



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

Code de bonne pratique

pour les matériaux bitumineux
coulés à froid



Recommandations

R 98 – Rév. 1

Centre de compétence impartial depuis 1952, le Centre de recherches routières (CRR) 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, Bulletins 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.brrc.be/fr.

Code de bonne pratique R 98

Code de bonne pratique pour les matériaux
bitumineux coulés à froid (MBCF)

Centre de recherches routières

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

Bruxelles

2023



Le présent Code de bonne pratique a été mis au point par le groupe de travail «MBCF» du Centre de Recherches routières (CRR).

■ Composition du groupe de travail

Président

A. Destrée (CRR)

Secrétaires

B. Beaumesnil (CRR) et J. De Visscher

Membres

Frank De Baan (Eurovia), Andie De Doncker (COPRO), Pierre Hontoy (SPW), Julie Schklar (Colas), Laurent Cantigniaux (SOCOGETRA), Jurgen Van Berleere (WILLEMEN INFRA), Leon Dezwart (WILLEMEN INFRA), Frank Bohez (Gravaubel), Vincent Frenay (Gravaubel), Emilie Genin (SPW), Philippe Keppens (AWV), David Sladden (Colas), Paul Van Eyck (Gastdocent wegenbouw PXL hogeschool).

Collaborateurs du CRR

Philippe Bourdon, Ben Duerinckx, Joeri Feremans, Anne Fondu, Erik Kestens, Philippe Peaureaux, Nathalie Piérard, Els Schelkens, Tine Tanghe, Ann Vanelstraete, Peter Vanelven, Stefan Vansteenkiste, Eddy Wouters.

■ Remerciements

Nous adressons nos remerciements au Bureau de Normalisation, pour le soutien financier au projet de recherche prénormatif «Méthodes d'essai européennes pour les MBCF» (contrat CCN NBN/PN16A04-B04) ainsi qu'à toute l'équipe du CRR qui s'est impliquée dans le projet. Ce code de bonne pratique n'aurait pas pu voir le jour sans les informations pratiques et la collaboration précieuse des exploitants des carrières, des producteurs d'émulsions et additifs, des entrepreneurs de MBCF et des administrations routières de Wallonie et de Flandre. Enfin, nous tenons à remercier tout particulièrement les membres du groupe de travail pour les informations utiles qu'ils nous ont fournies, pour leur relecture des textes et leurs commentaires constructifs.

■ Avertissement

Bien que les recommandations de ce code de bonne pratique aient été rédigées avec le plus grand soin possible, 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.

Code de bonne pratique pour les matériaux bitumineux coulés à froid (MBCF) / Centre de recherches routières. – Bruxelles: CRR, 2023, 140 p. – (Recommandations, 1376-9340 ; R 98 Rév. 1).

Dépôt légal: D/2019/0690/5

Editeur responsable: A. De Swaef, Woluwedal 42 - 1200 Bruxelles

Table des matières

Avant-propos	1	
1	Introduction	3
1.1	Description	3
1.2	Objectif de la technique de MBCF	5
1.3	Enjeux	6
2	Matériaux, marquage CE et familles de produits	7
2.1	Matériaux	7
2.1.1	Granulats	7
2.1.1.1	Nature et origine	8
2.1.1.2	Caractéristiques géométriques	8
2.1.1.3	Caractéristiques mécaniques	10
2.1.1.4	Constitution du squelette granulaire	11
2.1.2	Émulsions	12
2.1.2.1	Qu'est-ce qu'une émulsion bitumineuse ?	13
2.1.2.2	Les émulsions à base de liant synthétique pigmentable	14
2.1.2.3	La rupture et le mûrissement d'une émulsion	14
2.1.2.4	Quelle émulsion utiliser et en quelle quantité ?	14
2.1.2.5	Caractéristiques des émulsions bitumineuses et des liants résiduels	15
2.1.3	Eau d'apport	18
2.1.4	Fines spéciales (ciment, chaux)	19
2.1.5	Autres additifs	20
2.1.5.1	Le retardateur de rupture	20
2.1.5.2	Les fibres	20
2.1.5.3	Les pigments	21
2.2	Marquage CE et familles de produits	22
2.2.1	Marquage CE	22
2.2.2	Familles de produits	22
3	Préparation du revêtement existant	25
3.1	Réparations préalables	26
3.1.1	Rétablissement de la planéité	26
3.1.2	Réparation des flaches et nids de poule	26
3.1.3	Traitement des fissures	27
3.1.3.1	Microfissures ou fissures capillaires ($l \leq 2$ mm)	28
3.1.3.2	Fissures d'une largeur entre 2 et 5 mm ($2 < l \leq 5$ mm)	28
3.1.3.3	Fissures larges ($l > 5$ mm)	28
3.1.4	Traitement de zones poreuses	29
3.1.4.1	Porosité faible	30
3.1.4.2	Porosité modérée	30
3.1.4.3	Porosité élevée	31
3.1.5	Traitement du ressuage	31
3.1.5.1	Ressuage léger	32
3.1.5.2	Ressuage modéré ou important	32
3.1.6	Inspection de l'évacuation des eaux de la route et préparation des bermes	33
3.2	Travaux préparatoires	34
3.2.1	Enlèvement des marquages routiers	34
3.2.1.1	Marquages thermoplastiques	34
3.2.1.2	Marquages à base de peinture routière	34
3.2.2	Nettoyage du revêtement	34

3.2.3	Protection de surfaces qui ne peuvent pas être recouvertes d'un MBCF	35
3.2.4	Application d'une couche de collage	36
4	Applications des MBCF	37
4.1	Types de techniques d'application	39
4.1.1	MBCF monocouche	39
4.1.2	MBCF bicouche	40
4.1.3	Enduit scellé par un MBCF	41
4.2	Choix de la technique de MBCF, de la composition et de la granulométrie	42
4.2.1	Trafic	42
4.2.2	Etat du revêtement	43
4.3	Applications spécifiques	46
4.3.1	Comme protection des couches de liaison dans le cas de travaux par phases	46
4.3.2	Pour la fixation des treillis en acier comme système antifissure	47
4.4	Période de réalisation	47
4.5	Tableau de synthèse global et exemple	48
4.5.1	Tableau de synthèse global	49
4.5.2	Exemple illustrant le choix du type de MBCF approprié et le calibre	50
	MBCF inférieur	54
	MBCF supérieur	55
5	Formulation des mélanges	57
5.1	Choix des matériaux	58
5.1.1	Choix des granulats	59
5.1.2	Choix de l'émulsion	59
5.1.3	Choix du ciment	59
5.1.4	Choix du retardateur de rupture	60
5.1.5	Choix d'autres additifs	60
5.2	Formulation théorique	60
5.2.1	Composition du granulat	60
5.2.2	Quantité d'émulsion	62
5.2.3	Quantité de ciment	63
5.2.4	Quantité d'eau	63
5.3	Formulation expérimentale des mélanges	64
5.3.1	Méthodes d'essai	65
5.3.1.1	Temps de mélange	65
5.3.1.2	Consistance	65
5.3.1.3	Cohésion	66
5.3.1.4	Essai d'usure	68
5.3.2	Procédure de formulation expérimentale	69
5.4	Influence des paramètres du mélange sur les performances	71
6	Exécution des MBCF	73
6.1	Zone de stockage	73
6.1.1	Emplacement	73
6.1.2	Support	73
6.1.3	Aménagement du lieu de stockage	74
6.1.4	Protection des granulats	76
6.2	Aménagement du chantier	76
6.3	Chargement de la machine à MBCF	77
6.4	Équipement	79

6.4.1	La machine à MBCF	79
6.4.1.1	Dosage et commande	80
6.4.1.1.1	Granulats	81
6.4.1.1.2	Émulsion	81
6.4.1.1.3	Eau d'apport et autres additifs	81
6.4.1.2	Malaxeur	81
6.4.2	Le traîneau	82
6.4.3	Le rouleau à pneus	84
6.4.4	Le camion-citerne pour l'émulsion	85
6.5	Épandage du MBCF	85
6.5.1	Conditions météorologiques	85
6.5.2	Ajustement de la consistance et du comportement à la rupture via l'eau d'apport et des additifs	86
6.5.3	Épandage la couche de MBCF	88
6.5.4	Travail manuel pour les géométries plus complexes	90
6.5.5	Bandes de MBCF adjacentes	91
6.6	Rupture et mûrissement du MBCF	92
6.6.1	La phase de rupture	92
6.6.2	La phase de mûrissement	93
6.7	Ouverture à la circulation	94
6.8	Texture	95
6.9	Compacteurs	97
6.10	Application des marquages	98
6.11	Dégradations possibles dans un MBCF	99
6.11.1	Les dégradations se produisant pendant la mise en œuvre	99
6.11.1.1	Rainures	99
6.11.1.2	Tôle ondulée transversale	100
6.11.1.3	Bosses	101
6.11.1.4	Traces de la machine à MBCF	101
6.11.1.5	Joint longitudinal d'étanchéité	102
6.11.2	Dégradations après la mise en œuvre	102
6.11.2.1	Plumage	102
6.11.2.2	Formation de pelades	102
6.11.2.3	Ressuage et pseudo-ressuage	103
6.11.2.4	Zones de poinçonnement	104
6.11.2.5	Déplacements et formation de bosses	104
6.12	Réception des travaux	105
7	Gestion routière durable avec des MBCF	107
7.1	Durabilité des MBCF	107
7.2	Stratégie d'entretien préventif efficiente	108
7.3	Exemple d'une analyse des coûts	109
7.4	Évaluation de l'adéquation de la route pour l'application d'un MBCF	114
7.4.1	Introduction	114
7.4.2	Détermination de l'indice visuel pour les applications de MBCF	114
7.4.2.1	L'inspection visuelle	114
7.4.2.2	Calcul de l'indice visuel pour les applications de MBCF (I_{VMBCF})	116
7.4.2.3	Évaluation de l'indice visuel pour les applications de MBCF	117
7.4.3	Circonstances spécifiques dans lesquelles des applications en MBCF ne constituent pas une solution idéale	117
	Bibliographie	119
	Annexe 1 - Les essais de caractérisation géométriques et mécaniques des granulats	125

