



**Centre de
recherches routières**
Ensemble pour des routes durables

Code de bonne pratique

Code de bonne pratique pour la formulation des
enrobés bitumineux



Recommandations

R 105

Centre de compétence impartial depuis 1952, le CRR (Centre de recherches routières) est au service de l'ensemble du secteur routier. Le CRR partage ses connaissances avec les professionnels du secteur notamment par la voie de ses publications (codes de bonne pratique, synthèses, comptes rendus de recherche, méthodes de mesure, fiches d'information CRR, Newsletters CRR et Dossiers, rapports d'activité). Nos publications sont largement diffusées en Belgique et à l'étranger auprès de centres de recherche scientifique, d'universités, d'institutions publiques et d'instituts internationaux. Pour plus d'informations sur nos publications et activités, visitez notre site web www.crr.be

Code de bonne pratique R 105

Code de bonne pratique pour la formulation des enrobés bitumineux

Centre de recherches routières

Établissement reconnu par application de l'Arrêté-loi du 30 janvier 1947

Bruxelles

2022

Code de bonne pratique pour la formulation des enrobés bitumineux / Centre de recherches routières.

Bruxelles: CRR, 2022, 110 p. (Recommandations ; ISSN 1376-9332; R 105).
Dépôt légal: D/2022/0690/3

Éditeur responsable: Annick De Swaef, boulevard de la Woluwe 42, 1200 Bruxelles

© CRR – Tous droits réservés.

Auteur

J. De Visscher

Comité de lecture

Ce code de bonne pratique est le fruit d'une collaboration avec un comité de lecture composé de membres ayant une expertise particulière dans le domaine des mélanges bitumineux et de la formulation des mélanges:

Karolien Couscheir	(Universiteit Antwerpen)
Alexandra Destrée	(CRR)
Chantal Flemal	(SPW)
Pierre Hontoy	(SPW)
Philippe Keppens	(AWV)
Joke Laermans	(Colas Belgium)
Pierre-Paul Modde	(C.O.R.C.)
Tine Tanghe	(CRR)
Jordy Van Dam	(COPRO)
Pieter Van der Sypt	(Willemen Infra)
Ann Vanelstraete	(CRR)

Remerciements

Le Centre de recherches routières remercie chaleureusement les membres du comité de lecture pour leur collaboration. Grâce aux nombreux et précieux commentaires et suggestions, ce code de bonne pratique répond le mieux possible aux attentes de l'ensemble du secteur des enrobés.

Avis au lecteur

Bien que les recommandations de ce code de bonne pratique aient été rédigées avec le plus grand soin, des imperfections ne sont pas exclues. Ni le CRR, ni ceux qui ont collaboré à la présente publication, ne peuvent être tenus pour responsables des informations fournies, qui le sont à titre purement documentaire et non contractuel.

Table des matières

1. Introduction	4
1.1 Mélanges bitumineux et formulation des mélanges	4
1.2 Exigences performantielles et caractéristiques performantielles	4
1.3 L'importance de la formulation des mélanges	5
1.4 Résumé du code de bonne pratique	7
2. Classification des enrobés bitumineux	8
2.1 Squelette pierreux, sableux, filler	8
2.2 Granulométrie continue et discontinue	10
2.3 Mélanges fermés et ouverts	12
3. Rôle et caractéristiques des composants	14
3.1 Gravillons	14
3.2 Sables	15
3.3 Fillers	16
3.4 Liants	17
3.5 Agrégats d'enrobés bitumineux	19
3.6 Additifs	21
4. Formulation théorique des mélanges	22
4.1 Formulation en parts de volume	22
4.2 Calcul des vides dans le granulat minéral	25
4.3 Volume de liant et vides	29
4.4 Importance de la rigidité du mastic	30
4.5 Optimisation volumétrique	32
5. Procédure de formulation des mélanges	34
5.1 Caractérisation et choix des composants	35
5.2 Composition des granulats	37
5.3 Teneur en liant	41
5.4 Vérification expérimentale des vides	46
5.5 Vérification expérimentale des performances du mélange	47
6. Impact des composants et de la volumétrie sur les performances du mélange	48
6.1 Maniabilité et aptitude au compactage	48
6.2 Rigidité	50
6.3 Résistance à l'orniérage	52
6.4 Sensibilité à l'eau	54
6.5 Résistance à la fatigue	55
6.6 Résistance au plumage	56
6.7 Résumé	57

7. Exemples pratiques	60
7.1 Formulation d'un mélange SMA	60
7.2 Formulation d'un mélange EME	66
8. Ajustement de la formulation des mélanges	72
8.1 Révision d'une formulation existante	72
8.2 Estimation de l'impact des variations en cours de production	73
8.3 Amélioration de la maniabilité lors de la mise en œuvre	77
Bibliographie	
Annexes	84
Annexe 1: Essais performantiels pour mélanges bitumineux	86
Annexe 2: Essais performantiels pour liants bitumineux	92
Annexe 3: Formulation des mélanges dans le cas de granulats poreux	96

Liste des figures

Figure 1.1	Formulation théorique des mélanges dans le cadre du processus de formulation	5
Figure 2.1	Illustration des familles d'enrobés bitumineux selon le type de squelette	7
Figure 2.2	Classification selon le squelette minéral au moyen du triangle de tamisage (limites pour des vides moyens de 40 % pour la fraction de pierre, 35 % pour la fraction de sable et 30 % pour la fraction de filler)	10
Figure 2.3	Exemple de granulométrie d'un mélange en volume et en masse	11
Figure 2.4	Exemples d'une granulométrie continue (à gauche) et d'une granulométrie discontinue, avec une discontinuité entre 2 et 4 mm (à droite)	12
Figure 4.1	Mélanges ayant des masses volumiques différentes, mais des caractéristiques mécaniques similaires	22
Figure 4.2	Mélange de granulats minéraux et vides dans le granulat minéral	23
Figure 4.3	Mélange de granulats minéraux et vides après remplissage par du liant	24
Figure 4.4	"Remplissage" et "Substitution" lors du mélange de grains de calibres différents	26
Figure 4.5	Vides dans un mélange binaire avec deux calibres D1 et D2, où $D1/D2 \approx 0$	27
Figure 4.6	Influence de l'angularité sur les vides	28
Figure 4.7	Volumétrie du mélange et lien entre les VMA, le volume de liant et le volume des vides	29
Figure 4.8	Lignes de rigidité du mastic similaire (lignes iso-MSI)	31
Figure 5.1	Procédure de formulation des mélanges	34
Figure 5.2	Granulométrie des composants et du mélange, confrontée aux limites du cahier des charges type Qualiroutes 2021 (zone grise)	38
Figure 5.3	Détermination du type de squelette minéral	39
Figure 5.4	Corrélation entre les vides calculés et les vides mesurés	46
Figure 6.1	Module de cisaillement (module de rigidité en cisaillement) d'un liant bitumineux en fonction de la température et de la fréquence	50
Figure 6.2	Impact de la teneur en liant sur la rigidité du mélange, pour une même composition de granulats minéraux	51
Figure 7.1	Granulométries des composants et du mélange conformément à la composition du tableau 7.1 (1 ^{re} formulation)	61
Figure 7.2	Granulométries des composants et du mélange conformément aux compositions du tableau 7.9 (mélange sans agrégats d'enrobés bitumineux)	67
Figure 7.3	Granulométries des composants et du mélange conformément aux compositions du tableau 7.9 (mélange avec agrégats d'enrobés bitumineux)	68
Figure A1.1	Compacteur giratoire et moule et éprouvette après compactage	86
Figure A1.2	Mouvement du moule pendant le compactage	87
Figure A1.3	Conditionnement dans l'eau et mesure de la résistance à la traction indirecte d'éprouvettes bitumineuses	87
Figure A1.4	Simulateur de trafic et mesure de la profondeur d'orniérage	88
Figure A1.5	Dispositif d'essai flexion en deux points	89
Figure A1.6	Principe de l'essai de flexion en deux points pour la rigidité	89
Figure A1.7	Détermination de la résistance à la fatigue à partir de la déformation ϵ_6	90
Figure A1.8	Essai de plumage (<i>Darmstadt Scuffing Device</i>)	91
Figure A2.1	Détail du dispositif DSR (<i>parallel plate geometry</i>)	92
Figure A2.2	Cycle de 10 cycles consécutifs de fluage-récupération (1s fluage-9s récupération), au niveau de contrainte faible (0,1kPa)(d'après EN 16659)	93
Figure A2.3	Dispositif BBR	94
Figure A3.1	Différence entre le volume apparent et le volume réel d'un granulat	96
Figure A3.2	Vides résiduels dans un granulat enrobé de bitume	97
Figure A3.3	Volumétrie d'un mélange avec porosité, par rapport à un mélange équivalent sans porosité (tous les volumes sont exprimés en pourcentage du volume total)	98

Liste des tableaux

Tableau 2.1	Composition du granulat et masse volumique des composants	10
Tableau 5.1	Caractéristiques obligatoires des matériaux pour la formulation théorique des mélanges	36
Tableau 5.2	Composition des granulats pour la formulation d'un mélange de Type AC-20base3 (selon CCT Qualiroutes 2021)	38
Tableau 5.3	Composition de la fraction de filler du mélange	40
Tableau 5.4	Composition du mélange, en masse et en pourcentages en volume	42
Tableau 5.5	Composition et caractéristiques empiriques du bitume mixte	44
Tableau 6.1	Tableau récapitulatif des influences des paramètres de formulation du mélange et de la volumétrie sur les performances du mélange	58
Tableau 7.1	Composition granulat SMA 0/10 (1 ^{re} formulation)	61
Tableau 7.2	Résultats de l'étude PradoWeb	62
Tableau 7.3	Vérification expérimentale des vides	62
Tableau 7.4	Vérification expérimentale des performances du mélange	63
Tableau 7.5	Composition modifiée du granulat (3 ^e formulation)	64
Tableau 7.6	Résultats de l'étude PradoWeb	64
Tableau 7.7	Vérification expérimentale des vides	65
Tableau 7.8	Vérification expérimentale des performances du mélange	65
Tableau 7.9	Composition du granulat pour un mélange EME 0/14, avec et sans agrégats d'enrobés bitumineux	67
Tableau 7.10	Résultats de l'étude PradoWeb	68
Tableau 7.11	Composition et propriétés du liant du mélange avec agrégats d'enrobés bitumineux	69
Tableau 7.12	Vérification expérimentale des vides	69
Tableau 7.13	Vérification expérimentale des performances du mélange	70
Tableau 8.1	Impact de l'ajustement (option 1) sur la teneur en liant et la composition du liant	74
Tableau 8.2	Impact d'un ajustement (option 1) sur les caractéristiques empiriques du mélange de liants	74
Tableau 8.3	Impact de l'ajustement (option 1) sur la volumétrie, le filler et l'indicateur de rigidité du mastic	74
Tableau 8.4	Impact de l'ajustement (option 2) sur la composition du granulat en pourcentages en volume	75
Tableau 8.5	Impact de l'ajustement (option 2) sur la granulométrie	75
Tableau 8.6	Impact de l'ajustement (option 2) sur la teneur en liant et la composition du liant	76
Tableau 8.7	Impact d'un ajustement (option 2) sur les caractéristiques empiriques du mélange de liants	76
Tableau 8.8	Impact de l'ajustement (option 2) sur la volumétrie, le filler et l'indicateur de rigidité du mastic	76
Tableau A3.1	Exemple de calcul pour le cas d'un mélange de type SMA, dont le granulat se compose pour 68,8 %v de granulats poreux	101



Avant-propos

Ce code de bonne pratique décrit la méthode recommandée par le Centre de recherches routières pour la formulation des enrobés bitumineux et remplace le précédent code de bonne pratique R69/97. Il s'ajoute à une série d'autres codes de bonne pratique du CRR:

- Code de bonne pratique pour le choix du revêtement bitumineux lors de la conception ou de l'entretien des chaussées (R102/20).
- Code de bonne pratique pour la fabrication des enrobés bitumineux (R72/02).
- Code de bonne pratique pour la mise en œuvre des revêtements bitumineux (R96/18).
- Manuel d'utilisation de PradoWeb ([Manuel PradoWeb](#)).

Avec le présent code de bonne pratique, le CRR veut diffuser les connaissances permettant de bien choisir les composants des mélanges bitumineux et leur composition proportionnelle, en fonction du type de mélange et des performances visées. Avec la production et la mise en œuvre du mélange bitumineux, la formulation du mélange constitue une phase cruciale dans la réalisation d'un revêtement bitumineux durable.

Le CRR recommande une méthode permettant au formulateur de formuler des mélanges de manière rationnelle et efficace. Cette méthode se base sur le principe que le mélange est composé en parts de volume. La composition est ensuite convertie en parts de masse en vue du pesage en laboratoire et de la production. Ce code de bonne pratique fournit donc un aperçu complet de la volumétrie des mélanges bitumineux et de leur impact sur les performances.

La méthode se base sur des calculs théoriques, qui reposent sur des conclusions expérimentales, et qui sont implémentés dans une application numérique conviviale, PradoWeb. Pour plus d'informations sur cette application et l'achat de la licence, veuillez consulter le site web du CRR ([PradoWeb](#)).

Ce code de bonne pratique explique les calculs afin de permettre au formulateur d'interpréter correctement les résultats et d'optimiser ensuite la formulation. Des exemples sont illustrés à l'aide de PradoWeb. Cette première étape de formulation théorique des mélanges réduit au minimum le nombre d'essais en laboratoire à effectuer sur le mélange, ce qui permet un gain de temps et de ressources considérable.

Dans la pratique, la formulation des mélanges est généralement liée aux exigences des différents cahiers des charges types et aux normes européennes. Il a été décidé de ne pas reprendre ces prescriptions, mais de faire référence aux documents pertinents lorsque cela s'avère nécessaire afin que le code de bonne pratique reste à jour si des modifications devaient être apportées ultérieurement aux cahiers des charges et aux normes.

La méthode n'est pas seulement recommandée pour la formulation de nouveaux mélanges, elle est également très utile pour évaluer l'impact de changements de certaines caractéristiques des composants ou de la composition, changements qui peuvent se produire dans la pratique consécutivement à des variations des caractéristiques des matériaux ou à des fluctuations de la production. Il est ainsi possible de détecter d'éventuels risques au niveau de la maniabilité ou de la déformabilité et de procéder à des ajustements rapides et opportuns.

La méthode est également applicable dans le cadre de la recherche et de l'innovation, indépendamment des prescriptions des cahiers des charges, ou en fonction de cahiers spéciaux des charges (étrangers).



1. Introduction

1.1 Mélanges bitumineux et formulation des mélanges

Un mélange bitumineux est principalement un mélange de granulats minéraux, enrobés d'un liant bitumineux.

Les composants jouent chacun un rôle spécifique: le granulat constitue en quelque sorte un squelette qui assure la résistance et la stabilité, tandis que le liant enrobe et lie le granulat.

Il convient de réduire la viscosité du liant bitumineux afin que les composants constituent un mélange homogène, dans lequel les granulats sont complètement enrobés. Dans le cas de l'enrobé mélangé à chaud, cela se fait par chauffe. Le mélange est ensuite transporté chaud sur le chantier, puis répandu et compacté jusqu'à l'épaisseur de couche souhaitée, alors que la viscosité du bitume augmente à mesure que le mélange refroidit.

Il en résulte un revêtement bitumineux, qui doit assurer la sécurité et le confort de l'usager de la route et résister aux contraintes du trafic et des intempéries auxquelles la route est exposée.

Pour la fabrication et la mise en œuvre des enrobés bitumineux, veuillez vous référer aux codes de bonne pratique CRR y afférents:

- R72/02 (Code de bonne pratique pour la fabrication des enrobés bitumineux, 2002)
- R96/18 (Code de bonne pratique pour la mise en œuvre des revêtements bitumineux, 2018)

Ce code de bonne pratique traite spécifiquement de la formulation des enrobés bitumineux.

La formulation des mélanges est le processus qui doit aboutir à un **choix optimal des composants** et de leur **composition proportionnelle** afin de garantir que le mélange réponde aux **exigences performantielles spécifiées**.

On ne saurait trop insister sur l'importance d'une bonne formulation des mélanges. Tout comme la qualité de la fabrication et de la mise en œuvre, il s'agit d'une condition préalable à l'obtention d'un revêtement bitumineux durable.

1.2 Exigences performantielles et caractéristiques performantielles

Les exigences performantielles sont des exigences posées aux caractéristiques performantielles, c'est-à-dire aux caractéristiques typiques des performances du matériau.

Les principales caractéristiques performantielles d'un enrobé bitumineux, appliqué comme composant d'un revêtement routier, sont les suivantes:

- maniabilité et aptitude au compactage, nécessaires à la production et à la mise en œuvre;
- rigidité du mélange, importante pour la portance de la structure routière dont fait partie la couche bitumineuse;
- résistance aux principales formes de dégradations causées par le trafic et les facteurs climatiques (température et précipitations):
 - orniérage;
 - fissures de fatigue;
 - fissures thermiques;
 - plumage.

Cette liste non exhaustive se limite aux caractéristiques performantielles qui sont les plus affectées par les choix effectués lors de la formulation des mélanges. Le chapitre 6 de ce code de bonne pratique détaille ces caractéristiques performantielles et la manière dont elles sont influencées par les différents paramètres du mélange.

Pour une discussion plus complète de toutes les caractéristiques performantielles des enrobés bitumineux, et l'importance de chaque caractéristique performantielle en fonction du type de mélange, de la position de la couche dans la structure du revêtement et de l'intensité de la charge de trafic, veuillez vous référer au chapitre 3 du code de bonne pratique CRR R102/20 (Code de bonne pratique pour le choix du revêtement bitumineux lors de la conception ou de l'entretien des chaussées, 2020).

1.3 L'importance de la formulation des mélanges

Personne ne nie l'importance de la formulation des mélanges. Néanmoins, force est de constater que de nombreux acteurs du secteur manquent encore de connaissances à ce sujet pour une approche appropriée et systématique. La formulation des enrobés bitumineux n'est pas une tâche facile, vu les nombreuses exigences performantielles qui sont parfois difficiles à concilier. Ainsi, une teneur en liant plus élevée entraînera une meilleure cohésion du mélange, ce qui le rendra moins sensible au plumage, à la fissuration et aux effets néfastes de l'eau. En revanche, la rigidité et la résistance à l'orniérage diminueront avec un dosage plus élevé du liant. Comme on le verra plus loin, ce sont toujours les exigences liées à la cohésion (résistance au plumage et à la fissuration) qui sont difficiles à concilier avec les exigences liées à la stabilité (rigidité, résistance à l'orniérage).

Trouver une composition de mélange équilibrée exige donc une bonne méthodologie, dont la nécessité n'a fait qu'augmenter au cours des dernières décennies en raison des facteurs suivants:

- L'offre et l'utilisation de composants nouveaux et/ou différents ne cessent d'augmenter, tout comme la variabilité des caractéristiques de ces composants. Les agrégats d'enrobés bitumineux destinés à être réutilisés dans les enrobés bitumineux en sont l'exemple le plus évident. Par conséquent, il est de moins en moins possible de se rabattre sur des formules de mélange connues et éprouvées et il est souvent nécessaire de réviser la formulation des mélanges en fonction des changements de matériaux et de leurs caractéristiques.
- Le réseau routier est exposé à des charges de plus en plus lourdes. Non seulement la charge de trafic ne cesse d'augmenter, mais les conditions météorologiques mettent aussi les routes à rude épreuve. Le changement climatique risque d'exacerber ce phénomène. Dans une optique de durabilité, il ne faut pas se contenter d'un mélange qui répond un minimum aux exigences performantielles spécifiées, mais au contraire, s'efforcer de concevoir un mélange qui y répond de manière optimale, en tenant compte des conditions économiques et écologiques essentielles.

Pour vérifier si une formule de mélange répond aux exigences spécifiées, ses caractéristiques performantielles doivent être déterminées expérimentalement en laboratoire. Les essais performantiels, brièvement décrits à l'annexe 1 sont toutefois chronophages et demandent beaucoup de ressources. Il convient donc de limiter autant que possible l'ajustement itératif de la composition du mélange sur la base des résultats d'essai. Une phase préliminaire à la formulation théorique des mélanges est donc essentielle et fera gagner du temps et des ressources (figure 1.1).

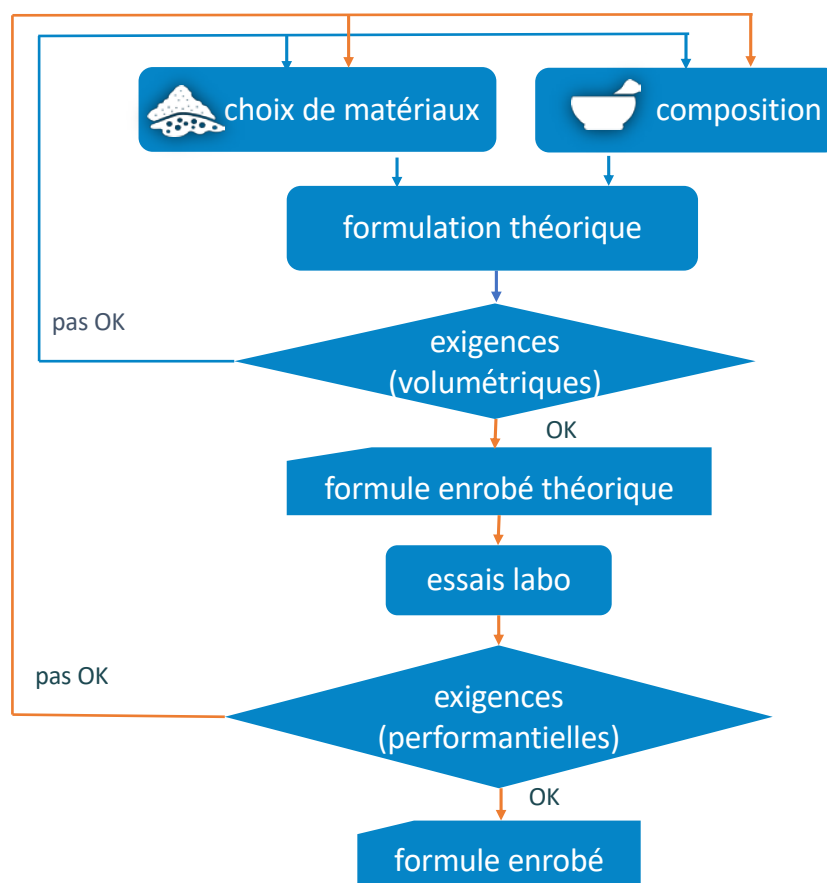


Figure 1.1 – Formulation théorique des mélanges dans le cadre du processus de formulation

La formulation théorique des mélanges consiste à utiliser des calculs pour estimer les performances et optimiser la formule du mélange (composants et leur composition proportionnelle). Cela permet d'estimer rapidement l'impact des changements des composants et de composition, ce qui offre la possibilité d'ajuster très précisément la formulation des mélanges. Cela réduit fortement le risque de devoir procéder à des ajustements radicaux de la formule du mélange en fonction des résultats des essais en laboratoire. La formulation théorique des mélanges permet donc d'obtenir un résultat plus optimal plus rapidement et avec moins de ressources.

La formulation théorique des mélanges doit être basée sur des méthodes de calcul connues et validées et être accompagnée d'un bon outil de calcul permettant d'effectuer ces calculs théoriques rapidement et correctement. C'est dans l'optique de fournir un tel outil au secteur des enrobés que l'outil numérique PradoWeb (<https://brrc.be/fr/innovation/aperçu-innovation/pradoweb>) a été développé. Dans de nombreux secteurs, la formulation numérique est une étape importante et primordiale dans le développement et l'innovation des produits. Cela vaut également pour le secteur des enrobés.

1.4 Résumé du code de bonne pratique

Les enrobés bitumineux sont souvent répartis en catégories. La signification et l'utilité de cette classification seront expliquées plus en détail au chapitre 2. Le chapitre 3 donne ensuite un aperçu des différents composants des mélanges bitumineux, avec une attention particulière pour les caractéristiques à prendre en compte lors de la formulation théorique des mélanges. Au chapitre 4, la méthode de formulation théorique des mélanges est approfondie: quelles grandeurs sont calculées, sur quels principes théoriques reposent les calculs, quelle est l'importance des grandeurs calculées et comment optimiser théoriquement la composition sur base des grandeurs calculées? Le chapitre 5 décrit quant à lui la procédure de formulation des mélanges, telle que recommandée par le CRR et développée dans l'outil PradoWeb. Le chapitre 6 examine plus en détail les caractéristiques performantielles du mélange. Pour une bonne formulation, il est essentiel que le formulateur comprenne comment les différents paramètres de formulation affectent ces performances, afin qu'il puisse apporter des ajustements ciblés au mélange pour obtenir la performance souhaitée. Le chapitre 7 présente un certain nombre d'études de cas, montrant comment obtenir rapidement et avec un minimum d'essais une bonne formulation des mélanges. Pour terminer, le chapitre 8 montre comment la méthodologie de la formulation des mélanges peut être utilisée dans le cadre du fonctionnement quotidien d'une centrale d'enrobage, non seulement pour la formulation de nouveaux mélanges, mais aussi pour l'ajustement de la composition en cours de production et pour l'estimation de l'impact de certains changements dans la composition et les caractéristiques des matériaux. Le but ultime de ce code de bonne pratique est de fournir les connaissances nécessaires pour comprendre cet impact et utiliser ces connaissances pour améliorer la qualité et la durabilité.

2. Classification des enrobés bitumineux

Un enrobé bitumineux est principalement un mélange de granulats minéraux, enrobés d'un liant bitumineux.

Le granulat constitue le squelette du mélange; c'est la structure qui doit porter et répartir les charges du trafic. La structure de ce squelette est donc révélatrice des caractéristiques typiques du mélange. C'est pourquoi les enrobés bitumineux sont classés en trois grandes familles selon le type de squelette: les mélanges à squelette pierreux, à squelette sableux ou à squelette filler.

Si l'on examine de plus près la granulométrie du granulat, on peut faire une classification entre les mélanges à granulométrie continue et les mélanges à granulométrie discontinue.

Enfin, une distinction est également faite entre les mélanges ouverts et fermés. Cette classification renseigne sur la porosité et dépend à la fois de la granulométrie et de la teneur en liant.

Ces différents concepts et leur signification sont expliqués plus en détail ci-dessous.

2.1 Squelette pierreux, sableux, filler

L'ensemble des agrégats granulaires d'un mélange peut être considéré grossièrement comme un mélange de trois composants:

- pierres: tous les grains qui restent sur un tamis de 2 mm;
- sables: tous les grains qui passent à travers un tamis de 2 mm et restent sur un tamis de 0,063 mm;
- filler: tous les grains qui passent à travers un tamis de 0,063 mm.

En fonction des quantités relatives des trois composants, on obtient des mélanges présentant des caractéristiques typiques différentes (figure 2.1).

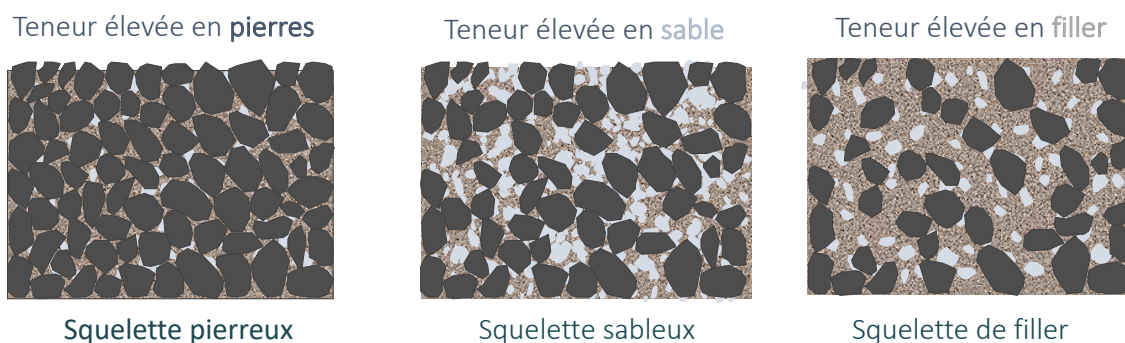


Figure 2.1 – Illustration des familles d'enrobés bitumineux selon le type de squelette

2.1.1 Squelette pierreux

Lorsque la fraction de pierre prédomine (au moins 70 % du volume de granulats), le squelette est principalement composé de pierres imbriquées les unes dans les autres (figure 2.1, à gauche). Ces pierres forment une structure solide et stable qui peut facilement porter et répartir les charges du trafic. Le volume de sables et de filler doit être relativement faible, afin que ces grains puissent se déposer dans les vides entre les pierres sans perturber le squelette pierreux. Bien entendu, la qualité des pierres, ainsi que leur angularité, sont d'une importance cruciale pour les mélanges à squelette pierreux.

En raison de leur grande rigidité et de leur stabilité élevée, les mélanges à squelette pierreux présentent une bonne résistance à l'orniérage et sont particulièrement adaptés aux routes soumises à un trafic lourd.

2.1.2 Squelette sableux

Lorsque la fraction de sable est élevée par rapport à la fraction de pierre et de filler, les grains de sable écartent les pierres et la fraction de sable détermine principalement la stabilité du squelette (figure 2.1, au milieu). L'empilement et la forme des grains de sable ont donc un impact important sur les performances du mélange.

Par rapport aux mélanges à squelette pierreux, les mélanges à squelette sableux présentent moins de macrotexture, ce qui les rend plus résistants au plumage. Ils présentent également l'avantage d'être plus faciles à mettre en œuvre, surtout si la fraction de sable contient, en plus du sable de concassage, une partie de sable rond.

2.1.3 Squelette filler

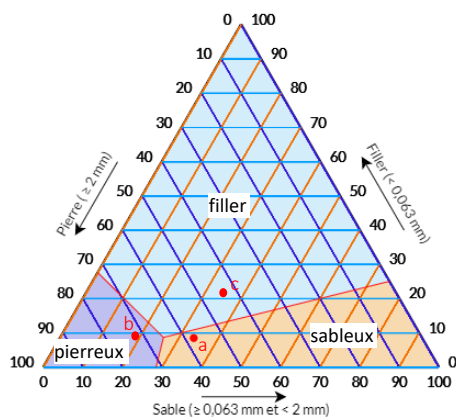
Lorsque la fraction de filler est élevée par rapport aux vides entre les grains de pierre et de sable, les grains de sable et de pierre sont écartés les uns des autres et il n'est pas possible de former un squelette granulaire solide (figure 2.1, à droite). C'est ensuite le mastic (le mélange filler-bitume) qui doit assurer la portance et la résistance à la déformation.

La résistance à la déformation permanente d'un mélange à squelette filler est bien sûr beaucoup plus faible, en raison de la nature viscoélastique du mastic. D'autre part, ces mélanges à squelette filler ont des propriétés particulières, telles qu'une bonne maniabilité, la possibilité de mise en œuvre sans compactage et l'imperméabilité à l'eau.

2.1.4 Triangle de tamisage

Pour représenter les familles d'enrobés bitumineux ci-dessus et les limites entre les familles, on a imaginé ce qu'on appelle le triangle de tamisage, tel que présenté à la figure 2.2 (Heleven, 1985). Ce triangle est en fait un diagramme ternaire dans lequel les coordonnées (% de filler, % de sable, % de pierre) sont reportées sur les trois côtés. Chaque mélange correspond à un point dans le triangle et la position de ce point par rapport aux limites indique à quelle famille appartient le mélange.

