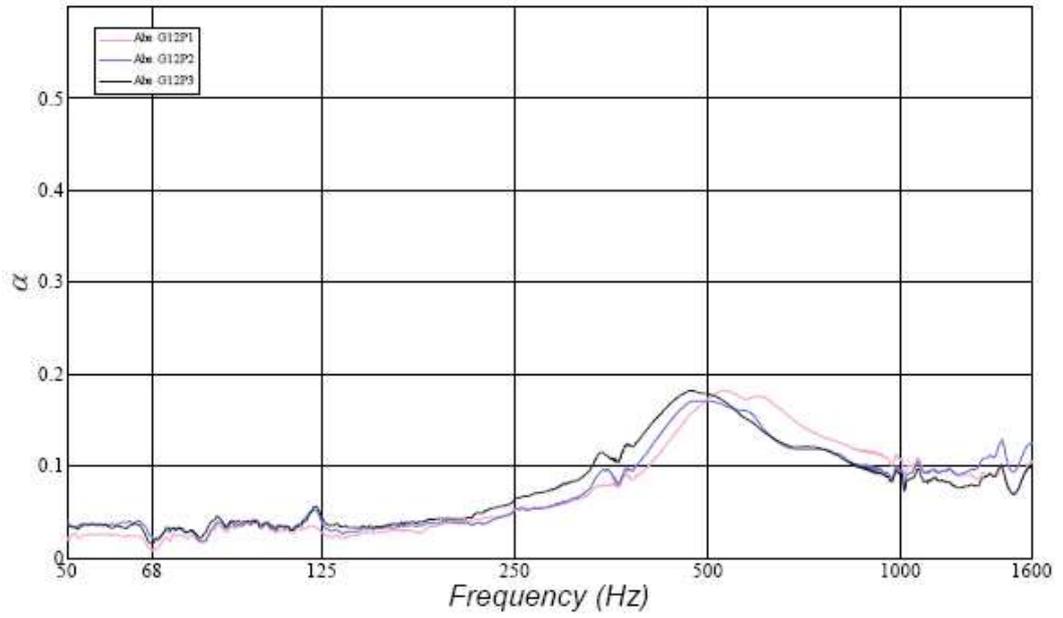


Fig. 47 Résultats d'absorption acoustique. LNA 8₁₂.

Glossaire

Terme	Signification
α	Facteur d'absorption acoustique (α)
λ	Profondeur de profil de la texture (λ)
$\Delta R\&B$	Pouvoir rigidifiant ($\Delta R\&B$)
A&B	Anneau et bille (A&B)
AC	Asphalt Concrete – Béton bitumineux (AC)
AC MR	Enrobé bitumineux macro-rugueux (AC MR)
AC EME	Enrobé bitumineux à module élevé (AC MR)
ACo	Open Graded Asphalt Concrete (ACo)
AG	Canton d'Argovie (AG)
ARFC	Asphalt-rubber friction course, revêtement avec granules de caoutchouc (ARFC)
B&K	Bruel & Kjaer (B&K)
BBM	Béton bitumineux mince (BBM)
BBTM	Béton bitumineux très mince (BBTM)
BBUM	Béton bitumineux ultra mince (BBUM)
BK	Commission d'accompagnement (BK)
CEI	Commission électrotechnique internationale (CEI)
CPA	Coefficient de polissage accéléré (CPA)
PSV	<i>Polished-stone Value (PSV)</i>
CPATT	Centre for Pavement and Transportation Technologies, Waterloo, Canada (CPATT)
CPB	Méthode au passage dans des conditions contrôlées (CPB)
CPX	Close-Proximity Method – Mesurage en champ proche du bruit (CPX)
CPXI	Close-Proximity Sound Index (CPXI)
CRR	Centre de recherches routières, Belgique (CRR)
D	Diamètre de l'échantillon (D)
dB(A)	Décibel « pondération A » selon normes CEI (dB(A))
DETEC	Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC)
UVEK	<i>Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK)</i>
DATEC	<i>Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni (DATEC)</i>
DIN	Organisme allemand de normalisation (DIN)
DRI	Danish Transport Research Institute (DRI)
DTT	Direct tension tester, essai de traction directe (DTT)
EN	Norme européenne (EN)
EOS	Scories de hauts fourneaux (EOS)
EP	Einzelprojekt (EP)
EP	Résine époxy (EP)
EPF	Ecole Polytechnique Fédérale, Suisse (EPF)
EPFL	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
f	Fréquence [Hz] (f)
F	Fluage, Marshall (F)
Ft	Fluage tangentiel, Marshall (Ft)
FEHRL	Forum of European National Highway Research Laboratories (FEHRL)
FFT	Analyseur de spectre à transformation de Fourier rapide (FFT)
FR	Canton de Fribourg (FR)