Liste des figures

Figure 1.1 – Arrière de la schlammeuse avec le traîneau	3
Figure 1.2 – Texture rugueuse d'un MBCF lors de la mise en œuvre	4
Figure 1.3 – Piste cyclable (à gauche) et îlot (à droite) avec un MBCF rouge	5
Figure 3.1 – Flache	27
Figure 3.2 – Revêtement avec regroupement de fissures larges (faïençage)	29
Figure 3.3 – Nettoyer le système d'évacuation bloqué (a) et prévoir des passages dans les bermes (b)	33
Figure 3.4 – Enlèvement des marquages	34
Figure 3.5 – Dégradation au traitement superficiel par des marquages qui n'ont pas été enlevés	34
Figure 3.6 – Couverture des impétrants	35
Figure 3.7 – Couverture d'un caniveau à ne pas traiter	35
Figure 4.1 – Exemple d'un plumage naissant	39
Figure 4.2 – Enduit scellé par un MBCF – Variante 1	42
Figure 4.3 – Enduit scellé par un MBCF – Variante 2	42
Figure 5.1 – Procédure de formulation des mélanges	58
Figure 5.2 – Granulométries de quelques mélanges granulaires typiques pour MBCF (0/6,3), comparées aux anciennes exigences belges et à d'autres directives	61
Figure 5.3 – Exemple de réalisation de l'essai de consistance selon la norme EN 12274-3	66
Figure 5.4 – Exemple de deux consistances pour MBCF (élevée et faible)	66
Figure 5.5 – Illustration de l'exécution de l'essai de cohésion selon la norme EN 12274-4	67
Figure 5.6 – Les quatre schémas de dégradation indiqués dans la norme EN 12274-4	67
Figure 5.7 – Illustration d'un MBCF présentant une faible cohésion (a) et une forte cohésion (b) après la réalisation de l'essai de cohésion selon la norme EN 12274-4	68
Figure 5.8 – Illustration de l'exécution de l'essai d'usure selon la norme EN 12274-5	69
Figure 5.9 – Illustration d'un MBCF présentant une faible résistance à l'usure (a) et une forte résistance à l'usure (b) après la réalisation de l'essai d'usure selon la norme EN 12274-5	69
Figure 5.10 – Diagramme de la formulation expérimentale des mélanges	70
Figure 5.11 – Illustration de l'évolution de la résistance à l'usure et au ressuage en fonction de la quantité d'émulsion	70
Figure 6.1 – Stock de granulats sur des supports non revêtus (à gauche) et revêtus (à droite)	74
Figure 6.2 – Stock de granulats prélevés à quelques centimètres au-dessus de la surface au sol	74
Figure 6.3 – Zone de stockage avec des granulats et deux camions-citernes	75
Figure 6.4 – Nettoyage du traîneau	75
Figure 6.5 – Mise en œuvre par étapes d'un MBCF	76
Figure 6.6 – Trace de pneu dans un MBCF frais	77
Figure 6.7 – Chargement du sable à l'aide d'une grue (photo de gauche) ou d'un chargeur sur pneus (photo de droite)	78
Figure 6.8 – Filtre à émulsion sale de la machine à MBCF	79
Figure 6.9 – Machine à MBCF sans et avec le châssis de camion (Source: Strassmayr)	79
Figure 6.10 – Éléments d'une machine à MBCF	80
Figure 6.11 – Système de dosage automatique (à gauche) et manuel (à droite)	81
Figure 6.12 – Malaxeur (Source: Colas Belgium SA)	82
Figure 6.13 – Traîneau avec deux roues de réglage sur les côtés et un troisième point de réglage au centre pour régler la hauteur	83
Figure 6.14 – Traîneau avec système de mélange	83
Figure 6.15 – Mécanisme de mélange dans le traîneau	83
Figure 6.16 – Traîneau avec bavette flexible en caoutchouc	84
Figure 6.17 – Rouleau à pneus	84
Figure 6.18 – Illustration de la machine à MBCF et du principe d'épandage du MBCF	85
Figure 6.19 – MBCF avec une consistance trop élevée pendant l'exécution	86
Figure 6.20 – Machine à MBCF avec opérateur	89
Figure 6.21 – Remplissage du traîneau du côté le plus haut via une goulotte	89
Figure 6.22 – Bavette en caoutchouc	89
Figure 6.23 – Les bords sont lissés avec des raclettes	89

Figure 6.24 – Représentation schématique de la bavette du traîneau	90
Figure 6.25 – Voie de stationnement où le MBCF a été posé manuellement (photo de gauche); plumage (photo de droite)	90
Figure 6.26 – Camion roulant sur un MBCF frais	91
Figure 6.27 – Camion équipé d'un système de pulvérisation pour les pneus	91
Figure 6.28 – Évolution schématique dans le temps du MBCF après sa sortie de la machine à MBCF	92
Figure 6.29 – A gauche, MBCF déjà rompu (noir); à droite MBCF (brun) avant la phase de rupture	93
Figure 6.30 – «Test du doigt» dans lequel la phase de mûrissement n'est pas suffisamment engagée, du bitume reste collé au doigt	93
Figure 6.31 – Plumage du MBCF dans les frayées dû à une ouverture prématurée à la circulation	94
Figure 6.32 – Ouverture de la route après rupture et mûrissement complets	94
Figure 6.33 – Texture rugueuse juste après la mise en œuvre et avant l'ouverture à la circulation	95
Figure 6.34 – Texture fermée par la circulation un an après la construction	95
Figure 6.35 – Route avec marquage central: texture plus dense dans les frayées qu'entre les frayées	96
Figure 6.36 – Route avec zone de bord ouverte et rugueuse dans la couche de MBCF	96
Figure 6.37 – Compacteur à pneus	97
Figure 6.38 – Compacteur avec système de pulvérisation pour maintenir les pneus humides	98
Figure 6.39 – Rainures causées par de gros gravillons juste après la mise en œuvre du MBCF	99
Figure 6.40 – Rainure fermée: à gauche, situation lors de la mise en œuvre, à droite, le même gravillon après un an	100
Figure 6.41 – MBCF ocre avec des tôles ondulées transversales	100
Figure 6.42 – Trace de roue dans un MBCF humide (photo de gauche), qui reste visible même après un an (photo de droite)	101
Figure 6.43 – Retouche de la trace laissée par le traîneau	101
Figure 6.44 – Perte individuelle de pierre à gauche et zone sujette au plumage à droite	102
Figure 6.45 – Formation de pelades	103
Figure 6.46 – Ressuage dans les frayées de gauche	103
Figure 6.47 – Zones de poinçonnement	104
Figure 6.48 – Formation de bosse en raison du changement d'axe imposé par le rond-point	105
Figure 7.1 - Les trois piliers du développement durable	107
Figure 7.2 - Comparaison entre un entretien préventif et curatif et impact sur l'état de la route et la durée de vie	109
Figure 7.3 - Valeur actuelle nette (VAN) de la couche de roulement en béton bitumineux (sans et avec traitements superficiels); les lignes indiquent la durée de vie totale correspondante	111
Figure 7.4 - Coûts annuels équivalents (CAE) de la couche de roulement en béton bitumineux (sans et avec traitements de surface)	112
Figure 7.5 - Économie sur les coûts annuels équivalents de la couche de roulement en béton bitumineux (sans et avec traitements superficiels)	113
Figure 7.6 – Véhicule de mesure CRR équipé de l'Imajbox®	114
Figure 7.7 – Inspection visuelle avec Imajview® en utilisant les images de l'Imajbox®	115
Figure 7.8 – Revêtement routier en fin de vie	115

Liste des tableaux

Tableau 2.1 – Familles de produits et catégories de routes	23
Tableau 3.1 – Définitions des types de fissure	27
Tableau 3.2 – Traitement préalable nécessaire en fonction du type de fissure et de la répartition	28
Tableau 3.3 – Définition des classes de porosité	30
Tableau 3.4 – Réparation préalable nécessaire en fonction de la classe de porosité	30
Tableau 3.5 – Définition des classes de ressuage	32
Tableau 4.1 – Aperçu des calibres les plus courants pour le MBCF bicouche	41
Tableau 4.2 – Définition des classes de trafic pour les MBCF	43
Tableau 4.3 – Choix recommandés en fonction de la classe de trafic	43
Tableau 4.4 – Choix recommandés en fonction de la limitation de vitesse	43
Tableau 4.5 – Choix recommandés en fonction du défaut d'uni transversal	44
Tableau 4.6 – Choix recommandés en fonction de la largeur de fissure	45
Tableau 4.7 – Choix recommandés en fonction de la classe de porosité	46
Tableau 4.8 – Préparation nécessaire et choix du type de MBCF et du calibre en fonction de l'intensité du trafic présent, du défaut d'uni, de la largeur de fissure et de la classe de porosité du revêtement	49
Tableau 5.1 – Couple de torsion minimal à atteindre pour des temps de mûrissement de 30 et 60 minutes pour des MBCF prévus pour une remise en circulation rapide selon la directive (ISSA, 2020)	68
Tableau 5.2 – Impact le plus attendu des paramètres du mélange sur les performances (indicatif)	72
Tableau 7.1 – Hypothèses et données sur lesquelles est basé l'exemple de calcul pour le cas du traitement superficiel avec un MBCF bicouche	110
Tableau 7.2 – Facteurs de pondération selon la méthode CRR MF 89 et facteurs de pondération ajustés pour les applications de MBCF	116



Avant-propos

L'initiative de l'écriture de ce code de bonne pratique est née d'une demande du secteur de l'enrobé. Elle s'inscrit dans le contexte du projet de recherche «Méthodes d'essai européennes pour les MBCF», qui a débuté le 1er juin 2016, avec le soutien financier du Bureau de Normalisation (NBN). Avec ce projet de recherche, le CRR souhaite contribuer à une meilleure maîtrise de la qualité des MBCF, pour permettre au secteur de l'enrobé de réaliser de meilleurs MBCF et plus de MBCF de qualité supérieure.

Avec ce code de bonne pratique, le CRR souhaite attirer l'attention sur les possibilités et les limites des matériaux bitumineux coulés à froid (MBCF), sur les conditions auxquelles la route existante doit satisfaire et sur les réparations préalables qui sont, le cas échéant, nécessaires.

Le MBCF devant impérativement être appliqué de manière pertinente et correcte, les gestionnaires de voirie et les bureaux d'étude, devront en tenir compte pour évaluer où et quand un MBCF est la solution indiquée pour maintenir la route en état. Ce code de bonne pratique constitue une aide indéniable pour les aider dans leurs démarches.

D'autres aspects tels que la définition de la technologie des MBCF, la description des composants, l'application du marquage CE et la définition des familles de produits MBCF sont également abordés. L'application opportune et régulière d'un MBCF s'inscrivant parfaitement dans une stratégie d'entretien durable, cette thématique est aussi approfondie dans ce code de bonne pratique.

Bien entendu, la méthodologie de formulation du mélange et l'exécution sont aussi d'une importance capitale pour une application de qualité. Ces deux sujets vont s'adresser davantage aux exécutants d'ouvrages en MBCF.

Contenu du code de bonne pratique

Le lecteur trouvera dans ce code de bonne pratique, un premier chapitre introductif décrivant la technologie, les finalités et l'importance des MBCF. Dans le chapitre 2 suivent une description des composants des MBCF, l'application du marquage CE et la définition des familles de produits MBCF.