Il est à souligner que les limites peuvent bouger légèrement, en fonction des vides des fractions individuelles. Par exemple, pour un mélange à squelette pierreux: plus les vides de la fraction de pierre sont grands, plus on peut ajouter de grains de sable et de grains de filler, sans perturber le squelette pierreux.



exemples	% pierre	% sable	% filler
a béton bitumineux	58	34	8
b SMA	71	19	10
c asphalte coulé	43	34	23

Figure 2.2 – Classification selon le squelette minéral au moyen du triangle de tamisage (limites pour des vides moyens de 40 % pour la fraction de pierre, 35 % pour la fraction de sable et 30 % pour la fraction de filler)

2.2 Granulométrie continue et discontinue

La granulométrie du granulat est déterminée à l'aide d'une série de tamis standardisés dont la dimension des mailles va de 0,063 mm à 32 mm au maximum. La granulométrie est indiquée comme passant ou comme refus (= 100 % - passant), en fonction de la dimension des mailles du tamis, à chaque fois exprimée en pourcentage de l'ensemble des granulats.

Les pourcentages de passant ou de refus peuvent être exprimés de deux manières:

1. en masse, comme pourcentage de la masse totale (% m);
2. en volume, comme pourcentage du volume total (% v).

Lorsque tous les grains ont la même masse volumique, il n'y a pas de différence entre les deux pourcentages. Néanmoins, les granulats secs résultent généralement d'un assemblage de différents matériaux ayant des masses volumiques différentes, ce qui rend cette distinction importante.

La figure 2.3 montre un exemple de mélange constitué de 6 composants, dont les masses volumiques diffèrent. La composition du mélange et les masses volumiques des composants sont indiquées au tableau 2.1. Le graphique de la figure 2.3 illustre la différence entre la granulométrie exprimée en volume et en masse.

Nom	% m	Masse volumique (Mg/m ³)
porphyre 6,3/10	35,0%	3,000
porphyre 4/6,3	10,0%	3,000
porphyre 2/4	14,0%	3,000
sable de concassage	26,5%	2,650
sable rond	6,5%	2,650
filler	8,0%	2,300

Tableau 2.1 – Composition du granulat et masse volumique des composants

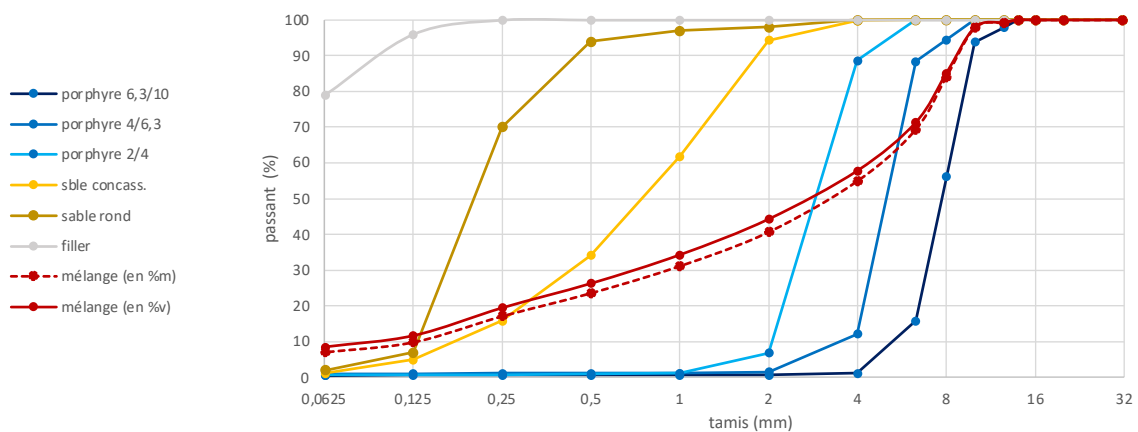


Figure 2.3 – Exemple de granulométrie d'un mélange en volume et en masse

Les chapitres suivants expliqueront clairement pourquoi la formulation théorique des mélanges doit toujours être basée sur la granulométrie exprimée en volume.

2.2.1 Granulométrie continue

On parle de granulométrie continue lorsque tous les calibres sont suffisamment représentés. Une granulométrie continue se caractérise par un diagramme de granulométrie dont la pente ne varie pas brusquement, comme à la figure 2.4, à gauche. Une granulométrie continue permet un empilement dense des grains, de sorte que les vides entre les grains restent relativement faibles. Les mélanges à granulométrie continue sont donc généralement denses et faciles à mettre en œuvre. Le béton bitumineux en est un exemple typique.

2.2.2 Granulométrie discontinue

Lorsqu'une certaine fraction granulaire est présente de manière très limitée ou est absente, par exemple la fraction dont le calibre est compris entre 2 et 4 mm, il est question d'une granulométrie discontinue. Elle se reconnaît par une zone presque plate dans le diagramme, c'est-à-dire une discontinuité dans la pente (figure 2.4, à droite). Dans ce mélange, il y a une distinction clairement définie entre une fraction grossière (avec un calibre ≥ 4 mm) d'une part et une fraction fine (avec un calibre < 2 mm) d'autre part. Lorsque la concentration de gros grains est suffisamment élevée, il en résulte un squelette stable formé par les gros granulates, entre lesquels les grains plus fins peuvent se nicher sans perturber le squelette. Le *Stone Mastic Asphalt* (SMA) et l'enrobé drainant (PA) sont des mélanges typiques présentant une granulométrie discontinue.

Par conséquent, les mélanges à granulométrie discontinue présentent généralement plus de vides dans le squelette minéral que les mélanges à granulométrie continue. Plus la concentration de la fraction fine est faible, moins les vides de la fraction grossière seront remplis et plus les vides dans le squelette minéral seront élevés. Avec une granulométrie discontinue, on peut obtenir des mélanges avec des vides très élevés. L'enrobé drainant en est un exemple typique.

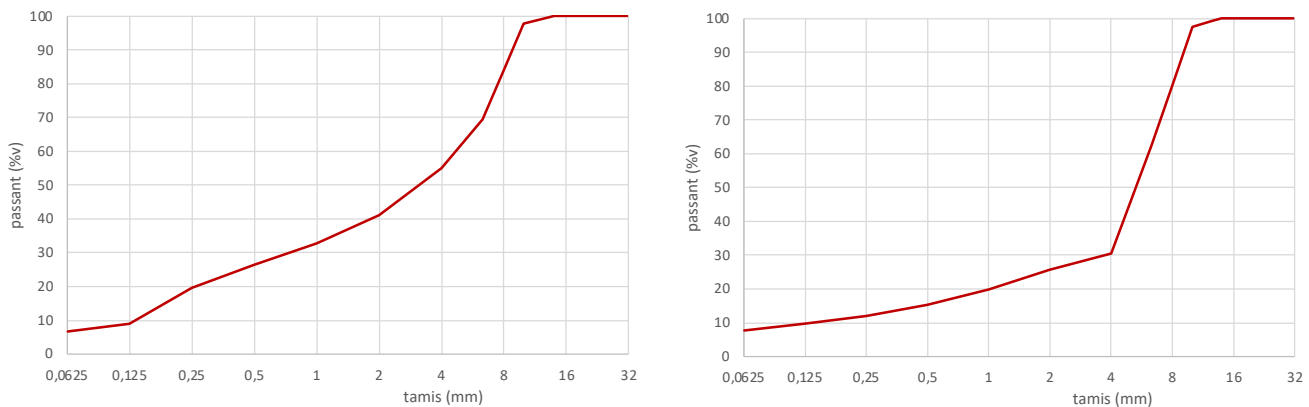


Figure 2.4 – Exemples d'une granulométrie continue (à gauche) et d'une granulométrie discontinue, avec une discontinuité entre 2 et 4 mm (à droite)

2.3 Mélanges fermés et ouverts

2.3.1 Mélanges fermés

Les mélanges à granulométrie continue présentent relativement peu de vides entre les grains minéraux. Après l'ajout du liant, le mélange ne contient plus que des vides internes et pas de vides interconnectés. Dans ce cas, on parle de mélanges fermés. Le béton bitumineux en est un exemple.

Un mélange à granulométrie discontinue peut également être fermé, à condition que la teneur en liant soit suffisamment élevée. Le SMA en est un exemple.

2.3.2 Mélanges ouverts

Dans le cas d'une granulométrie discontinue et d'une faible teneur en liant, les vides du mélange restent interconnectés, c'est-à-dire que le mélange est poreux. L'enrobé drainant est clairement un exemple de mélange ouvert.



3. Rôle et caractéristiques des composants

Ce chapitre décrit les différents composants et leur rôle dans le mélange. L'attention est attirée sur les principales caractéristiques à prendre en compte dans la formulation théorique des mélanges, en raison de leur impact sur cette dernière et sur les caractéristiques performantielles des mélanges énumérés précédemment au point 1.2.

Il ne s'agit pas d'un aperçu exhaustif de toutes les caractéristiques des matériaux, ni des exigences relatives à ces caractéristiques. Pour les exigences relatives aux caractéristiques des matériaux, veuillez vous référer aux cahiers des charges types régionaux et aux normes européennes pertinentes.

Pour plusieurs caractéristiques, l'impact sur les performances et la formulation des mélanges est discuté plus en détail au chapitre 6.

La subdivision et la terminologie utilisées ci-dessous sont conformes à l'application du matériau comme composant d'un mélange bitumineux et en accord avec la terminologie utilisée dans PradoWeb.

3.1 Gravillons

Par gravillon, on entend un granulat avec un calibre d/D , où d est supérieur ou égal à 2 mm. Il peut s'agir:

- de gravillons d'origine minérale naturelle;
- de gravillons d'origine secondaire provenant d'un processus industriel (p. ex., des scories d'aciérie).

Les gravillons confèrent au mélange force et rigidité grâce à leurs propriétés mécaniques intrinsèques. Les caractéristiques des gravillons à connaître pour la formulation théorique des mélanges sont les suivantes:

3.1.1 Angularité

Pour obtenir une structure granulaire stable, il est impératif d'utiliser de gravillons anguleux. Les grains anguleux s'imbriquent les uns dans les autres et bloquent ainsi leur mouvement relatif réciproque, ce qui est nécessaire pour la résistance à la déformation permanente. Les gravillons provenant de granulats concassés sont censés être 100 % anguleux.

3.1.2 Granulométrie

La granulométrie doit être connue de manière aussi précise que possible. Un granulat de calibre d/D a encore un pourcentage de refus sur D et un passant sur d . Une attention particulière doit être accordée au passant à travers le tamis de 2 mm et 0,063 mm. Ces valeurs sont limitées par les exigences des cahiers des charges, mais sont néanmoins non négligeables, car elles contribueront à la fraction de sable et à la fraction de filler du granulat.

3.1.3 Masse volumique

En gros, la masse volumique des gravillons naturels est estimée entre 2,6 à 2,7 Mg/m³. Pour certains granulats, et en particulier dans le cas de gravillons secondaires, la valeur peut être très différente.

La norme NBN EN 1097-6 établit une distinction entre la masse volumique réelle et la masse volumique apparente d'un granulat. Dans la pratique, il n'y a de différence que dans le cas de granulats poreux. L'annexe 3 traite plus en détail l'influence des granulats poreux sur la formulation des mélanges.

Pour la formulation des mélanges, la masse volumique réelle doit être déterminée aussi précisément que possible pour convertir correctement les pourcentages en masse du mélange en pourcentages en volume (et inversement).

3.1.4 Autres

Les caractéristiques intrinsèques suivantes du matériau jouent un rôle dans le choix des gravillons, mais n'ont plus d'incidence sur la détermination de la composition proportionnelle du mélange: résistance à la fragmentation (NBN 2020a), résistance à l'usure (NBN, 2011) et résistance au polissage (NBN, 2009a). La résistance au polissage est particulièrement importante pour les mélanges pour couches de roulement, afin de maintenir la rugosité, en tant que caractéristique essentielle pour la sécurité. Par conséquent, ces caractéristiques devront répondre à certaines exigences (Bruxelles Mobilité, 2016; Service Public de Wallonie, Mobilité & Infrastructures, 2021; Vlaamse Overheid, Agentschap Wegen en Verkeer, 2021).

3.2 Sables

Par sable, on entend un granulat de calibre 0/D, où $D \leq 2$ mm (conformément à la norme NBN EN 13043). Toutefois, PradoWeb permet que D soit plus grand, de sorte qu'une grave (par exemple 0/4 mm) puisse être encodé comme un «sable».

Les sables contribuent principalement à la fraction de sable, qui est nécessairement présente pour obtenir une granulométrie appropriée et garantir la maniabilité du mélange. On utilise généralement du sable concassé en raison de son angularité. Des sables ronds sont également utilisés dans certains mélanges, spécifiquement pour améliorer la maniabilité. Cependant, l'utilisation de sables ronds n'est pas recommandée pour les enrobés bitumineux qui doivent avoir une grande résistance à la déformation permanente.

Les principales caractéristiques des sables à connaître pour la formulation théorique des mélanges sont les suivantes:

3.2.1 Angularité

L'angularité est importante pour la résistance à la déformation permanente, pour la même raison que celle décrite ci-dessus pour les gravillons. Pour cette raison, dans les mélanges pour routes à fort trafic, qui doivent posséder une grande résistance à la déformation permanente, on utilise exclusivement du sable concassé. Lorsque la résistance à la déformation permanente est moins critique, on peut aussi utiliser partiellement des sables ronds pour améliorer la maniabilité du mélange.

Un mélange de grains anguleux contient plus de vides qu'un mélange de grains ronds. L'angularité affectera donc également les vides dans l'ensemble du granulat minéral dont le sable fait partie.

L'angularité peut être mesurée au moyen du coefficient d'écoulement (NBN EN 933-6), mais pour la formulation théorique du mélange dans PradoWeb, il suffit de caractériser l'angularité comme «1» (ou 100 % anguleux) pour un sable concassé et «0» (ou 100 % rond) pour un sable rond.

3.2.2 Masse volumique

La masse volumique des sables est une donnée nécessaire pour convertir correctement les pourcentages en masse du mélange en pourcentages en volume (et inversement). Pour la formulation du mélange, la masse volumique doit être déterminée aussi précisément que possible.

3.2.3 Granulométrie

La granulométrie des sables contribue à la granulométrie globale du granulat. Une attention particulière doit être accordée au passant au tamis de 0,063 mm qui, en Belgique, est limité par les exigences des cahiers des charges. Si le sable contient une teneur élevée en particules fines, celles-ci contribueront de manière significative à la fraction de filler du mélange complet de granulats minéraux.

3.2.4 Autres

Dans le cas des mélanges à teneur élevée en sables, la résistance au polissage du sable a également un impact sur le maintien de la rugosité. On choisit alors un sable concassé provenant d'une roche mère présentant une résistance au polissage suffisamment élevée.

3.3 Fillers

Par filler, on entend un granulat dont la majeure partie passe à travers le tamis de 0,063 mm. Dans le cas du filler, on distingue:

- le filler d'apport: un filler produit séparément et apporté en tant que composant du mélange;
- le filler de récupération: poussière des sables et gravillons qui est récupérée par l'installation de dépoussiérage.

Le filler se mélangera au liant pour former le mastic. Le mastic doit donc être considéré comme la phase réelle qui enveloppe et lie les sables et les gravillons. Le rôle du filler est donc principalement de conférer au mastic une consistance et une cohésion appropriées. L'importance de la consistance du mastic est discutée plus en détail au point 4.4.

Note: lorsqu'un pigment est ajouté pour colorer le mélange, le pigment fin affectera également la consistance du mastic. Ainsi, du point de vue de la formulation théorique des mélanges, le pigment sera également considéré comme un filler.

Les principales caractéristiques des fillers à connaître pour la formulation théorique des mélanges sont les suivantes:

3.3.1 Masse volumique

La masse volumique des fillers est une donnée nécessaire pour convertir correctement les pourcentages en masse du mélange en pourcentages en volume (et inversement). Pour la formulation du mélange, la masse volumique doit être déterminée aussi précisément que possible.

3.3.2 Granulométrie

La granulométrie, en particulier le passant au tamis de 0,063 mm, est d'une grande importance car ce passant contribue largement à la teneur réelle en filler du mélange.

3.3.3 Vides Rigden

Les vides dans le filler sec, compacté au moyen d'un appareillage Rigden selon une méthode normalisée (NBN, 2008), sont liés au pouvoir rigidifiant du filler lorsqu'il est mélangé au liant. Un filler avec des vides Rigden plus élevés donnera un mastic plus rigide. Ceci est abordé plus en détail au point 4.4.

3.4 Liants

Le liant est le composant qui lie le granulat minéral. À haute température, la consistance doit être suffisamment faible pour que le mélange bitumineux puisse être mélangé et compacté, tandis qu'aux températures de service, le liant doit être suffisamment consistant pour assurer la portance, la cohésion et la résistance à la déformation permanente.

Le plus courant est le bitume routier, un bitume obtenu par distillation du pétrole brut, qui répond à la norme de produit NBN EN 12591 (NBN, 2009b) et aux exigences dans les cahiers des charges types régionaux. Les bitumes routiers sont répartis en classes dites de pénétration, en fonction de leur pénétrabilité à l'aiguille à 25 °C, mesurée selon la norme NBN EN 1426 (NBN, 2015a).

En outre, il existe encore des types de liants spéciaux sur le marché, notamment:

- les bitumes modifiés par des polymères (PmB): modifiés par des polymères pour améliorer les propriétés rhéologiques (répondent à la norme de produit NBN EN 14023 [NBN, 2010]);
- les bitumes durs: traités pour obtenir une très grande rigidité (répondent à la norme de produit NBN EN 13924-1[NBN, 2015b]);
- les liants synthétiques (modifiés ou non par des polymères): translucides et à colorer avec un pigment si nécessaire.

Les principales caractéristiques des liants à connaître pour la formulation théorique des mélanges sont les suivantes:

3.4.1 Caractéristiques rhéologiques

Le liant est un matériau viscoélastique. À basse température et à haute fréquence de charge, la rigidité et la viscosité sont élevées, de sorte que les déformations restent faibles. À haute température et à basse fréquence de charge, la rigidité et la viscosité diminuent, ce qui entraîne la fluidification du bitume.

Pour le bitume routier, la consistance est caractérisée par les caractéristiques empiriques suivantes:

- pénétration ou pénétrabilité à l'aiguille (pen) à 25 °C (pen, en 10-1 mm), selon la NBN EN 1426;
- point de ramollissement Anneau et Bille ($T_{A\&B}$, en °C), selon la NBN EN 1427.

La pénétration est une mesure de la dureté: plus la valeur de pénétrabilité est faible, plus le liant est dur. Le point de ramollissement est caractéristique pour la résistance à la déformation permanente: plus le point de ramollissement est élevé, moins le liant sera sensible à la déformation permanente à des températures de service plus élevées.

Pour les autres liants, tels que les liants modifiés par des polymères, la pénétration et la température de ramollissement ne donnent pas une bonne image du comportement rhéologique. Pour ces liants, d'autres méthodes de mesure, recourant au DSR (*Dynamic Shear Rheometer*) ou au BBR (*Bending Beam Rheometer*), doivent être utilisées pour obtenir une image plus complète du comportement rhéologique. En pratique, on se limite généralement à la détermination du module complexe de cisaillement G^* via DSR à des températures et des fréquences bien définies qui sont pertinentes pour les performances du mélange. Ces valeurs de module complexe peuvent également être saisies dans PradoWeb et y sont utilisées pour prédire la rigidité de l'enrobé bitumineux (voir plus loin, point 5.3.4).

La viscosité du liant à température élevée est importante pour la production et la mise en œuvre de l'enrobé. On vise généralement une viscosité dynamique de 0,28 Pa.s pour le mélange et de 0,37 Pa.s pour le compactage (West 2010). Pour le bitume routier, la NBN EN 12697-35 précise pour le mélange et le compactage en laboratoire les températures auxquelles ces valeurs de viscosité sont atteintes. Toutefois, pour les liants synthétiques et les liants modifiés par des polymères, ces températures d'équiviscosité ne s'appliquent pas. Les températures optimales de mélange et de mise en œuvre doivent alors être déterminées à partir de mesures de viscosité dans la plage des températures de mise en œuvre élevées.

Pour plus de particularités sur les essais rhéologiques pour liants bitumineux, voir annexe 2.

3.4.2 Masse volumique

La masse volumique du liant est une donnée nécessaire pour convertir correctement les pourcentages en masse du mélange en pourcentages en volume (et inversement).

3.5 Agrégats d'enrobés bitumineux

Les agrégats d'enrobés bitumineux (AEB) sont un matériau secondaire issu du fraisage ou de la démolition de revêtements bitumineux, qui répond à la norme NBN EN 13108-8 (NBN, 2016-2019). Réutilisée comme composant dans un nouveau mélange bitumineux, la fraction de granulats secs contribuera au granulat et la fraction de liant au liant. Vu que le liant issu des agrégats d'enrobés bitumineux a subi un processus de vieillissement à long terme, il est appelé ci-après «ancien liant». Lorsque les agrégats d'enrobés bitumineux sont ajoutés à chaud, pour simplifier le calcul, on partira du principe, pour la formulation théorique des mélanges, que l'ancien liant se mélange complètement au nouveau liant.

Les principales caractéristiques des agrégats d'enrobés bitumineux à connaître pour la formulation théorique des mélanges sont les suivantes:

3.5.1 Teneur en liant

L'ancien liant reprendra le rôle de liant avec le liant nouvellement ajouté. La teneur en ancien liant dans les agrégats d'enrobés bitumineux est donc une donnée nécessaire.

3.5.2 Caractéristiques de l'ancien liant

Le vieillissement entraîne une diminution de la pénétrabilité à l'aiguille et une augmentation du point de ramollissement. La connaissance de ces caractéristiques empiriques permet de prédire, à l'aide de lois de mélange simples, la pénétrabilité à l'aiguille et le point de ramollissement du liant mixte qui résultera du mélange de l'ancien liant et du nouveau liant.

$$\log \text{pen}_{\text{mixte}} = (1-a) \cdot \log \text{pen}_{\text{nouveau}} + a \cdot \log \text{pen}_{\text{ancien}} \quad (3.1)$$

$$T_{\text{A\&B mixte}} = (1-a) \cdot T_{\text{A\&B nouveau}} + a \cdot T_{\text{A\&B ancien}} \quad (3.2)$$

où:

$\text{pen}_{\text{mixte}}$: pénétration du liant mixte

$T_{\text{A\&B mixte}}$: point de ramollissement du liant mixte

a : concentration en masse de l'ancien liant dans le liant mixte (= masse d'ancien liant/masse de liant mixte)

Strictement parlant, ces lois de mélange ne sont valables que si les deux liants, ancien et nouveau, sont des bitumes routiers. Dans tous les autres cas, ces lois de mélange ne sont pas très fiables, mais elles peuvent éventuellement être utilisées pour faire une prédiction de la classe de pénétrabilité dans le cas d'un PmB.

3.5.3 Masse volumique de l'ancien liant

Par convention, la masse volumique de l'ancien liant est de 1,030 Mg/m³. La masse volumique exacte de l'ancien liant est une donnée nécessaire pour déterminer la masse volumique du bitume mixte et convertir les pourcentages en masse du mélange en pourcentages en volume (et inversement).

3.5.4 Masse volumique de la fraction de granulats secs

Contrairement aux gravillons et aux sables, qui sont extraits d'une seule roche mère, la fraction sèche d'agrégats d'enrobés bitumineux est un mélange de grains d'origines différentes. La masse volumique varie donc d'un grain à l'autre. Cela signifie que la masse volumique mesurée sur la fraction de granulats secs est en fait une moyenne pondérée des masses volumiques des grains individuels.

En pratique, dans le cas des agrégats d'enrobés bitumineux, il suffit de mesurer la masse volumique sur les fractions individuelles de pierre, de sable et de filler pour obtenir une approximation suffisante de la variation réelle de la masse volumique en fonction du calibre des grains.

La masse volumique moyenne de la fraction de granulats secs peut alors être calculée comme suit:

$$\rho_{\text{sec}} = 100 / (\% m_{\text{pierre}} / \rho_{\text{pierre}} + \% m_{\text{sable}} / \rho_{\text{sable}} + \% m_{\text{filler}} / \rho_{\text{filler}}) \quad (3.3)$$

où

$\% m_{\text{pierre, sable, filler}}$: masses de la fraction de pierre, de sable ou de filler, en pourcentage de la masse totale de la fraction de granulats secs ($m\%_{\text{pierre}} + m\%_{\text{sable}} + m\%_{\text{filler}} = 100$)

$\rho_{\text{pierre, sable, filler}}$: masses volumiques de la fraction de pierre, de sable et de filler

3.5.5 Masse volumique des agrégats d'enrobés bitumineux

La masse volumique des agrégats d'enrobés bitumineux, constitués de la fraction de granulats secs et de l'ancien liant, peut être mesurée directement sur les agrégats d'enrobés bitumineux, ou calculée sur la base des masses volumiques ci-dessus et de la teneur en liant des agrégats d'enrobés bitumineux:

$$\rho_{\text{AEB}} = 100 / (\% m_{\text{liant}} / \rho_{\text{liant}} + (100 - \% m_{\text{liant}}) / \rho_{\text{sec}}) \quad (3.4)$$

où

ρ_{AEB} : masse volumique des agrégats d'enrobés bitumineux

$\% m_{\text{liant}}$: teneur en liant des agrégats d'enrobés bitumineux

ρ_{liant} : masse volumique du liant

ρ_{sec} : masse volumique de la fraction de granulats secs

3.5.6 Granulométrie de la fraction de granulats secs

La fraction de granulats secs contribue aussi bien à la fraction de pierre qu'à la fraction de sable ou de filler du mélange. Il est donc nécessaire de connaître avec précision la granulométrie de la fraction de granulats des agrégats d'enrobés bitumineux, mesurée sur le granulat lavé et séché. Cette granulométrie est appelée la «granulométrie blanche» dans le jargon technique, par opposition à la «granulométrie noire», qui est mesurée sur les agrégats d'enrobés bitumineux enrobés de liant.

Étant donné que les granulats provenant des agrégats d'enrobés bitumineux sont généralement un mélange de granulats de natures différentes, il existe une différence selon que la granulométrie est exprimée en termes de pourcentage en masse ou de pourcentage en volume, comme décrit précédemment au point 2.2. Dans la pratique, la granulométrie est déterminée par pesage, c'est-à-dire en pourcentage en masse. Cette granulométrie peut être convertie en granulométrie en pourcentage en volume, à condition de connaître la masse volumique en fonction du calibre des grains.

3.5.7 Angularité de la fraction de granulats secs

Même si les granulats des agrégats d'enrobés bitumineux sont broyés d'origine, c'est-à-dire anguleux, il est possible que l'angularité diminue à l'usage (usure et polissage du revêtement routier) et suite aux différents traitements que les granulats ont subis lors du recyclage (fraisage, broyage, tamisage, etc.). Il est important d'en être conscient, en raison de l'impact de l'angularité sur les performances du mélange (chapitre 6).

3.5.8 Vides de la fraction de filler

La fraction de filler des agrégats d'enrobés bitumineux contribuera à la fraction de filler du nouveau mélange dans lequel les agrégats d'enrobés bitumineux sont réutilisés. Ainsi, les vides Rigden de la fraction de filler affectent également les vides de la fraction de filler dans son entièreté. L'importance de ces vides est expliquée plus en détail au point 4.4.

3.6 Additifs

Par additifs, on entend les composants qui sont ajoutés au mélange dans une très faible mesure lors du malaxage. Aujourd'hui, de nombreux additifs sont utilisés dans des mélanges bitumineux à des fins très diverses, notamment:

- abaissement de la température de production;
- rajeunissement de l'ancien bitume;
- inhibition de la ségrégation du mélange (inhibiteurs d'écoulement);
- amélioration des caractéristiques du bitume;
- amélioration de l'adhésivité entre le liant et le granulat.

Tout additif ajouté en tant que composant séparé, même s'il est ajouté en très petites quantités, affectera la volumétrie du mélange. La masse volumique de chaque additif doit donc être connue afin de calculer correctement la masse volumique du mélange.

L'influence des additifs sur les propriétés du liant et les performances du mélange dépend, entre autres, du type d'additif, du dosage et de la méthode d'ajout, et est donc très spécifique.

4. Formulation théorique des mélanges

La méthode de formulation théorique du CRR est une méthode qui vise à optimiser la volumétrie en fonction des performances souhaitées. Le point de départ est la composition du granulat minéral. Cette composition détermine la structure du squelette minéral. Une méthode de calcul particulière est utilisée pour le calcul des vides dans le granulat minéral. Ensuite, le volume de liant est déterminé en tenant compte des vides disponibles et de la composition du mastic (le mélange de liant et de la fraction de filler).

Les principes de base de cette méthode de calcul théorique sont expliqués plus en détail dans ce chapitre. Pour terminer, ce chapitre explique comment ajuster la composition du mélange afin d'optimiser la volumétrie.

4.1 Formulation en parts de volume

4.1.1 Principe physique

Les volumes occupés par les différents grains déterminent la structure du squelette minéral et cette structure a un impact majeur sur les caractéristiques performantielles de l'enrobé bitumineux. Supposons que nous remplaçons dans le mélange granulaire de la figure 4.1, à gauche, les grains les plus fins par un granulat similaire aux propriétés mécaniques identiques, mais de masse volumique différente. D'un point de vue volumétrique, rien ne change et les caractéristiques mécaniques (rigidité et résistance) restent identiques, et donc rien ne change non plus dans le comportement mécanique, car les forces qui agissent sont réparties de manière identique entre les différents grains, quelle que soit leur masse. Cependant, la granulométrie, exprimée en pourcentages en masse, sera différente pour les deux mélanges. Il n'est donc pas logique d'exprimer la composition du granulat minéral en termes de pourcentages en masse, sans prendre en compte les masses volumiques des différents grains. En fonction des masses volumiques des grains, cela aboutirait à des différences de volumétrie, et donc à des caractéristiques mécaniques différentes.

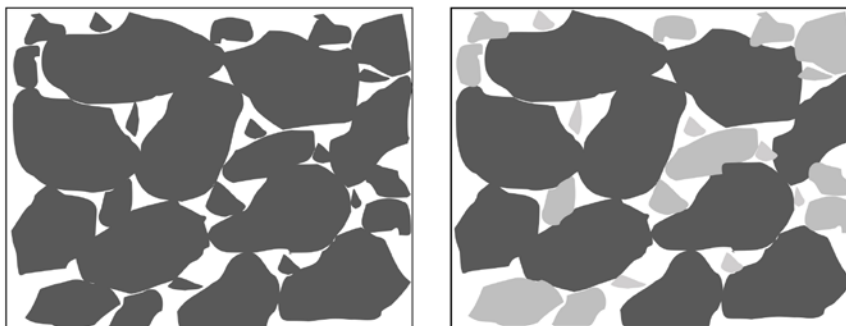


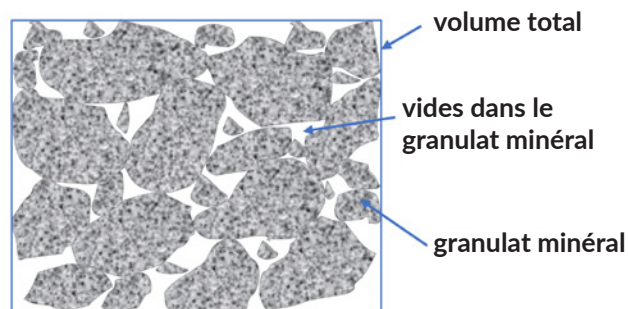
Figure 4.1 – Mélanges ayant des masses volumiques différentes, mais des caractéristiques mécaniques similaires

4.1.2 Grandeurs volumétriques

Les vides dans le granulat minéral (VMA)

Lorsque des agrégats granulaires différents sont mélangés, ils occupent un volume plus important que leur volume réel, car il reste des vides entre les grains (figure 4.2).