g	Facteur de forme de la texture (g)
GA	Gussasphalt, béton de ciment (GA)
HM	Teneur en vides (HM)
HRS	Pourcentage de vides dans le squelette granulaire (HRS)
Hz	Hertz, unité de mesure de la fréquence (Hz)
IPG	Innovatieprogramma Geluid (IPG)
ISO	Organisation internationale de normalisation (ISO)
ITS	Indirect tensile strength, résistance en traction indirecte (ITS)
ITSd	Résistance en traction indirecte à sec (ITSd)
ITSw	Résistance en traction indirecte mouillée (ITSw)
ITSR	Indirect tensile strength ratio, ratio de résistance en traction indirecte (ITSR)
kHz	10 ³ Hz (kHz)
Leq	Niveau de pression acoustique continu équivalent (Leq)
Lmax	Niveau de pression acoustique maximal (Lmax)
LAVOC	Laboratoire des voies de circulation, EPFL (LAVOC)
LDD	Lärmindernde Dünnschichtdecken (LDD)
LECA®	Lightweight expanded clay, argile expansée légère (LECA)
LEMA	Laboratoire d'électromagnétisme et d'acoustique, EPFL (LEMA)
LMA	Lärmmessanhänger (LMA)
LNA	Low noise asphalt, revêtement peu bruyant (LNA)
LU	Canton de Lucerne (LU)
MA	Mastic asphalt, asphalte coulé (MA)
MMLS3	Model Mobile Load Simulator (MMLS3)
MPa	Mégapascal, 1N/mm ² (MPa)
MSI	Tensile modulus of elasticity, module de rigidité du liant (MSI)
MVA	Masse volumique apparente (MVA)
MVR	Masse volumique réelle (MVR)
N	Newton, unité de force (N)
OFEV	Office fédéral de l'environnement (OFEV)
OFROU ASTRA	Office fédéral des routes (OFROU) <i>Bundesamt für Strassen (ASTRA)</i>
OGAC	Open Graded Asphalt Concrete (OGAC)
PA	Porous Asphalt – Enrobé drainant (PA)
PCG	Presse à cisaillement giratoire (PCG)
PL	Poids lourds (PL)
PmB	Polymer Modified Bitumen, bitume modifié aux polymères (PmB)
PMT MPD	Profondeur moyenne de texture (PMT) <i>Mean Texture Depth</i>
POSMAC	Porous Surface Mastic Asphalt Course (POSMAC)
PWR	Pavement Wear Ratio, ratio d'usure du revêtement (PWR)
RPT	Réforme de la péréquation financière et de la répartition des tâches entre la Confédération et les cantons (RPT)
SBS	Styrène-butadiène, élastomères (SBS)

SDA	Semidichte Asphaltsschichten, enrobé semi-dense (SDA)
SG	Canton de Saint-Gall (SG)
SM	Stabilité Marshall (SM)
SMA	Splittmastixasphalt, enrobé en asphalte coulé (SMA)
SN	Norme suisse (SN)
SN EN	Version suisse d'une norme européenne (SN EN)
SNR	Règle de norme suisse (SNR)
SO	Canton de Soleure (SO)
SPA	Spittasphalt – Enrobé mince macrorugueux (SPA)
SPB	Statistical Pass-By, mesurage statistique au passage (SPB)
SPBI	Statistical Pass-By Index, indice statistique au passage (SPBI)
STL	Simulateur de trafic léger (STL)
STL-86+	Modèle de calcul du bruit du trafic routier (STL-86+)
SZ	Canton de Schwyz (SZ)
TD	Techdata S.A. (TD)
TG	Canton de Thurgovie (TG)
TI	Canton du Tessin (TI)
TP	Teilprojekt (TP)
VFB	Voids filled with binder, vides remplis de liant (VFB)
VL	Véhicules légers (VL)
VMA	Voids in Mineral Aggregate, vides dans les matériaux granulaires (VMA)
VS	Canton du Valais (VS)
VSS	Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)
WP	Work Package (WP)
ZOAB	Zeer Open Asphalt, « Béton bitumineux très poreux » (ZOAB)
ZSA	Zeer Stil Asphalt, « Asphalte très silencieux » (ZSA)