Le chapitre 3 aborde les réparations préalables nécessaires et les travaux préparatoires, qui sont d'une importance cruciale pour la durabilité des MBCF. Ensuite, le chapitre 4 s'intéresse aux types d'applications. Il indique également où et quand un traitement superficiel avec un MBCF est approprié. Le choix de l'application de ces MBCF est illustré concrètement à l'aide d'un exemple.

Le chapitre 5 est dédié à la méthodologie de formulation du MBCF et aux essais normatifs qui peuvent être utilisés pour établir les compositions des MBCF. Le chapitre 6 est consacré à l'exécution des MBCF. Le dernier chapitre approfondit l'aspect durabilité des MBCF; d'une part, en choisissant une stratégie d'entretien préventif et, d'autre part, en sélectionnant correctement les routes sur lesquelles un traitement avec un MBCF a un sens. Les essais de caractérisation géométriques et mécaniques des granulats (décrits dans le chapitre 2) sont brièvement décrits en annexe 1.



Chapitre 1

Introduction

1.1 Description

Un MBCF (Matériau Bitumineux Coulé à Froid) est un mélange bitumineux d'agrégats minéraux, d'émulsion, d'eau et d'additifs appropriés (ciment, régulateur de rupture, pigment). On distingue quatre types de MBCF, sur base du calibre du mélange granulaire: 0/2, 0/4, 0/6,3 et 0/10 mm.

Les MBCF sont appliqués comme traitement de surface, en une ou en deux couches.

Ils sont de plus en plus souvent appliqués en combinaison avec un enduit, une technique généralement connue comme étant un enduit scellé par un MBCF. *Etant donné qu'il s'agit d'une technique spéciale, elle n'est pas traitée plus en détail dans le cadre de ce code de bonne pratique à l'exception de la brève description qui en est faite au chapitre 4. Vu que l'on utilise des MBCF, la technique est reprise comme un choix possible dans les différents tableaux des chapitres 3 et 4 pour le choix d'une technique de traitement superficiel appropriée.*

Les mélanges de MBCF sont confectionnés à froid sur le chantier de construction dans une schlammeuse mobile (figure 1.1). A l'arrière de la machine se trouve le malaxeur, qui mélange les différents composants suivant les proportions qui ont été établies. Le mélange arrive dans un traîneau, qui est tiré par la schlammeuse. Dans le traîneau, le mélange est réparti uniformément sur la largeur de la bande et appliqué sur le revêtement. Une bavette en caoutchouc située à l'arrière du traîneau lisse la couche sur une épaisseur qui peut être estimée approximativement à une fois et demie à deux fois le plus gros calibre du mélange.



Figure 1.1 - Arrière de la schlammeuse avec le traîneau

Avant de rouvrir la chaussée au trafic, le MBCF doit avoir développé suffisamment de cohésion pour résister aux sollicitations. La cohésion augmente dès que le processus de rupture de l'émulsion est engagé. La vitesse de rupture dépend des composants et de la formulation du mélange, mais elle est également influencée par les conditions météorologiques: plus il fait froid et humide, plus le processus de rupture sera lent. Si l'on a un mélange bien formulé et que les conditions sont adéquates, la cohésion peut déjà être suffisamment élevée après une demi-heure, de sorte que les nuisances pour le trafic et pour les riverains restent très limitées.

Après application, le MBCF présente une texture rugueuse (figure 1.2). A mesure que le revêtement va être circulé, la profondeur de texture va progressivement diminuer et l'aspect va ressembler davantage à un béton bitumineux dense. Plus le calibre de la couche supérieure de MBCF est élevé, plus la texture à la pose est rugueuse et plus cela prend du temps pour que le revêtement soit compacté par le trafic. Pour accélérer ce processus, sur une route où le trafic n'est pas dense par exemple, on peut utiliser un compacteur à pneus lors de la mise en œuvre.



Figure 1.2 - Texture rugueuse d'un MBCF lors de la mise en œuvre

Avantage non négligeable, en raison de leur faible épaisseur, les MBCF impliquent peu de travaux d'adaptation au niveau des ralentisseurs, des caniveaux et évacuations d'eau, ainsi que des bermes et des rues transversales.

Les MBCF s'intègrent parfaitement dans une stratégie d'entretien préventif, où ils sont mis en œuvre à des moments réguliers pour maintenir l'étanchéité et les caractéristiques de surface. Les différentes possibilités d'application et les choix recommandés en fonction du trafic, ainsi que l'état de la voirie sont traités au chapitre 4.

Par contre, un MBCF ne sert pas à réparer une voirie fortement endommagée. L'application directe d'un MBCF sur un revêtement qui comporte des fissures, du plumage sévère, des nids de poule, des pelades et de l'orniérage (plus de 25 mm) est une solution qui n'offre aucune garantie de durabilité parce que la dégradation sous-jacente se propagera presque immédiatement au MBCF sus-jacent. C'est pourquoi il est nécessaire de réaliser préalablement les réparations qui s'imposent afin que le traitement suivant avec un MBCF puisse donner un résultat durable. Ceci est expliqué plus en détail au chapitre 3.

Etant donné que cette technologie exige moins d'investissements en matériel et que les MBCF sont produits à froid, et mis en œuvre à faible épaisseur, le prix de revient direct est peu élevé. En gros, dans les bonnes circonstances, le prix de revient d'un MBCF monocouche s'élève à environ un quart du prix de revient d'une couche de roulement bitumineuse classique. C'est pourquoi les MBCF constituent pour les autorités locales (administrations des villes et communes) et les maîtres d'ouvrage privés une solution intéressante pour conserver la qualité de leurs voiries à un budget limité.

1.2 Objectif de la technique de MBCF

Les principaux objectifs d'un traitement superficiel avec des MBCF sont indiqués ci-après.

Augmenter l'imperméabilité du revêtement

L'apparition de fissures et de plumage rend une couche de roulement progressivement plus poreuse, si bien qu'elle ne remplit plus son rôle important d'étanchéité de la structure routière. L'eau de pluie s'infiltrerait dans les couches sous-jacentes, affaiblissant leur cohésion et leur portance. Procéder à temps à un recouvrement avec un MBCF prévient cette dégradation de la structure routière.

Rétablir l'adhérence

Suite au polissage de la surface routière par le trafic et les conditions climatiques, l'adhérence de la surface routière diminue progressivement. Le recouvrement avec un MBCF permet d'augmenter à nouveau l'adhérence de sorte que la sécurité routière n'est pas compromise.

Empêcher un plumage naissant

Le plumage est le phénomène de perte de pierres à la surface, sous l'influence du trafic et des conditions climatiques. L'utilisation appropriée d'un MBCF sur un revêtement qui présente un plumage naissant permet d'endiguer ce phénomène. Le MBCF va rétablir la cohésion et protéger la couche de roulement dans son ensemble. Pour ce faire, il ne faut pas attendre trop longtemps. Si le plumage est trop grave et que la surface est devenue trop hétérogène, le MBCF n'apportera pas de solution durable.

Comblant un orniérage naissant et de petites irrégularités

Les MBCF permettent de combler un orniérage très limité et d'autres irrégularités, ce qui augmente le confort de conduite, réduit le bruit de roulement ainsi que la formation de flaques par temps de pluie.

Rétablir l'aspect esthétique du revêtement

Les réparations locales de fissures, nids de poule et autres défauts permettent de maintenir le revêtement en état, mais son aspect esthétique se dégrade peu à peu. Dans des quartiers résidentiels, cela porte très vite préjudice à la qualité de l'environnement. L'application d'un MBCF sur toute la largeur de la bande rétablit l'aspect esthétique uniforme de la voirie.

Contribuer à la sécurité routière en recourant à des couleurs

L'utilisation d'un MBCF avec une émulsion à base d'un liant synthétique pigmentable ou un bitume noir «classique» et de pigment permet de conférer localement au revêtement une autre couleur. Ce procédé est souvent exploité pour les trottoirs et les pistes cyclables, les bandes cyclables suggérées et les îlots (exemples à la figure 1.3). L'usage de couleurs augmente la visibilité des zones où les usagers faibles se déplacent, ce qui contribue dans une large mesure à la sécurité routière. Il est toutefois préférable de limiter l'utilisation de MBCF à base de liant synthétique à des zones à faible trafic en raison de leur sensibilité accrue aux dégradations.



Figure 1.3 – Piste cyclable (à gauche) et îlot (à droite) avec un MBCF rouge (Source: WILLEMEN INFRA NV)

1.3 Enjeux

Le traitement superficiel avec un MBCF est une solution rapide et rentable, en comparaison du remplacement de la couche de roulement. Ceci est démontré à l'aide d'un exemple de calcul au chapitre 7. Il n'y a donc rien d'étonnant à ce que les villes et communes, qui doivent faire face à des budgets de plus en plus serrés, recourent aux MBCF pour maintenir l'état et la qualité de leurs routes. La proportion de notre réseau routier qui entre en ligne de compte pour un entretien préventif avec des MBCF est donc assez grande.

Ceci ne s'applique bien entendu seulement qu'à la condition que la durée de vie attendue des MBCF soit suffisamment longue. Cela exige avant tout un mélange bien formulé et une bonne maîtrise de la technique d'exécution.

Les exigences suivantes sont tout aussi importantes pour mener à bien les travaux:

- l'application doit se limiter aux voiries qui s'y prêtent. Les routes où passe du trafic lourd ne conviennent en général pas pour un MBCF comme couche de roulement
- l'application doit être faite à temps afin que l'imperméabilité reste garantie
- l'exécution doit se faire dans les conditions météorologiques idéales
- des dégradations graves à la surface existante doivent être réparées au préalable.

Malheureusement, dans la pratique, on constate trop souvent qu'un MBCF présente des dégradations prématurées en raison du non-respect des considérations ci-dessus. Cela peut donner une image négative et constituer un frein à l'application de cette technique. C'est pourquoi il est extrêmement important que les maîtres d'ouvrage, les gestionnaires routiers et les bureaux d'étude soient bien informés des possibilités et des restrictions de la technique et qu'ils puissent mieux évaluer où, quand et comment appliquer des MBCF.

Le CRR veut offrir une meilleure formation et un meilleur transfert des connaissances au niveau pratique, en ce qui concerne l'application des MBCF. Dans cette optique, le présent code de bonne pratique constitue un élément important.

Chapitre 2

Matériaux, marquage CE et familles de produits

Pour rappel, un matériau bitumineux coulé à froid (MBCF), appelé couramment schlammage, est un revêtement superficiel composé de granulats, d'émulsion, d'eau d'apport et d'additifs appropriés. Pour des applications spéciales, on peut également utiliser des émulsions à base de liant synthétique pigmentable, des pigments ou des fibres.

Ce chapitre 2 décrit les différents matériaux susmentionnés qui composent un MBCF (§ 2.1) et explicitera l'application du marquage CE et les familles de produits pour les MBCF (§ 2.2).