Ces vides sont représentés par l'abréviation VMA, pour *Voids in the Mineral Aggregate*, et exprimés en pourcentage du volume total.



Volume total = volume du granulat + vides dans le granulat minéral

Figure 4.2 – Mélange de granulats minéraux et vides dans le granulat minéral

Les VMA jouent un rôle clé dans la formulation des mélanges car ils sont déterminants pour le volume de liant que le mélange peut contenir et les vides résiduels du mélange bitumineux. Le point 4.2 aborde le calcul théorique des VMA.

Volume du liant

Le volume du liant a un impact très important sur les performances du mélange:

- Le volume doit être suffisant pour assurer un recouvrement uniforme des grains minéraux et pour fournir des ponts de liaison suffisants, afin d'assurer la cohésion. De plus, un volume de liant élevé va empêcher l'eau de pénétrer en profondeur dans la masse de l'enrobé. Il assure également la maniabilité du mélange.
- D'autre part, ce volume ne doit jamais dépasser le volume de l'espace disponible entre les grains du squelette. Un excès de liant entraînera une désorganisation du squelette, avec des effets néfastes sur la stabilité et la résistance à la déformation (orniérage) et un excès de liant qui est forcé de remonter à la surface (ressuage).

Le mélange sera donc toujours conçu avec des vides résiduels appropriés après remplissage par le liant (figure 4.3). Le volume de liant, exprimé en pourcentage du volume total, sera donc inférieur aux VMA.

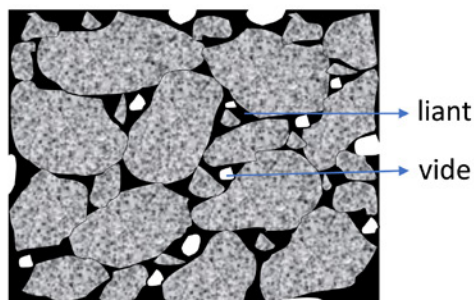


Figure 4.3 – Mélange de granulats minéraux et vides après remplissage par du liant

Note: si le mélange de granulats contient des granulats poreux, ceux-ci absorberont un certain volume de liant. Le liant absorbé dans les vides ne contribue pas efficacement au recouvrement des granulats, mais il doit être pris en compte pour le dosage du liant. L'annexe 3 décrit l'influence des granulats poreux sur la formulation des mélanges.

Vides

Comme l'illustre la figure 4.3, les vides résiduels, en abrégé les vides, sont déterminés par deux grandeurs volumétriques: VMA et volume de liant. Si l'on exprime également le volume de liant en pourcentage du volume total, l'équation suivante est d'application:

$$\text{Vides} = \text{VMA} - \text{Volume de liant (en \%)}$$

En considérant la relation entre les VMA, le volume de liant et les vides, on constate que pour des VMA identiques, une augmentation/diminution du volume de liant entraîne une diminution/augmentation des vides. Par conséquent, si l'on veut réduire la teneur en liant sans que les vides augmentent, il faut s'assurer que les VMA diminuent.

Les vides ont un impact très important sur les performances du mélange.

Quelques exemples:

- Un niveau de vides élevé signifie généralement une moindre cohésion, une plus grande susceptibilité à la fissuration et une plus grande perméabilité à l'eau, qui affecte aussi plus rapidement la cohésion. Pour certaines applications et certains types (par exemple, l'enrobé drainant), cependant, des vides élevés sont délibérément recherchés en raison des propriétés acoustiques et de l'évacuation de l'eau souhaitée. La durée de vie de ces mélanges est donc inférieure.
- Il doit toujours y avoir une quantité minimale de vides pour compenser des effets tels que le compactage supplémentaire du mélange induit par le trafic et la dilatation thermique du liant. Une teneur en vides trop faible pourrait entraîner des problèmes tels que l'instabilité (orniérage) et la remontée du liant (ressuage).

Ce point est abordé plus en détail au chapitre 6.

Vides remplis de liant (VFB)

Dans ce contexte, on utilise souvent le terme de vides remplis de liant, représenté par VFB, pour *Voids Filled with Binder*. Les VFB, exprimés en pourcentage de VMA absorbés par le liant, sont donc une mesure du degré de remplissage par le liant.

$$VFB = 100 \% * \text{Volume de liant} / \text{VMA (en \%)}$$

Une valeur VFB de 100 % signifie que les vides du granulat minéral sont entièrement remplis par le liant et constitue donc la limite du surremplissage.

On se souvient de l'importance des **volumes** occupés par les différents composants et de l'importance des vides pour les performances du mélange. La formulation des mélanges doit donc viser une composition optimale en parts de volume. Il est alors possible de convertir la composition en une composition en parts de masse, en tenant compte des masses volumiques des différents composants.

Les masses volumiques des composants sont donc des données extrêmement importantes pour la formulation des mélanges. La bonne connaissance de celles-ci est indispensable pour la conversion de la masse en volume et vice versa.

4.2 Calcul des vides dans le granulat minéral

Le calcul des VMA repose sur la modélisation de la manière dont les grains d'un mélange de granulats minéraux s'agencent, en fonction de leur taille et de leur concentration dans le mélange:

- Les petits grains en faible concentration peuvent se placer entre des grains plus gros sans perturber l'agencement des gros grains. Ils remplissent ainsi les vides entre les plus gros grains. Cet agencement est logiquement appelé «remplissage» (figure 4.4, à gauche).
- Les gros grains, en revanche, ne peuvent être introduits dans un mélange de petits grains sans déplacer les petits grains. Les gros grains prendront alors la place des petits grains. Cet agencement est appelé «substitution» (figure 4.4, à droite).

On constate que dans les deux cas, les vides du mélange diminuent par rapport aux vides de la fraction grossière et de la fraction fine proprement dite.

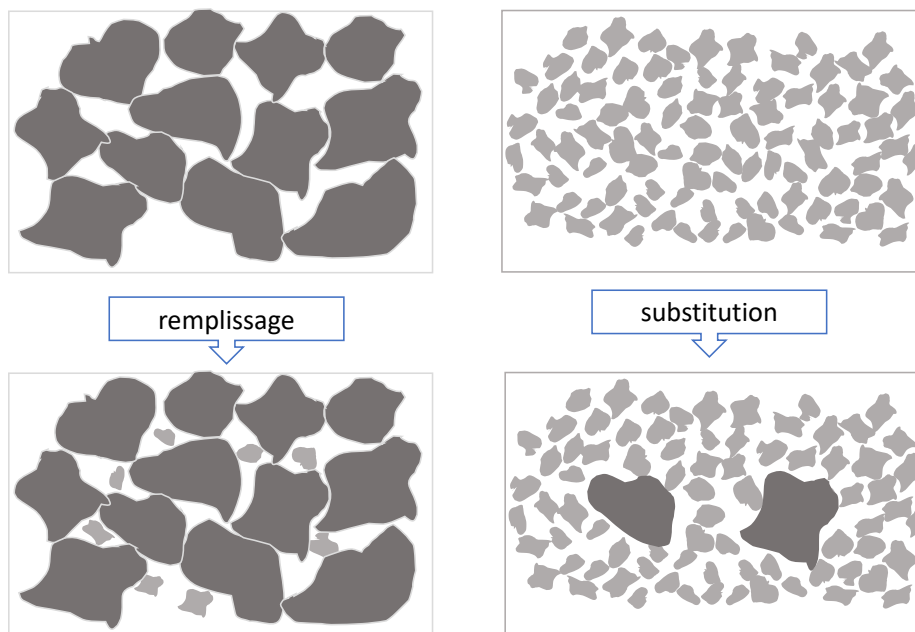


Figure 4.4 - «Remplissage» et «Substitution» lors du mélange de grains de calibres différents

4.2.1 Mélange de fraction fine et grossière

Dans le cas d'un mélange binaire, c.-à-d. un mélange avec seulement deux tailles différentes D_1 et D_2 , où la taille D_1 est négligeable par rapport à la taille D_2 , les deux agencements de «remplissage» et de «substitution» se distinguent clairement. Pour ce cas particulier, on peut dériver des lois mathématiques exactes pour les vides du mélange, en fonction des vides de la fraction fine (ε_1), de la fraction grossière (ε_2) et de la proportion du mélange. Ces deux lois sont représentées graphiquement à la figure 4.5. Ce graphique montre les vides du mélange en fonction de la concentration de la fraction grossière C_2 , pour le cas d'une fraction fine avec 35 % de vides et d'une fraction grossière avec 40 % de vides.

Le graphique peut être lu comme suit:

- En partant de la fraction fine uniquement (c.-à-d. $C_2 = 0\%$), la ligne orange décrit comment les vides du mélange (ε_m) diminuent en cas d'ajout de gros grains (c.-à-d. que C_2 augmente). Cela est dû au mécanisme de *substitution*.
- En partant de la fraction grossière uniquement (c.-à-d. $C_2 = 100\%$), la ligne bleue décrit comment les vides du mélange diminuent en cas d'ajout de petits grains (c.-à-d. que C_2 diminue). Cette diminution s'explique par le mécanisme de *remplissage*.
- L'intersection des deux courbes se produit à la concentration à laquelle les grains fins ont complètement rempli les vides de la fraction grossière. Ce point, où un mécanisme d'agencement passe vers un autre, correspond au pourcentage de vides minimum théorique du mélange binaire.

Si le rapport D_1/D_2 n'est pas négligeable, l'introduction de grains provoquera une perturbation progressive de l'agencement des grains déjà présents. Il en résulte un «élargissement» du squelette, qui conduit à des vides plus grands par rapport au cas où $D_1/D_2 \approx 0$. Dans la représentation graphique, cela se traduit par un déplacement des courbes vers le haut.

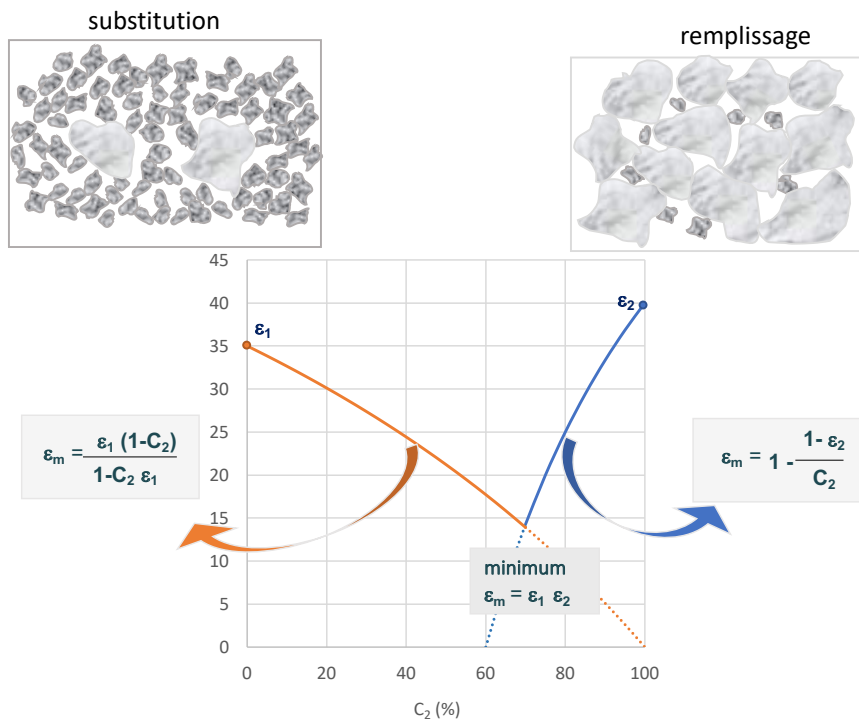


Figure 4.5 – Vides dans un mélange binaire avec deux calibres D_1 et D_2 , où $D_1/D_2 \approx 0$

4.2.2 Généralisation de la méthode

Les lois de remplissage et de substitution, telles qu'illustrées à la figure 4.5, constituent le cœur de la méthode de calcul développée pour un mélange de granulats, tel qu'il se présente dans un mélange bitumineux. À cette fin, le mélange de granulats est considéré comme un mélange de 10 fractions granulaires, selon une granulométrie croissante: 0/0,063 mm, 0,063/0,125 mm, ... jusqu'à la fraction la plus grossière 16/32 mm. Chaque fraction de grain F_i ($i=1, \dots, 10$) est caractérisée ici par une teneur en vides spécifique ε_i .

Les vides du mélange complet sont ensuite calculés par application itérative des lois de mélange binaires, dans laquelle la fraction fine est un mélange partiel des premières fractions ($j=1, \dots, i-1$) et la fraction grossière est la fraction suivante (i). Ce processus itératif commence dès lors par les vides de la fraction la plus fine et se termine par les vides du mélange complet.

Dans ce cadre, les facteurs suivants sont pris en compte:

- le rapport des calibres moyens des fractions successives;
- la quantité de chaque fraction, exprimée en pourcentage en volume par rapport à l'ensemble du mélange de granulats;
- l'angularité de chaque fraction, qui a un impact sur les vides de la fraction car les granulats anguleux laissent davantage de vides que les granulats ronds (figure 4.6).

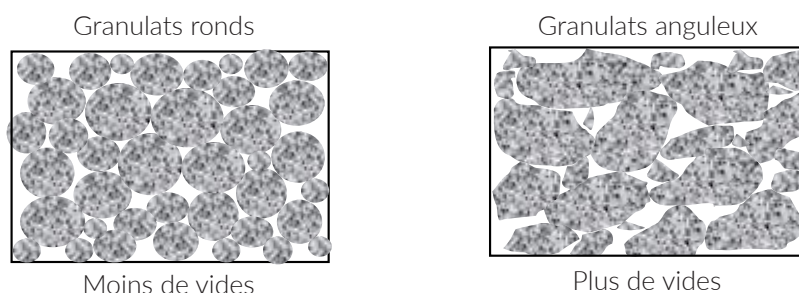


Figure 4.6 – Influence de l'angularité sur les vides

Pour plus d'informations sur la méthode de calcul itérative et les formules utilisées, veuillez vous référer à (Francken, 1991).

À chaque étape de l'itération, les concentrations des fractions déterminent quelle méthode d'agencement domine et donc, quelle loi est d'application. Par conséquent, cette méthode convient aussi bien aux mélanges à granulométrie continue qu'aux mélanges à granulométrie discontinue. Une discontinuité dans la granulométrie donne lieu à du remplissage, à condition que la concentration des fractions les plus fines soit suffisamment faible.

4.2.3 Influence du compactage

Les granulats minéraux sont enrobés de liant bitumineux dans le malaxeur d'enrobé. Il en résulte un mélange en vrac foisonné qui est encore compacté sur le chantier, ce qui entraîne une diminution progressive de la distance entre les granulats minéraux. Le niveau et la méthode de compactage exercent donc une influence sur les vides entre les granulats minéraux (VMA) dans le mélange enrobé et compacté et, par conséquent, sur les vides du mélange.

Cette influence est implicite dans la méthode de calcul des VMA, via les vides ε_i ($i=1, \dots, 10$) des fractions partielles. En effet, le choix des vides spécifiques des fractions partielles peut être aligné sur la méthode et le niveau de compactage.

PradoWeb calcule avec des valeurs fixes de vides spécifiques ε_i ($i=1, \dots, 10$), alignés de façon optimale sur les vides mesurés au compacteur giratoire. Le compacteur giratoire est un instrument de mesure et de compactage utilisé en laboratoire pour compacter des carottes d'enrobé sous l'influence de cycles de contraintes normales et de contraintes de cisaillement (Annexe 1). Cette méthode de compactage par pétrissage simule le compactage qui se produit sur un chantier de construction sous l'effet d'un rouleau de compactage. Dans les cahiers des charges belges, des exigences sont spécifiées pour les vides des carottes giratoires, le choix par défaut du nombre de girations dépendant du type de mélange:

- 60 girations dans le cas du béton bitumineux (mélanges à squelette sableux);
- 100 girations dans le cas de l'EME (Enrobé à Module Élevé);
- 120 girations dans le cas des SMA et des PA (mélanges à squelette pierreux).

L'alignement des paramètres de calcul dans PradoWeb sur les vides, mesurés avec le compacteur giratoire dans des conditions standard, facilite l'interprétation des résultats calculés, qui peuvent ainsi être directement confrontés aux exigences des cahiers des charges belges.

4.3 Volume de liant et vides

Comme expliqué au point 4.1.2, le volume de liant doit être suffisamment élevé pour assurer un bon enrobage et une bonne cohésion. Il est à noter que, lors de l'utilisation d'agrégats d'enrobés bitumineux, le volume de liant est la somme du volume du nouveau liant et du liant déjà présent dans les agrégats d'enrobés bitumineux.

D'autre part, si le volume de liant devait dépasser les VMA, le squelette minéral serait trop rempli, avec pour conséquence un risque élevé d'instabilité. Les VMA calculés fournissent donc une limite supérieure pour la teneur en liant.

Les vides dans le mélange découlent directement des VMA calculés et du volume de liant:

$$\text{Vides} = \text{VMA} - \text{volume de liant}$$

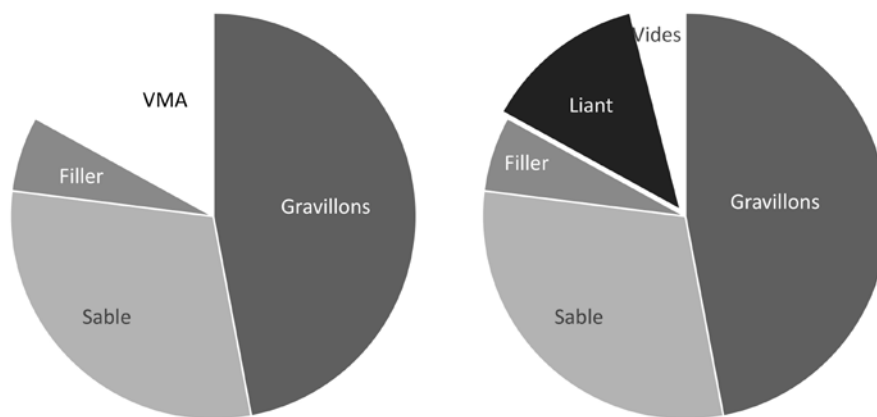


Figure 4.7 - Volumétrie du mélange et lien entre les VMA, le volume de liant et le volume des vides

Les vides ne doivent pas être trop importants. Une augmentation des vides entraîne une diminution de la cohésion et une plus grande sensibilité à la fissuration et à l'eau. Cela signifie que le volume de liant doit être suffisamment important pour assurer, d'une part, un bon enrobage des grains minéraux et, d'autre part, la durabilité du mélange.

Le mélange doit toujours contenir un minimum de vides. Cela signifie que le volume de liant doit absolument être inférieur aux VMA. Le surremplissage des vides du squelette minéral par le liant entraîne de nombreux problèmes, tels que:

- la déstabilisation du squelette, ce qui rend le mélange très sensible à la déformation;
- la remontée du liant (que l'on appelle «ressuage» du revêtement bitumineux), qui fait perdre au revêtement sa rugosité.

Des vides plus élevés améliorent souvent aussi la résistance à l'orniérage.

En outre, les cahiers des charges spécifient généralement une valeur limite inférieure pour la teneur en liant et des valeurs limites inférieure et supérieure pour les vides.

4.4 Importance de la rigidité du mastic

La fraction de filler a été définie comme la partie des granulats secs qui passe à travers le tamis de 0,063 mm. Avec le liant, elle constitue «le mastic». Le mastic bitumineux, comme le liant bitumineux qui en fait partie, a un comportement viscoélastique. Sa rigidité et sa viscosité sont toutefois plus élevées, en raison de l'action rigidifiante du filler.

Un enrobé bitumineux peut également être considéré comme un mélange de sable et de pierres, qui est lié par le mastic. En d'autres termes, le mastic est considéré comme le véritable liant. Dans ce rôle, la consistance du mastic est extrêmement importante pour les caractéristiques performantielles du mélange:

- Un mastic de faible rigidité et de faible viscosité donnera plutôt lieu à un mélange de faible rigidité et peu résistant à la déformation permanente. Cela augmente évidemment le risque d'orniérage.
- Un mastic très rigide et visqueux, en revanche, rend le mélange plus difficile à mettre en œuvre. En pratique, la température de mélange et la température de compactage d'un enrobé bitumineux sont choisies en fonction de la viscosité du liant (point 3.4.1). Cela ne tient pas compte de la quantité de filler ou de sa nature, qui affectent l'effet rigidifiant et donc la rigidité du mastic.

On peut en conclure que l'augmentation de la rigidité et de la viscosité due à l'ajout de filler, par rapport à la rigidité et à la viscosité du bitume, doit rester dans certaines limites. Une augmentation excessive peut conduire à un mélange peu maniable, et une augmentation insuffisante à un mélange trop peu rigide et sensible à l'orniérage.

Il est donc important de prendre en compte cet effet rigidifiant dans la formulation théorique du mélange et de s'assurer qu'il reste dans certaines limites.

Les principaux facteurs qui déterminent la rigidité du mastic sont les suivants:

1. la rigidité du bitume;
2. le rapport du volume filler/bitume: : v_f/v_b ;
3. le pouvoir rigidifiant du filler.

Le pouvoir rigidifiant d'un filler peut être caractérisé au moyen de l'essai Anneau & Bille sur le mastic, composé du filler et d'un bitume routier standard avec un rapport v_f/v_b fixe (NBN EN 13179-1) (NBN, 2013b). La différence entre le point de ramollissement du mastic et le point de ramollissement du bitume est une mesure du pouvoir rigidifiant du filler.

Diverses études sur fillers ont abouti à une vaste base de données avec les résultats de l'essai Anneau & Bille sur les mastics. Il a été constaté qu'il existe une corrélation entre le pouvoir rigidifiant et les vides du filler, déterminés par la méthode Rigden.

Une formule semi-empirique basée sur la physique pour l'augmentation du point de ramollissement Anneau et Bille, en fonction des vides Rigden ($voids_{Rigden}$) et du rapport volumique v_f/v_b , a été proposée pour la première fois dans (Francken and Moraux 1985). Les paramètres de cette formule ont été déterminés de manière à ce que les valeurs calculées et les valeurs mesurées du point de ramollissement Anneau & Bille présentent la meilleure corrélation possible pour une population de différents fillers. Au fil des ans, de nombreux fillers nouveaux et différents sont apparus sur le marché, ce qui a conduit à ajuster la formule afin que la corrélation reste optimale pour tous les types

de fillers utilisés dans la pratique dans les enrobés bitumineux. Cette formule semi-empirique permet une première prédiction théorique de la consistance du mastic dans un enrobé bitumineux, basée sur le rapport volumique filler/liant dans le mélange et les vides Rigden du filler dans le mélange, où le filler est l'ensemble de toutes les particules fines (c'est-à-dire le passant à travers le tamis de 0,063 mm).

La figure 4.8 montre les lignes d'augmentation similaire du point de ramollissement, en fonction des vides Rigden ($\text{voids}_{\text{Rigden}}$) et du rapport volumique v_f/v_b , en utilisant la formule théorique.

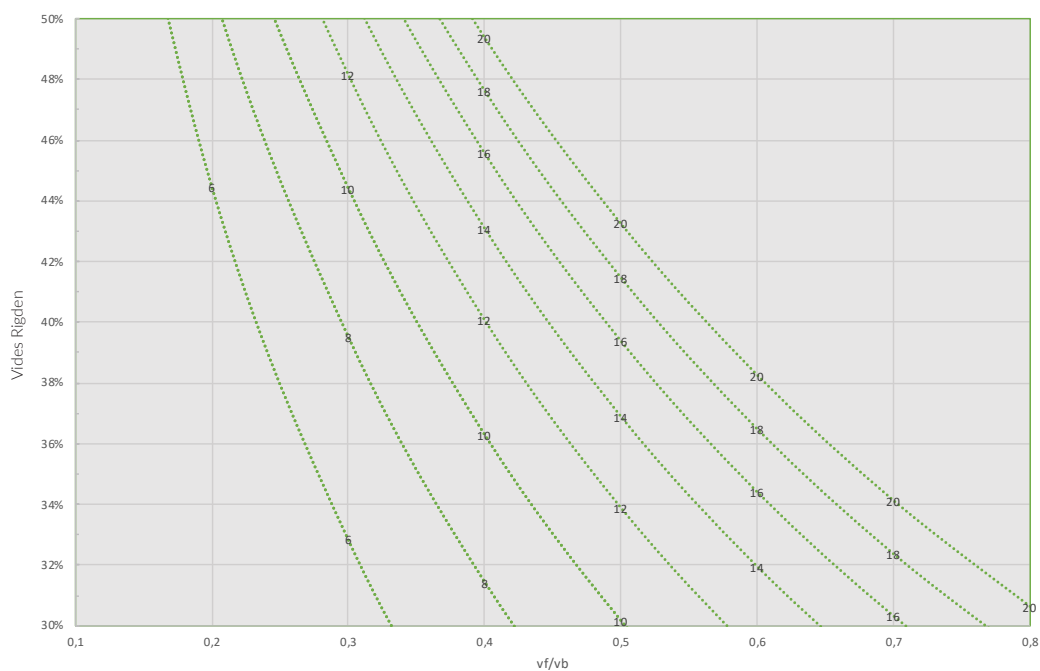


Figure 4.8 – Lignes de rigidité du mastic similaire (lignes iso-MSI)

Il est important d'attirer l'attention sur les points suivants concernant la norme EN 13179-1 (NBN, 2013b) pour l'essai Anneau & Bille sur mastics, qui a servi à déterminer la formule. En principe, l'essai est destiné à caractériser le pouvoir rigidifiant d'un filler d'apport, c'est pourquoi il est réalisé avec un bitume routier standard, afin que le résultat soit indépendant du type de liant, et avec le mastic passé à travers le tamis de 0,125 mm. Toutefois, pour le mastic, tel que présent dans le mélange bitumineux, il faut tenir compte du fait que:

- on a souvent affaire à un type de liant différent, et que dans le cas des liants modifiés par des polymères, l'augmentation du point de ramollissement est plus importante;
- le filler n'est pas un filler d'apport pur, mais un mélange de particules fines provenant de tous les composants, y compris les agrégats d'enrobés bitumineux le cas échéant.

Il s'ensuit que la valeur de la rigidité du mastic prédite théoriquement est à peine une approche du résultat de ce que donnerait l'essai Anneau & Bille sur le mastic réel du mélange, c.-à-d. avec le liant réel et avec la totalité de la fraction de filler. Néanmoins, cette formule donne une indication utile de la rigidité du mastic dans la phase de formulation théorique. Dès lors, dans le contexte de la formulation théorique des mélanges, on ne parle pas d'une «augmentation du point de ramollissement Anneau & Bille», mais d'un «indicateur de rigidité du mastic», ou en anglais *Mastic Stiffness Indicator*, d'où vient l'acronyme MSI.

4.5 Optimisation volumétrique

En résumé, la procédure de formulation théorique d'un mélange se déroule selon le schéma suivant:

- 1° Choix des composants
- 2° Composition du granulat minéral et calcul des vides dans le granulat minéral (VMA), en tenant compte:
- du type de squelette minéral souhaité (pierreux, sableux ou filler);
 - des exigences relatives à la granulométrie globale du mélange;
 - des exigences éventuelles relatives à la granulométrie de la fraction de sable.
- 3° Choix de la teneur en liant et détermination des vides, en tenant compte:
- du volume de liant nécessaire pour assurer un bon enrobage et une bonne cohésion;
 - des vides souhaités dans le mélange;
 - de la rigidité du mastic, qui dépend du rapport volumique filler/liant et de la nature du filler;
 - si présence d'agrégats d'enrobés bitumineux: composition et caractéristiques du mélange de liant.

À chaque étape, il faut, le cas échéant, satisfaire aux exigences des cahiers des charges types en vigueur, qui prescrivent généralement des limites à la granulométrie, une teneur minimale en liant et des limites aux vides.

Le schéma ci-dessus est donc un processus itératif, dans lequel des ajustements peuvent être effectués à chaque étape:

- Si l'on ne parvient pas à obtenir une granulométrie appropriée à l'étape 2, on retournera à l'étape précédente pour adapter le choix des composants.
- En partant d'une composition donnée du granulat minéral, il ne sera pas toujours possible de remplir toutes ces conditions simultanément à l'étape 3.

Dans ce cas:

- on modifiera la composition du granulat minéral pour adapter les VMA (retour à l'étape 2). Les modifications suivantes entraînent généralement une augmentation des VMA:
 - augmentation des fractions les plus grossières et réduction (voire suppression) d'une fraction plus fine, de sorte que la granulométrie devient plus discontinue;
 - réduction de la teneur en sable et/ou en filler.
- si une modification de la composition du granulat minéral ne suffit pas, on optera pour d'autres matériaux (retour à l'étape 1).

Ce processus permet d'optimiser théoriquement la volumétrie du mélange, avant de passer à la phase d'essais en laboratoire.

Le chapitre suivant décrit la procédure complète de formulation des mélanges, dans laquelle s'inscrit la formulation théorique. Ce chapitre approfondit le processus d'optimisation et les différentes options disponibles pour orienter les paramètres du mélange dans la direction souhaitée sont examinés plus en détail. Les exemples du chapitre 7 aussi illustreront davantage ce point.

5. Procédure de formulation des mélanges

Ce chapitre décrit les différentes étapes de la procédure de formulation des mélanges, telle que recommandée par le CRR. À chaque étape, il est important d'interpréter correctement les résultats, afin de pouvoir passer logiquement aux étapes suivantes.

La formulation théorique, comme décrit au chapitre précédent, est une partie essentielle de la procédure de formulation des mélanges. Lorsqu'on dispose des bons outils numériques, cette étape nécessite relativement peu de temps et de ressources, tout en entraînant une réduction du nombre d'essais performantiels (répétés) qui doivent être effectués par la suite. La procédure pratique décrite dans ce chapitre est en phase avec PradoWeb, l'application numérique qui automatise les calculs nécessaires et guide l'utilisateur tout au long de la phase de formulation théorique.

La formulation théorique est suivie d'essais en laboratoire, dont les résultats doivent être confrontés aux exigences (figure 5.1).