Bibliographie

Documentation

- [1] Angst Ch., Beltzung F., Bosshardt D., Grolimund H.-J., Pestalozzi H. (2008), « **Revêtements de routes peu bruyants à l'intérieur des localités** ». *Rapport final 2007. Rapport OFROU/OFEV*, Berne.
- [2] Angst Ch., Bosshardt D., Grolimund H.-J. et al. (2004-2010). « **Revêtements de routes peu bruyants à l'intérieur des localités** ». *Rapports annuels 2004 à 2009. Rapports OFROU/OFEV*, Berne.
- [3] Centre de Recherches routières (1997). « **Code de bonne pratique pour la formulation des enrobés bitumineux** ». *R 69/97*, Bruxelles.
- [4] Junod A., Dumont A.-G. (2004). « **Unterhalt 2000 : Formulation et optimisation des formules d'enrobés** ». Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche ASTRA 2000/421-2, Rapport VSS No. 1143*.
- [5] Grolimund H.-J., Attinger R., Meister A. (2002). « **Lärmarme bituminöse Strassen-beläge inner- und ausserorts** ». *Rapport OFROU/OFEV*, Berne.
- [6] Innovation Programme on noise mitigation – IPG (2005). « **Inventory study of basic knowledge on tyre/road noise** ». *Rapport DWW-2005-022*, Pays-Bas.
- [7] Pestalozzi H., Grolimund H.-J., Angst Ch. (2004). « **Revêtements peu bruyants à l'intérieur des localités – Rapport de synthèse 2003** ». *Rapport OFROU/OFEV*, Berne.
- [8] Shojaati M., Blötz A., Horat M., Caprez M. (2000). « **Lärmverhalten verschiedener Belagsoberflächen** ». Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche VSS 16/92, Rapport VSS No. 462*.
- [9] Poulikakos L.D., Pittet M., Arnaud L., Junod A., Gubler R., Simond E., Partl M.N., Dumont A.-G. (2007). « **Mechanical Properties of Porous Asphalt, Recommendations for Standardization** ». Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche VSS 1999/280, Rapport VSS No. 1185*.
- [10] Caprez M., Trombik P., Fleischer P. (2007). « **Lärmverhalten von Deckschichten im Vergleich zu Gussasphalt mit strukturierter Oberfläche** ». Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche VSS 2003/503, Rapport VSS No. 1262*.
- [11] Raab Ch., Partl M.N. (2011). « **Stripping bei lärmindernden Deckschichten unter Überrollbeanspruchung im Labormaßstab** ». Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche VSS 2007/502, Rapport VSS No. 1335*.
- [12] Schellenberg K. (en cours). « **Lärmarme Oberflächen bei Gussasphalt-Deckschichten auf Brücken** ». Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche ASTRA2009/007*.
- [13] Lindenmann H.P., Schiffmann F., Baumgartner F., Kälin E., Braber R. (2014) « **Zusammenhang Textur und Griffigkeit von Fahrbahnen und Einflüsse auf die Lärmemission** ». Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche VSS 2009/703, Rapport VSS No. 1495*.
- [14] Naus R.W.M., Bhairo P.D., Van Montfort J., Giezen W. (2004). « **Rollpave – Prefab road for rapid construction** ». *Eurasphalt & Eurobitume Congrès 2004*, Vienne.
- [15] Van de Ven M., Voskuilen J. (2010) « **Validation of New Dutch Volumetric Mix Design Method for SMA with Mechanical Tests and Field Trials** ». *International Conference on Asphalt Pavement 2010*, Nagoya.
- [16] **Noise Innovation Programme**. *Programme de recherche national*, Pays-Bas. <http://www.innovatieprogrammageluid.nl> (consultation : 08.2011).
- [17] Bendtsen H., Larsen L.E. (2002). « **Two-layer porous pavements and noise reductions in Denmark** ». *International Conference on Asphalt Pavement 2002*, Copenhagen.
- [18] Bendtsen H., Andersen B. (2008). « **Optimized thin layers for urban roads** ». *Rapport DRI n°162*, Danemark.
- [19] Bendtsen H., Nielsen E. (2008). « **DRI-DWW Thin Layer Project – Final Report** ». *Rapport DRI n°159*, Danemark.
- [20] Lorenzen A. (2008). « **Low Noise Road Traffic" - The German research program "Leistra2"** ». *Transport Research Arena Europe 2008*, Ljubljana.
- [21] Ripke O. (2004). « **Reducing traffic noise by optimising hot-mix asphalt surface courses** ». *Eurasphalt & Eurobitume Congrès 2004*, Vienne.
- [22] **Forschungsprojekt Leiser Strassenverkehr 2**. *Programme de recherche national*, Allemagne. <http://www.leistra2.de> (consultation : 08.2011).
- [23] Brosseaud Y., Anfosso Ledée F. (2004). « **Revêtements à faible niveau de bruit et à haute adhérence : Bilan des recherches françaises, développement des produits** ». *Eurasphalt & Eurobitume Congrès 2004*, Vienne.