2.1 Matériaux

Les matériaux utilisés pour la fabrication des MBCF et leurs exigences sont décrits dans les chapitres «Matériaux» des trois cahiers des charges types régionaux belges (Bruxelles Mobilité, 2016; Service Public de Wallonie [SPW], Mobilité & Infrastructures, 2021; Vlaamse Overheid, Agentschap Wegen en Verkeer [AWV], 2021).

2.1.1 Granulats

Ce paragraphe 2.1.1 est subdivisé comme suit:

- la nature, l'origine et les principales caractéristiques géométriques et mécaniques du squelette granulaire seront décrites dans les § 2.1.1.1 à § 2.1.1.3;
- le § 2.1.1.4 évoquera les possibilités de synthèse du squelette granulaire d'un MBCF.

Le squelette granulaire 0/D d'un MBCF est constitué de sable et de gravillons. Ce mélange de sable et de gravillons est appelé «grave» (*all-in aggregate*). La grave peut être produite de deux manières:

- en mélangeant des gravillons et des sables;
- sans passer par des fractions de gravillons et de sable séparées.

Les sables, les gravillons et les graves qui entrent dans la composition d'un MBCF doivent satisfaire aux exigences de la norme EN 13043 (Bureau de Normalisation [NBN], 2002+2004) et ils relèvent du système d'attestation CE 2+.

Le choix des graves et leurs caractéristiques géométriques et mécaniques auront un impact important sur la fabrication, l'exécution et la durabilité des MBCF. Les paramètres qui vont influencer les performances de ces MBCF sont principalement la granulométrie, l'angularité, la forme, la teneur et la qualité des fines et la dureté de ces graves.

Pour la fabrication des MBCF colorés, le choix de la teinte des graves est également important pour en assurer sa pérennité et l'évolution favorable de ses nuances dans le temps. Il est conseillé de rechercher des graves dont la couleur se rapproche le plus possible de la teinte finale souhaitée pour ces revêtements à froid colorés.

Outre leurs propriétés colorimétriques, ces graves de couleur devront également satisfaire aux exigences des cahiers des charges types régionaux en termes de caractéristiques géométriques et mécaniques.

2.1.1.1 Nature et origine

En Belgique, les MBCF sont majoritairement fabriqués avec des matériaux de roches massives de porphyre ou de grès concassées. Il est important de souligner que les MBCF ne sont pas fabriqués avec des granulats de type calcaire; ces derniers ne répondant pas aux spécifications établies dans les trois cahiers des charges types régionaux. Pour les différents matériaux granulaires admis pour la fabrication d'un MBCF, veuillez vous référer aux trois cahiers des charges types régionaux (Bruxelles Mobilité, 2016; SPW, Mobilité & Infrastructures, 2021; Vlaamse Overheid, AWW, 2021).

Certains gravillons et sables artificiels, tels que les scories d'aciéries inox traitées, sont autorisés, mais ils ne sont pas utilisés dans la pratique.

A l'heure actuelle, contrairement à d'autres pays (Deneuvillers et al., 2017; Heitzman, 2018; Robati et al., 2013), deux types de matériaux granulaires ne sont pas admis dans la composition d'un MBCF:

- La bauxite calcinée. Ce granulat artificiel possède des caractéristiques mécaniques et physiques supérieures à celles des granulats naturels, et en particulier un coefficient de polissage accéléré très élevé (§ 2.1.1.3 Caractéristiques mécaniques). En Belgique, La bauxite calcinée de type réfractaire est utilisée pour les ESHP (Enduit Superficiel Haute Performance). Mais en France, ils l'utilisent dans les MBCF et dans des cas particuliers comme les zones «accidentogènes»: virages dangereux, zones de décélération,...
- Les agrégats d'enrobés bitumineux (AEB). Ces matériaux recyclés doivent être conformes à la norme EN 13108-8 (NBN, 2016b). Ils sont utilisés dans plusieurs pays (France, Québec, États-Unis,...) mais cela reste actuellement assez peu répandu car les MBCF avec des agrégats d'enrobés bitumineux nécessitent des formulations particulières, un matériel et une méthodologie de mise en œuvre adaptés.

2.1.1.2 Caractéristiques géométriques

Les principales caractéristiques géométriques des graves utilisées pour fabriquer des MBCF sont décrites ci-dessous. Pour les exigences vis-à-vis de ces caractéristiques, veuillez vous référer aux trois cahiers des charges types régionaux (Bruxelles Mobilité, 2016; SPW, Mobilité & Infrastructures, 2021; Vlaamse Overheid, AWW, 2021). Les essais normatifs utilisés pour déterminer ces caractéristiques géométriques sont décrits en annexe 1.

La granularité (d/D)

La granularité peut être définie comme la distribution dimensionnelle des grains, exprimée en pourcentages de masse passant au travers d'un ensemble spécifié de tamis, dont la dimension est définie en mm. Selon la norme EN 13043 (NBN, 2002+2004), les graves doivent être désignées en termes de classes granulaires d/D et doivent être conformes aux spécifications de granularité. En Belgique, ces classes granulaires doivent être spécifiées en utilisant les dimensions de tamis comprenant la série de base plus la série 2. La granularité des classes granulaires doit être déterminée, selon la norme EN 933-1 (NBN, 2012a), via une analyse granulométrique par tamisage. Cette norme s'applique à tous les granulats, dont les granulats légers, jusqu'à une taille nominale de 90 mm, mais en excluant les fillers (fractions constitués principalement de fines, passant au tamis de 0,063 mm). Pour ces fillers, il faut réaliser une analyse par tamisage dans un jet d'air selon la norme EN 933-10 (NBN, 2009a).

En Belgique, quatre granularités de grave sont utilisées pour la fabrication de MBCF:

- 0/2;
- 0/4;
- 0/6,3;
- 0/10.

Ces graves ont une granularité continue et sont recomposées en carrière (§ 2.1.1.4).

D'autres pays utilisent des graves présentant une courbe granulométrique discontinue (Herrero, 2018; Le Bec, 2006). Le choix de ces formulations discontinues est dicté principalement par les caractéristiques de rugosité et de meilleure résistance au ressuage et à la déformation dans les frayées.

La teneur en fines (f) et leur qualité (MB_f)

Les fines sont les fractions granulaires qui passent au tamis de 0,063 mm (63 µm). Leur teneur doit être la plus constante possible car elles ont une influence directe sur la réactivité entre les granulats et l'émulsion, la maniabilité et la cohésion finale des MBCF (Le Bec, 2009). En effet, ces fines sont les fractions granulométriques ayant la plus grande surface de contact avec l'émulsion et elles peuvent donc être très réactives (Deneuvillers et al., 2000). Ces fines vont créer un mastic avec le liant résiduel qui «liera» les plus grosses fractions granulaires.

D'un point de vue pratique pour les MBCF, au vue de la forte réactivité des fines vis-à-vis de l'émulsion (§ 2.1.2 Emulsions), une teneur trop importante en fines peut causer une rupture prématurée de l'émulsion à son contact et provoquer par conséquent une perte de maniabilité par augmentation de la viscosité du MBCF qui pourra, dans des cas extrêmes, complètement bloquer le malaxeur.

Pour des teneurs en fines supérieures à 3 %, l'essai au bleu de méthylène (*Methylene Blue-MB* en anglais) est exigé et il sera réalisé en Belgique selon l'annexe A de la norme EN 933-9 (NBN, 2022b), sur la fraction 0/0,125 mm d'un sable 0/2. La valeur au bleu de méthylène des fines (MBF, exprimée en g bleu de méthylène/kg matériau) reflète la propreté de ces dernières. En effet, plus la valeur au bleu sera élevée, moins le sable sera considéré comme «propre». Cela pourra avoir un impact négatif sur les cinétiques de rupture des émulsions et sur la cohésion finale du MBCF.

Le coefficient d'aplatissement (FI)

Il est déterminé selon la norme EN 933-3 (NBN, 2012b). Ce coefficient d'aplatissement (ou *Flakiness Index-FI* en anglais) nous donne une indication sur la forme des granulats. Plus ce coefficient sera élevé, plus la proportion de gravillons plats dans la grave sera importante, et moins leur mise en place dans la route sera facile et plus ils seront fragiles.

D'un point de vue pratique pour les MBCF, il impactera la maniabilité, l'homogénéité et la stabilité du mélange mais également la rugosité en surface. Si les granulats sélectionnés ne présentent pas un coefficient d'aplatissement adapté, il y aura par exemple plus de risques de «lissage» important et de ressuage dans les frayées de ces MBCF.

L'angularité (C_{x/y})

Elle est déterminée selon la norme EN 933-5 (NBN, 2022a) en analysant le pourcentage en masse de pierres avec des surfaces cassées dans les gravillons (C_{x/y} avec C pour *Crushed particles*). Le fait d'utiliser des granulats avec des surfaces cassées permet la formation d'un squelette granulaire très stable.

D'un point de vue pratique pour les MBCF, l'angularité est importante car elle aura un impact sur la stabilité du mélange (p. ex.: orniérage) et sur la rugosité en surface.

2.1.1.3 Caractéristiques mécaniques

Les principales caractéristiques mécaniques (ou intrinsèques) des graves utilisées pour la fabrication des MBCF sont décrites ci-dessous. Pour les exigences vis-à-vis de ces caractéristiques, veuillez vous référer aux trois cahiers des charges types régionaux.

La résistance à la fragmentation (LA)

Elle est mesurée par l'essai Los-Angeles (LA) conformément à la norme EN 1097-2 (NBN, 2020a). Cet essai est destiné à appréhender la résistance aux impacts mécaniques suite au transport, au malaxage, au compactage ou au trafic. Plus ce coefficient sera élevé, moins les granulats seront résistants à la fragmentation.

D'un point de vue pratique pour les MBCF, la résistance à la fragmentation des granulats aura une incidence sur la préparation du mélange, la mise en œuvre et la durabilité du MBCF. Une résistance adéquate permettra également d'éviter la formation de poussière dans la roche pendant le transport de la carrière au chantier.

La résistance à l'usure (MDE)

Elle est mesurée par l'essai Micro-Deval (MDE) en présence d'eau conformément à la norme EN 1097-1 (NBN, 2011b). Cet essai est destiné à appréhender la résistance à l'usure par attrition des granulats. Plus ce coefficient sera élevé, moins les granulats seront résistants à l'usure.

D'un point de vue pratique pour les MBCF, la résistance à l'usure des granulats est importante car elle aura une incidence sur la stabilité du mélange, la rugosité en surface et la durabilité du MBCF. Une résistance adéquate permettra également d'éviter la formation de poussière dans la roche pendant le transport de la carrière au chantier.

Le coefficient de polissage accéléré (PSV)

Il est mesuré par l'essai PSV (Polished Stone Value) conformément à la norme EN 1097-8 (NBN, 2020b). Cet essai est destiné à simuler en laboratoire l'action de polissage des gravillons par les pneumatiques des véhicules. Plus ce coefficient sera élevé, plus les granulats seront résistants au polissage.