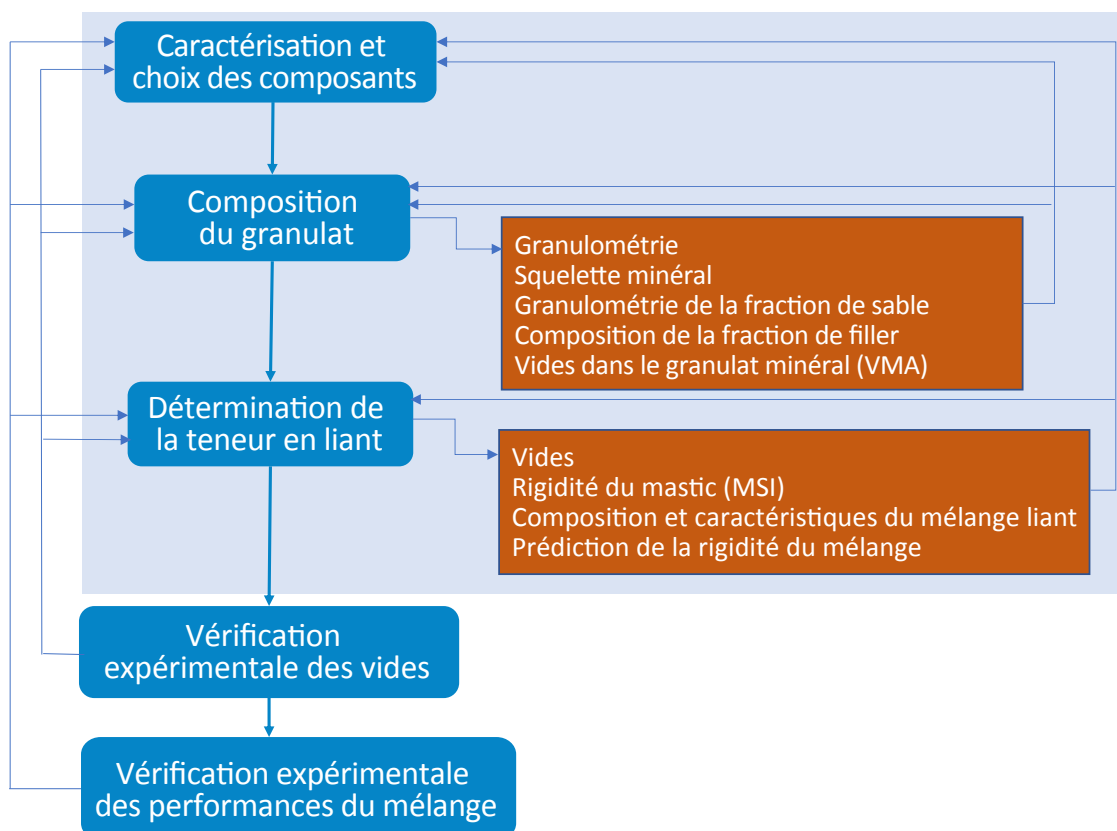


Figure 5.1 – Procédure de formulation des mélanges

Bien entendu, la toute première étape, qui précède la formulation des mélanges, est le choix du type d'enrobé. Ce choix dépend du rôle du mélange dans le revêtement bitumineux (couche de roulement, sous-couche, couche de reprofilage, réparation locale, etc.), du lieu d'application (autoroute, chemin agricole, parking, etc.) et des exigences en termes de performances, de sécurité et de confort. Pour le choix du type d'enrobé bitumineux, veuillez vous référer au code de bonne pratique CRR y afférent (CRR, 2020). Dans la suite de ce chapitre, la procédure de formulation est illustrée au moyen d'un béton bitumineux pour sous-couches, avec utilisation d'agrégats d'enrobés bitumineux.

5.1 Caractérisation et choix des composants

Bien entendu, les caractéristiques des matières premières doivent être connues et conformes aux prescriptions pour une utilisation dans les enrobés bitumineux.

Le choix des composants dépend du type d'enrobé et des performances souhaitées.

Les agrégats d'enrobés bitumineux sont un matériau qui se prête parfaitement à la réutilisation dans de nouveaux mélanges, tout en conservant de bonnes performances, à condition que les agrégats d'enrobés bitumineux soient correctement gérés et caractérisés et que la formulation du nouveau mélange d'agrégats d'enrobés bitumineux soit correcte. Dans la recherche d'une plus grande circularité dans le secteur de la construction routière, il est donc naturel d'utiliser au maximum les agrégats d'enrobés bitumineux.

PradoWeb comprend un module pour la saisie et la gestion des caractéristiques des matières premières. Une fois les caractéristiques encodées, les matériaux peuvent être utilisés dans différents mélanges.

Dans PradoWeb, les matériaux sont divisés en six types, comme indiqué précédemment au chapitre 3:

1. Gravillons: granulats qui passent pour la plupart à travers le tamis avec des mailles de dimension D et restent sur le tamis avec des mailles de dimension d , où $d \geq 2$ (calibre d/D).
2. Sables: granulats qui passent pour la plupart à travers le tamis avec des mailles de dimension D , où $D \leq 2$ mm (calibre $0/D$).
3. Fillers: matériau fin passant pour la majeure partie à travers le tamis de 0,063 mm. Dans cette catégorie, on retrouve notamment les fillers d'apport, les fillers de récupération et les pigments.
4. Liants: tous les types de nouveaux liants (bitume routier, bitume modifié par des polymères, liant synthétique, etc.).
5. Agrégats d'enrobés bitumineux: agrégats récupérés de fraisat, composés de granulats et d'ancien liant.
6. Additifs: matériaux ajoutés en très petites quantités. Une distinction est faite entre:
 - Additifs liant: additifs qui, avec le liant, forment un mélange homogène. Les produits régénérants et les additifs pour les enrobés basse température appartiennent à cette catégorie.
 - Additifs mélange: additifs solides qui ne se dissolvent pas dans le mélange. On pense par exemple ici aux inhibiteurs d'écoulement minéraux.

Note: les matériaux granulaires fins qui contribuent à la granulométrie (p. ex. les pigments, le ciment et la chaux hydratée) sont introduits comme un filler afin que leur impact sur la granulométrie et la rigidité du mastic soit pris en compte. Même si la quantité est faible, ils ne doivent pas être introduits comme additif.

Le tableau 5.1 énumère les caractéristiques qui doivent impérativement être saisies afin d'effectuer les calculs.

Type de composant	Caractéristique	Unité
Gravillons	Masse volumique	Mg/m ³
	Granulométrie	% m
	Angularité	-
Sables	Masse volumique	Mg/m ³
	Granulométrie	% m
	Angularité	-
Fillers	Masse volumique	Mg/m ³
	Granulométrie	% m
	Vides Rigden	%
Liants	Masse volumique	Mg/m ³
	Pénétration (pen)	0,1 mm
	Température de ramollissement Anneau et Bille (T _{A&B})	°C
Agrégats d'enrobés bitumineux	Granulométrie	% m
	Masse volumique de la fraction de pierre	Mg/m ³
	Masse volumique de la fraction de sable	Mg/m ³
	Masse volumique de la fraction de filler	Mg/m ³
	Angularité	
	Vides Rigden de la fraction de filler	%
	Teneur en liant	% m
	Masse volumique de l'ancien liant	Mg/m ³
	Pénétration de l'ancien liant (pen)	0,1 mm
	Point de ramollissement Anneau et Bille (T _{A&B}) de l'ancien liant (T _{AB})	°C
Additifs	Masse volumique	Mg/m ³

Tableau 5.1 – Caractéristiques obligatoires des matériaux pour la formulation théorique des mélanges

5.2 Composition des granulats

Une fois les composants choisis, les granulats seront composés en spécifiant les proportions dans lesquelles les différents composants seront mélangés. Dans le cas des agrégats d'enrobés bitumineux, bien sûr, seule la fraction sèche du granulat est prise en compte.

Dans la pratique, la composition est exprimée en pourcentages en masse, car les composants sont pesés en laboratoire et à la centrale d'enrobage. L'encodage dans PradoWeb se fait donc en pourcentages en masse. Pour une formulation correcte du mélange, la composition est convertie dans PradoWeb en pourcentages en volume afin de pouvoir continuer à calculer en termes de volumes.

La composition des granulats conduit aux résultats suivants:

5.2.1 Granulométrie des granulats

Ces pourcentages en masse et les granulométries des différents composants secs déterminent la granulométrie du mélange de granulats secs, soit en pourcentage en masse du passant soit en refus. Dans le cas des agrégats d'enrobés bitumineux, c'est la granulométrie des granulats secs lavés qui est prise en compte. Cette granulométrie est appelée «granulométrie blanche» par opposition à la «granulométrie noire» des agrégats d'enrobés bitumineux mêmes.

La granulométrie en pourcentages en masse doit être convertie en une granulométrie en pourcentages en volume, car les pourcentages en volume détermineront la structure du squelette minéral et les VMA. Ce calcul est effectué au moyen des masses volumiques des différents composants.

Dans le cas des agrégats d'enrobés bitumineux, la conversion de la granulométrie des granulats secs en pourcentages en volume est moins simple, car il s'agit d'un mélange hétérogène de grains. La masse volumique n'est donc pas la même pour tous les grains et, par conséquent, la granulométrie de la fraction sèche des agrégats d'enrobés bitumineux n'est pas la même en termes de pourcentages en masse ou de pourcentages en volume. PradoWeb permet d'effectuer la conversion de manière approximative, en utilisant les masses volumiques des fractions distinctes de pierre, de sable et de filler. Elles doivent être déterminées et saisies comme des caractéristiques des agrégats d'enrobés bitumineux (tableau 5.1).

Pour la composition des granulats, on se base généralement sur une granulométrie souhaitée ou connue. L'objectif de rechercher une certaine granulométrie est d'obtenir la même structure de squelette. Par conséquent, la granulométrie en parts de volume doit correspondre le plus possible à la granulométrie souhaitée en parts de volume. PradoWeb contient une routine qui calcule automatiquement la composition, en vue d'obtenir la granulométrie souhaitée. Cette routine n'est pas seulement pratique et rapide, elle est aussi très instructive sur le choix des composants. Le résultat peut montrer qu'il n'est pas possible d'obtenir une bonne approximation, ce qui indique une pénurie d'un certain composant d'un certain calibre. D'autre part, le résultat peut révéler qu'un certain composant est superflu et peut être enlevé.

La figure 5.2 montre un exemple de granulométrie en pourcentages en volume calculée par PradoWeb, pour un béton bitumineux pour sous-couche dont 40 % des granulats proviennent d'agrégats d'enrobés bitumineux. Cette granulométrie résulte de la composition des granulats secs selon les pourcentages du tableau 5.2, composition qui a été générée automatiquement dans PradoWeb sur la base d'une granulométrie cible (représentée par la ligne vert clair dans le graphique). Dans cet exemple, il n'y a qu'une différence minimale entre les pourcentages en masse et en volume, car les masses volumiques de tous les granulats diffèrent peu.

Le cas échéant, la granulométrie des granulats secs sera confrontée aux exigences des cahiers des charges. Les exigences relatives aux types d'enrobé décrites dans les cahiers des charges types belges ont été implémentées dans PradoWeb, de sorte que, si nécessaire, les vérifications sont effectuées automatiquement et le résultat est affiché à la fois numériquement et graphiquement. La zone grise de la figure 5.2 montre la plage dans laquelle la granulométrie doit se situer pour répondre aux exigences du mélange de type AC-20base3 (béton bitumineux pour sous-couches, selon le cahier des charges type Qualiroutes 2021). PradoWeb confronte la granulométrie en pourcentages en volume aux exigences en vigueur, car c'est le volume des grains, et non leur masse, qui détermine la structure du squelette minéral.

Note: dans les cahiers des charges types, les exigences relatives à la granulométrie sont exprimées en pourcentage en masse. Toutefois, il est précisé que si la masse volumique des granulats diffère de $2,65 \text{ Mg/m}^3$, les compositions doivent être corrigées afin de maintenir le même rapport volumique. Cette correction implique que c'est en fait la granulométrie en parts de volume qui doit répondre aux exigences des cahiers des charges. C'est aussi ce que vérifie PradoWeb.

	Masse volumique (Mg/m^3)	% masse	% volume
Calcaire 14/20	2,692	2,2	2,2
Calcaire 6.3/14	2,670	32,6	32,6
Sable de concassage 0/2	2,704	23,9	23,6
Filler Ib	2,683	1,6	1,6
RA 0/14	2,650	39,7	40,0
Total	2,671	100	100

Tableau 5.2 – Composition des granulats pour la formulation d'un mélange de Type AC-20base3 (selon CCT Qualiroutes 2021)

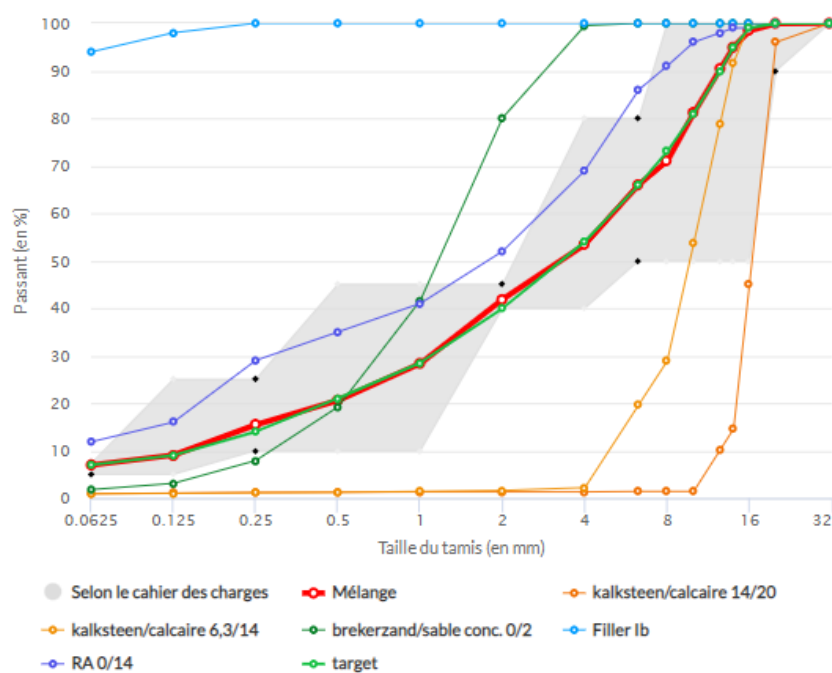


Figure 5.2 – Granulométrie des composants et du mélange, confrontée aux limites du cahier des charges type Qualiroutes 2021 (zone grise)

Si la granulométrie du mélange ne répond pas aux exigences des cahiers des charges, il convient de rectifier la composition du granulat sec. Si cela ne suffit pas, il faudra revoir le choix des composants des granulats secs (point 5.1).

5.2.2 Squelette minéral

La granulométrie du mélange de granulats permet d'identifier la famille d'enrobés en fonction du squelette minéral, comme décrit au chapitre 2. PradoWeb comprend une routine de test qui effectue automatiquement l'identification sur la base des volumes occupés par les fractions de pierre, de sable et de filler. La représentation graphique du point dans le diagramme ternaire montre où se trouve le mélange (figure 5.3). Un mélange proche de l'une des limites peut s'avérer critique, car de petits changements dans la granulométrie peuvent provoquer un décalage, avec un impact majeur sur les performances.

Composition dry aggregate	in v%	Label	Color
% stone (≥ 2 mm)	58,15	Filler skeleton	Light Blue
% sand (≥ 0.063 mm and < 2 mm)	34,86	Sand skeleton	Orange
% filler (< 0.063 mm)	6,99	Stone skeleton	Blue

Skeleton Type Sand skeleton

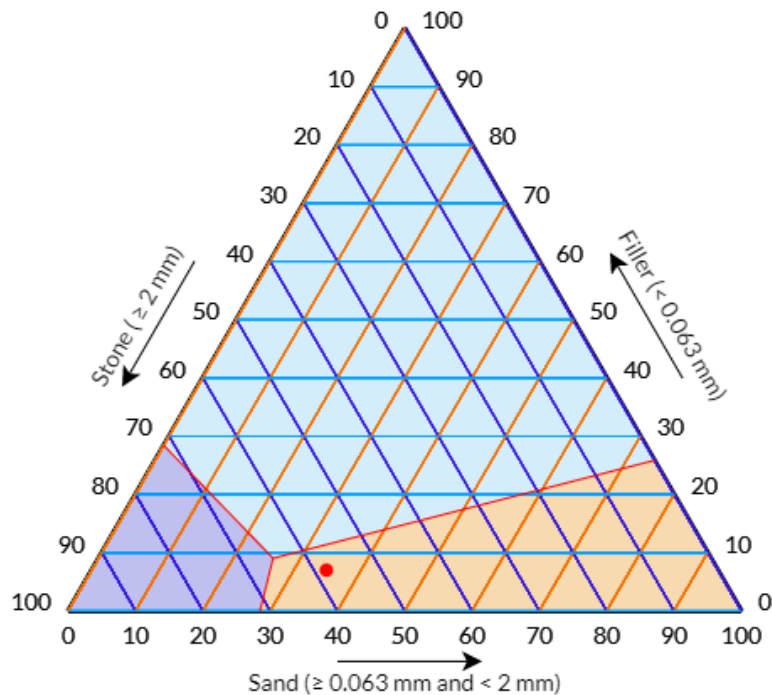


Figure 5.3 – Détermination du type de squelette minéral

5.2.3 Granulométrie de la fraction de sable

La fraction de sable des granulats secs est constituée majoritairement de sables neufs et, dans le cas de l'utilisation d'agrégats d'enrobés bitumineux, de la fraction de sable des AEB. En outre, il y a également une contribution du sable présent dans les gravillons et du refus sur tamis de 0,063 mm des fillers. En particulier pour les mélanges à squelette sableux, dans lesquels la fraction de sable forme le squelette et doit répartir les charges, il est important que la fraction de sable soit constituée de manière équilibrée avec une granulométrie continue. Avoir exclusivement du sable grossier ou exclusivement du sable fin peut entraîner des problèmes de mise en œuvre ou d'instabilité du squelette. Pour cette raison, dans le cas de certains mélanges à squelette sableux, les cahiers des charges types belges précisent également des exigences relatives à la granulométrie de la fraction de sable. Si nécessaire, ils sont également testés automatiquement dans PradoWeb.

5.2.4 Composition et caractéristiques de la fraction de filler

Le point 4.4 a traité du rôle du filler en tant que composant du mastic et de la manière dont la rigidité du mastic est déterminée par les caractéristiques du filler. Les vides du filler et la masse volumique sont typiquement des caractéristiques nécessaires au calcul de l'indicateur de rigidité du mastic. La fraction de filler des granulats secs, cependant, est une combinaison de filler d'apport le cas échéant, de filler de récupération, de particules fines de sables et de gravillons et de la fraction de filler des agrégats d'enrobés bitumineux. Pour autant que les caractéristiques de ces composants individuels soient connues, PradoWeb estime, par des lois de mélange, la masse volumique moyenne et les vides Rigden de la fraction de filler, deux paramètres importants pour la prédiction de la rigidité du mastic. Le tableau 5.3 présente la composition de filler du mélange pris comme exemple. La fraction de filler est constituée à 68 % du filler des agrégats d'enrobés bitumineux. Le point 5.3.2 analyse plus en détail l'évaluation correcte de la rigidité du mastic, qui ne doit être ni trop faible ni trop élevée.

Origine	En % v des granulats secs	En % v de la fraction de filler	Masse volumique (en Mg/m ³)	Vides Rigden
Filler d'apport	1,50 %	21,4 %	2,683	30.9 %
Fraction de filler AEB	4,75 %	68,0 %	2,654	37.0 %
Fraction de filler sables et gravillons	0,74 %	10,6 %	2,690	33.0 %(1)
Total	7,00 %	100,0 %	2,665	35.3 %

(1) Valeur forfaitaire pour les vides Rigden des particules fines obtenues par dépoussiérage des sables et des pierres

Tableau 5.3 – Composition de la fraction de filler du mélange

5.2.5 Vides dans le granulat minéral

Les vides dans le granulat minéral sont calculés selon la méthode décrite au chapitre 4, en utilisant la granulométrie en pourcentages en volume. Les paramètres de ce calcul sont les vides spécifiques des différentes fractions partielles. Ces vides ont été ajustés au compactage giratoire pour les calculs dans PradoWeb. Les angularités des différentes fractions partielles, qui résultent des angularités des composants et de la composition proportionnelle, sont utilisées pour corriger les vides spécifiques. Ainsi, l'impact de l'angularité sur les vides entre les grains est pris en compte.

Il n'y a pas d'exigences pour les VMA dans les cahiers des charges belges, car les VMA sont implicitement limités par les exigences relatives à la teneur en liant et aux vides résiduels. Toutefois, si l'on souhaite obtenir un mélange à forte teneur en vides et/ou à forte teneur en liant, il faut s'efforcer d'obtenir des VMA élevés afin qu'il y ait suffisamment d'espace pour contenir le volume de liant et qu'il reste suffisamment de vides. Ci-dessous sont reprises des valeurs indicatives typiques pour les VMA pour les principaux types de mélanges:

Béton bitumineux pour sous-couches: 15 à 20 %

Béton bitumineux pour couches de roulement: 17 à 22 %

SMA: 20 à 26 %

PA: 28 à 32 %

Pour le béton bitumineux pour sous-couches de l'exemple, PradoWeb calcule une valeur de 17,3 % pour les VMA.

5.3 Teneur en liant

Une fois la composition des granulats déterminée, il reste à choisir la teneur en liant.

La teneur en liant est choisie conformément aux exigences des cahiers des charges, qui dépendent du type de mélange. Pour des raisons pratiques, les normes et cahiers des charges expriment généralement les exigences relatives à la teneur en liant en pourcentage en masse dans le mélange. Toutefois, il sera toujours indiqué que les exigences doivent être corrigées par un facteur égal à « $2,65/\rho$ », avec ρ qui correspond à la masse volumique des granulats. Pour les granulats dont la masse volumique est supérieure/inférieure à $2,65 \text{ Mg/m}^3$, il faudra donc doser moins/plus de liant en pourcentage en masse. Ainsi, le volume de liant requis reste le même quelle que soit la masse volumique du granulat. PradoWeb effectue automatiquement cette correction de la teneur en liant requise par le cahier des charges, sur la base de la masse volumique du granulat. De cette manière, le formulateur peut immédiatement voir si la teneur en liant qu'il saisit en pourcentage en masse satisfait aux exigences des cahiers des charges.

Pour le béton bitumineux pour sous-couches de l'exemple, la masse volumique des granulats n'est que légèrement supérieure à $2,65 \text{ Mg/m}^3$, de sorte que la correction pour la teneur minimale en liant est plutôt faible (4,56 % au lieu de 4,6 %). Dans cet exemple, une teneur en liant de 4,7 % est prise en compte.

La teneur en liant est ensuite convertie dans PradoWeb en volume occupé par le liant. Dès que le volume total de liant est connu, les grandeurs suivantes sont aussi calculées:

5.3.1 Vides

Les vides découlent directement des VMA calculés et du volume de liant, exprimé en pourcentage du volume total: $Vides = VMA - \text{volume de liant}$

Le tableau 5.4 montre les résultats pour l'exemple du béton bitumineux pour sous-couches, pour lequel des VMA de 17,3 % ont été calculés et une teneur en liant de 4,7 % a été choisie.

	en % m	en % v
% pierres (≥ 2 mm)	55,3 %	48,1 %
% sable ($\geq 0,063$ mm et < 2 mm)	33,3 %	28,8 %
% filler ($< 0,063$ mm)	6,6 %	5,8 %
% liant	4,7 %	10,7 %
% vides	-	6,6 %

Tableau 5.4 – Composition du mélange, en pourcentages en masse et en volume

Dans cet exemple, les vides répondent aux limites indicatives du cahier des charges Qualiroutes 2021 pour un mélange de type AC-20base3 (3,5 % - 9 % pour le Réseau I). Si les vides ne répondent pas aux limites, il peut être suffisant d'ajuster uniquement la teneur en liant.

Par contre, il peut arriver que, par exemple, les vides tombent en dessous de la limite inférieure, alors que la teneur en liant est également à la limite inférieure. Dans ce cas, la granulométrie doit être ajustée afin d'augmenter les VMA, et ce en modifiant la composition des granulats secs (point 5.2).

Les modifications suivantes entraînent généralement une augmentation des VMA:

- augmentation des fractions les plus grossières et diminution (voire suppression) d'une fraction plus fine afin d'obtenir une granulométrie plus discontinue;
- réduction de la teneur en sable et/ou en filler.

Si ces adaptations ne suffisent pas à rectifier les VMA, il faudra remonter encore plus loin dans la procédure et modifier le choix des composants (point 5.1).

5.3.2 Rigidité du mastic

Le choix de la teneur en liant et tout changement dans la granulométrie ou dans les matériaux de base (comme décrit plus haut) auront également un impact sur la rigidité du mastic (MSI). Cette valeur dépend en effet du rapport entre le volume de la fraction de filler et le volume de liant (v_f/v_b) et les vides de la fraction de filler (v_{Rigden}) (point 4.4).

Les deux paramètres sont connus à ce stade de la formulation théorique, ce qui permet de calculer et d'évaluer l'indicateur de rigidité du mastic. PradoWeb calcule automatiquement la rigidité du mastic et représente graphiquement la valeur, en fonction du rapport volumique v_f/v_b et des vides Rigden de la fraction de filler.

Pour une bonne formulation du mélange, il est nécessaire d'éviter que l'indicateur de rigidité du mastic se trouve dans une zone critique. Un indicateur de rigidité du mastic trop faible (mastic trop peu rigide et sensible à la déformation) peut être néfaste pour les performances du mélange, au même titre qu'un indicateur trop élevé (mise en œuvre compliquée).

La plage dans laquelle se situe de préférence le MSI diffère selon le type de mélange. Pour le béton bitumineux, 15 à 20 °C semble être une plage appropriée. Pour le SMA, on constate souvent que le MSI est plus élevé, ce qui est compréhensible car le SMA est un mélange riche en mastic. Une bonne résistance à l'orniérage nécessite donc une rigidité élevée du mastic. La quantité de mastic, et la mise en œuvre systématiquement mécanique du SMA, expliquent pourquoi la maniabilité du SMA n'est généralement pas un problème dans la pratique, malgré la grande rigidité du mastic.

Si la rigidité du mastic est trop élevée, les options suivantes sont possibles pour la réduire:

- Augmentation de la teneur en liant

Toutefois, il faut tenir compte du fait que cela modifiera également les vides, qui devront donc être réévalués (point 5.3.1).

- Réduction de la teneur en filler

Cela nécessite un ajustement de la composition des granulats secs (point 5.2). Cela a un impact sur les VMA et par conséquent sur les vides, qui doivent être réévalués.

- Changement du type de filler

Pour ce faire, il faut revenir à la sélection des composants (point 5.1). Il faut alors opter pour un filler d'apport dont l'effet rigidifiant est moindre, c'est-à-dire un filler dont les vides Rigden sont plus faibles. La modification du filler aura aussi un impact sur les VMA et par conséquent sur les vides, qui doivent être vérifiés.

PradoWeb permet d'effectuer rapidement ces modifications et la vérification de leur impact sur la rigidité du mastic.

5.3.3 Composition et caractéristiques du liant

En cas d'utilisation d'agrégats d'enrobés bitumineux, comme dans l'exemple, le liant est composé de nouveau et d'ancien liant. Le pourcentage d'ancien liant dans le mélange liant dépend de la teneur en liant des agrégats d'enrobés bitumineux et de la quantité d'agrégats d'enrobés bitumineux dans le mélange. Cette dernière est établie dès que la composition des granulats secs est choisie.

Le pourcentage d'ancien liant détermine alors immédiatement le pourcentage de nouveau liant nécessaire pour le liant total.

Si les cahiers des charges de certains types de mélanges fixent une limite à la quantité d'agrégats d'enrobés bitumineux autorisée dans un mélange, c'est souvent sous la forme d'un pourcentage maximal autorisé d'ancien liant dans le mélange liant. En effet, la qualité de l'ancien liant est le facteur le plus critique pour les performances de l'enrobé bitumineux.

S'il s'avère, dans cette phase de la formulation du mélange, que le pourcentage d'ancien liant dans le mélange liant est trop élevé, on dispose des possibilités d'ajustement suivantes:

- Il est possible d'augmenter davantage la teneur en liant afin qu'il y ait proportionnellement plus de nouveau liant. Bien sûr, il faut dans ce cas vérifier à nouveau les vides du mélange (point 5.3), ainsi que l'indicateur de rigidité du mastic.
- Dans la plupart des cas, il sera nécessaire de réduire la quantité d'agrégats d'enrobés bitumineux, ce qui implique de modifier la composition des granulats secs (point 5.2).
- Une autre option consiste à utiliser d'autres agrégats d'enrobés bitumineux avec une teneur plus faible en ancien liant (point 5.1).

En cas d'ajout à chaud et de temps de mélange suffisant, on suppose en théorie que l'ancien et le nouveau liant se mélangent complètement. Dans ce cas, les caractéristiques empiriques du bitume mixte peuvent être estimées à l'aide des lois de mélange connues (point 3.5.2).

Cela permet, dans le cas des bitumes routiers, d'estimer théoriquement la classe de pénétration dans laquelle le bitume mixte tombe. Si le bitume mixte tombe dans une classe trop basse (ou trop élevée), il convient de choisir un nouveau liant d'une classe supérieure (ou inférieure) ou d'opter pour un autre agrégat d'enrobés bitumineux.

Le tableau 5.5 présente les résultats pour l'exemple de mélange de type AC20-base3. L'ancien liant représente environ 46 % du liant total.

	% m dans le mélange	% m dans le bitume mixte	Pen (en 0,1 mm)	T _{A&B} (en °C)
Nouveau	2,54 %	54,1 %	68	47,3
Ancien	2,16 %	45,9 %	16	70,0
Total	4,70 %	100,0 %	35	57,7

Tableau 5.5 – Composition et caractéristiques empiriques du bitume mixte

5.3.4 Prédiction de la rigidité du mélange

Les points précédents ont expliqué comment déterminer théoriquement la composition du mélange et comment l'optimiser afin d'obtenir une volumétrie appropriée, c'est-à-dire un volume approprié de granulats, de liant et de vides. D'autres paramètres importants ont également été contrôlés, tels que la rigidité du mastic et la composition du liant en cas d'utilisation d'agrégats d'enrobés bitumineux.

Avec les modèles théoriques actuels et la connaissance limitée des paramètres requis, la prédiction théorique des résultats des essais performantiels n'est pas encore suffisamment fiable. Il est donc nécessaire de procéder à des essais dans la phase suivante afin d'évaluer correctement les performances du mélange.

La rigidité du mélange, quant à elle, peut être estimée avec une certaine fiabilité en utilisant la formule (Francken & Vanelstraete, 1996) :

$$\log\left(\frac{E^*}{E_\infty}\right) = \log\left(\frac{G_b^*}{G_{b\infty}}\right) \left[1 - 1.35 * \left(1 - \exp\left(-0.13 * \frac{v_{agg}}{v_b}\right) \right) * (1 + 0.11 * \log\left(\frac{G_b^*}{G_{b\infty}}\right)) \right] \quad (5.1)$$

où:

E^* : le module de rigidité du mélange, à une température et une fréquence données

G_b^* : le module de cisaillement du liant, à la température et à la fréquence correspondantes

E_∞ : le module dit «de verre» du mélange, c'est-à-dire le module approché à très basse température et haute fréquence, et qui dépend de la composition volumétrique selon:

$$E_\infty = 14360 * \left(\frac{v_{agg}}{v_b}\right)^{0.55} * \exp(-0.0584 * V) \quad (\text{en MPa}) \quad (5.2)$$

où:

v_{agg}/v_b : le rapport entre le volume de granulat et le volume de liant

V : les vides du mélange

$G_{b\infty}$: le module de verre du liant, c'est-à-dire le module de cisaillement approché à très basse température et haute fréquence

Le module de cisaillement du liant peut être déterminé par une mesure DSR (Annexe 2), et encodé directement dans PradoWeb comme caractéristique du matériau, pour chaque combinaison de température et de fréquence. Pour le bitume routier, le module de cisaillement approximatif peut être déduit des caractéristiques empiriques ρ_n et $T_{A\&B}$ en utilisant le nomogramme de Van der Poel (Shell Handbook).