- [24] Bucchi A., Dondi G., Simone A. (2002). « **Laboratory and field experimental investigations about the properties of a thin bituminous layer with porous aggregate** ». *International Conference on Asphalt Pavement 2002*, Copenhagen.
- [25] Haberl J., Litzka J. (2008). « **Use of noise reducing pavements on the Austrian road system** ». *Transport Research Arena Europe 2008*, Ljubljana.
- [26] Valtonen J., Hyyppä I., Sainio P. (2002). « **Noise reduction vs wearing properties** ». *International Conference on Asphalt Pavement 2002*, Copenhagen.
- [27] Leung F., Tighe S., MacDonald G., Penton S. (2006). « **Noise Reducing Asphalt Pavements: A Canadian Case Study** ». *International Conference on Asphalt Pavement 2006*, Québec.
- [28] Itou H., Mizuno W., Arao Y., Ichioka T., Watanabe Y., Shimizu T., Ohno S., Ooba T., Matsumura T., Asano K., Tsushima H. (2010). « **Development of Porous Surface Mastic Asphalt Course (POSMAC)** ». *International Conference on Asphalt Pavement 2010*, Nagoya.
- [29] **SILVIA**. Projet européen FP5 (2006). <http://www.trl.co.uk/silvia>.
- [30] **SILENCE**. Projet européen FP6 (2007). <http://www.silence-ip.org>.
- [31] **HARMONOISE**. Projet européen (2005). <http://www.imagine-project.org/artikel.php?ac=direct&id=289#>.
- [32] **IMAGINE**. Projet européen FP6 (2006). <http://www.imagine-project.org>.
- [33] Di Benedetto H., Corté J.-F. (2004). « **Matériaux routiers bitumineux 2 : Constitution et propriétés thermo-mécaniques des mélanges** ». *Hermes Science Publications - Lavoisier*, Paris.
- [34] Meiarashi S. (2003). « **Surface de roulement poreuse et élastique comme mesure ultime pour limiter les nuisances sonores provoquées par la circulation routière** ». *Congrès Mondial de l'AIPCR 2003*, Durban.