En pratique, la résistance au polissage des granulats est importante car elle participera au maintien des propriétés d'adhérence des MBCF (interaction pneumatique-surface de la chaussée). Ces propriétés sont liées à la texture du revêtement (microtexture et macrotexture).

2.1.1.4 Constitution du squelette granulaire

Pour fabriquer un MBCF, l'**entrepreneur** a deux possibilités: il peut reconstituer le squelette granulaire à partir d'un sable et de gravillon(s) ou utiliser un matériau préalablement recomposé en carrière. Actuellement en Belgique, la seconde possibilité est celle qui est principalement utilisée. Pour obtenir ces squelettes granulaires, la recomposition se fait comme suit pour les graves de type:

- 0/4: mélange de 0/2 + 2/4;
- 0/6,3: mélange de 0/2 + 2/4 + 4/6,3 ou mélange de 0/2 + 2/6,3;
- 0/10: mélange de 0/2 + 2/4 + 4/6,3 + 6,3/10 ou mélange de 0/2 + 2/6,3 + 6,3/10.

Plusieurs techniques sont utilisées en carrières pour reconstituer le squelette granulaire des graves:

1. L'installation pour fabriquer ce mélange granulaire pour les MBCF est une installation séparée qui est plus ou moins équivalente à une centrale à béton car il y a une trémie, un malaxeur et un camion pour transporter les granulats recomposés. Le malaxage est une étape très importante pour homogénéiser le mélange de granulats et éviter sa ségrégation (lors du transport par exemple). Pour faciliter cette étape de mélange et d'homogénéisation du produit granulaire pour MBCF, il faut utiliser de l'eau pour l'humidifier. Cela permet également d'avoir une régularité de composition (moins de ségrégation des fines) avec un taux d'humidité optimale (§ 2.1.3 Eau d'apport).
2. La carrière dispose de trémies avec bandes doseuses de sorte qu'ils peuvent facilement adapter la granulométrie finale souhaitée. Il n'y a pas de malaxeur, mais puisque les différents ingrédients tombent en même temps les uns sur les autres (à même le sol), et que le tout est ultérieurement repris par un chargeur pour mettre dans les camions de transport, aucun malaxeur n'est utilisé dans ce cas.
3. Il n'y a pas d'installation séparée et dédiée à la fabrication des graves pour MBCF. En carrière, les mélanges granulaires sont produits par mélange au chargeur; le chargeur étant une machine qui charge les camions. Si par exemple, il faut réaliser une grave 0/4 (50 % 0/2 + 50 % 2/4), ils mélangent un bac de chargeur du calibre 0/4 avec un autre bac du calibre 0/2 et ainsi de suite jusqu'à l'obtention du stock souhaité. Le stock de calibre recomposé est supposé s'homogénéiser ensuite de lui-même suite aux chargements et déchargements des camions.

Pour ces deux dernières techniques, des problèmes de contamination (saletés provenant du sol lors de la prise des graves par le chargeur) et d'inhomogénéité des graves (par exemple la ségrégation des fines) pourraient avoir lieu.

Vis-à-vis de ce mélange granulaire, en pratique sur chantier, trois points d'attention sont à mentionner:

- il est important d'avoir un lieu de stockage proche et surtout propre, de préférence dont le support est revêtu, pour éviter les risques de contaminations. Si différentes granulométries sont stockées, il est important qu'elles soient bien séparées pour éviter que des mélanges se produisent;
- la teneur en eau des graves. Si elles ne sont pas protégées lors du stockage et que des pluies surviennent, elles se gorgeront d'eau et la teneur ne sera plus celle prévue dans la recette originale du MBCF. Les pluies pourront également entraîner un phénomène de ségrégation des fines au sein des graves;
- la réactivité des granulats (vis-à-vis de l'émulsion) est fonction de son âge: les granulats fraîchement concassés sont plus «réactifs» en raison de leurs charges de surface, que des granulats «plus» anciens (Le Bec, 2009).

■ 2.1.2 Émulsions

Le liant entrant dans la composition «classique» d'un MBCF est une émulsion cationique bitumineuse. La teneur en bitume est fonction du type d'émulsion et est généralement de 60 à 65 % (Institut National de Recherche et de Sécurité [INRS], 2017; Le Bec, 2012).

Il existe trois familles d'émulsion cationique bitumineuse:

1. Les émulsions cationiques de bitume routier (C60By)
2. Les émulsions cationiques de bitume polymère¹ (C60BPY)
3. Les émulsions cationiques de bitume modifiées au latex² (C60BPY, C65BPY).

Ces trois types d'émulsion doivent satisfaire aux exigences de la norme EN 13808 (NBN, 2013b).

Note: Les émulsions cationiques de bitume polymère (PmB) et les émulsions cationiques de bitume modifiées au latex seront dénommées «émulsions modifiées (PmB ou latex)» dans la suite du document pour une question de concision.

Les deux premiers types d'émulsion sont respectivement obtenues par:

1. la mise en émulsion d'un bitume pur routier;
2. la mise en émulsion d'un bitume préalablement modifié par ajout de polymère (sous forme solide). Le polymère le plus courant en Belgique est le SBS, il s'agit d'un copolymère bloc poly(styrène-butadiène-styrène).

Pour le troisième type, il y a deux possibilités les plus couramment utilisées pour les obtenir:

- 3a. Le latex cationique compatible est préalablement incorporé dans la phase aqueuse avant émulsification du bitume pur.
- 3b. Le latex cationique compatible est injecté en ligne pendant la fabrication de l'émulsion. Il peut être injecté dans la ligne d'approvisionnement de la phase aqueuse et/ou de la phase bitume.

Le latex est lui-même une émulsion. Il s'agit d'une dispersion aqueuse, très fine, de polymère synthétique. Généralement, le SBR (Styrene Butadiene Rubber) est utilisé, il s'agit d'un caoutchouc synthétique de type copolymère poly(styrène-butadiène).

Les codes CxxB(P)y ci-dessus doivent être lus comme suit:

- C: émulsion cationique;
- xx: teneur en bitume (%);
- B: bitume routier;
- BP: bitume polymère neuf (PmB) ou bitume routier avec présence d'un latex compatible;
- y: classe de l'indice de rupture (§ 2.2.1.5).

1 Les bitumes modifiés par des polymères (PmB) sont couverts par la norme EN 14023 (NBN, 2010b).

2 Une émulsion cationique de bitume modifiée au latex est un terme général pour une émulsion de bitume routier contenant un latex (une autre émulsion d'un polymère). Ces deux émulsions sont intimement mélangées et le mélange est considéré comme une émulsion biphasique, à l'instar d'une émulsion cationique de bitume polymère qui est monophasique.

2.1.2.1 Qu'est-ce qu'une émulsion bitumineuse ?

Pour rappel, une émulsion bitumineuse cationique est une dispersion de bitume dans l'eau dont la formation nécessite l'emploi d'une énergie mécanique de cisaillement du bitume (fragmentation en fines gouttelettes) et d'un émulsifiant cationique (stabilisation des gouttelettes).

L'émulsifiant et le bitume sont donc les deux acteurs principaux de la fabrication d'une émulsion cationique bitumineuse (Le Bec, 2012):

- **Les émulsifiants** (appelés également surfactant ou tensioactif)
Il s'agit de produits non normalisés. La teneur en émulsifiant d'une émulsion pour MBCF est généralement comprise entre 0,3 % et 2 %. Ce sont des produits liquides (ou solides) qui appartiennent principalement à la famille des amines. Ces émulsifiants ont un rôle important vis-à-vis de la stabilité au stockage, du comportement à la rupture de l'émulsion mais également au niveau de l'adhésivité entre le bitume et les granulats.
- Les bitumes routiers «**émulsionnables**»
Ils se différencient des autres bitumes car ils présentent naturellement (ou artificiellement) les caractéristiques nécessaires pour faciliter l'émulsification. Ils proviennent d'une sélection spécifique des pétroles bruts. La qualité de ces bitumes est très importante et nécessite par conséquent une constance de ces caractéristiques chimiques (constance d'approvisionnement). Toute modification du brut nécessitera d'ajuster la formulation de l'émulsion et particulièrement la nature et/ou le dosage des émulsifiants pour éviter plusieurs déconvenues telles une instabilité de l'émulsion, une variation des viscosités ou des défauts d'adhésivité.
Des deux familles de bitume existantes («paraffiniques» et «naphténiques»), les naphténiques sont largement préconisés pour la fabrication des émulsions pour MBCF. Ce sont des bruts riches en asphaltènes et qui contiennent des acides naphténiques (leur conférant une acidité marquée) qui seront très utiles pour l'émulsification et l'obtention d'une montée rapide en cohésion. En effet, l'emploi de bitumes paraffiniques purs conduit à des MBCF qui ne présentent pas toujours une cohésion suffisante pour supporter au jeune âge le trafic véhiculaire.
Cependant, vu le risque d'une indisponibilité des liants de type «naphténiques», certains producteurs d'émulsion français ont mis au point des émulsions à base de bitume paraffinique (avec ajout d'additifs et/ou d'émulsifiants appropriés) qui semblent présenter des propriétés similaires aux émulsions à base de bitume «naphténique» (Le Bec, 2012). En 2021, cette carence en liants naphténiques s'étant confirmée, les producteurs d'émulsion belges ont également dû mettre au point des émulsions à base de bitume paraffinique et ils développent notamment des émulsions modifiées au latex.

Actuellement en Belgique:

- Les émulsions pour MBCF sont fabriquées à partir de bitume de type paraffinique et d'émulsifiant cationique.
- Le bitume utilisé pour la fabrication des émulsions est un bitume pur, généralement de grade 50/70, 70/100 ou 160/220. Le choix de la pénétrabilité du bitume sera fonction du fabricant d'émulsion et du type d'émulsion à fabriquer.
- L'utilisation d'émulsion cationique bitumineuse modifiée au latex est également possible. L'introduction de ce type d'émulsion dans les cahiers des charges types régionaux découle des bons retours d'expérience au niveau international.
- Les émulsions cationiques de bitume polymère neuf (PmB) ne sont plus utilisées comme émulsions pour MBCF.

2.1.2.2 Les émulsions à base de liant synthétique pigmentable

Pour obtenir des MBCF colorés de teinte vive (rouge, ocre,...), une émulsion à base de liant synthétique pigmentable peut être utilisée (Lapeyronie & Bouveret, 2015; Pane et al., 2008). Avec une émulsion bitumineuse noire classique, on obtient que des couleurs sombres comme le bordeaux-brun.

Dans ce code de bonne pratique, nous nous concentrerons spécifiquement sur les émulsions cationiques bitumineuses. Si vous souhaitez des informations complémentaires sur les liants synthétiques pigmentables, veuillez vous référer au dossier 17 du CRR (Piérard et al., 2013) et aux deux documents établis par l'organisme de certification COPRO pour la certification de ce type de liant (PTV 858 [Onpartijde Instelling voor de Controle van Bouwproducten (COPRO), 2021a] et TRA 58 [COPRO, 2021b]).