Ces formules sont implémentées dans PradoWeb, afin que l'impact des changements dans le choix et/ou la composition des matériaux sur la rigidité du mélange puisse être estimé. Cependant, une vérification ultérieure par un essai de rigidité reste nécessaire.

5.4 Vérification expérimentale des vides

Une fois le mélange optimisé sur le plan théorique, on peut procéder à des essais en laboratoire.

Les vides sont une caractéristique volumétrique qui est essentielle pour toutes les caractéristiques performantielles du mélange. Par conséquent, le premier essai est toujours l'essai de compactage giratoire, qui permet de vérifier les vides calculés du mélange.

Comme expliqué précédemment au point 4.2.3, le calcul dans PradoWeb des VMA, et donc des vides, est adapté au compactage giratoire. Les vides calculés théoriquement avec PradoWeb peuvent donc être directement confrontés au résultat de mesure de l'essai de compactage giratoire.

La corrélation entre les vides calculés et les vides mesurés est assez bonne, comme le montre la figure 5.4. Ce graphique utilise les données de différents types de mélanges récemment testés dans le compacteur giratoire du CRR et calculés à l'aide de l'application PradoWeb. Le coefficient directeur est d'environ 1 et la corrélation est assez bonne, compte tenu de la précision des données d'encodage (caractéristiques des composants), des restrictions du modèle théorique et de l'incertitude de mesure de l'essai de compactage giratoire lui-même.

La prédiction théorique des vides est surtout utile car elle permet de prévoir l'impact de certains changements. Si l'essai de compactage giratoire devait révéler qu'il faut adapter les vides dans une certaine mesure et une certaine direction, il suffirait généralement d'ajuster la formulation théorique pour que les vides calculés changent dans la même mesure et la même direction.

Si le formulateur travaille toujours avec le même compacteur giratoire et constate que l'écart entre les vides calculés et les vides mesurés est systématique, il peut déjà anticiper cet écart systématique, inhérent au dispositif de mesure utilisé, lors de la formulation théorique.

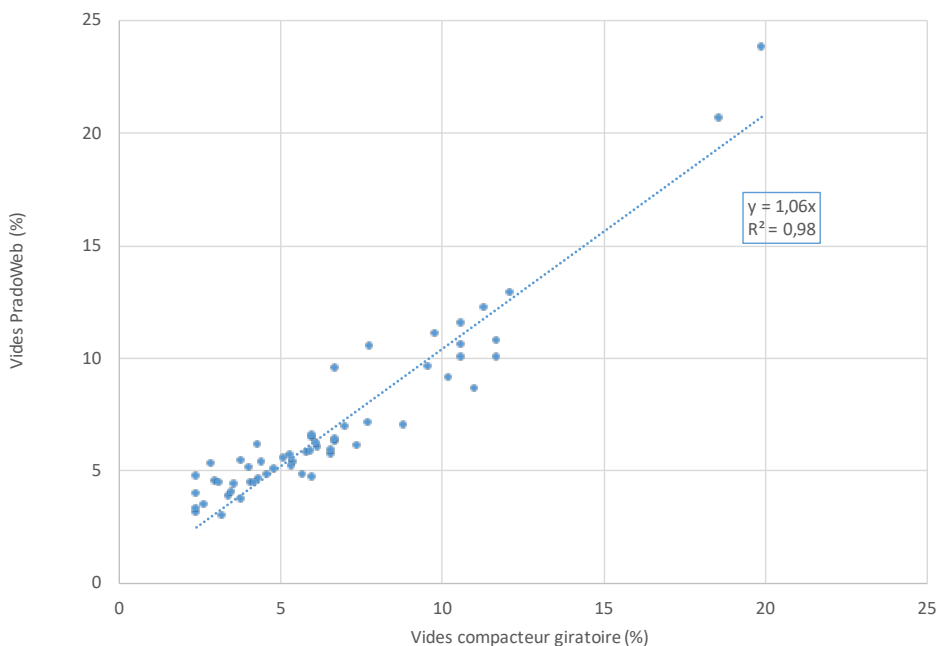


Figure 5.4 – Corrélation entre les vides calculés et les vides mesurés

5.5 Vérification expérimentale des performances du mélange

L'étape finale de la formulation des mélanges consiste en la vérification expérimentale des performances du mélange qui, selon le type de mélange et l'application, doivent répondre à certaines exigences.

Lorsque les résultats d'essai sont conformes aux exigences posées, la formulation du mélange est terminée. Si ce n'est pas le cas, il faut réfléchir à la meilleure façon d'ajuster la formulation du mélange pour améliorer la ou les performances. Pour cela, il est nécessaire d'avoir une bonne compréhension de l'impact des composants et de la volumétrie sur l'ensemble des performances du mélange. Le chapitre suivant décrit les différentes options possibles.

Si, dans cette phase, la formulation du mélange doit encore être ajustée, on reviendra toujours à la phase de formulation théorique. PradoWeb permet d'effectuer rapidement des modifications - qu'il s'agisse d'un ajustement de la composition ou d'un choix différent d'un ou plusieurs composants. Il est ainsi possible de recalculer et révérifier rapidement l'impact du changement sur la volumétrie et la rigidité du mastic, avant de reprendre les essais. Il est important de tenir à l'œil tous les paramètres cruciaux décrits précédemment.

6. Impact des composants et de la volumétrie sur les performances du mélange

Ce chapitre décrit l'impact des caractéristiques des composants et de la composition volumétrique sur les principales caractéristiques performantielles. Il est essentiel de bien comprendre cet impact:

- pour prévoir les conséquences des choix que l'on fait lors de la formulation théorique des mélanges;
- pour connaître les options possibles pour rectifier le mélange au cas où il ne répondrait pas aux exigences performantielles spécifiées.

Il est donc important de tenir compte des éléments suivants lors de la formulation théorique initiale du mélange lors de l'ajustement de la formulation sur la base des résultats des différents essais performantiels et lors de tout autre ajustement qui pourrait s'avérer nécessaire (par exemple, en raison de changements dans les caractéristiques des matériaux par la suite).

Le tableau 6.1 à la fin de ce chapitre montre, pour chaque caractéristique performantielle, les principaux paramètres exerçant une influence. Parallèlement, ce tableau indique aussi les conséquences possibles d'un certain choix pour les autres performances.

En outre, il existe de nombreux additifs possibles qui ont un impact sur les caractéristiques performantielles, tels que les dopes d'adhésivité ou les produits régénérants. L'ajout de ces additifs permet d'améliorer certaines caractéristiques performantielles sans autre modification de la formulation du mélange. Il serait trop ambitieux de discuter des types d'additifs et de leur impact sur les performances des mélanges et ce serait, de plus, rapidement dépassé, étant donné les nouveaux développements multiples dans ce domaine.

Le code de bonne pratique CRR (Code de bonne pratique pour le choix du revêtement bitumineux lors de la conception ou de l'entretien des chaussées, 2020) approfondit l'importance des caractéristiques performantielles, en fonction des applications possibles du mélange.

6.1 Maniabilité et aptitude au compactage

La maniabilité peut être décrite comme la facilité avec laquelle un mélange est répandu et fini sur le chantier. Elle est particulièrement importante lorsqu'il s'agit d'une mise en œuvre manuelle.

Après l'épandage, le mélange doit être compacté, ce qui entraîne une diminution des vides et une augmentation du contact entre les granulats. L'aptitude au compactage est la facilité avec laquelle le mélange peut être compacté.

La maniabilité et l'aptitude au compactage sont des propriétés cruciales du mélange, car elles déterminent la qualité de la production et de la mise en œuvre. Ce code de bonne pratique analyse ces propriétés car elles sont influencées de manière significative par la formulation du mélange.

Pour une bonne maniabilité et aptitude au compactage, il faut s'assurer que la consistance (rigidité et viscosité) du liant est suffisamment faible en choisissant une température de mélange et une température de compactage adaptées au liant: plus le liant est dur, plus ces températures doivent être élevées. Cependant, dès que le liant se mélange au filler, c'est le mastic qui détermine en grande partie la maniabilité et l'aptitude au compactage. C'est pourquoi l'indicateur de rigidité du mastic est si important pour la maniabilité et l'aptitude au compactage. Un indicateur de rigidité du mastic trop élevé peut entraîner des problèmes lors de la production et de la mise en œuvre du revêtement bitumineux.

À l'heure actuelle, il n'existe pas encore de méthode d'essai validée pour mesurer la maniabilité en laboratoire. L'aptitude au compactage peut être déterminée à l'aide de l'essai de compactage giratoire (Annexe 1).

Afin d'améliorer la maniabilité et l'aptitude au compactage d'un mélange, les choix suivants peuvent être opérés:

Liant

Un liant à faible viscosité dans la plage des températures de compactage et de mise en œuvre améliorera la maniabilité.

Teneur en liant

Une quantité plus importante de liant augmente la quantité de mastic et le rapport liant/filler, ce qui réduit la rigidité du mastic. Cela a un effet nettement favorable sur la maniabilité.

Angularité des granulats

Les grains ronds roulent plus facilement les uns sur les autres que les grains anguleux, si bien que l'augmentation du rapport sable rond/sable de concassage améliore la maniabilité.

Granulométrie

Un rapport sable/pierre plus élevé améliore la maniabilité, car en raison de la grande quantité de grains de sable, les pierres «roulent» plus facilement les unes sur les autres pendant le mélange et le compactage. Les mélanges à squelette sableux sont donc généralement plus faciles à mettre en œuvre et plus adaptés à une mise en œuvre manuelle que les mélanges à squelette pierreux.

Rigidité du mastic

A mesure que le liant se mélange au filler, c'est le mastic qui reprend le rôle de lubrifiant. Une faible rigidité du mastic dans la plage des températures de compactage et de mise en œuvre favorise donc la maniabilité et l'aptitude au compactage. Une faible rigidité du mastic peut être obtenue en apportant une ou plusieurs des adaptations suivantes (point 4.4):

- un choix approprié de liant (point 6.1.1);
- une augmentation de la teneur en liant (point 6.1.2);
- une réduction de la teneur en filler;
- le choix d'un filler ayant un effet rigidifiant moindre, c'est-à-dire un filler dont les vides Rigden sont inférieurs.

Agrégats d'enrobés bitumineux

L'utilisation d'agrégats d'enrobés bitumineux n'a pas d'impact systématique sur la maniabilité ou l'aptitude au compactage. L'impact dépendra de la qualité et des propriétés des agrégats d'enrobés bitumineux ainsi que de la formulation du mélange. Les propriétés des agrégats d'enrobés bitumineux qui ont le plus d'impact sur la maniabilité et l'aptitude au compactage sont les suivantes:

- la viscosité du liant, qui est généralement très élevée pour le liant vieilli;
- l'angularité des grains, qui peut diminuer par usure, fraisage, criblage et autre traitement des agrégats d'enrobés bitumineux.

6.2 Rigidité

La rigidité est une caractéristique des matériaux qui indique dans quelle mesure un matériau résiste à la déformation sous l'influence d'une charge mécanique. La rigidité est caractérisée par le module de rigidité, qui est le rapport entre l'ampleur de la contrainte et celle de la déformation (unité: N/m² ou Pa). La rigidité du bitume dépend fortement de la température et de la fréquence de la charge.

Un rhéomètre dynamique (DSR), dans lequel le liant est soumis à une charge sinusoïdale en mode cisaillement, permet de mesurer la rigidité en cisaillement (module de cisaillement) en fonction de la température et de la fréquence (NBN EN 14470, Annexe 2).

La figure 6.1 montre le résultat d'une mesure DSR. La rigidité maximale est atteinte à très basse température et à haute fréquence et est caractérisée par ce que l'on appelle le «module de verre».

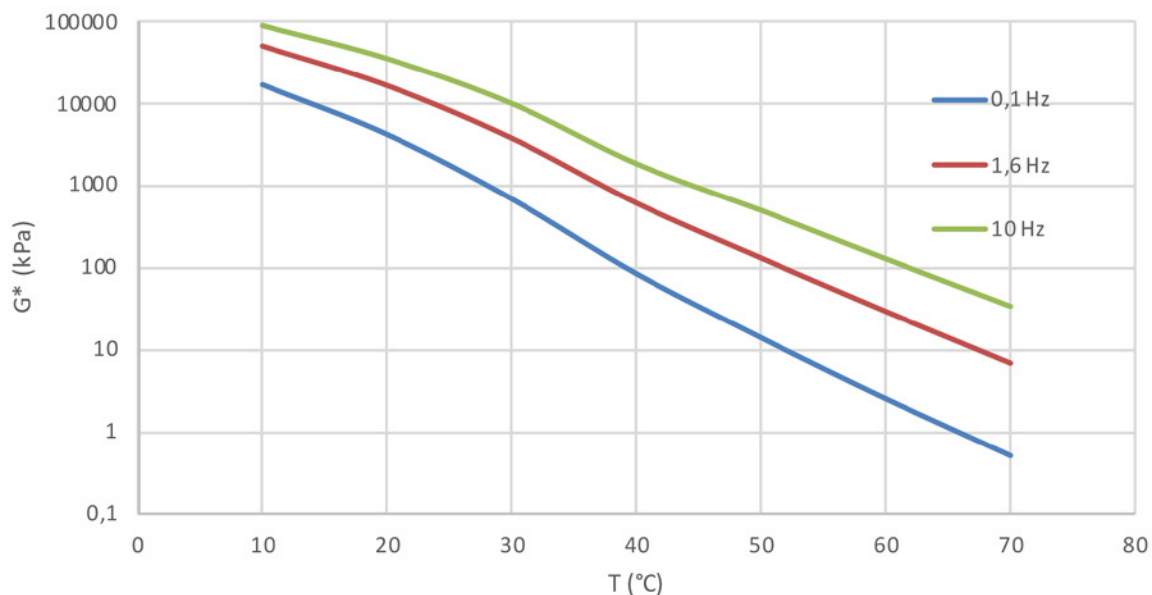


Figure 6.1 – Module de cisaillement (module de rigidité en cisaillement) d'un liant bitumineux en fonction de la température et de la fréquence

La rigidité d'un mélange bitumineux dépend de la rigidité de ses composants et de la composition volumétrique. Vu que le granulat est beaucoup plus rigide que le liant, le granulat peut être considéré comme indéformable et seules la rigidité du liant et la volumétrie sont déterminantes pour la rigidité du mélange. Cela a permis de déduire une formule empirique pour la rigidité du mélange, basée sur la rigidité du liant, les vides du mélange et le rapport entre le volume de granulats et le volume de liant (v_{agg}/v_b) (Francken and Vanelstraete 1993) (point 5.3.4).

En Belgique, un essai de flexion en deux points sur des éprouvettes trapézoïdales est utilisé pour déterminer la rigidité des mélanges bitumineux (NBN EN 12697-26, Annexe 1).

La rigidité du mélange est influencée par les facteurs suivants:

Liant

Une plus grande rigidité du liant entraîne naturellement une plus grande rigidité du mélange (point 5.3.4).

Dans le cas du bitume routier, la classe de pénétrabilité est indicative pour la rigidité. Pour les autres liants, le module de cisaillement sera examiné, à la température et à la fréquence correspondantes.

Les mélanges bitumineux présentent donc une rigidité élevée par temps froid et une rigidité plus faible par temps chaud, en raison de la dépendance du liant à la température. Cette dépendance à la température peut être réduite en utilisant un liant qui est moins dépendant de la température. Les liants modifiés par des polymères constituent un bon choix à cet égard.

Teneur en liant

Pour une même composition de granulats minéraux, c'est-à-dire des vides égaux dans le granulat minéral, une teneur en liant plus élevée conduira à des vides plus faibles et à un rapport volumique v_{agg}/v_b plus faible également. Il en résulte une plus faible rigidité du mélange (figure 6.2). Notez que cet effet est plutôt limité.

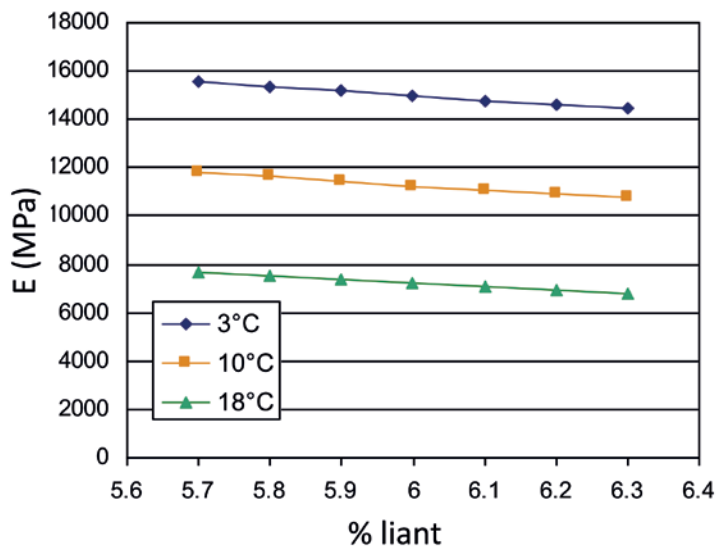


Figure 6.2 – Impact de la teneur en liant sur la rigidité du mélange, pour une même composition de granulats minéraux

Vides

Si les vides augmentent consécutivement à la réduction de la teneur en liant alors que les vides dans le granulat minéral restent constants, on obtient une plus grande rigidité du mélange.

Cependant, si la teneur en liant reste constante, les vides plus élevés sont la conséquence de vides plus élevés dans le granulat minéral ou d'un moins bon compactage, ce qui aboutit à un mélange moins rigide. L'impact des vides sur la rigidité du mélange n'est donc pas sans ambiguïté.

Rigidité du mastic

Une augmentation de la rigidité du mastic entraîne également une augmentation de la rigidité du mélange. Elle peut être atteinte en choisissant un liant à rigidité élevée et/ou en réduisant la teneur en liant (voir ci-dessus). D'autres options consistent à augmenter la teneur en filler ou à choisir un filler plus rigide, c.-à-d. un filler dont les vides Rigden sont plus élevés.

Agrégats d'enrobés bitumineux

L'augmentation de la quantité d'agrégats d'enrobés bitumineux peut accroître ou réduire la rigidité du mélange, en fonction des caractéristiques des agrégats d'enrobés bitumineux.

En raison du vieillissement, l'ancien liant a généralement une plus grande rigidité que le nouveau liant, et la rigidité augmentera généralement à mesure que l'on utilisera plus d'agrégats d'enrobés bitumineux.

Cependant, ce n'est pas toujours le cas. Si le nouveau liant a également une rigidité très élevée, comme dans le cas des EME (Enrobés à Module Élevé), il peut arriver que l'utilisation d'agrégats d'enrobés bitumineux réduise la rigidité du mélange au lieu de l'augmenter.

En plus des caractéristiques du liant, les caractéristiques du filler influencent également la rigidité. Le remplacement partiel d'un filler d'apport à teneur élevée en vides Rigden (c.-à-d. un filler au pouvoir rigidifiant élevé) par un filler plus faible présent dans les agrégats d'enrobés bitumineux peut aussi entraîner une diminution de la rigidité du mélange.

6.3 Résistance à l'orniérage

L'orniérage est le phénomène de déformation permanente résultant des passages répétés des roues. Il se manifeste principalement par temps chaud, lorsque le liant est le plus sensible à la déformation permanente, et à des endroits où le trafic est lourd et lent. La résistance à l'orniérage est donc fortement déterminée par le comportement rhéologique du liant aux températures de service plus élevées et aux basses fréquences. La stabilité du squelette minéral joue également un rôle crucial.

La résistance à l'orniérage est mesurée en laboratoire à l'aide d'un simulateur de trafic, dans lequel deux dalles-échantillons sont soumises à des passages répétés des roues à une température plus élevée (en Belgique 50 °C) (NBN EN 12697-22, Annexe 1).

Une résistance élevée à l'orniérage peut être obtenue en faisant les choix suivants:

Liant

Pour le bitume routier, le point de ramollissement $T_{A\&B}$ est un bon indicateur: plus ce point de ramollissement est élevé, meilleure est la résistance à la déformation dans la plage de température critique dans laquelle se produit l'orniérage.

L'utilisation de liants modifiés par des polymères a un effet très favorable sur la résistance à l'orniérage. Cela est en partie dû à leur rigidité, qui est mieux maintenue à des températures plus élevées, mais surtout à leur capacité à récupérer leur élasticité lorsque la charge est enlevée. Le point de ramollissement $T_{A\&B}$ est moins approprié comme indicateur dans le cas des liants modifiés par des polymères. Une évaluation plus précise de la résistance à la déformation permanente des liants modifiés par des polymères et d'autres types de liant sera basée sur des essais spécifiques tels que le test MSCR (*Multiple Stress Creep and Recovery test*) (NBN, 2016c, Annexe 2).

Teneur en liant

Le liant étant le composant le plus sensible à la déformation, sa teneur doit être maintenue aussi faible que possible si l'on veut concevoir un mélange présentant une résistance élevée à l'orniérage.

Granulométrie

Les mélanges présentant une granulométrie discontinue et une fraction de pierre élevée offrent généralement une meilleure résistance à la déformation. La discontinuité est obtenue en limitant ou en éliminant une certaine fraction, généralement la fraction comprise entre 2 et 4 mm ou entre 2 et 6,3 mm, selon le calibre maximal des grains. Cela garantit un bon blocage des grains de pierre anguleux et un squelette stable.

Angularité des granulats

Plus les granulats sont anguleux, meilleure est leur résistance à la déformation. En fait, l'angularité empêche le mouvement relatif des grains et est donc cruciale pour la stabilité du squelette minéral.

Rigidité du mastic

Une rigidité élevée du mastic assure une faible déformation et empêche ainsi le mouvement relatif des grains minéraux. Une rigidité élevée du mastic peut être obtenue en apportant une ou plusieurs adaptations suivantes: rigidité élevée du liant, diminution de la teneur en liant, augmentation de la teneur en filler ou choix d'un filler plus rigidifiant (vides Rigden plus élevés).

Agrégats d'enrobés bitumineux

Dans de nombreux cas, l'augmentation de la quantité d'agrégats d'enrobés a un impact positif sur la résistance à l'orniérage, car le vieillissement du liant a entraîné une augmentation du point de ramollissement $T_{A\&B}$.

Toutefois, dans le cas où le nouveau liant a également une résistance très élevée à la déformation, comme dans le cas des Enrobés à Module Élevé (EME), il peut arriver que l'utilisation d'agrégats d'enrobés bitumineux ait un impact négatif sur l'orniérage.

En outre, l'angularité des granulats peut également jouer un rôle. Il se peut que les agrégats d'enrobés bitumineux soient moins anguleux consécutivement à un phénomène d'usure, de fraisage ou à un autre traitement, ce qui peut également avoir un effet néfaste sur la résistance à l'orniérage.

Si le choix du nouveau liant est adapté aux caractéristiques de l'ancien liant, de telle sorte que le bitume mixte reste dans une même classe selon les lois de mélange, il ne faut pas s'attendre à ce que l'utilisation d'agrégats d'enrobés bitumineux ait un impact important. Cependant, la prudence est de mise lorsqu'on opte pour un nouveau bitume très mou: s'il n'y a pas un bon mélange avec l'ancien liant dur, il reste une phase très molle et sensible à la déformation, ce qui est très préjudiciable à la résistance à l'orniérage.

6.4 Sensibilité à l'eau

L'eau a un impact négatif sur la cohésion du mélange, en raison de la détérioration de l'adhésivité entre le liant et le granulat.

En Belgique, la sensibilité à l'eau est mesurée par un essai de traction indirecte sur carottes. La résistance à la traction d'une série d'éprouvettes, conditionnées dans l'eau, est comparée à la résistance à la traction d'une série d'éprouvettes non conditionnées. Plus ce rapport entre ces résistances est faible, plus le mélange est sensible aux effets de l'eau sur la cohésion (NBN EN 12697-12, Annexe 1).

La sensibilité à l'eau est fortement déterminée par les paramètres suivants du mélange:

Teneur en liant

Une teneur élevée en liant garantit un bon enrobage complet du granulat minéral. L'eau a alors plus de mal à accéder à l'interface entre le bitume et le granulat, ce qui limite la sensibilité à l'eau. Dans le même temps, avec les mêmes vides dans le granulat minéral, la teneur en liant plus élevée entraîne des vides plus faibles, ce qui signifie que l'eau ne pénètre pas aussi profondément dans la masse du mélange.

Vides

Un faible niveau de vides limite la pénétration de l'eau et réduit ainsi la sensibilité à l'eau.

Cela ne signifie pas que les VMA doivent nécessairement être faibles. Des mélanges avec des VMA élevés peuvent encore avoir une faible sensibilité à l'eau, à condition que la teneur en liant soit suffisamment élevée. Le SMA (*Stone Mastic Asphalt*) en est un exemple. Il présente généralement une faible sensibilité à l'eau, grâce au film de mastic épais et uniforme qui enrobe les grains de pierre.

Affinité liant/granulat

Une bonne adhésivité du liant au granulat empêche la pénétration de l'eau à l'interface et réduit ainsi la sensibilité à l'eau. Cette adhésivité dépend du choix du granulat. Le calcaire, par exemple, présente une très bonne affinité avec les liants. L'adhésivité peut, si nécessaire, être améliorée par l'ajout d'un dope d'adhésivité (par exemple, de la chaux hydratée).

Agrégats d'enrobés bitumineux

L'augmentation de la quantité d'agrégats d'enrobés bitumineux n'a pas d'impact systématique sur la sensibilité à l'eau. Les agrégats d'enrobés bitumineux peuvent avoir un impact positif si l'ancien liant adhère fortement à l'ancien granulat. La nature des granulats joue également un rôle.

Cependant, tout dépend de l'impact des agrégats d'enrobés bitumineux sur l'aptitude au compactage. Si le mélange est plus difficile à compacter à cause des agrégats d'enrobés bitumineux, l'augmentation de la teneur en vides entraînera une plus grande sensibilité à l'eau, mais s'il est plus facile à compacter, cela entraînera une teneur réduite en vides et une sensibilité à l'eau plus faible.

6.5 Résistance à la fatigue

La fatigue se produit consécutivement à l'accumulation de microfissures, sous l'influence de contraintes répétées. Après un grand nombre de charges répétées (c.-à-d. passages des roues), des fissures de fatigue se développent. Elles apparaissent généralement au bas des sous-couches, là où se produisent les contraintes de traction les plus élevées. Ce type de fissure de fatigue entraîne une réduction drastique de la portance de la structure routière.

En Belgique, la résistance à la fatigue, tout comme la rigidité, est mesurée en laboratoire dans le cadre d'un essai de flexion en deux points sur des éprouvettes trapézoïdales. Les éprouvettes sont soumises à une charge cyclique contrôlée par déformation à température et fréquence constantes jusqu'à la rupture. L'amplitude de déformation la plus élevée avec laquelle il est possible d'atteindre 1 million de cycles est une mesure de la résistance à la fatigue (NBN EN 12697-26, Annexe 1).

La fatigue étant un phénomène très complexe, l'impact de la formulation du mélange est très difficile à prévoir. En outre, la fatigue est dans une certaine mesure réversible pendant les périodes de repos, car les surfaces des fissures peuvent fusionner à nouveau (effet *healing*). Les paramètres de mélange suivants ont un impact démontrable sur le comportement de fatigue:

Liant

Pour une bonne résistance à la fatigue, il faut utiliser un liant capable de supporter de grandes déformations répétées sans se fissurer. Ce sont les liants modifiés par des polymères qui sont les plus performants à cet égard. Une bonne adhésivité au granulat a également un impact positif, car cela ralentit le développement de microfissures à l'interface.

Teneur en liant

Une teneur plus élevée en liant entraîne un meilleur enrobage des grains minéraux et, par conséquent, une bonne cohésion du mélange, ce qui réduit la sensibilité à la fissuration.

Vides

Vu que les microfissures se propagent facilement par le biais des vides, une teneur élevée en vides nuit à la résistance à la fatigue.

Affinité liant/granulat

Une bonne adhésivité du liant au granulat empêche l'apparition de microfissures à l'interface. L'utilisation de calcaire ou l'ajout d'un dope d'adhésivité peut donc améliorer la résistance à la fatigue.

6.6 Résistance au plumage

Le plumage est le phénomène de perte de pierres à la surface. Le plumage nuit gravement au confort et à la sécurité de l'usager de la route, augmente la résistance au roulement et évolue rapidement vers des formes graves de dégradations comme les nids de poule.

Le plumage est causé par des forces de cisaillement locales qui détachent les grains de pierre qui dépassent. On y est le plus souvent confronté dans des zones avec un trafic tangentiel important. Le phénomène se manifeste surtout avec des mélanges présentant une texture superficielle ouverte, comme le SMA, l'enrobé drainant ou certains types de couches antibruit.

En laboratoire, le plumage est mesuré à l'aide d'un appareil qui simule l'action d'un pneu qui exerce une force tangentielle sur une dalle-éprouvette (NBN EN 12697-50, Annexe 1).

Les paramètres de formulation suivants ont un impact sur la résistance au plumage.

Liant

Le liant doit bien adhérer au granulat et présenter une bonne résistance à la fissuration. Les mélanges contenant des liants modifiés par des polymères sont donc plus performants en termes de résistance au plumage.

Teneur en liant

Un bon enrobage des pierres est nécessaire pour une bonne adhésivité à la surface. La teneur en liant doit donc être suffisamment élevée.

Vides

Une faible teneur en vides favorise la cohésion et entraîne donc une diminution de la perte de pierres en surface. L'enrobé drainant est donc un mélange particulièrement critique pour le plumage.

Granulométrie

Une fraction sable/pierre élevée et une granulométrie continue favorisent la cohésion et entraînent une réduction de la macrotecture. Les pierres s'insèrent mieux entre les grains plus fins, ce qui les empêche de se détacher. Le béton bitumineux n'est donc pas très sensible aux dommages causés par le plumage.

Affinité liant/granulat

Une bonne adhésivité du liant au granulat empêche le détachement des pierres.

6.7 Résumé

Le tableau 6.1 donne un aperçu des principaux paramètres du mélange (caractéristiques des matériaux et caractéristiques volumétriques) et de la façon dont ces paramètres peuvent améliorer les différentes caractéristiques performantielles. Pour une formulation équilibrée du mélange, on choisira en premier lieu des adaptations qui n'auront que peu ou pas d'effet négatif sur les autres caractéristiques performantielles, qui peuvent également être importantes pour l'application.

Aucune tendance générale ne peut être dégagée concernant l'impact de l'utilisation d'agrégats d'enrobés bitumineux. L'impact dépend de la qualité et des propriétés des agrégats d'enrobés bitumineux, du type de mélange et de la formulation même du mélange, en particulier du choix du nouveau liant. En tout état de cause, il est important que les caractéristiques des agrégats d'enrobés bitumineux homogènes, telles que listées au point 3.5, soient déterminées le plus précisément possible et incluses dans la formulation du mélange.

Pour de nombreuses applications aux exigences élevées, l'utilisation de liants modifiés par des polymères offre une solution pour améliorer à la fois la stabilité et la durabilité à long terme. Cela s'explique par leur comportement rhéologique: par rapport au bitume routier ordinaire, les PmB sont plus rigides et moins visqueux à haute température et, à l'inverse, moins rigides et plus élastiques à basse température. Ils améliorent donc à la fois la résistance à l'orniérage, qui se produit à des températures de service plus élevées, et la résistance à la fissuration, plus critique à des températures plus basses. La maniabilité, cependant, est un point d'attention particulier: les mélanges avec des liants modifiés par des polymères sont généralement moins maniables. Il convient donc de faire très attention à la température de mise en œuvre.