Normes

- [35] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2008), « **Mélanges bitumineux – Spécifications des matériaux – Partie 1 : Enrobés bitumineux** ». *SN 640431-1b-NA. EN 13108-1:2006/AC:2008*.
- [36] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2005), « **Mélanges bitumineux – Méthodes d'essai pour enrobés à chaud – Partie 8 : Détermination de la teneur en vides des éprouvettes bitumineuses** ». *SN 670408. EN 12697-8:2003*.
- [37] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2009), « **Mélanges bitumineux – Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie 12 : Détermination de la sensibilité à l'eau des éprouvettes bitumineuses** ». *SN 670412a-NA. EN 12697-12:2008*.
- [38] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2008), « **Mélanges bitumineux – Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie 17 : Perte de matériau des éprouvettes d'enrobé drainant** ». *SN 670417. EN 12697-17:2004 / A1:2007*.
- [39] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2005), « **Mélanges bitumineux – Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie 18 : Essai d'égouttage du liant** ». *SN 670418. EN 12697-18:2004*.
- [40] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2008), « **Mélanges bitumineux – Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie 22 : Essai d'orniérage** ». *SN 670422a-NA. EN 12697-22:2003 / A1:2007*.
- [41] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2005), « **Mélanges bitumineux – Méthodes d'essai pour enrobés à chaud – Partie 23 : Détermination de la résistance à la traction indirecte des éprouvettes bitumineuses** ». *SN 670423. EN 12697-23:2003*.
- [42] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2004), « **Mélanges bitumineux – Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie 30 : Confection d'éprouvettes par compacteur à impact** ». *SN 670430. EN 12697-30:2004*.
- [43] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2008), « **Mélanges bitumineux – Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie 31 : Confection d'éprouvettes à la presse à compactage giratoire** ». *SN 670431a. EN 12697-31:2007*.
- [44] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2008), « **Mélanges bitumineux – Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie 33 : Confection d'éprouvettes au compacteur de plaque** ». *SN 670433a-NA. EN 12697-33:2003 / A1:2007*.
- [45] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2008), « **Mélanges bitumineux – Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie 34 : Essai Marshall** ». *SN 670434a. EN 12697-34:2004/A1:2007*.
- [46] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2008), « **Mélanges bitumineux – Spécifications des matériaux – Partie 5 : Béton bitumineux grenu à forte teneur en mastic** ». *SN 640431-5a-NA. EN 13108-5:2006/AC:2008*.

[47] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2008), « **Mélanges bitumineux – Spécifications des matériaux – Partie 7 : Bétons bitumineux drainants** ». SN 640431-7a-NA. EN 13108-7:2006/AC:2008.

Clôture du projet



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

RECHERCHE DANS LE DOMAINE ROUTIER DU DETEC

Version du 09.10.2013

Formulaire N° 3 : Clôture du projet

établi / modifié le : 28.04.2015

Données de base

Projet N° : ASTRA 2010/010
Titre du projet : Projet de recherche EP1 : Formulation des revêtements peu bruyants
Echéance effective : 2014

Textes :

Résumé des résultats du projet :

Le projet de recherche a permis de mettre au point une méthode de formulation pour des revêtements potentiellement peu bruyants. Cette méthode basée sur la formulation volumique permet de diminuer au maximum les gâchées d'essais, tout en gardant une très bonne corrélation entre la formulation théorique et la fabrication. Elle repose sur l'utilisation du logiciel PradoWin qui est basé sur la méthode de formulation du CRR en Belgique.

Quatre formules (grain maximal: 4mm ou 8mm, teneur en vides: 12% ou 16%) pour des revêtements potentiellement peu bruyants ont été proposées. Elles respectent toutes les exigences mécaniques de la règle SNR640436 relative aux enrobés semi-denses (SDA) pour des SDA 4B, 4C, 8B et 8C (à l'exception d'une valeur pour l'orniérage du SDA 8C). Il n'a pas été possible de réellement évaluer en laboratoire les performances acoustiques de ces mélanges en raison du manque de sensibilité de la méthode de caractérisation acoustique utilisée (coefficient d'absorption acoustique avec la méthode du tube d'impédance). L'optimisation des formules s'est ainsi faite principalement sur la base de leurs performances mécaniques.

Les quatre formules étudiées utilisaient des granulats de bonne qualité de deux provenances (Famsa et Balmotz): les résultats mécaniques obtenus sont très proches.

La méthode géométrique de mesure de la teneur en vides est recommandée car elle fournit des résultats concluants et est avantageuse par sa simplicité et sa rapidité d'application.

Un compactage 2x40 coups Marshall ou PCG à 90 girations a été utilisé pour déterminer les teneurs en vides réelles.

L'orniérage est plus important sur des plaques de 35mm d'épaisseur que sur des plaques de 50mm. Les formules ont été établies sur la base d'un module de richesse compris entre 3.8 et 4.2 et d'une teneur en liant minimale de 6.2% (grain maximal: 4mm) et de 5.8% (grain maximal: 8mm).