2.1.2.3 La rupture et le mûrissement d'une émulsion

Lorsque l'on utilise une émulsion pour la fabrication d'un MBCF, celle-ci passe par différentes étapes d'évolution: la déstabilisation, la rupture et au final le mûrissement de cette dernière menant à la cohésivité du liant et à l'adhésivité souhaitée. Il est très important de faire la distinction entre ces étapes et plus spécifiquement pour la **rupture** et le **mûrissement** de l'émulsion:

- Les étapes dites de **déstabilisation** (agglomération, floculation et coalescence): durant celles-ci, les gouttelettes s'agglomèrent et se fondent les unes dans les autres.
- L'étape de **rupture**: elle désigne l'ensemble des phénomènes conduisant à la formation d'une phase bitumineuse continue. Les globules de l'émulsion initialement individualisés sont engagés dans un processus irréversible menant au rapprochement de ces globules et à la séparation du bitume et de l'eau. Le bitume adhère au granulat du MBCF et l'eau remonte à la surface du MBCF. La vitesse à laquelle ce processus se produit est indiquée, entre autres, par l'indice de rupture de l'émulsion (voir §.2.1.2.5).
- L'étape de **mûrissement**: elle désigne l'ensemble des phénomènes conduisant à l'évacuation de l'eau et à l'état où le liant atteint ses propriétés finales d'adhésivité et de cohésivité. Cette étape ne peut se réaliser que lorsque la rupture est suffisamment engagée. L'eau de l'émulsion libérée pendant la phase de rupture va s'écouler et/ou s'évaporer.

D'un point de vue plus pratique:

- la **rupture** se marque par le passage d'une coloration brune à une coloration noire puisque le bitume se transforme en un film continu. En effet, au fur et à mesure que le bitume se sépare de l'eau, la couleur fonce jusqu'à ce que le MBCF devienne complètement noir;
- lorsque le **mûrissement** est suffisamment entamé, on ressent une sensation collante lorsque l'on appuie son doigt sur le MBCF («*finger test*», figure 6.30) sans que du bitume ne reste adhérent sur le doigt après avoir appliqué cette pression (ceci n'est pas le cas juste après la rupture). La montée en cohésion nécessaire à l'ouverture au trafic devra encore certainement se faire après cela.

2.1.2.4 Quelle émulsion utiliser et en quelle quantité ?

Le choix du type et des caractéristiques de l'émulsion pour la mise en œuvre d'un matériau bitumineux coulé à froid est fonction principalement:

- de la période d'exécution;
- des conditions climatiques;
- de l'état du support;
- du type de trafic;
- du type de MBCF (monocouche, bicouche, ou scellement d'un enduit).

Pour les exigences vis-à-vis du choix de l'émulsion, veuillez vous référer aux trois cahiers des charges types régionaux.

Comparativement à une émulsion à base de bitume routier, les émulsions cationiques de bitume polymère (PmB) et les émulsions cationiques de bitume modifiées au latex peuvent selon la littérature (Deneuillers et al., 2000):

- améliorer la cohésion à haute température;
- avoir une plus grande élasticité;
- être moins fragile à basse température;
- avoir une meilleure adhésivité aux granulats;
- être moindre sensible au vieillissement.

En Belgique, pour des MBCF utilisés en couche de roulement, le dosage en émulsion varie en moyenne entre 9 % et 15 % dans la formulation, cela correspond à une teneur en liant résiduel comprise entre 5 % et 9 % par rapport au poids des granulats secs. Une étude de formulation permet d'estimer la teneur en liant optimale, qui sera fonction des autres composants, du type de MBCF et de la porosité du support (voir chapitre 5).

La conception de ces émulsions cationiques bitumineuses vise principalement à obtenir (Delfosse et al., 2001; Le Cunff, 2018; Roussel, 2013):

- une grande stabilité au stockage et au transport;
- une viscosité peu élevée pour faciliter l'enrobage des différents constituants du MBCF;
- une fluidité contrôlée lors du répandage du MBCF;
- une rupture rapide et adéquate après le répandage;
- une montée en cohésion rapide après rupture;
- une bonne adhésivité «active» (capacité à adhérer aux granulats) et «passive» (capacité à rester sur le granulat en présence d'eau) entre le liant résiduel et les fractions granulaires.

2.1.2.5 Caractéristiques des émulsions bitumineuses et des liants résiduels

Les émulsions cationiques de bitume répondent aux prescriptions de la norme EN 13808 (NBN, 2013b).

Les caractéristiques mentionnées dans les fiches techniques pour les émulsions cationiques bitumineuses sont décrites ci-dessous.

- La polarité de l'émulsion

Il s'agit d'émulsion cationique dont la polarité est positive (contrairement aux émulsions anioniques dont la polarité est négative). Elle est déterminée selon la norme EN 1430 (NBN, 2009b).

- Le potentiel hydrogène (pH)

Le pH est déterminé selon la norme EN 12850 (NBN, 2022c) à l'aide d'un pH-mètre électronique. Les émulsions cationiques sont «acides» et leur acidité va dépendre d'une part de la nature de l'émulsifiant cationique utilisé et d'autre part de la quantité d'acide nécessaire à son ionisation. Le pH est un bon indicateur de la régularité de la production et il a une influence sur la stabilité au stockage et la rupture de l'émulsion. Dans la norme EN 13808 (NBN, 2013b), il n'y a pas de spécifications pour le pH. En Belgique, il est de maximum de 6 et il se situe en règle générale plutôt dans la fourchette de 1,5 à 5,5.

L'indice de rupture

La vitesse de rupture d'une émulsion peut être estimée via l'indice de rupture de l'émulsion cationique-IREC (*Breaking Value*-BV), déterminé selon la norme EN 13075-1 (NBN, 2016a).

Il s'agit d'une valeur correspondant à la quantité de fines de référence (en grammes) nécessaire pour coaguler 100 g d'émulsion de bitume. Trois types de fines de référence peuvent être utilisés. Ils portent les noms de Sikaisol, Forshammer ou Caolin Q92. On réalise toujours la conversion en «équivalent Forshammer» conformément à la norme EN 13075-1 et par conséquent quand on utilise le filler:

- Forshammer: $BV_{\text{Forshammer}} = 1 \times BV$;
- Sikaisol: $BV_{\text{Forshammer}} = 1,3 \times BV$;
- Caolin Q92: $BV_{\text{Forshammer}} = 1,2 \times BV$.

En pratique, plus l'indice de rupture est petit, plus la rupture de l'émulsion est rapide. La norme EN 13808 définit les émulsions cationiques de bitume selon des classes de performance. Les classes listent les valeurs ou les gammes admissibles pour chaque spécification.

En Belgique, il s'agit généralement des classes de rupture 4 ou 5 correspondant à des émulsions dites «lentes» dont l'IREC doit être respectivement:

- compris entre 110 et 195;
- supérieur à 170.

L'émulsion peut donc être intrinsèquement très lente mais la rupture pourra être adaptée:

- dans l'usine de production des émulsions. *D'un point de vue pratique, il sera bon de favoriser une discussion entre l'entrepreneur et le fabricant d'émulsion afin que ce dernier puisse tenir compte des exigences du type d'application pour adapter si possible la vitesse de rupture de l'émulsion*³.
- au moment de la mise en œuvre du MBCF, par ajout (§ 2.1.4 et § 2.1.5):
 - d'un retardateur de rupture, sous forme d'additif liquide;
 - de fines minérales (ciment ou chaux), additifs généralement solides jouant un rôle important dans le comportement à la rupture et la montée en cohésion.

- La teneur en liant

La teneur en liant est déterminée sur base de la mesure de la teneur en eau selon la méthode de distillation azéotropique (EN 1428 [NBN, 2012c]). Une méthode alternative plus rapide peut être utilisée, il s'agit de la méthode par évaporation à la balance dessicatrice conformément à la norme EN 16849 (NBN, 2016c). *En pratique, il convient de connaître précisément la teneur en liant du lot d'émulsion utilisé pour maîtriser au mieux le dosage en liant du MBCF; ce dernier ayant une influence importante sur sa consistance, sa montée en cohésion et sa durabilité.*

- La pseudo-viscosité

La viscosité d'une émulsion est mesurée à l'aide d'un viscosimètre à écoulement (EN 12846-1 [NBN, 2011c]) et évaluée par une mesure de temps d'écoulement (exprimé en secondes). Plus ce temps d'écoulement sera long, plus l'émulsion présentera une viscosité élevée. La viscosité de l'émulsion est importante car elle conditionne d'une part le fait que l'émulsion soit «pom-

³ Tous les fabricants ne peuvent pas ajuster l'indice pendant la production. Au moment de la rédaction de ce code de bonne pratique, il était également impossible d'ajuster l'indice de rupture de l'émulsion à base de bitume paraffiné.

pable» et «manipulable»; et d'autre part qu'elle puisse correctement enrober les granulats à température ambiante. *En pratique, une trop faible viscosité augmentera les risques de coulure (vers les bas-côtés ou dans les pentes) et une viscosité trop élevée, a contrario, pourra conduire à un mauvais enrobage des fractions granulaires.*

- Le résidu sur tamis

Le résidu sur tamis est la fraction massique (exprimée en %) de particules retenues sur un tamis à ouvertures de mailles de 0,5 mm (EN 1429 [NBN, 2013a]). Cette caractéristique est importante car elle estime d'une part la finesse de dispersion de la phase bitume et elle évalue d'autre part la stabilité au stockage de l'émulsion. Plus ce résidu sur tamis sera élevé, moins l'émulsion sera considérée comme fine et stable. En effet, selon (Delfosse et al., 2001), les cinétiques des réactions de rupture et d'adhésion du bitume sur les granulats sont gouvernées par la distribution de la taille des particules de l'émulsion et les caractéristiques du bitume (viscosité, tension superficielle). Elles vont affecter plus particulièrement le drainage de l'eau restante et si les cinétiques des réactions sont trop rapides, elles peuvent amener à piéger l'eau dans le réseau des gouttelettes interconnectées.