Enfin, il convient également de mentionner la possibilité d'utiliser des additifs pour améliorer certaines performances. En raison de l'étendue de l'offre et de la variété des types d'additifs disponibles dans le commerce aujourd'hui, il est impossible de les énumérer tous. Le formulateur doit être conscient que chaque additif peut avoir une influence positive sur une caractéristique précise, mais négative sur d'autres caractéristiques.

Les points précédents et le tableau 6.1 montrent qu'un équilibre global doit être trouvé entre la rigidité et la résistance à l'orniérage (stabilité), d'une part, et la résistance au plumage, à la fatigue, à la fissuration et à l'action de l'eau (durabilité à long terme), d'autre part. En effet, une adaptation du mélange pour une meilleure stabilité a souvent un effet néfaste sur sa durabilité à long terme, et vice versa. Néanmoins, il est possible d'équilibrer les deux par une formulation logique du mélange basée sur les principes volumétriques. C'est ce qui ressort des exemples illustrés au chapitre suivant.

	Maniabilité/ aptitude au compactage	Rigidité	Résistance à l'ornièrage	Sensibilité à l'eau	Résistance à la fatigue	Résistance au plumage
Choix du liant	faible viscosité à la température de mélange et de mise en œuvre (dépend du choix approprié des températures de production)	faible pénétrabilité ⁽¹⁾ G* élevé (à température et fréquence correspondantes)	T _{ASB} élevée ⁽¹⁾ Faible J _{IR} (test MSCR) (dans la plage 40-70 °C)	-	effet positif des PmB	effet positif des PmB
Choix du filler	vides Rigden faibles	vides Rigden élevés	vides Rigden élevés	filler calcaire (de préférence)	-	-
Choix du granulat	-	-	-	calcaire ou grès	-	-
Angularité des granulats	faible	-	élevée	-	-	-
Rapport pierre/sable ou granulométrie discontinue	faible	-	élevé	-	-	faibles
Teneur en liant	élevée	faible	faible	élevée	élevée	élevée
Vides	-	-	élevés	faibles	faibles	faibles
Rigidité du mastic⁽²⁾	faible	élevée	élevée	-	-	-
Affinité liant/granulat	-	-	-	élevée	élevée	élevée

⁽¹⁾ Bon indicateur uniquement dans le cas du bitume routier

⁽²⁾ Rigidité élevée du mastic due à: un liant rigide, une faible teneur en liant, une teneur élevée en filler et un filler avec des vides Rigden élevés

Tableau 6.1 – Tableau récapitulatif des influences des paramètres de formulation du mélange et de la volumétrie sur les performances du mélange



7. Exemples pratiques

Ce chapitre donne quelques exemples pour illustrer la formulation des mélanges bitumineux. Il montre la formulation, qui commence par la formulation théorique (exemples calculés avec PradoWeb) et la manière d'ajuster la formulation quand le mélange ne répond pas aux exigences performantielles fixées.

7.1 Formulation d'un mélange SMA

Le SMA ou *Stone Mastic Asphalt* est prescrit comme couche de roulement pour les routes à fort trafic. Une résistance élevée à l'orniérage est donc cruciale. Dans une application comme couche de roulement, la résistance au plumage est également une caractéristique importante.

Comme le nom l'indique, la pierre et le mastic sont les deux principaux composants du SMA: une grande quantité de gravillons fournit un squelette stable et solide et une grande quantité de mastic assure la cohésion. Le mastic doit offrir une résistance suffisante à la déformation.

Cet exemple décrit la formulation d'un mélange SMA 0/10 (sans agrégats d'enrobés bitumineux).

Choix des composants

- Gravillons: type de pierre de très haute qualité, particulièrement résistante à l'usure et à la fragmentation, compte tenu des forces et de l'usure auxquelles les pierres sont exposées. Dans cet exemple, on utilise du porphyre.
- Sable: sable de concassage uniquement, pour la résistance à l'orniérage.
- Filler: filler avec des vides Rigden élevés (en l'occurrence 45 %), pour une rigidité élevée du mastic.
- Liant: bitume modifié par des polymères, pour la résistance à l'orniérage et au plumage.
- Additifs: à titre d'illustration, nous utilisons dans cet exemple de la fibre de cellulose comme inhibiteur d'écoulement, pour éviter la ségrégation entre les pierres et le mastic.

Formulation volumétrique

Pour une bonne stabilité et une bonne résistance à l'orniérage, on choisit un mélange à squelette pierreux, c'est-à-dire un mélange de granulats avec plus de 70 % de pierres. Pour obtenir une granulométrie discontinue entre 2 et 4 mm, on réalise une composition sans fraction granulaire 2/4 mm et avec uniquement une petite fraction 4/6,3 mm. La fraction de pierre est donc principalement constituée de pierres dont le calibre est compris entre 6,3 et 10 mm.

La fraction de sable 0/2 est limitée afin de ne pas perturber le squelette pierreux.

La quantité de filler est choisie élevée, afin:

- que le volume de mastic soit suffisamment élevé pour un bon enrobage des pierres;
- que la rigidité du mastic soit suffisamment élevée pour la résistance à l'orniérage.

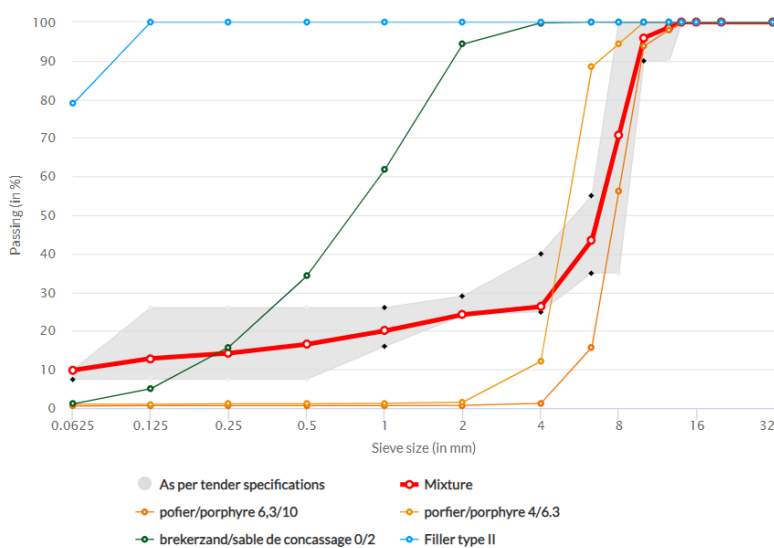
Le tableau 7.1 montre la composition du granulat, en masse et en pourcentages en volume. Dans ce cas, les différences entre les deux sont relativement faibles, car les masses volumiques des granulats ne diffèrent pas beaucoup.

Type	Nom	Masse volumique (Mg/m ³)	Vides Rigden (%)	% m	% v
Gravillons	Porphyre 6.3/10	2,727		65,5	65,6
Gravillons	Porphyre 4/6.3	2,711		10,0	10,1
Sable	Sable de concassage 0/2	2,710		12,5	12,6
Filler d'apport	Filler type II	2,800	45	12,0	11,7
Total		2,732		100,0	100,0

Tableau 7.1 – Composition granulat SMA 0/10 (1^{re} formulation)

La figure 7.1 montre les granulométries des composants et la granulométrie résultante en pourcentages en volume (courbe rouge). La zone grise marque les limites imposées par le cahier des charges type Qualiroutes 2021 pour ce type de mélange (références cahier des charges). La granulométrie est discontinue, avec une évolution presque plate entre 2 et 4 mm. En raison de la faible teneur en sable, le passant à travers le tamis de 2 mm est faible.

Avec cette composition de granulats, PradoWeb calcule des vides dans le squelette minéral (VMA) de 24,8 %.



VMA

24,76%

Figure 7.1 – Granulométries des composants et du mélange conformément à la composition du tableau 7.1 (1^{re} formulation)

Pour des raisons de cohésion et de durabilité, on opte pour une teneur élevée en liant de 6,6 % dans le mélange. Cela conduit aux résultats calculés dans la colonne centrale du tableau 7.2. La rigidité du mastic est très élevée, en raison de la quantité importante de filler et du choix d'un filler à fort pouvoir rigidifiant. Cela peut indiquer une maniabilité difficile. Les vides sont également assez élevés et au-dessus de la limite supérieure indicative du CCT Qualiroutes 2021. Notons que selon le SB 250 v4.1a, ces vides sont encore admissibles, car la limite supérieure est alors à 11 %. Il y a donc un risque que les vides dans le compacteur giratoire ne soient pas satisfaisants.

Dans une deuxième formulation, la teneur en liant est portée à 7 %. Il en résulte à la fois une réduction de la rigidité du mastic, et donc une meilleure maniabilité, et des vides plus faibles, comme le montrent les résultats du tableau 7.2.

Résultats théoriques PradoWeb	SMA 0/10 1 ^{re} formulation	SMA 0/10 2 ^e formulation
Teneur en liant (en %)	6,6	7,0
VMA (%)	24,8	24,8
VFB (%)	57,5	61,3
MSI (°C)	22,8	20,4
MVA (Mg/m ³)	2,201	2,210
MVM (Mg/m ³)	2,459	2,445
Vides (%)	10,5	9,6

Tableau 7.2 – Résultats de l'étude PradoWeb

Compte tenu de la teneur élevée en liant, on ajoute 0,3 % de fibres afin de répondre à l'exigence d'un écoulement maximal. Cette exigence a ensuite été vérifiée par l'essai selon la norme NBN EN 12697-18.

Les vides de la 2^e formulation (mélange avec 7,0 % de liant) ont été vérifiés expérimentalement avec le compacteur giratoire à 120 girations. Le résultat concorde très bien avec l'estimation théorique et répond aux limites indicatives du cahier des charges Qualiroutes 2021 (tableau 7.3).

	Méthode	Vides dans le CCT Qualiroutes 2021 (à titre indicatif)	SMA 0/10 2 ^e formulation
Vides théoriques	PradoWeb	/	9,6 %
Vides du giratoire (120 gir.)	NBN EN 12697-31	5 - 10 %	9,6 % (± 0,4 %)

Tableau 7.3 – Vérification expérimentale des vides

Vérification expérimentale des performances

Avec la deuxième formulation, qui donne de bons résultats théoriques et qui a été vérifiée avec le compacteur giratoire, on passe à la phase des essais performantiels. Le tableau 7.4 présente les résultats. Dans une application comme couche de roulement, la sensibilité à l'eau, la résistance à l'orniérage et la résistance au plumage sont des caractéristiques importantes.

Performance	Méthode	Grandeur mesurée	Exigences du cahier des charges (Qualiroutes 2021)	SMA 0/10 2 ^e formulation
Sensibilité à l'eau	NBN EN 12697-12	ITS-R	≥ 80 %	88 %
Résistance à l'orniérage	NBN EN 12697-22	$P_{3,LD}$	≤ 7,5 % ⁽¹⁾	5,5 %
Résistance au plumage	prCEN TS 12697-50	Perte de masse	néant	23 g/m ²

⁽¹⁾ pour Réseau I ($2000 \leq T \leq 6000$)

Tableau 7.4 – Vérification expérimentale des performances du mélange

Le mélange répond aux exigences du cahier des charges type Qualiroutes pour le Réseau I ($2000 \leq T \leq 6000$). Pour le SMA 0/10, il n'y a pas d'exigences concernant le plumage, car le plumage ne se produit normalement pas avec le SMA avec PmB, à condition de respecter les bonnes pratiques pendant la production et la mise en œuvre. Aussi, le résultat de cet essai est très bon.

Autre ajustement de la formulation

Il est possible d'optimiser davantage ce mélange afin qu'il réponde aux exigences pour le Réseau I ($T > 6000$). La résistance à l'orniérage doit donc être davantage améliorée (profondeur d'orniérage proportionnelle ≤ 5,0 %).

Le tableau 6.1 au chapitre précédent présente les différentes options:

- rapport pierre/sable: plus élevé
- granulométrie discontinue: plus élevée
- teneur en liant: plus faible
- vides: plus élevés
- rigidité du mastic : plus élevée (c'est-à-dire teneur en filler plus élevée et/ou teneur en liant plus faible)

Dans ce cas, il est encore possible:

- d'augmenter encore la discontinuité, en réduisant la fraction 4/6,3 mm (et en augmentant la fraction 6,3/10 pour compenser, afin que le rapport pierre/sable reste maximal);
- de réduire la teneur en liant, ce qui a pour effet d'augmenter les vides et de réduire le coût.

Les deux changements ont été effectués. Le tableau 7.5 montre le changement de la composition du granulat, avec moins de gravillons 4/6.3, et plus de 6.3/10, ce qui augmente légèrement la discontinuité. On remarque au tableau 7.5 que le filler d'apport a des caractéristiques différentes de celles du tableau 7.1. Le filler n'étant plus disponible, un autre filler de type II a été utilisé. Il a des vides Rigden plus faibles (41 % au lieu de 45 %), ce qui réduit encore la rigidité du mastic. Cependant, cela est préjudiciable à la résistance à l'orniérage, mais si l'on réduit également la teneur en liant, l'indicateur de rigidité du mastic reste suffisamment élevé (> 18).

Type	Nom	Masse volumique (Mg/m ³)	Vides Rigden (%)	SMA 0/10 3 ^e formulation	
				% m	% v
Gravillons	Porphyre 6.3/10	2,727		71,5	71,6
Gravillons	Porphyre 4/6.3	2,711		4,0	4,0
Sable	Sable de concassage 0/2	2,710		12,5	12,6
Filler d'apport	Filler type II	2,780	41	12,0	11,8
Total		2,730		100,0	100,0

Tableau 7.5 – Composition modifiée du granulat (3^e formulation)

La teneur en liant a été réduite de 0,2 %, ce qui conduit aux résultats calculés au tableau 7.6.

Résultats théoriques PradoWeb	SMA 0/10 3 ^e formulation
Teneur en liant (en %)	6,8
VMA (%)	24,2
VFB (%)	61,2
MSI (°C)	18,3
MVA (Mg/m ³)	2,221
MVM (Mg/m ³)	2,451
Vides (%)	9,4

Tableau 7.6 – Résultats de l'étude PradoWeb

Les vides ont à nouveau été vérifiés expérimentalement à l'aide de l'essai de compactage giratoire (tableau 7.7). Les vides mesurés sont plus élevés que les vides calculés. Ils sont plus élevés que la limite supérieure du CCT Qualiroutes 2021, mais il s'agit de limites indicatives et non pas d'exigences.

	Méthode	Vides dans le CCT Qualiroutes 2021 (à titre indicatif)	SMA 0/10 3 ^e formulation
Vides théoriques	PradoWeb	/	9,4 %
Vides du giratoire (120 gir.)	NBN EN 12697-31 (NBN, 2019)	5-10 %	10,9 % (± 0,3 %)

Tableau 7.7 – Vérification expérimentale des vides

Vérification expérimentale des performances

Le tableau 7.8 présente les résultats des essais performantiels effectués sur le 3^e mélange de formulation.

	Méthode	Grandeur mesurée	Exigences du cahier des charges (Qualiroutes 2021)	SMA 0/10 3 ^e formulation
Sensibilité à l'eau	NBN EN 12697-12 (NBN, 2018a)	ITS-R	≥ 80 %	84
Résistance à l'orniérage	NBN EN 12697-22 (NBN, 2020b)	$P_{3,LD}$	≤ 5 % ⁽¹⁾	4,5

⁽¹⁾ pour Réseau I ($T > 6\ 000$)

Tableau 7.8 – Vérification expérimentale des performances du mélange

Comme prévu, cette nouvelle optimisation de la composition engendre une meilleure résistance à l'orniérage, afin de satisfaire pour le Réseau I ($T > 6\ 000$). La sensibilité à l'eau répond toujours aux exigences, mais elle a légèrement diminué par rapport à la 2^e formulation. C'est un changement logique, vu que le mélange est devenu plus discontinu, avec moins de liant et des vides plus élevés. La résistance au plumage n'a pas été mesurée, car aucun problème n'est attendu à cet égard.

L'exemple ci-dessus illustre la manière de formuler un SMA et d'obtenir un mélange durable présentant une résistance élevée à l'orniérage.

7.2 Formulation d'un mélange EME

L'EME ou Enrobé à Module Élevé est prescrit comme sous-couche pour les routes à fort trafic. Dans cette application, la rigidité et la résistance à la fatigue du mélange sont extrêmement importantes. La résistance à la déformation permanente est également importante, car l'orniérage peut également se propager aux sous-couches.

L'EME est un mélange qui offre un très bon compromis en termes de durabilité et de résistance à l'orniérage. La durabilité est assurée par une faible teneur en vides. Un liant dur confère au mélange une bonne résistance à la déformation et une très grande rigidité. Comme sous-couche, le mélange contribue ainsi de manière significative à la portance de la route.

Cet exemple décrit la formulation d'un EME 0/14, sans et avec agrégats d'enrobés bitumineux.

Note: la formulation du mélange avec agrégats d'enrobés bitumineux (AEB) a été réalisée dans le cadre d'une recherche. Le mélange contient environ 25 % d'agrégats d'enrobés bitumineux, ce qui se traduira par une proportion d'ancien liant supérieure à ce qui est actuellement autorisé dans certains cahiers des charges types (en fonction de l'homogénéité des agrégats d'enrobés bitumineux). La formulation est présentée ici à titre d'exemple.

Choix des composants

Dans cet exemple, le formulateur opte pour les composants suivants:

- gravillons: calcaire;
- sable: aussi bien du sable de concassage que du sable rond, pour la maniabilité;
- filler: filler de type I, pour la maniabilité;
- liant: bitume dur, pour la résistance à l'orniérage;
- agrégats d'enrobés bitumineux 0/14 mm.

Formulation volumétrique

Pour des raisons de maniabilité et de durabilité, on opte dans cet exemple pour un mélange à squelette sableux présentant une faible teneur en vides. On vise alors des VMA faibles.

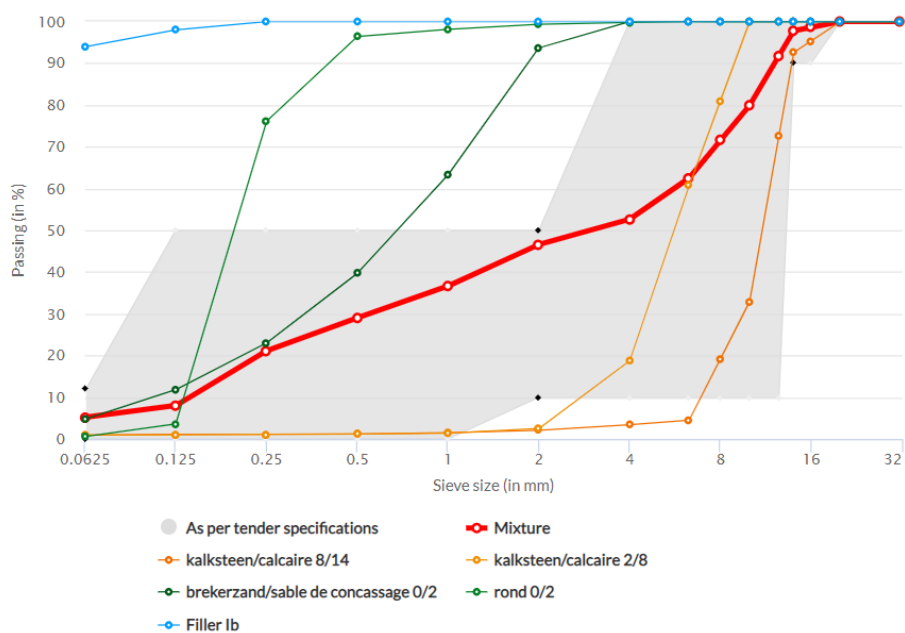
La composition du mélange granulaire avec agrégats d'enrobés bitumineux a été calculée automatiquement dans PradoWeb, en encodant la granulométrie du mélange sans AEB comme granulométrie cible. D'un point de vue volumétrique, les deux mélanges ont donc une granulométrie identique.

Les compositions du tableau 7.9 donnent lieu à de faibles valeurs de VMA (16,7 % pour le mélange sans agrégats d'enrobés bitumineux et 15,9 % pour le mélange avec AEB). La valeur inférieure pour le mélange avec agrégats d'enrobés bitumineux s'explique par le fait que les AEB ont été introduits avec une angularité de 0,5 (c'est-à-dire 50 % de granulats anguleux). Il en résulte des VMA et des vides plus faibles, ce qui est confirmé par l'essai de compactage giratoire (voir ci-dessous pour les résultats de l'essai de compactage giratoire). Le fait que les granulats sont effectivement moins anguleux, en raison de l'usure pendant l'utilisation et le processus de recyclage, peut expliquer les vides plus faibles avec agrégats d'enrobés bitumineux. Il se peut que le pré-enrobage des agrégats d'enrobés bitumineux favorise le compactage. Les vides systématiquement plus faibles d'un mélange

avec agrégats d'enrobés bitumineux par rapport à un mélange équivalent sans AEB avec une granulométrie volumétrique identique, sont généralement bien estimés par PradoWeb, à condition d'encoder une angularité de 0,3 à 0,5 pour les agrégats d'enrobés bitumineux.

Type	Nom	Masse volumique (Mg/m ³)	Vides Rigden (%)	EME 0/14 (sans AEB)		EME 0/14 (avec AEB)	
				% m	% v	% m	% v
Gravillons	Calcaire 8/14	2,844		30,7	29,9	26,0	25,2
Gravillons	Calcaire 2/8	2,838		23,2	22,7	17,1	16,6
Sable	Sable de concassage 0/2	2,710		30,1	30,8	20,8	21,2
Sable	Sable rond	2,661		12,7	13,2	10,3	10,7
Filler d'apport	Filler Ib	2,683	30,9	3,3	3,4	1,3	1,3
Fraction de granulat AEB	RA 0/14					24,4	24,9
Total				100,0	100,0	100,0	100,0

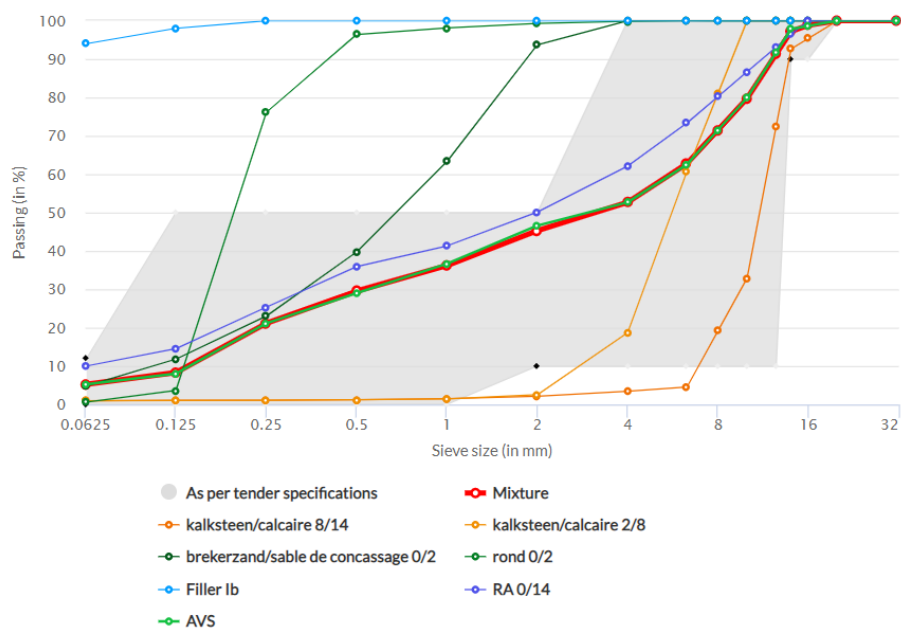
Tableau 7.9 – Composition du granulat pour un mélange EME 0/14, avec et sans agrégats d'enrobés bitumineux



VMA

16,74%

Figure 7.2 – Granulométries des composants et du mélange conformément aux compositions du tableau 7.9 (mélange sans agrégats d'enrobés bitumineux)



VMA

16,20%

Figure 7.3 – Granulométries des composants et du mélange conformément aux compositions du tableau 7.9 (mélange avec agrégats d'enrobés bitumineux)

La maniabilité plus difficile et la sensibilité à la fissuration propres aux mélanges avec un liant dur doivent être compensées par un volume de liant suffisant. Les résultats sont donnés dans le tableau 7.10 avec une teneur en liant de 5,0 % dans le mélange. Dans ce cas, la rigidité du mastic est faible, en raison de la faible teneur en filler et du choix d'un filler avec des vides Rigden relativement faibles (30,9 %). Pour l'EME, un indicateur de rigidité du mastic faible est plutôt souhaitable, car le liant est dur. Un liant dur associé à un indicateur de rigidité du mastic élevé donnerait un mastic très rigide et donc un mélange difficile à mettre en œuvre.

Résultats des calculs PradoWeb	EME 0/14 (sans AEB)	EME 0/14 (avec AEB)
Teneur en liant (en %)	5,0	5,0
VMA (%)	16,7	16,2
VFB (%)	71,2	73,6
MSI (°C)	7,3	7,5
MVA (Mg/m ³)	2,429	2,432
MVM (Mg/m ³)	2,553	2,541
Vides (%)	4,8	4,3
Rigidité à 15 °C, 10 Hz (MPa)	11742	12536

Tableau 7.10 – Résultats de l'étude PradoWeb

Dans le cas du mélange avec agrégats d'enrobés bitumineux, il faut également tenir compte de la composition et des propriétés du liant, qui est constitué en partie du nouveau liant et en partie de l'ancien liant dans les agrégats d'enrobés bitumineux (tableau 7.11). Dans cet exemple, où le nouveau liant est un liant dur, les caractéristiques empiriques du nouveau et de l'ancien liant diffèrent à peine. Le mélange de liants aura donc également pratiquement les mêmes caractéristiques. La proportion d'ancien liant, 26,8 %, est supérieure à ce qui est actuellement autorisé (20 %), dans certains cahiers des charges types (en fonction de l'homogénéité des agrégats d'enrobés bitumineux).

	%	Pen (en 0,1 mm)	T _{A&B} (en °C)
Nouveau	73,2	13,0	78,4
Ancien	26,8	17,0	67,3
Mélange	100	14,0	75,4

Tableau 7.11 – Composition et propriétés du liant du mélange avec agrégats d'enrobés bitumineux

Les vides ont été vérifiés expérimentalement à l'aide de l'essai de compactage giratoire à 100 girations (tableau 7.12). Les vides mesurés diffèrent peu des vides calculés et le résultat répond toujours aux exigences des cahiers des charges.

	Méthode	Vides dans le CCT Qualiroutes 2021 (exigences)	EME 0/14 (sans AEB)	EME 0/14 (avec AEB)
Vides théoriques	PradoWeb	/	4,8	4,3
Vides du giratoire (100 gir.)	NBN EN 12697-31	3-8 %	4,5	4,1

Tableau 7.12 – Vérification expérimentale des vides

Vérification expérimentale des performances

Le tableau 7.13 présente les résultats des essais performantiels effectués sur les deux mélanges. Il convient de souligner que la teneur en liant a été augmentée de 0,2 % pour les essais de rigidité et de fatigue. L'exigence pour la fatigue ne serait probablement pas satisfaite avec une teneur en liant plus faible. Une augmentation de la teneur en liant de 0,2 % entraînerait probablement une diminution des vides d'environ 0,5 % (c'est-à-dire toujours conforme) ainsi qu'une amélioration de la sensibilité à l'eau.

Performance	Méthode	Grandeur mesurée	Exigences du cahier des charges (Qualiroutes 2021)	Teneur en liant (%)	EME 0/14 (sans AEB)	EME 0/14 (avec AEB)
Sensibilité à l'eau	NBN EN 12697-12 (NBN, 2018a)	ITS-R	$\geq 70 \%$	5,0	94%	94%
Résistance à l'orniérage	NBN EN 12697-22 (NBN, 2020b)	$P_{3,LD}$	$\leq 5 \%$ (pour Réseau I (T>6000))	5,0	2 %	Pas mesuré
Rigidité (15 °C, 10 Hz)	NBN EN 12697-26 (NBN, 2018c)	E-module	$\geq 11\ 000$ MPa*	5,2	11860 MPa	Pas mesuré
Fatigue	NBN EN 12697-24 (NBN, 2018b)	ϵ_6	≥ 130 μ strain*	5,2	131 μ strain	Pas mesuré

*Il n'y a pas d'exigences dans le CCT Qualiroutes 2021 mais bien dans le SB 250 v4.1a

Tableau 7.13 – Vérification expérimentale des performances du mélange

La résistance à l'orniérage est très bonne, ce qui permet de conclure que la faible valeur de rigidité du mastic ne pose pas de problème pour l'orniérage et ne fera qu'améliorer la maniabilité. En principe, l'essai d'orniérage devrait être répété avec la teneur en liant supérieure pour démontrer que le mélange avec 5,2 % de liant répond à toutes les exigences. Théoriquement, la profondeur d'orniérage augmente lorsque la teneur en liant augmente.

Dans le cadre de la recherche, ce même mélange a également été testé avec une teneur en filler plus faible, ce qui a donné un indicateur de rigidité du mastic encore plus faible (6,0 °C) et pourrait rendre l'enrobé plus sensible à l'orniérage. Néanmoins, le résultat dans l'essai d'orniérage est resté exactement le même (2,0 %).

Le mélange avec agrégats d'enrobés bitumineux contient trop d'ancien liant pour être conforme à certains cahiers des charges types (en fonction de l'homogénéité des agrégats d'enrobés bitumineux). Il faudra donc réduire la quantité d'agrégats d'enrobés bitumineux d'environ 7 %, de préférence en conservant la granulométrie en pourcentages en volume, étant donné que les vides du mélange convenaient très bien.



8. Ajustement de la formulation des mélanges

Dans le chapitre précédent, des exemples ont été donnés pour illustrer l'approche d'une nouvelle formulation des mélanges dans le contexte d'une étude préliminaire. Cependant, il existe d'autres situations dans lesquelles la formulation théorique des mélanges et l'utilisation de PradoWeb sont particulièrement utiles. Quelques exemples concrets sont donnés dans ce chapitre.

8.1 Révision d'une formulation existante

Un premier cas se présente lorsque le producteur d'enrobé dispose déjà d'une formulation de mélange qui a fait ses preuves dans la pratique, mais qu'il doit la revoir, par exemple parce que:

- la note justificative arrive à échéance et que certaines caractéristiques des matériaux ont changé;
- un matériau doit soudainement être remplacé parce qu'il est temporairement ou définitivement indisponible;
- le producteur d'enrobé veut utiliser un autre matériau, par exemple parce qu'il est moins cher ou plus facile à obtenir.

Les modifications des caractéristiques des matériaux nécessitent alors généralement une adaptation de la formulation des mélanges.