Une méthodologie simple d'aide à la décision a été proposée pour choisir un type de revêtement en fonction des priorités (en terme de performances acoustique ou mécanique) qui seraient émises par les responsables d'un réseau routier.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Atteinte des objectifs :

Les objectifs suivants ont pu être atteints:

- Proposition d'une méthode de travail concrète pour la formulation et l'optimisation des revêtements potentiellement peu bruyants,
- Proposition de directives et recommandations pour l'élaboration de revêtements potentiellement peu bruyants.
- Proposition de recommandations par rapport aux matériaux à utiliser, aux méthodes d'essais recommandées, à la démarche détaillée de la formulation et à la fabrication et aux manipulations en laboratoire.
- Proposition d'adaptation des normes en vigueur.
- Proposition d'une méthodologie d'aide à la décision permettant de choisir le type de revêtement adapté à une problématique concrète.
- Coordination avec les autres projets de recherche individuels et fourniture de recettes de revêtements aux EP2 et EP4.

Déductions et recommandations :

Des recommandations pour l'élaboration de revêtements potentiellement peu bruyants ont été proposées à partir des nombreux essais paramétriques effectués dans le cadre du projet de recherche. En plus d'informations concernant la méthode de formulation et la fabrication des matériaux en laboratoire, ces recommandations concernent les composants à utiliser pour fabriquer des enrobés peu bruyants et les méthodes d'essais à utiliser pour les qualifier. Ces recommandations devraient pouvoir être utilisées pour l'adaptation de normes, non seulement pour les composants et les méthodes d'essais mais aussi pour valeurs visées pour la formulation (teneur en vides, teneur en liant, granulométrie, module de richesse), en particulier pour l'établissement d'une norme définitive pour les SDA.

Publications :

Aucune

Chef/cheffe de projet :

Nom : Dumont

Prénom : André-Gilles

Service, entreprise, institut : EPFL-LAVOC

Signature du chef/de la cheffe de projet :



RECHERCHE DANS LE DOMAINE ROUTIER DU DETEC

Formulaire N° 3 : Clôture du projet

Appréciation de la commission de suivi :

Evaluation :

Si on excepte qu'il n'a pas été possible dévaluer les performances phoniques de revêtements sur la base d'un essai simple en laboratoire, les principaux objectifs du projets ont été atteints:

- l'utilisation d'un outil théorique de formulation (logiciel PradoWin) réduit effectivement considérablement le travail à effectuer en laboratoire.
- quatre formules susceptibles de fournir de bonnes performances acoustiques ont été optimisées.
- les quatre formules proposées remplissent les exigences mécaniques de la nouvelle règle SNR640436 sur les SDA pour des SDA4B, 4C, 8B et 8C.
- des recommandations pour choix des matériaux de base, des conditions des essais de laboratoire ainsi que des caractéristiques des mélanges bitumineux à viser (vides, teneur en liant, additifs, etc.) ont été proposées

La proposition de méthode d'aide à la décision proposée ne semble pas utilisable en l'état à cause de l'insuffisance des données récoltées dans ce projet, et du manque de recul actuel sur les revêtements peu bruyants.

Mise en oeuvre :

Les résultats du présent mandat devraient être pris en considération pour l'élaboration ou la révision des normes concernant les mélanges bitumineux

Il n'a pas été possible de construire une planche d'essai dans le cadre du TP2 en imposant une des quatre formules proposées. Il est recommandé de voir si des revêtements posés dans le cadre du TP2 correspondent à des recettes similaires à celles proposées par le présent projet de recherche.

Besoin supplémentaire en matière de recherche :

- Déterminer la variabilité acceptable des caractéristiques mécaniques des revêtements potentiellement peu bruyants produits en centrale afin de définir les exigences de réception de ces revêtements
- Trouver une méthode d'évaluation simple des propriétés acoustiques en laboratoire

Influence sur les normes :

- Exigences sur les composants de base (granulats, bitumes) et sur les mélanges
- Essais sur les mélanges : confection des éprouvettes, méthode de mesure des vides, essai d'orniérage (épaisseur des plaques) définition de valeurs limites

Président/Présidente de la commission de suivi :

Nom : Seiler

Prénom : Luzia

Service, entreprise, institut : OFROU

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

7.10.2015

Index des rapports de recherche en matière de route

L'index actuel des rapports publiés dernièrement est à télécharger sur notre site www.astra.admin.ch (Service --> Recherche en matière de routes --> Downloads --> Formulaires).