Les principaux essais de caractérisation sur les liants récupérés sont les suivants:

- La pénétrabilité (pen)

L'essai normatif (EN 1426 [NBN, 2015b]) peut être réalisé sur les liants purs, les liants modifiés par un polymère neuf (PmB) et les liants des émulsions modifiées au latex. La pénétrabilité est un indicateur de la consistance du bitume (à 25 °C). Le principe de l'essai est de mesurer (en 1/10 mm) l'enfoncement d'une aiguille dans un échantillon de bitume qui est soumis à une charge de 100 g, pendant 5 secondes. *En pratique, plus cette valeur sera faible, plus le bitume sera dur.*

- La température de ramollissement Bille et Anneau (TB&A)

L'essai normatif (EN 1427 [NBN, 2015c]) peut être réalisé sur les liants purs, les liants modifiés par un polymère neuf (PmB) et les liants des émulsions modifiées au latex. La température de ramollissement Bille et Anneau (exprimée en °C) est un indicateur d'une température d'équiconsistance, c'est-à-dire la température élevée de service au-delà de laquelle la consistance du liant sera insuffisante pour qu'il puisse jouer son rôle sur la chaussée. Le principe de l'essai est de mesurer la température où un anneau de bitume supportant une bille en acier se déforme en s'allongeant jusqu'à atteindre un repère déterminé. *En pratique, plus cette température sera élevée, plus la température appropriée d'utilisation maximale le sera.*

- Le retour élastique

L'essai normatif (EN 13398 [NBN, 2018d]) est réalisé uniquement pour les émulsions cationiques de bitume polymère (PmB) et les émulsions cationiques de bitume modifiées au latex. Le retour élastique est un indicateur qui permet de caractériser la capacité du liant à retrouver ses caractéristiques géométriques d'origine à la suite d'une déformation. Le principe de l'essai est d'étirer une éprouvette de bitume à une température de 25 °C et une vitesse constante de 50 mm/min sur une longueur prédéterminée (200 mm). Le fil ainsi obtenu est coupé en son milieu pour obtenir deux moitiés de fil. La traction établie grâce à l'étirage apparaît sous forme de retour des deux moitiés de fil. Après un temps de retour de 30 minutes, on mesure le raccourcissement des demi-fils que l'on exprime en pourcentage de la longueur de l'allongement. Plus cette valeur sera élevée, plus le bitume présentera de bonnes caractéristiques viscoélastiques. *En pratique, un retour élastique performant améliore la résistance à la déformation permanente et l'autoréparation de la chaussée ('Healing'); et de ce fait il contribuera significativement à la cohésion du MBCF.*

■ 2.1.3 Eau d'apport

Pour obtenir une consistance correcte lors de l'étape de formulation, il faut optimiser les proportions des différents constituants du MBCF (granulats, émulsion, additifs), et plus particulièrement l'eau d'apport. Cette eau d'apport va préhumidifier les fractions granulaires et elle aura pour effets principaux (Le Bec, 2009):

- d'éviter la ségrégation des granulats;
- de faciliter l'enrobage du squelette granulaire (répartition uniforme de l'émulsion sur l'ensemble des fractions granulaires);
- d'affiner la consistance/la maniabilité du MBCF.

L'eau, considérée comme le milieu de mélange des constituants (Deneuvillers et al., 2017), peut être introduite de trois façons différentes:

- par l'humidité des granulats;
- par l'eau d'apport;
- par l'eau présente dans l'émulsion.

L'eau utilisée pour la fabrication d'un MBCF doit de préférence être potable. Au vue de la chimie complexe et sensible des enrobés à l'émulsion, selon (Virginia Department of Transportation [VDOT], Materials Division, 2011), il est préférable:

- qu'elle soit libre d'huile, d'acide, de sel, d'alcalin ou de matières organiques;
- de tester son pH car il peut clairement affecter le comportement de l'émulsion.

La quantité d'eau totale dans le mélange est très importante car elle aura un impact majeur sur la consistance du MBCF et par conséquent sur sa mise en œuvre:

- Une quantité d'eau totale trop faible impliquera un mélange trop «raide» (figure 5.2) avec:
 - une forte consistance;
 - un MBCF moins homogène;
 - une mise en œuvre du MBCF plus compliquée;
 - a priori une moins bonne adhésion au support (la teneur en émulsion «libre» dans le MBCF est insuffisante pour créer un collage adapté et efficace avec le support).

Un cas extrême de mélange trop sec pourra «rompre» dans le traineau de la schlammeuse avant même de pouvoir être appliqué.

- Une quantité d'eau totale trop élevée conduit à un mélange trop «liquide», avec une faible consistance (figure 5.2) et augmentera les risques de phénomènes de ségrégation et de fluage.

Un cas extrême de mélange trop humide impliquera une viscosité insuffisante pour qu'il puisse rester homogène. Les gros granulats migreront vers le bas et l'émulsion et les fines flotteront à la surface du mélange. Cela pourrait produire une surface qui sera très lisse, noire et brillante.

D'un point de vue pratique, selon (VDOT, Materials Division, 2011), un simple test pour déterminer si la teneur en eau totale est excessive, est de tracer une ligne dans le MBCF à l'aide d'un stick. Si la dépression se remplit de liquide, le MBCF contient trop d'eau. L'exécution d'un MBCF de qualité impliquera donc de bien contrôler la teneur en eau totale du mélange.

En pratique, cette teneur en eau totale sera fonction:

- des conditions climatiques: lorsque les températures sont élevées, il est fort probable qu'il faille augmenter la teneur en eau contrairement à des températures plus basses qui nécessiteront de diminuer la quantité d'eau présente dans le mélange. Cependant, lorsque les températures sont estivales, il y a lieu de ne pas avoir le réflexe d'ajouter trop d'eau mais d'utiliser plutôt un retardateur de prise qui diminuera la consistance du MBCF et en facilitera la mise en œuvre (§ 2.1.5).
- des capacités d'absorption du squelette granulaire: c'est-à-dire l'humidité intrinsèque des granulats lors de la mise en œuvre.

■ 2.1.4 Fines spéciales (ciment, chaux)

Pour réguler la vitesse de rupture de l'émulsion, deux produits pulvérulents de grande surface spécifique peuvent être utilisés:

- le ciment (EN 197-1 [NBN, 2011a]);
- la chaux hydratée (EN 459-1 [NBN, 2015a]).

En Belgique, on utilise uniquement le ciment comme régulateur.

Comme explicité au paragraphe 2.1.2, les émulsions utilisées pour les MBCF sont des émulsions surstabilisées à rupture lente. Elles ne doivent pas rompre trop vite afin de pouvoir procéder à la fabrication et à la mise en œuvre du MBCF (pas de rupture dans le mélangeur, ni dans le traineau) mais cette rupture doit néanmoins être suffisamment rapide pour que le MBCF posé reste en place sans s'écouler vers les abords, qu'il entame prestement sa montée en cohésion et qu'une remise au trafic dans un délai rapide puisse être réalisée.

Les fines spéciales (ciment, chaux) vont non seulement jouer un rôle important dans le comportement à la rupture, mais elles vont également affecter le temps de mélange⁴, la consistance et le développement de la cohésion du MBCF. Le comportement de ces fines sera bien entendu fonction de l'émulsion utilisée et en particulier de la nature de l'émulsifiant constitutif de l'émulsion.

Les fines spéciales sont donc ajoutées au mélange en quantité relativement limitée dans la plupart des cas:

- pour le ciment: entre 0,1 % et 2,0 %;
- pour la chaux: maximum 0,1 % (Deneuvillers et al., 2017).

En France, ils utilisent les deux produits. Selon (Ng, 2015), la chaux hydratée va permettre d'obtenir un temps de mélange plus long par rapport au ciment et souvent un meilleur développement de la cohésion.

Pour la chaux, ils utilisent également du lait de chaux, un produit liquide qui supprime les contraintes liées à la manipulation d'une poudre (au niveau du dosage, de la manutention et de la sécurité d'utilisation).

4 Il s'agit du temps pendant lequel on peut mélanger les différents constituants sans que la rupture du MBCF n'intervienne.

■ 2.1.5 Autres additifs

■ 2.1.5.1 Le retardateur de rupture

Il s'agit généralement d'un tensioactif en solution aqueuse (produit pur qui a été dilué dans de l'eau) qui peut être utilisé dans des conditions climatiques estivales pour retarder la rupture et permettre un enrobage adéquat des constituants et une montée de la cohésion mieux contrôlée. Cet additif est donc a priori inutile par temps froid. Dans le langage courant du secteur de l'enrobé, le retardateur de rupture est également nommé "dope". En pratique, ce retardateur de rupture est généralement l'émulsifiant cationique utilisé dans la formulation de l'émulsion au vue de son évidente compatibilité avec les autres constituants. *D'un point de vue pratique, il sera bon de favoriser une discussion entre l'entrepreneur et le fabricant d'émulsion afin que ce dernier puisse lui conseiller le produit qui serait le plus adapté. L'entrepreneur devra bien entendu vérifier la compatibilité de ce produit avec sa formulation de MBCF.*

L'utilisation ou non d'un retardateur de rupture sera bien entendu fonction des conditions d'exécution des MBCF. Si l'entrepreneur décide d'utiliser ce retardateur de rupture, il sera ajouté en quantité très limitée. En effet, cet additif aura un effet conséquent sur le comportement à la rupture mais également sur la consistance du MBCF.

Si un dosage excessif en retardateur de rupture est ajouté au mélange, il peut causer un phénomène de moussage et nuire à l'adhésivité entre le liant résiduel et les fractions granulaires (Delfosse, 2001). En pratique, sur chantier, on pourra alors obtenir un MBCF avec une surface très fermée d'aspect spongieux (diminuant par conséquent la macrotecture du revêtement) et moins durable.

Au niveau des schlammeuses, la vitesse de malaxage aura clairement une influence sur la quantité de retardateur de rupture à utiliser. En effet, plus la vitesse de malaxage sera lente, plus longtemps le MBCF pourra rester maniable et une quantité moindre de tensioactif pourra alors être ajoutée au mélange.

En Belgique, ce retardateur de rupture n'est pas systématiquement employé par tous les entrepreneurs, car il peut influencer négativement la montée en cohésion et la cohésion finale du MBCF. Certains entrepreneurs utilisent des émulsions à rupture « contrôlée » (en adaptant le taux d'émulsifiant) qui sont formulées pour être utilisées à différentes saisons climatiques.

■ 2.1.5.2 Les fibres

En Belgique, nous avons encore peu d'expérience avec ce type d'additifs. En France (Herrero, 2018; Vivier, 1992), au Québec (Le Bec, 2006) et en Suisse (Gontier, 2016), les formulations comportant des fibres minérales ou organiques sont relativement plus connues mais leur utilisation n'est pas systématique. Selon la littérature, ces fibres peuvent assurer plusieurs fonctions:

- Éviter la ségrégation du mélange et augmenter sa cohésion, permettant une application aisée et sans coulure (et plus particulièrement pour des formules avec une granulométrie discontinue).
- Améliorer la durabilité du MBCF.

2.1.5.3 Les pigments

Il existe deux types de pigments: les pigments organiques et inorganiques (également appelés pigments minéraux).

Comparativement aux pigments organiques, la plupart des pigments inorganiques sont stables:

- à l'action des éléments chimiques (acide, base);
- à la lumière (rayonnement ultraviolet);
- aux intempéries.