La manière la plus efficace de réviser le mélange consiste en premier lieu à revenir à la formulation théorique du mélange. Avec PradoWeb, c'est rapide: il suffit d'introduire les matériaux modifiés et de les remplacer dans l'étude de mélange existante, et PradoWeb montre immédiatement quel est l'impact de la modification sur la granulométrie, la volumétrie, la rigidité du mastic et la rigidité du mélange. En cas de modification trop importante d'un ou plusieurs résultats calculés, entraînant certains risques, tels que des vides qui ne seront plus satisfaisants ou une rigidité du mastic qui indique une mise en œuvre plus difficile, la formulation du mélange peut être ajustée de manière ciblée. En général, on veut éviter de modifier la volumétrie du mélange par rapport au mélange précédent ou la modifier le moins possible, c'est-à-dire que la granulométrie en parts de volume reste la même. Cette opération aussi est rapide: on encode dans PradoWeb la granulométrie précédente comme granulométrie cible, et la composition du granulat est recalculée automatiquement de manière à obtenir la granulométrie cible souhaitée.

Comme dans le cas d'une nouvelle formulation de mélange, la phase expérimentale n'est lancée que lorsque l'étude théorique est satisfaisante.

8.2 Estimation de l'impact des variations en cours de production

Un deuxième cas dans lequel la formulation théorique des mélanges est utile est celui où la production à la centrale d'enrobage présente des divergences (au niveau de la teneur en liant et/ou de la granulométrie) par rapport au mélange approuvé. Cela peut être dû à :

- des erreurs de pesage, de sorte que les quantités pesées ne correspondent pas aux paramètres;
- la variabilité de la composition et des caractéristiques des composants.

Les divergences dans la teneur en liant et la granulométrie seront corrigées dès que possible en ajustant les dosages des composants à la centrale. Si, avec ces ajustements, les divergences de la teneur en liant et de la granulométrie restent dans les limites des tolérances, il n'y aura probablement pas de différences majeures au niveau de la volumétrie. Cependant, l'adaptation des dosages, combinée à la variabilité des caractéristiques de certains composants, peut comporter certains risques.

PradoWeb permet d'évaluer l'impact d'un changement de composition ou de comparer rapidement des options alternatives d'ajustement et d'en estimer les différents risques.

A titre d'exemple, on reprend le mélange du chapitre 5: type AC-20base3, avec agrégats d'enrobés bitumineux (proportion de 40 % dans le granulat et de 46 % dans le liant).

Si la teneur en liant dans les agrégats d'enrobés bitumineux devait diminuer de 5,4 % à 4,6 % (diminution de 0,8 %) en cours de production, cela entraînerait une diminution de la teneur totale en liant de 4,70 % à 4,37 %. Cette réduction est supérieure à l'écart maximal autorisé par rapport au mélange approuvé (0,3 %), et le résultat est inférieur à la teneur minimale en liant de 4,60 % (4,56 % après correction sur la base de la masse volumique). Le producteur d'enrobé est donc obligé d'ajuster la composition en cours de production.

Pour augmenter la teneur en liant, il existe deux options (ou une combinaison des deux):

1. augmentation de la teneur en nouveau liant;
2. augmentation de la quantité d'agrégats d'enrobés bitumineux.

Une petite étude théorique à l'aide de PradoWeb permet d'estimer l'impact de chaque option.

Option 1: Augmentation de la teneur en nouveau liant

Pendant la production de l'enrobé, le pourcentage de nouveau liant peut être ajusté de 0,3 % au maximum. Cela ne modifie en rien la composition du granulat, la granulométrie et les VMA. Il n'y aura d'impact qu'au niveau du liant (quantité, proportion d'ancien liant et caractéristiques du mélange de liants).

Les tableaux 8.1 et 8.2 montrent l'impact d'une augmentation de 0,3 % de la teneur en nouveau liant sur la quantité de liant, la composition et les caractéristiques du mélange de liants. On constate ce qui suit:

- La teneur totale en liant est de 4,66 %. Il y a donc encore un léger écart de 0,04 % par rapport au mélange approuvé. Ceci est acceptable, car le résultat est supérieur à la teneur minimale en liant (4,56 %, compte tenu de la masse volumique du granulat).
- La composition du mélange de liants change et le mélange de liants devient légèrement plus mou (la pénétrabilité passe de 35,0 à 38,6.10⁻¹ mm).

	Mélange approuvé		Mélange différent		Mélange ajusté (option 1)	
	% m dans le mélange	% m dans le bitume	% m dans le mélange	% m dans le bitume	% m dans le mélange	% m dans le bitume
Nouveau	2,54 %	54,1 %	2,54 %	58,1 %	2,83 %	60,8 %
Ancien	2,16 %	45,9 %	1,83 %	41,9 %	1,83 %	39,2 %
Total	4,70 %	100,0 %	4,37 %	100,0 %	4,66 %	100,0 %

Tableau 8.1 – Impact de l'ajustement (option 1) sur la teneur en liant et la composition du liant

	Nouveau bitume	Ancien bitume	Bitume mixte		
			Mélange approuvé	Mélange différent	Ajustement (option 1)
Pénétrabilité (en 0,1 mm)	68,0	16,0	35,0	37,1	38,6
T _{A&B} (en °C)	47,3	70,0	57,7	56,8	56,2

Tableau 8.2 – Impact d'un ajustement (option 1) sur les caractéristiques empiriques du mélange de liants

Le tableau 8.3 montre que l'ajustement engendre le maintien de la volumétrie et de la valeur MSI. Les différences avec le mélange approuvé sont négligeables.

	Mélange approuvé	Mélange différent	Ajustement (option 1)
VMA (%)	17,3	idem	idem
v _{agg} (%)	82,7	idem	idem
v _b (%)	10,7	9,9	10,6
Vides (%)	6,6	7,4	6,7
VFB (%)	61,6	57,1	61,1
v _{Rigden} (%)	35,3	idem	idem
Pourcentage de filler provenant d'AEB (%)	68,0	idem	idem
MSI (°C)	14,4	16,2	14,6

Tableau 8.3 – Impact de l'ajustement (option 1) sur la volumétrie, le filler et l'indicateur de rigidité du mastic

Option 2: Augmentation de la quantité d'agrégats d'enrobés bitumineux

Ce changement a un impact sur la composition du granulat. Vu qu'il existe des tolérances sur l'écart maximal de la granulométrie, la composition doit être ajustée de manière à ce que la granulométrie s'écarte le moins possible du mélange approuvé. PradoWeb calcule automatiquement la meilleure composition approximative lorsque la granulométrie du mélange approuvé (en pourcentages en volume) est saisie comme granulométrie cible. Dans ce calcul, la quantité de granulats issus des agrégats d'enrobés bitumineux a été fixée à 47,5 % (en pourcentage en volume du mélange de granulats), soit une augmentation de 7,5 % par rapport au mélange approuvé. Le résultat de cet ajustement de la composition est illustré au tableau 8.4.

Le tableau 8.5 montre l'impact de cet ajustement sur la granulométrie. Comme prévu, les différences par rapport au mélange approuvé sont très limitées. L'écart est le plus important sur le tamis de 2 mm, mais il reste encore largement dans les limites de la tolérance de $\pm 3\%$ (tolérance pour une moyenne de 10 résultats).

	Mélange approuvé (en % v)	Ajustement (option 2) (en % v)
Calcaire 14/20	2,2	2,3
Calcaire 6,3/14	32,6	31,3
Sable de concassage 0/2	23,6	18,5
Filler Ib	1,6	0,5
RA 0/14	40,0	47,5
Total	100	100

Tableau 8.4 – Impact de l'ajustement (option 2) sur la composition du granulat en pourcentages en volume

Dimension des mailles du tamis (mm)	Mélange approuvé	Ajustement (option 2)
	Passant (en % v)	Passant (en % v)
31,5	100,0	100,0
20	99,9	99,9
14	95,0	95,0
10	81,1	81,4
6,3	66,0	66,0
4	53,4	52,4
2	41,8	40,5
1	28,3	28,1
0,5	20,5	21,1
0,25	15,4	16,1
0,125	9,0	9,0
0,063	7,0	6,8

Tableau 8.5 – Impact de l'ajustement (option 2) sur la granulométrie

L'augmentation de la quantité d'agrégats d'enrobés bitumineux entraîne une teneur en liant de 4,71 % dans le mélange. Le tableau 8.6 montre le résultat de la composition du liant et le tableau 8.7 les caractéristiques empiriques prévues. Avec cette option, il n'y a pas de différences significatives par rapport au mélange approuvé, car la réduction de la teneur en ancien liant dans les agrégats d'enrobés bitumineux est compensée.

	Mélange approuvé		Mélange différent		Mélange ajusté (option 2)	
	% m dans le mélange	% m dans le bitume	% m dans le mélange	% m dans le bitume	% m dans le mélange	% m dans le bitume
Nouveau	2,54 %	54,1 %	2,54 %	58,1 %	2,54 %	54,0 %
Ancien	2,16 %	45,9 %	1,83 %	41,9 %	2,17 %	46,0 %
Total	4,70 %	100,0 %	4,37 %	100,0 %	4,71 %	100,0 %

Tableau 8.6 – Impact de l'ajustement (option 2) sur la teneur en liant et la composition du liant

	Nouveau bitume	Ancien bitume	Bitume mixte		
			Mélange approuvé	Mélange différent	Ajustement (option 2)
Pénétrabilité (en 0,1 mm)	68,0	16,0	35,0	37,1	34,9
T_{A&B} (en °C)	47,3	70,0	57,7	56,8	57,7

Tableau 8.7 – Impact d'un ajustement (option 2) sur les caractéristiques empiriques du mélange de liants

Pour conclure, le tableau 8.8 montre l'impact sur la volumétrie et la valeur MSI. Là encore, il n'y a pas de différences majeures par rapport au mélange approuvé. Les changements en termes de volumétrie sont mineurs, conséquence logique de l'ajustement correct de la composition en vue de maintenir la granulométrie. La composition du filler a été modifiée, mais l'impact sur les vides Rigden est assez limité, car les vides Rigden de la fraction de filler des agrégats d'enrobés bitumineux ne diffèrent pas beaucoup de ceux du filler d'apport.

	Mélange approuvé	Mélange différent	Ajustement (option 2)
VMA (%)	17,3	idem	17,2
v_{agg} (%)	82,7	idem	82,8
v_b (%)	10,7	9,9	10,7
Vides (%)	6,6	7,4	6,5
VFB (%)	61,6	57,1	62,4
v_{Rigden} (%)	35,3	idem	36,2
Pourcentage de filler provenant d'AEB (%)	68,0	idem	83,6
MSI (°C)	14,4	16,2	14,4

Tableau 8.8 – Impact de l'ajustement (option 2) sur la volumétrie, le filler et l'indicateur de rigidité du mastic

De cette petite étude théorique, on peut conclure que les deux options (ou une combinaison des deux) sont acceptables. La deuxième option, l'augmentation de la proportion d'agrégats d'enrobés bitumineux, semble la plus intéressante en raison du taux de recyclage plus élevé et de la moindre consommation de nouveau bitume. Toutefois, le producteur d'enrobé doit prendre en compte certains risques liés à la variabilité des agrégats d'enrobés bitumineux. Supposons que la fraction de filler des AEB augmente pendant la production, cela aura un impact sur le passant à travers le tamis de filler de 0,063 mm. Un ajustement basé sur le filler d'apport n'est guère possible, car cette quantité est déjà très faible. Le passant à travers le tamis de 0,063 mm peut, en principe, être augmenté jusqu'à un maximum de 8,5 % (différence de 1,5 % par rapport au mélange approuvé), mais cela entraînera une augmentation de la rigidité du mastic et éventuellement une mise en œuvre plus difficile. En outre, les vides Rigden de la fraction de filler sont également soumis à des fluctuations. Une augmentation de ceux-ci entraînerait également une augmentation de la rigidité du mastic.

Les exemples qui précèdent montrent qu'un producteur d'enrobé peut estimer, au moyen de la formulation théorique, ce que toutes sortes de variations dans les agrégats d'enrobés bitumineux signifient pour les caractéristiques volumétriques et la rigidité du mastic. Cela permet de réduire les risques d'échec dans la pratique.

8.3 Amélioration de la maniabilité lors de la mise en œuvre

Un troisième cas dans lequel l'utilisation de la formulation théorique des mélanges peut s'avérer très utile est celui où, pendant la mise en œuvre sur le chantier, il s'avère que le mélange est difficile à mettre en œuvre ou, au contraire, trop maniable.

Les causes les plus courantes peuvent être les suivantes:

- variations de la teneur en filler et/ou des propriétés du filler, qui se produisent le plus souvent dans des mélanges contenant des agrégats d'enrobés bitumineux et/ou une proportion élevée de filler de récupération.
- variations de la consistance du liant ou de sa composition, qui se produisent aussi le plus souvent dans les mélanges avec agrégats d'enrobés bitumineux.

Dans le cas d'une maniabilité compliquée, les ajustements suivants peuvent être effectués dans les limites des tolérances autorisées:

- augmentation de la teneur en liant;
- réduction de la teneur en filler;
- réduction du rapport sable de concassage/sable rond;
- réduction du rapport fraction de pierre/fraction de sable.

Un examen de l'étude théorique dans PradoWeb permet de mieux estimer quelle est la meilleure option:

- Si la valeur MSI est élevée, une augmentation de la teneur en liant et/ou une réduction de la teneur en filler est la plus appropriée, car ces changements conduisent à une diminution de la valeur MSI.
- Si le MSI est plutôt faible, alors le problème ne réside probablement pas dans la rigidité du mastic et les deux dernières options sont indiquées. Un abaissement supplémentaire de l'indicateur de rigidité du mastic n'est alors pas souhaitable, car cela augmente la sensibilité à l'orniérage.

En même temps, le producteur d'enrobé peut en tirer des leçons. Si l'ajustement est réussi et résulte en une bonne maniabilité, on peut en déduire une bonne valeur indicative pour le MSI du type de mélange qui a été mis en œuvre. Ces connaissances peuvent être exploitées dans les futures formulations de mélanges, afin que le producteur d'enrobé ait une meilleure emprise sur la maniabilité des mélanges produits.



Bibliographie

- Centre de Recherches Routières. (2002). Code de bonne pratique pour la fabrication des enrobés bitumineux (Recommandations CRR No. R72/02).
- Centre de Recherches Routières. (2018). Code de bonne pratique pour la mise en œuvre des enrobés bitumineux (Recommandations CRR No. R 96).
- Centre de Recherches Routières. (2020). Code de bonne pratique pour le choix du revêtement bitumineux lors de la conception ou de l'entretien des chaussées (Recommandations CRR No. R 102).
- COPRO. (2014). Prescriptions techniques pour enrobés bitumineux (Prescriptions Techniques COPRO No. PTV 864, version 2.0). <https://www.copro.eu/fr/ptv-864>
- Francken, L. (1991). Granulométrie et formulation. Bituminfo (60), 3-21.
- Francken, L., & Moraux, C. (1985). Influence des fillers sur les caractéristiques de la consistance des mastics bitumineux. Bituminfo (49), 7-18.
- Francken, L., & Vanelstraete, A. (1993, June 16-18). New developments in analytical asphalt mix design. In Summaries and papers of the 5th Eurobitume congress. Volume IB: Session 3; Session 4, Stockholm, Sweden (pp. 502-507). European Bitumen Association (Eurobitume).
- Heleven, L.J.E. (1985, septembre 11-13). Une approche géométrique de la formulation des mélanges bitumineux. In 3^{ème} Eurobitume Symposium, La Haye, Pays-Bas. Volume I: Résumés et rapports. Rapport II.5, pp.143-147.
- Hunter, R. N., Self, A., & Read, J. (2015). The Shell Bitumen handbook (Sixth edition). ICE Publishing.
- Vansteenkiste, S. & Piérard, N. (2014). Beoordeling van het effectieve gehalte aan holle ruimte in een bitumineus mengsel met staalslak (LD-slak, elo-slak, roestvaststaalslak, enz.) (OCW Leaflet No. N93). Centre de Recherche Routières (CRR).
- West, R. C., Watson, D. E., Turner, P. A., & Casola, J. R. (2010). Mixing and compaction temperatures of asphalt binders in hot-mix asphalt (NCHRP Report No. 648). Transportation Research Board (TRB). <https://www.trb.org/Publications/Blurbs/163348.aspx>

Cahiers des charges

Bruxelles Mobilité. (2016). CCT 2015: Cahier des charges type relatif aux voiries en Région de Bruxelles-Capitale. <https://mobilite-mobiliteit.brussels/sites/default/files/cct2015fr.pdf>

Service Public de Wallonie, Mobilité & Infrastructures. (2021). CCT Qualiroutes: Cahier des charges type (Version 2021 consolidée [et ses adaptations ultérieures]). http://qc.spw.wallonie.be/fr/qualiroutes/frame.jsp?index_cctquali.html

Vlaamse Overheid, Agentschap Wegen en Verkeer. (2019). Standaardbestek 250 voor de wegenbouw (version 4.1). <https://wegenenverkeer.be/zakelijk>

Normes

Bureau de Normalisation. (2001). Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats.

Partie 6: Evaluation des caractéristiques de surface: Coefficient d'écoulement des gravillons (NBN EN 933-6). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-933-6-2001_5912/

Bureau de Normalisation. (2007). Bitumes et liants bitumineux: Détermination du point de ramollissement:

Méthode bille et anneau (NBN EN 1427). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-1427-2007_19454/

Bureau de Normalisation. (2008). Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 4: Détermination de la porosité du filler sec compacté (NBN EN 1097-4). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-1097-4-2008_22602/

Bureau de Normalisation. (2009a). Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 8: Détermination du coefficient de polissage accéléré (NBN EN 1097-8). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-1097-8-2009_11091/

Bureau de Normalisation. (2009b). Bitumes et liants bitumineux : Spécifications des bitumes routiers (NBN EN 12591). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-12591-2009_19592/

Bureau de Normalisation. (2010). Bitumes et liants bitumineux: Cadre de spécifications des bitumes modifiés par des polymères (NBN EN 14023). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-14023-2010_587/

Bureau de Normalisation. (2011). Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 1: Détermination de la résistance à l'usure (micro-Deval) (NBN EN 1097-1). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-1097-1-2011_34150/

Bureau de Normalisation. (2012a). Bitumes et liants bitumineux: Détermination du module complexe en cisaillement et de l'angle de phase: Rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR) (NBN EN 14770). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-14770-2012_38018/

- Bureau de Normalisation. (2012b). Bitumes et liants bitumineux: Détermination du module de rigidité en flexion: Rhéomètre à flexion de barreau (BBR) (NBN EN 14771). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-14771-2012_21196/
- Bureau de Normalisation. (2013a). Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 6: Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau (NBN EN 1097-6). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-1097-6-2013_15830/
- Bureau de Normalisation (2013b). Essais sur les fillers dans les mélanges bitumineux. Partie 1: Essai bille-anneau (NBN EN 13179-1). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-13179-1-2013_35925/
- Bureau de Normalisation. (2015). Bitumes et liants bitumineux: Détermination de la pénétrabilité à l'aiguille (NBN EN 1426). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-1426-2015_38723/
- Bureau de Normalisation. (2016a). Mélanges bitumineux: Méthodes d'essai. Partie 25: Essai de compression cyclique (NBN EN 12697-25). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-12697-25-2016_17105/
- Bureau de Normalisation. (2016b). Mélanges bitumineux: Méthodes d'essais. Partie 35: Malaxage de laboratoire (NBN EN 12697-35). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-12697-35-2016_27190/
- Bureau de Normalisation. (2016c). Bitumes et liants bitumineux: Essai de fluage-recouvrance sous contraintes répétées (essai MSCR) (NBN EN 16659). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-16659-2016_39476/
- Bureau de Normalisation. (2016-2019). Mélanges bitumineux: Spécifications pour le matériau (NBN EN 13108-[1-31]). <https://www.nbn.be/shop/fr/chercher/?src=t&k=13108>
- Bureau de Normalisation. (2017a). Mélanges bitumineux: Méthodes d'essai. Partie 18: Egouttage du liant (NBN EN 12697-18). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-12697-18-2017_27115/
- Bureau de Normalisation. (2017b). Mélanges bitumineux: Méthode d'essais. Partie 23: Détermination de la résistance à la traction indirecte des éprouvettes bitumineuses (NBN EN 12697-23). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-12697-23-2017_33203/
- Bureau de Normalisation. (2018a). Mélanges bitumineux: Méthodes d'essai. Partie 12: Détermination de la sensibilité à l'eau des éprouvettes bitumineuses (NBN EN 12697-12). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-12697-12-2018_40451/
- Bureau de Normalisation. (2018b). Mélanges bitumineux: Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud. Partie 24: Résistance à la fatigue (NBN EN 12697-24). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-12697-24-2018_40525/
- Bureau de Normalisation. (2018c). Mélanges bitumineux: Méthodes d'essai. Partie 26: Rigidité (NBN EN 12697-26). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-12697-26-2018_38281/
- Bureau de Normalisation. (2019). Mélanges bitumineux: Méthodes d'essai. Partie 31: Confection d'éprouvettes à la presse à compactage giratoire (NBN EN 12697-31). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-12697-31-2019_29351/

Bureau de Normalisation. (2020a). Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 2: Méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation (NBN EN 1097-2). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-1097-2-2020_21230/

Bureau de Normalisation. (2020b). Mélanges bitumineux: Méthodes d'essai. Partie 22: Essai d'orniérage (NBN EN 12697-22). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-12697-22-2020_26010/

Comité Européen de Normalisation. (2018). Mélanges bitumineux: Méthodes d'essai. Partie 50: Résistance aux arrachements superficiels (CEN/TS 12697-50). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/cen-ts-12697-50-2018_33881/

Annexes

Annexe 1 : Essais performantiels pour mélanges bitumineux

Annexe 2 : Essais performantiels pour liants bitumineux

Annexe 3 : Formulation des mélanges dans le cas de granulats poreux

Liste des abréviations

AC	Asphalt concrete
AEB	Agrégats d'enrobés bitumineux
BB	Béton bitumineux
BBR	Bending Beam Rheometer
CCT	Cahier des charges type
DSR	Dynamic Shear Rheometer
ED	Enrobé drainant (= ZOA en NL, PA en GB)
EME	Enrobé à module élevé
PA	Porous Asphalt (= ED en FR, ZOA en NL)
PmB	Bitume modifié par des polymères
MSCR	Multiple Stress Creep and Recovery
MSI	Mastic Stiffness Indicator
SB	Standaardbestek
SMA	Stone Mastic Asphalt
VFB	Voids Filled with Binder
VMA	Voids in the Mineral Aggregate

Liste des symboles

ρ	Masse volumique (ou densité)
$\text{voids}_{\text{Rigden}}$	Vides Rigden filler
pen	Pénétrabilité à l'aiguille
$T_{\text{A\&B}}$	Point de ramollissement Anneau & Bille
V	Pourcentage de vides
V_{agg}	Pourcentage en volume de granulats
V_f	Pourcentage en volume de filler
V_b	Pourcentage en volume de liant



Annexe 1

Essais performantiels pour mélanges bitumineux

1. Compacteur giratoire

L'aptitude au compactage d'un enrobé bitumineux peut être évaluée à l'aide d'un compacteur giratoire conformément à la norme européenne EN 12697-31 (Bureau de Normalisation [NBN], 2019). Ce dispositif compacte les enrobés bitumineux chauds dans un moule cylindrique (figure A1.1), sous l'influence d'une force de pétrissage. La force est générée par une force verticale constante combinée à un mouvement de rotation de l'axe du moule giratoire. L'axe décrit une surface conique avec un petit «angle de giration» fixe (α), comme l'illustre la figure A1.2. Les plaques supérieure et inférieure du moule sont mobiles par rapport à la gaine du moule et restent toujours horizontales, générant ainsi une tension de cisaillement oscillante. Pendant l'essai, la hauteur de l'éprouvette est mesurée en continu. On en déduit l'évolution de la masse volumique apparente en fonction du nombre de girations. Si la masse volumique maximale du mélange est également connue, les vides peuvent être déterminés en fonction du niveau de compactage, qui est proportionnel au nombre de girations.

L'essai giratoire permet d'évaluer l'impact des composants et de leur composition sur les vides et constitue donc un premier essai important pour vérifier la volumétrie du mélange.



Figure A1.1 – Compacteur giratoire et moule et éprouvette après compactage

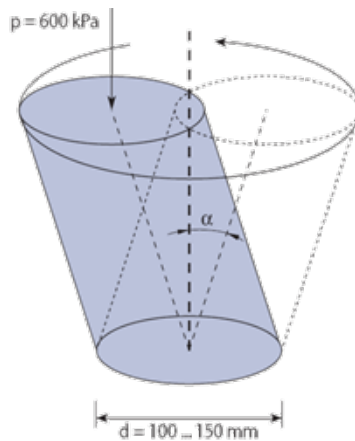


Figure A1.2 – Mouvement du moule pendant le compactage

2. Sensibilité à l'eau (ITS-R)

Une exposition prolongée à l'eau entraîne une diminution de la résistance des mélanges bitumineux. La détermination de la résistance d'éprouvettes conditionnées dans l'eau, par rapport à la résistance d'éprouvettes non conditionnées dans l'eau, permet ainsi d'évaluer la sensibilité à l'eau d'un mélange. La norme européenne EN 12697-12 pour la détermination de la sensibilité à l'eau d'éprouvettes bitumineuses (Bureau de Normalisation [NBN], 2018a), fournit une méthode standard pour le conditionnement dans l'eau et la détermination de la sensibilité à l'eau. En combinaison avec la norme européenne pour la détermination de la résistance à la traction indirecte (fendage) d'éprouvettes bitumineuses (EN 12697-23) (figure A1.3), nous disposons d'une méthode d'essai pour la détermination de la sensibilité à l'eau d'un mélange bitumineux. Plus le rapport de la résistance à la traction indirecte d'éprouvettes conditionnées, par rapport à la résistance à la traction indirecte d'éprouvettes non conditionnées (*Indirect Tensile Strength Ratio* - ITS-R (en %)), est petit, plus la sensibilité à l'eau du mélange est élevée.

La méthode permet donc d'évaluer l'impact du choix des matériaux et/ou de la formulation des mélanges sur la sensibilité à l'eau.

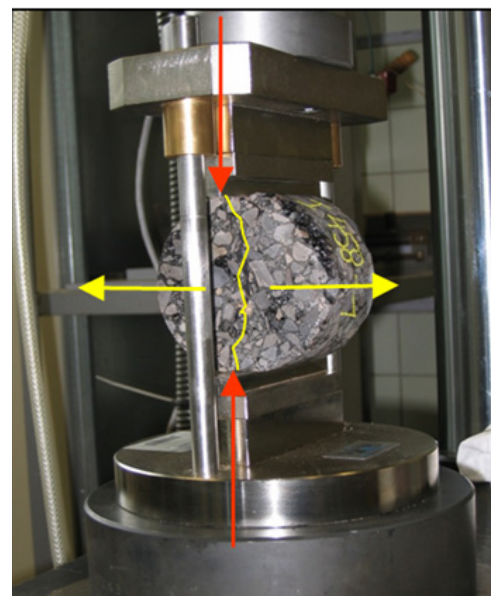


Figure A1.3 – Conditionnement dans l'eau et mesure de la résistance à la traction indirecte d'éprouvettes bitumineuses

3. Résistance à l'orniérage (*large size device*)

La résistance à l'orniérage est déterminée par l'essai d'orniérage conformément à la norme européenne NBN EN 12697-22. En Belgique, on utilise le *large size device*, un dispositif dans lequel deux dalles-échantillons sont soumises à une charge d'essieu verticale de 5 kN sur un pneu qui effectue un mouvement rectiligne de va-et-vient à une fréquence de 1 Hz (figure A1.4). La déformation verticale est mesurée en des endroits bien définis dans le profil longitudinal et transversal après un nombre déterminé de cycles de charge (figure A1.5). L'évolution de la profondeur moyenne d'orniérage est déduite en fonction du nombre de passages des roues. En Belgique, l'essai est réalisé à une température par défaut de 50 °C.

L'essai d'orniérage permet d'évaluer l'impact du choix des matériaux et/ou de la formulation des mélanges sur la résistance à l'orniérage.



Figure A1.4 – Simulateur de trafic et mesure de la profondeur d'orniérage

4. Rigidité (deux points)

La norme européenne NBN EN 12697-26 (Bureau de Normalisation [NBN], 2018) décrit différents dispositifs d'essai pour déterminer la rigidité des mélanges bitumineux à différentes températures et avec différentes fréquences. En Belgique, on utilise l'essai de flexion en deux points sur des éprouvettes trapézoïdales. La méthode consiste à charger une éprouvette trapézoïdale, qui est fixée à la base large, sur une flexion sinusoïdale alternée (figure A1.5). La charge reste dans le domaine linéaire, c.-à-d. le domaine dans lequel la relation contrainte-déformation est linéaire.

L'application d'une tension sinusoïdale d'amplitude constante (σ_0) sur l'éprouvette entraîne une déformation de même fréquence, mais avec un décalage (φ). Le module de rigidité, à la température et à la fréquence de mesure, est le rapport entre l'amplitude de la contrainte et l'amplitude de la déformation (figure A1.6).

L'essai de flexion en deux points permet d'évaluer l'impact du choix des matériaux et/ou de la formulation des mélanges sur le module de rigidité de l'enrobé bitumineux.

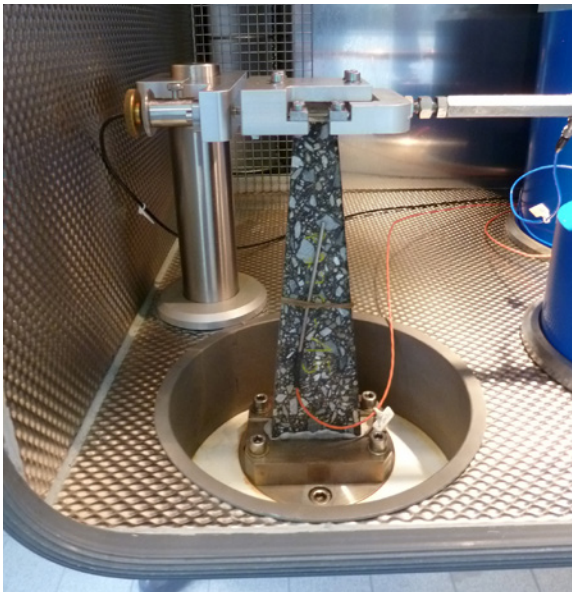


Figure A1.5 – Dispositif d'essai flexion en deux points

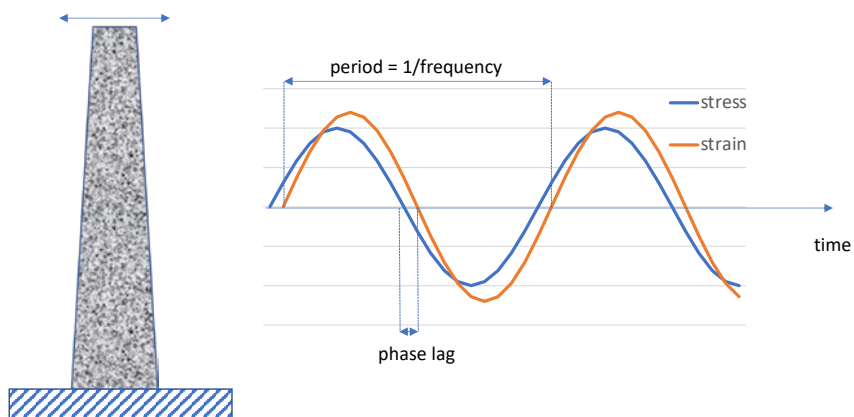


Figure A1.6 – Principe de l'essai de flexion en deux points pour la rigidité

5. Fatigue

Le dispositif d'essai pour la détermination du module de rigidité (essai de flexion en deux points, figure A1.5) peut également être utilisé pour déterminer la résistance à la fissuration par fatigue à la suite d'une déformation par flexion, comme décrit dans la norme NBN EN 12697-24 (Bureau de Normalisation [NBN], 2018b). Une déformation à variation sinusoïdale d'amplitude constante est imposée à l'éprouvette trapézoïdale, et la force nécessaire à cet effet est mesurée. La déformation appliquée est plus élevée que lors de la détermination du module de rigidité, de sorte que des fissures de fatigue se forment et que l'éprouvette s'affaisse progressivement. Plus l'amplitude de la déformation est élevée (ϵ), plus la force diminuera rapidement, consécutivement à la fatigue. Le point de rupture est défini comme le nombre de cycles auquel la force requise pour déformer l'éprouvette est réduite à la moitié de la valeur initiale. On peut alors déterminer une courbe montrant le point de rupture en fonction de l'amplitude de la déformation (figure A1.7). Le paramètre caractéristique ϵ_6 est la déformation pour laquelle le point de rupture tombe à 1 million de cycles. Plus ϵ_6 est élevé, plus le mélange résistera aux dommages causés par la fatigue, à la température et à la fréquence auxquelles l'essai a été effectué.

L'essai de flexion en deux points permet d'évaluer l'impact du choix des matériaux et/ou de la formulation des mélanges sur la résistance à la fatigue de l'enrobé bitumineux.

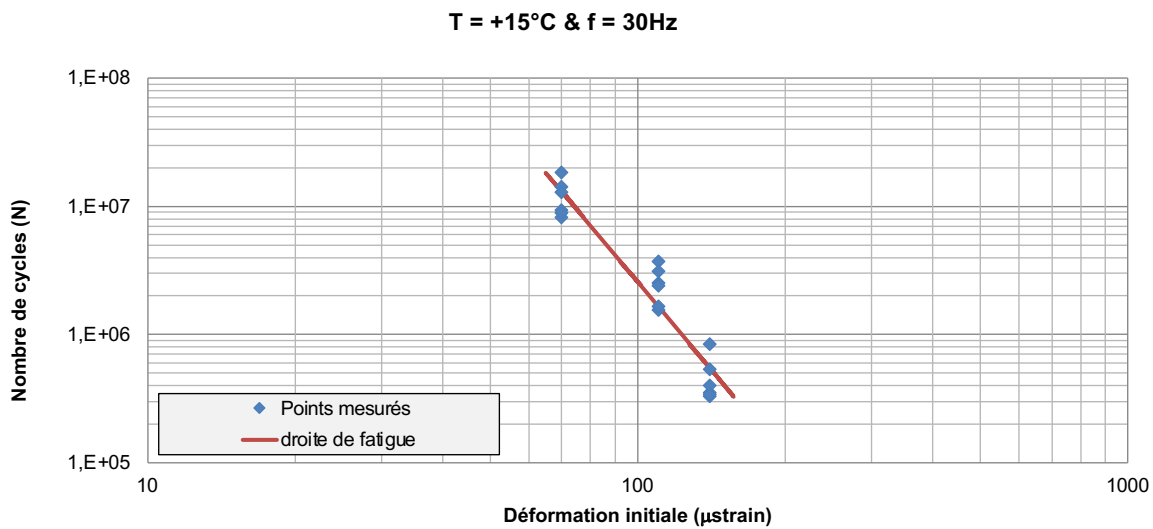


Figure A1.7 – Détermination de la résistance à la fatigue à partir de la déformation ϵ_6

6. Résistance au plumage

La résistance au plumage est mesurée au moyen d'un dispositif qui simule l'effet d'un trafic tangentiel à la surface d'une couche de roulement bitumineuse. Pour ce faire, le CRR utilise un dispositif de type DSD (*Darmstadt Scuffing Device*), tel que décrit dans la *technical specification* TS CEN 12697-50 du CEN (figure A1.8). Dans ce dispositif, un pneu est abaissé sous une charge d'essieu verticale sur la surface d'une plaque d'essai, qui effectue ensuite une combinaison d'un mouvement de rotation et d'un mouvement de va-et-vient. Cela génère des contraintes de cisaillement qui provoquent du plumage. La perte de masse de la dalle, en fonction du nombre de cycles de charge, permet d'évaluer la sensibilité au plumage d'un enrobé bitumineux.

L'essai de plumage offre la possibilité d'évaluer l'impact du choix des matériaux et/ou de la formulation des mélanges sur la sensibilité au plumage de l'enrobé bitumineux et est particulièrement important pour les mélanges ouverts à granulométrie discontinue.



Figure A1.8 – Essai de plumage (*Darmstadt Scuffing Device*)

Annexe 2

Essais performantiels pour liants bitumineux

1. DSR

La norme européenne EN 14770 (Bureau de Normalisation [NBN], 2012) décrit une méthode de mesure des propriétés rhéologiques des liants bitumineux à l'aide d'un *Dynamic Shear Rheometer* (DSR) en mode oscillation. Un échantillon placé entre deux plaques circulaires parallèles est soumis à une charge de cisaillement sinusoïdale sous température contrôlée. Le module de cisaillement est dérivé du rapport des amplitudes de la déformation et de la tension, et l'angle de phase de la différence de phase entre la tension sinusoïdale et la déformation. La procédure comprend la détermination du module de cisaillement et de l'angle de phase sur la portée souhaitée de fréquences et de températures.

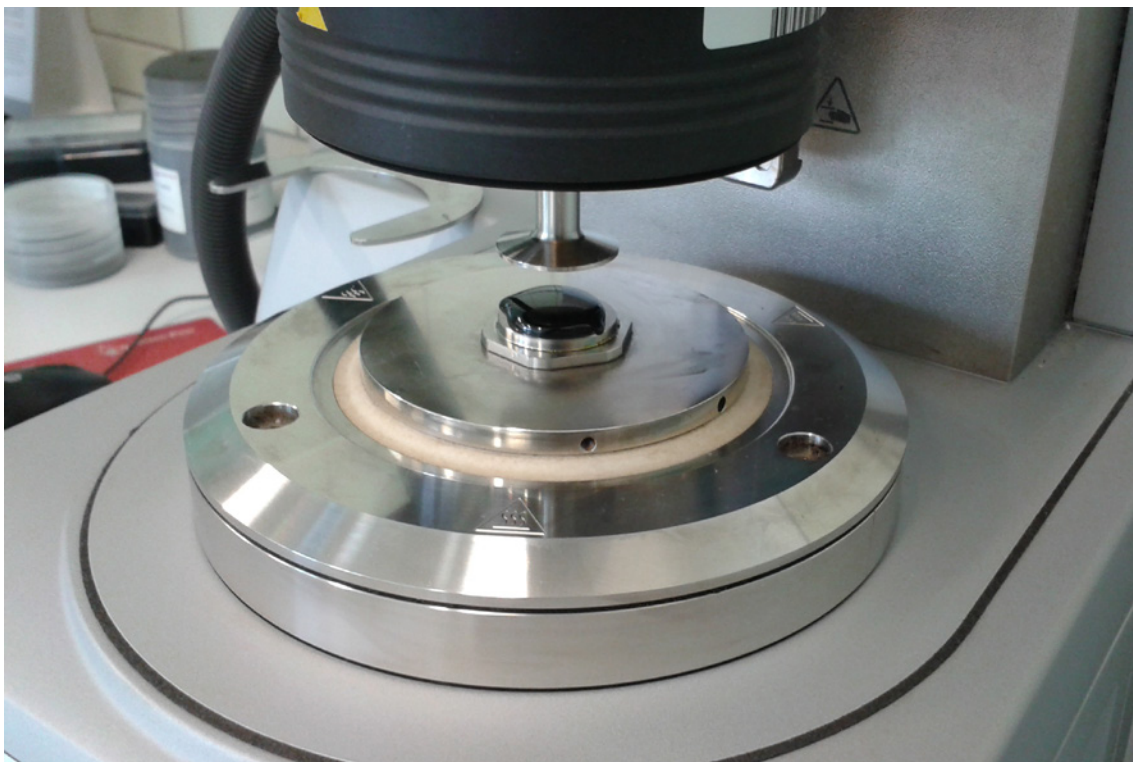


Figure A2.1 – Détail du dispositif DSR (parallel plate geometry)

2. MSCR

La norme européenne EN 16659 (Bureau de Normalisation [NBN], 2016) décrit l'essai MSCR (*Multiple Stress Creep and Recovery*), qui est réalisé au moyen d'un *Dynamic Shear Rheometer* (DSR) en mode fluage (figure A2.1). L'essai MSCR vise à déterminer la sensibilité à la déformation permanente de liants bitumineux et est donc effectué dans la plage des températures de service élevées. L'essai consiste à appliquer successivement dix cycles de fluage-récupération (figure A2.2) à des niveaux de contrainte successivement faibles (0,1 kPa) et élevés (3,2 kPa). La déformation non récupérable (*non recoverable strain*) à 0,1 kPa est un indicateur de la sensibilité à la déformation permanente et la différence avec le résultat à 3,2 kPa est une indication de la sensibilité à la contrainte (la non-linéarité).

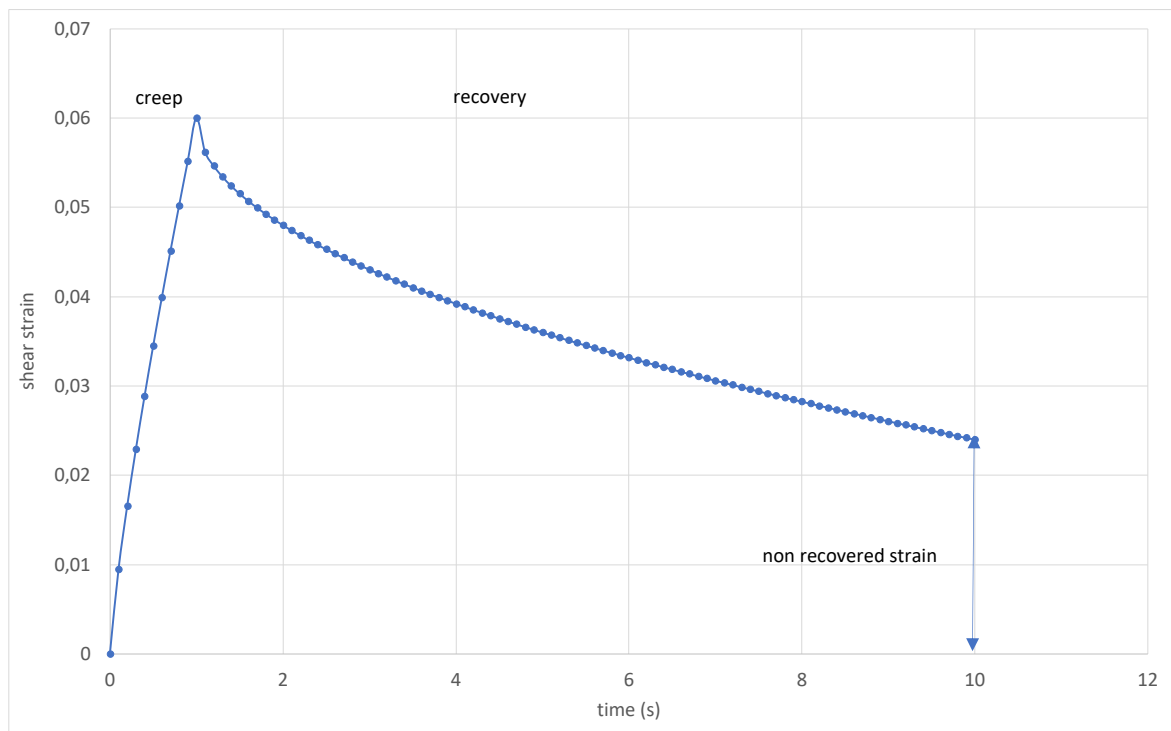


Figure A2.2 – Illustration d'un cycle de fluage-récupération (1s fluage-9s récupération)

3. BBR

La norme européenne EN 14771 (Bureau de Normalisation [NBN], 2005) décrit une méthode de mesure de la rigidité des liants bitumineux dans la plage des températures de service faibles, au moyen d'un *Bending Beam Rheometer* (BBR) (figure A2.3). Elle implique un dispositif de flexion en trois points dans lequel des échantillons de bitume en forme de poutre sont soumis à une force statique constante dans un bain à basse température. La rigidité à la flexion est déterminée à partir du rapport entre la contrainte et la déformation, mesuré après un certain temps. Cet essai permet de déterminer une température à laquelle la rigidité du bitume devient critique pour la fissuration à basse température.



Figure A2.3 – Dispositif BBR



Annexe 3

Formulation des mélanges dans le cas de granulats poreux

Notions et définitions

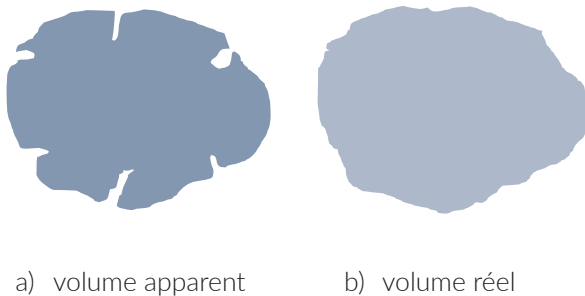
La norme pour la détermination de la masse volumique des granulats (EN 1097-6 [1]) fait une distinction entre la masse volumique apparente (*apparent particle density*) et la masse volumique réelle (*oven-dried particle density*) (figure A3.1).

La **masse volumique apparente** est définie comme la masse après séchage, divisée par le volume apparent (c.-à-d. le volume, à l'exception du volume des vides accessibles à l'eau, figure A3.1a).

$$\rho_{a, \text{agg}} = \text{masse sèche/volume apparent du granulat}$$

La **masse volumique réelle** est définie comme la masse après séchage, divisée par le volume réel (il s'agit du volume, y compris le volume des vides accessibles à l'eau, figure A3.1b).

$$\rho_{rd, \text{agg}} = \text{masse sèche/volume réel du granulat}$$



a) volume apparent

b) volume réel

Figure A3.1 – Différence entre le volume apparent et le volume réel d'un granulat

Note:

- Dans le cas de granulats à faible porosité (peu de vides accessibles à l'eau, autrement dit absorption d'eau négligeable), il n'y a pas de différence significative entre le volume apparent et le volume réel.

La **porosité P** est définie comme le volume des vides accessibles à l'eau, par rapport au volume réel du granulat:

$$P = \text{volume des vides} / \text{volume réel du granulat} \quad (1)$$

La porosité détermine donc le rapport entre la masse volumique apparente et la masse volumique réelle du granulat:

$$\rho_{rd,agg} = (1-P) * \rho_{a,agg} \quad (2)$$

La porosité peut être déterminée par l'absorption d'eau, car le volume d'eau absorbé peut être assimilé au volume de vides accessibles à l'eau:

$$P = \frac{m_{wa} / \rho_w}{m_{agg} / \rho_{rd,agg}} \quad (3)$$

où:

- m_{wa} : masse d'eau absorbée
- ρ_w : masse volumique de l'eau
- m_{agg} : masse des granulats secs
- $\rho_{rd,agg}$: masse volumique réelle des granulats

Cette comparaison peut être ramenée à:

$$P = w_a \rho_{rd,agg} / \rho_w \quad (4)$$

où w_a est l'absorption d'eau du granulat, définie comme suit:

$$w_a = m_{wc} / m_{agg} \quad (5)$$

En cas d'enrobage avec liant bitumineux, les vides accessibles à l'eau sont partiellement remplis de liant (figure A3.2). Le degré de pénétration du liant dans les vides dépend, entre autres, de la viscosité du liant: plus la viscosité est faible, plus le liant pénètre profondément. La partie des vides qui n'est pas remplie par le liant lors de l'enrobage est appelée **vides résiduels**.

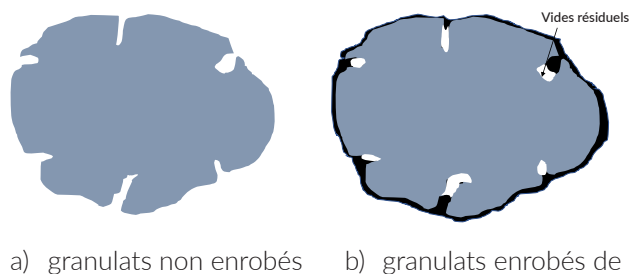


Figure A3.2 – Vides résiduels dans un granulat enrobé de bitume

Un essai d'enrobage avec du bitume chaud permet de déterminer expérimentalement les vides résiduels (Vansteenkiste & Piérard, 2014).

Impact des granulats poreux sur la volumétrie d'un mélange bitumineux

La figure A3.3 montre la volumétrie d'un mélange sans granulats poreux, comparé à un mélange avec le même volume réel de granulats poreux. Dans le cas du mélange avec granulats poreux, ce volume réel sera constitué du volume apparent ($v_{a,agg}$) et du volume des vides (v_p). Le volume des vides est partiellement rempli par le liant absorbé (v_{ba}) et ce qui reste est le volume des vides résiduels (v_{rh}).

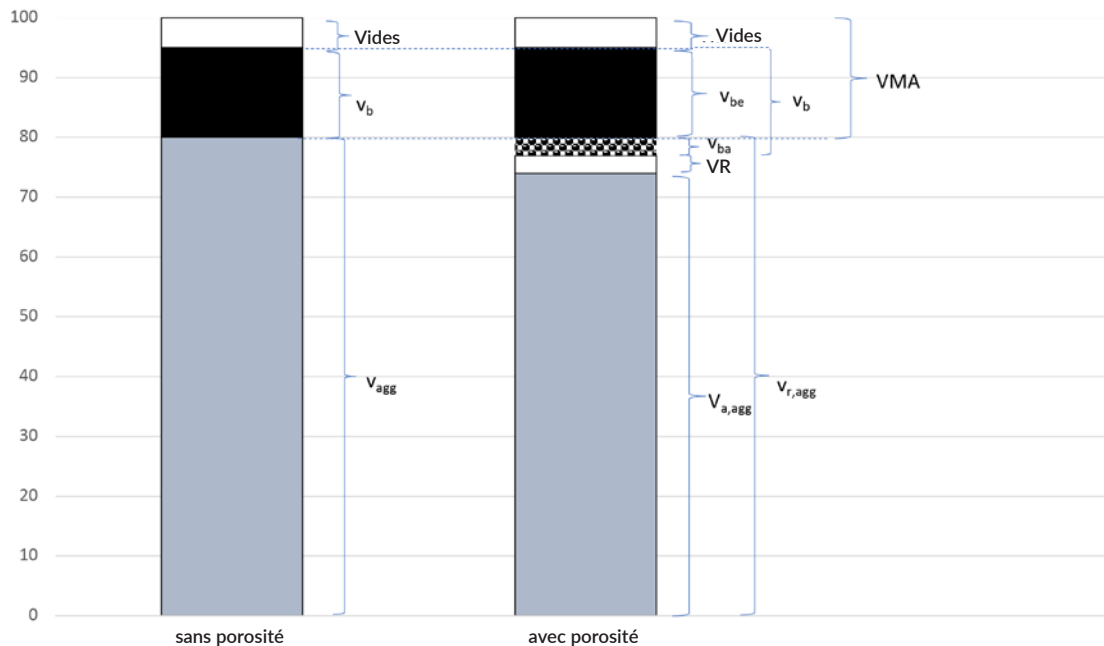


Figure A3.3 – Volumétrie d'un mélange avec porosité, par rapport à un mélange équivalent sans porosité (tous les volumes sont exprimés en pourcentage du volume total)

Les vides d'un enrobé bitumineux désignent les cavités entre les grains minéraux enrobés de liant. Les vides résiduels dans le granulat poreux ne sont pas pris en compte, car ces vides sont enveloppés dans le granulat et n'ont donc aucun effet sur les performances du mélange.

Le volume de liant absorbé dans les vides du granulat (v_{ba}), n'est plus disponible pour l'enrobage et ne joue donc pas un rôle effectif dans le mélange. Dans le cas de granulats poreux, il faudra donc un plus grand volume de liant (v_b) pour compenser le liant absorbé, mais seule la partie qui n'est pas absorbée (v_{be}) est effective:

$$v_{be} = v_b - v_{ba} \quad (6)$$

où:

- v_{be} : liant de volume effectif
- v_b : volume total du liant
- v_{ba} : volume de liant absorbé

Les VMA sont les vides entre les volumes réels des grains minéraux, et correspondent donc à la somme des vides et du volume effectif du liant:

$$VMA = vides + v_{be} \quad (7)$$

Dans le cas général où la porosité des granulats est négligeable, la relation devient:

$$VMA = vides + v_b \quad (\text{et } v_{ba}=0) \quad (8)$$

Concrètement, on peut en déduire que les VMA, le volume de liant effectif v_{be} et les vides effectifs d'un mélange contenant des granulats poreux se calculent de la même manière que dans le cas de granulats non poreux. Le calcul est basé sur le volume réel des granulats, c'est-à-dire la masse volumique réelle ($\rho_{rd,agg}$). Les vides et la teneur effective en liant peuvent ainsi être optimisés et confrontés aux exigences éventuelles des cahiers des charges pour les vides et la teneur en liant.

Enfin, pour le dosage total du liant, il faut tenir compte du volume de liant absorbé par le granulat poreux, v_{ba} . Il faut l'ajouter au volume effectif du liant.

Les paragraphes qui suivent expliquent plus en détail comment traiter les granulats poreux dans PradoWeb, et comment estimer la quantité supplémentaire de liant qui doit compenser la quantité de liant absorbée.

PradoWeb en cas de granulats poreux et calcul de la quantité totale de liant

Comme d'habitude, la composition des granulats est saisie en pourcentages en masse et PradoWeb calcule la composition en pourcentages en volume au moyen des masses volumiques réelles. Les vides dans le squelette minéral (VMA) sont calculés. Il s'agit des vides entre les grains minéraux des granulats secs; les vides dans les vides des pierres ne sont donc pas compris. Les VMA, moins le volume du liant effectif (= enrobant) (v_{be}), donne les vides du mélange, qui déterminent les propriétés du mélange (rigidité du mélange, résistance à l'orniérage, résistance à la fissuration, etc.).

Ensuite, seule la teneur en liant doit être augmentée pour compenser la quantité de liant absorbée par les granulats poreux. Le calcul est effectué comme suit:

Le volume de liant absorbé (v_{ba}) est égal au volume des vides (v_p), moins le volume des vides résiduels dans le granulat poreux (v_{vr}).

$$v_{ba} = v_p - v_{vr} \quad (9)$$

Si la fraction de granulats poreux est un pourcentage en volume v_i du volume réel du granulat, le volume des vides du granulat dans le volume total du mélange:

$$v_p = \sum_{i=1}^n (P_i * v_i * v_{r,agg}) \quad (10)$$

où:

P_i : la porosité de la fraction de granulats i

v_i : le pourcentage en volume de la fraction de granulat i dans le volume de granulats

$v_{r,agg}$: le pourcentage en volume de granulats dans le mélange

Le volume des vides résiduels est:

$$v_{vr} = \sum_{i=1}^n (a_i * P_i * v_i * v_{r,agg}) \quad (11)$$

Où a_i le volume des vides résiduels divisé par le volume des vides, pour la fraction de granulats i ($a_i < 1$).

Ce rapport a_i peut en principe être mesuré pour tout granulat poreux en utilisant la méthode de mesure interne [2]. Cependant, il est difficile de prévoir dans quelle mesure les vides absorbent le liant pendant la production d'un enrobé bitumineux, car cela va dépendre de nombreux facteurs (température de mélange, durée du mélange et intensité du mélange, etc.). En première approximation, pour tous les granulats poreux, a_i est égal à 1/3, ce qui signifie qu'en moyenne un tiers des vides sont remplis de liant absorbé

Note: le choix de 1/3 est très arbitraire, car il est difficile d'estimer dans quelle mesure les vides seront remplis de liant. Toutefois, ne pas tenir compte du tout du phénomène d'absorption du liant entraînerait une teneur en liant trop faible.

Le volume de liant absorbé devient alors:

$$v_{ba} = (1/3) * \sum_{i=1}^n (P_i * v_i * v_{r,agg}) \quad (12)$$

Enfin, le volume de liant v_{ba} , absorbé est converti en pourcentage en masse (en % de la masse totale du mélange):

$$m_{ba}(\% \text{ m in}) = v_{ba}(\% \text{ v in}) * (\rho_b / \text{MVA}) \quad (13)$$

où:

ρ_b : la masse volumique du liant

MVA: la masse volumique apparente du mélange

La quantité totale de liant à doser devient:

$$m_b = m_{be} + m_{ba} \quad (14)$$

Méthodologie au moyen d'un exemple de calcul

Le tableau A3.1 montre un exemple de calcul pour le cas d'un mélange de type SMA, dont 68,8 % v des granulats sont constitués de granulats poreux. Une simulation a été réalisée avec une porosité faible et une porosité élevée. Pour l'étude PradoWeb, la même masse volumique réelle des granulats a été prise en compte. Les résultats sont donc identiques.

On est parti du principe qu'un tiers des vides accessibles à l'eau sont remplis de liant absorbé. Il est à noter que, dans le cas d'une porosité élevée, l'absorption du liant a un impact significatif sur la quantité totale de liant nécessaire.

	Porosité faible	Porosité élevée	Résultat déterminé par
Caractéristiques granulats poreux:			
Absorption d'eau w_a	0,3 %	2,5 %	mesure (EN 1097-6)
$\rho_{rd,agg}$	2,728 Mg/m ³	2,728 Mg/m ³	mesure (EN 1097-6)
P	0,82 %	6,82 %	formule (4)
Étude PradoWeb:			
$v_{r,agg}$	75,50 %	75,50 %	PradoWeb
VMA	24,50 %	24,50 %	PradoWeb
v_{be}	13,96 %	13,96 %	PradoWeb
Vides	10,54 %	10,54 %	PradoWeb
MVA	2,195 Mg/m ³	2,195 Mg/m ³	PradoWeb
Teneur effective en liant (% m dans le mélange)	6,50 %	6,50 %	PradoWeb
v (% de granulats poreux dans le granulat total)	68,77 %	68,77 %	PradoWeb
$v^* v_{r,agg}$	51,92 %	51,92 %	PradoWeb
Correction de la teneur en liant pour l'absorption du liant:			
$v_p = P^* v^* v_{r,agg}$	0,42 %	3,54 %	formule (10)
v_{ba} (estimé à 1/3 de v_p)	0,14 %	1,18 %	formule (12)
Teneur en liant absorbé (% m dans le mélange)	0,06 %	0,54 %	formule (13)
Teneur totale en liant (% m dans le mélange)	6,56 %	7,04 %	formule (14)

Tableau A3.1 – Exemple de calcul pour le cas d'un mélange de type SMA, dont le granulat se compose pour 68,8 %v de granulats poreux

Les membres ressortissants et adhérents peuvent commander gratuitement nos publications au format numérique. Cette publication est uniquement disponible au format numérique.

Plus d'informations: <https://brrc.be/fr/expertise/publications>

Pour commander cette publication:

publication@brrc.be

Référence: R 105. – Prix: 16 € (hors TVA de 6 %)

Également dans la collection “Recommandations”

Orientés sur la conception, l'exécution et l'entretien des routes, les codes de bonne pratique (référence R) rassemblent les résultats de recherches de groupes de travail créés par le CRR en vue d'étudier des sujets bien déterminés.

Référence	Titre	Prix
R 104	Code de bonne pratique pour l'essai de compression cyclique uniaxial pour l'asphalte coulé	10,00 €
R 102	Code de bonne pratique pour le choix du revêtement bitumineux lors de la conception ou de l'entretien des chaussées	20,00 €
R 98	Code de bonne pratique pour les matériaux bitumineux coulés à froid	16,00€
R 96	Code de bonne pratique pour la mise en œuvre des revêtements bitumineux	20,00 €
R 88/14	Code de bonne pratique pour la protection des routes contre les effets de l'eau	18,00 €
R 84/12	Code de bonne pratique pour la gestion et la maîtrise des mauvaises herbes sur les revêtements modulaires par voie non chimique + Annexe (Arbre de décision pour la gestion et la maîtrise des mauvaises herbes sur les revêtements modulaires)	20,00 €
R 83/12	Code de bonne pratique pour la conception, la mise en œuvre et l'entretien des complexes étanchéité-revêtement de ponts à tablier en béton	32,00 €
R 82/11	Code de bonne pratique pour les revêtements industriels extérieurs en béton	17,00 €
R 81/10	Code de bonne pratique pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques + 4 guides pratiques – Amélioration des sols pour le remblayage des tranchées d'égouts et l'enrobage des tuyaux – Stabilisation des sols pour couches de sous-fondation – Amélioration des sols pour terrassements et fond de coffre – Plates-formes industrielles. Fondations par traitement de sol)	26,50 €
R 72/02	Code de bonne pratique pour la fabrication des enrobés bitumineux	20,00 €
R 71/01	Code de bonne pratique des enduits superficiels	10,00 €

Autres séries CRR



Compte rendu de recherche



Méthode de mesure



Synthèse



Centre de recherches routières
Ensemble pour des routes durables

Etablissement reconnu par application de l'Arrêté-loi du 30 janvier 1947
Boulevard de la Woluwe 42
1200 Bruxelles
Tél.: 02 775 82 20
www.crr.be

Ce code de bonne pratique décrit la méthode recommandée par le Centre de recherches routières pour la formulation des enrobés bitumineux.

La formulation d'un mélange consiste à bien choisir les composants et leur composition proportionnelle en fonction du type de mélange et des performances visées pour ce mélange. Avec la production et la mise en œuvre du mélange bitumineux, la formulation des mélanges constitue une phase cruciale dans la réalisation d'un revêtement bitumineux durable.

Le CRR recommande une méthode permettant au formulateur de formuler des mélanges de manière rationnelle et efficace. La méthode repose en grande partie sur la formulation théorique des mélanges, ce qui réduit au minimum le nombre d'essais à effectuer en laboratoire.

Ce code de bonne pratique décrit les principes théoriques et les méthodes de calcul tels qu'implémentés dans l'application CRR pour la formulation théorique des mélanges PradoWeb. Le principe de base est que le mélange est composé en parts de volume. L'importance de la volumétrie des mélanges bitumineux et son impact sur les performances sont donc discutés en détail.

L'ensemble de la procédure de formulation est illustré par des exemples pratiques. Le code de bonne pratique montre aussi comment la méthodologie de la formulation des mélanges peut être utilisée dans le cadre du fonctionnement quotidien d'une centrale d'enrobage, non seulement pour la formulation de nouveaux mélanges, mais aussi pour l'ajustement de la composition en cours de production et pour l'estimation de l'impact de certains changements dans la composition et les caractéristiques des matériaux.

Mots clés ITRD

0152 – CONCEPTION UNIVERSELLE ; 0187 – NORME ; 4105 – SABLE ; 4555 – MATÉRIAU ; 4573 – RECYCLAGE (MATER) ; 4577 – GRANULAT ; 4599 – FILLER ; 4948 – LIANT ; 4967 – BÉTON BITUMINEUX ; 5925 – CARACTÉRISTIQUES ; 6255 – ESSAI ; 6464 – CALCUL ; 7142 – VOLUMÉTRIE (ANAL) ; 8513 – CLASSIFICATION ; 8645 – LOGICIEL ; 9078 – THÉORIE ; 9102 – MÉTHODE