Ces pigments inorganiques disponibles sur le marché peuvent également être d'origine naturelle ou synthétique. Les pigments inorganiques synthétiques présentent une teinte pure, un très bon pouvoir colorant et des propriétés constantes comparativement aux pigments inorganiques naturels dont le pouvoir colorant est notamment moins marqué. Pour ces raisons essentielles, il est donc recommandé d'utiliser des pigments minéraux synthétiques pour la mise en œuvre des MBCF colorés.

Ces matériaux pigmentaires sont disponibles dans une large gamme de coloris et ils peuvent être utilisés séparément ou en mélange pour fabriquer des MBCF colorés de tonalités variées. Il est toutefois préférable de limiter l'utilisation de MBCF à base de liant synthétique à des zones à faible trafic en raison de leur sensibilité accrue aux dégradations.

Il est possible de pigmenter des formules de MBCF:

- classiques, c'est-à-dire constituées d'une émulsion cationique bitumineuse (couleur noire). Dans ce cas-ci, nous serons limités à des MBCF de couleur bordeaux-brun avec l'ajout de pigment rouge;
- à base d'émulsion de liant synthétique pigmentable (couleur claire et translucide en fin film). Les couleurs possibles seront plus vives (par exemple rouge, ocre, beige).

En général, une quantité de pigment variant de 1 à 3 % peut être ajoutée, dépendant de la couleur finale souhaitée. Cet ajout nécessite d'adapter la formulation car il peut affecter la consistance, le temps de rupture, la montée en cohésion et la durabilité du MBCF coloré; de par la teneur élevée en fines de ces pigments. Veuillez vous référer au dossier CRR 17 si vous souhaitez plus de détails sur les pigments (Piérard et al., 2013).

2.2 Marquage CE et familles de produits

2.2.1 Marquage CE

La norme EN 12273 (NBN, 2008) est une norme produit pour laquelle il existe une annexe ZA (annexe relative aux dispositions vis-à-vis de la Directive Produits de Construction). Dès lors, la réglementation concernant le marquage CE s'applique aux MBCF destinés à la construction et à l'entretien des chaussées routières et autres zones de circulation (ex: trottoirs, voies cyclables), exceptés ceux:

- formulés par le client;
- dont les surfaces sont inférieures à 500 m² et qui ne sont pas contiguës (ex: réparations mineures);
- qui sont couverts par des réglementations internationales (ex: *International Civil Aviation Organisation-ICAO* pour des terrains d'aviation);
- qui sont mis en œuvre dans les tunnels et dans les zones concernées par des réglementations sur l'incendie.

Une des principales caractéristiques de cette norme EN 12273 (NBN, 2008) est qu'elle ne prescrit pas de «recettes», mais établit des exigences performantielles. Pour un certain nombre d'exigences, cette norme laisse plusieurs choix aux pays mêmes. Les choix opérés en Belgique pour les MBCF ont été fixés dans une annexe nationale et les cahiers des charges types des trois régions ont été mis en conformité.

L'évaluation de la conformité des MBCF à la norme performantielle EN 12273 (NBN, 2008) est à démontrer préalablement par le producteur:

- en mettant en place un certificat de maîtrise de la production (FPC - *Factory Production Control*). Ce certificat atteste qu'une maîtrise permanente de la production est assurée en interne par le fabricant. Tous les éléments, exigences et dispositions adoptés par le fabricant pour assurer cette maîtrise doivent être documentés de façon systématique sous forme de règles d'actions et de procédures écrites. Les modalités sont décrites dans les annexes A et B de la norme EN 12273 (NBN, 2008) et dans les cahiers des charges types régionaux.
- en réalisant une planche test pour essais de type initiaux (TAIT - *Type Approval Installation Trial*), correspondant à la famille de MBCF concernés. L'objectif de cette planche d'essai est de démontrer que les caractéristiques du MBCF sont conformes aux caractéristiques déclarées. Cette planche sera une section de route où un MBCF a été réalisé avec un système de maîtrise de la production dont les performances seront évaluées un an après l'application. Les modalités sont décrites dans l'annexe C de la norme EN 12273 (NBN, 2008) et dans les cahiers des charges types régionaux.

Actuellement, il n'y a pas de marquage CE pour l'enduit scellé par un MBCF. Les deux revêtements (enduit superficiel et MBCF) ont un marquage CE qui leur est propre.

2.2.2 Familles de produits

L'utilisation et la classification des routes n'étant pas équivalente dans tous les pays, la définition des familles de matériaux bitumineux coulés à froid (MBCF) et des catégories de routes, pour lesquelles une planche test pour essais de type initiaux est requise, relève de chaque état membre du CEN.

Une famille de produits est basée sur la performance et autorise donc une variation des constituants conformément à la maîtrise de production du producteur. Un TAIT de MBCF pour une autoroute par exemple couvrira l'application sur une chaussée à faible circulation mais l'inverse n'est pas applicable car il démontre l'aptitude de l'entrepreneur.

Pour la Belgique, pour limiter le nombre de TAIT, les familles de produits ont été définies selon le tableau 2.1.

Les familles de produits MBCF sont définies par le type de liant (émulsions cationiques de bitume routier, émulsions cationiques de bitume polymère, émulsions cationiques de bitume modifiées au latex), le type de MBCF et la catégorie de route. Les catégories de route sont quant à elles définies par le type de trafic régional (on parle de Bouwklasse pour la Flandre et Bruxelles et de Réseau pour la Wallonie). Le domaine de validité d'une planche test est défini par l'association d'une famille de MBCF et d'une catégorie de route. Le producteur devra donc réaliser huit planches tests s'il souhaite couvrir l'ensemble des combinaisons belges.

Le maître d'ouvrage devra s'assurer que le producteur de MBCF possède un certificat de marquage CE correspondant bien à la classe de performance visée dans son marché.

Le tableau 2.1 donne un aperçu des différentes catégories de routes et familles de produits (qui peuvent être distinguées afin de limiter le nombre de TAIT).

Famille de produits	1	2	3	4	5	6	7	8
Catégorie de route	R1				R2			
Type de trafic	Bouwklasse 1-5 (Flandre & Bruxelles) Réseau I-II (Wallonie)				Bouwklasse 6-10 + BF (Flandre & Bruxelles) Réseau III (Wallonie)			
Type de MBCF	MBCF monocouche		MBCF bicouche		MBCF monocouche		MBCF bicouche	
Type de liant	b1	b2	b1	b2	b1	b2	b1	b2
b1: émulsion cationique de bitume routier (non modifiée) b2: émulsion cationique de bitume de bitume polymère (PmB), émulsion cationique de bitume modifiée au latex								

Tableau 2.1 – Familles de produits et catégories de routes



Chapitre 3

Préparation du revêtement existant

L'état du revêtement à traiter a une grande influence sur la qualité et la durabilité du MBCF appliqué. C'est pourquoi il est crucial de bien préparer le revêtement existant.

La préparation du revêtement existant peut être subdivisée en deux phases.

- Phase 1 - Réparations préalables (§ 3.1)

Vu l'épaisseur limitée et la sensibilité à la fissuration d'un MBCF, la durée de vie d'un MBCF posé sur un revêtement abîmé sera très restreinte. Il est donc tout à fait déconseillé d'appliquer un MBCF sur un revêtement endommagé, sans avoir préalablement réparé les dégradations.

Les réparations préalables sont réalisées avant la pose effective des MBCF. Elles sont de préférence effectuées deux à trois semaines à l'avance en fonction de la situation et de la technique de réparation appliquée. Le but est en fait que la zone réparée soit exposée suffisamment longtemps au trafic et aux conditions environnantes pour que les huiles présentes aient le temps de s'évaporer, pour réduire la graisse à la surface et pour que le postcompactage des réparations réalisées soit terminé avant de placer le MBCF.

Le § 3.1 approfondit les types de dégradation et la manière dont celles-ci doivent être réparées.

- Phase 2 - Travaux préparatoires (§ 3.2)

Juste avant la pose proprement dite des MBCF, il faut toujours procéder à quelques travaux préparatoires, même si le revêtement ne présente pas de dégradations notoires. Le § 3.2 s'y intéresse plus spécifiquement.

Lors de la rédaction du cahier spécial des charges pour les travaux de schlammage, il est donc important de tenir compte des deux phases de préparation. En outre, il faut prévoir une signalisation correcte et suffisante pendant la réalisation du MBCF pour dévier le trafic afin d'éviter une circulation trop rapide du trafic routier sur le MBCF frais. Le MBCF doit être rompu et suffisamment mûr pour avoir une cohésion suffisante avant que le trafic ne puisse être à nouveau autorisé à circuler dessus, afin d'empêcher que des gravillons ne se détachent prématurément du MBCF.

3.1 Réparations préalables

3.1.1 Rétablissement de la planéité

Si les défauts d'uni, mesurés à la règle de 3 m, deviennent supérieurs à 20 mm, il faut les réparer avant les travaux de schlammage. Ils ne peuvent pas être compensés avec la technique du MBCF même. Il va falloir fraiser localement la couche inégale et la réparer de manière durable au moyen d'une couche de matériau bitumineux appliquée à chaud. Pour plus de détails sur des réparations durables de ce type, il est fait référence aux chapitres concernés dans les différents cahiers des charges types en Belgique.

De telles interventions sont en général réalisées bien avant (> 2 à 3 semaines) les travaux de schlammage pour donner aux zones réparées le temps de s'adapter aux conditions et au trafic. On évite ainsi que d'autres déformations supplémentaires ne surviennent après l'application du traitement au MBCF.

Toutefois, si les défauts d'uni dans le revêtement restent inférieurs à 20 mm (tant les défauts d'uni globaux présents sur toute la largeur de la chaussée que ceux concentrés dans les frayées), il n'est pas nécessaire de réaliser des travaux de réparation à l'avance. Il est possible d'éliminer ces défauts d'uni limités via une technique au MBCF spécifique avec une granularité adaptée le jour même ou tout au plus quelques jours avant les travaux de schlammage. Un MBCF qui sert à éliminer le défaut d'uni est également appelé «MBCF de lissage». Nous faisons référence pour cela au chapitre 4 et au § 4.2.2.A du présent code de bonne pratique.

Par définition, le MBCF de lissage n'a pas une épaisseur constante, de sorte que la consommation de MBCF va être variable. Il est préférable dès lors de prévoir un poste distinct dans le cahier spécial des charges.

Selon l'endroit des défauts d'uni et leur profondeur, on utilisera le MBCF de lissage sur toute la largeur de la bande ou on l'appliquera sur une largeur restreinte, qui comble par exemple uniquement les frayées. Pour ce dernier cas, on peut adapter le traîneau avec des cloisons de manière à ce que seule une partie du traîneau de MBCF soit arrosée de MBCF ou à ce que l'on puisse utiliser des traîneaux adaptés en largeur.

3.1.2 Réparation des flaches et nids de poule

Si le revêtement présente de gros défauts d'uni et dégradations, comme des affaissements, des flaches ou des nids de poule, il convient d'abord d'éliminer la cause de ces dégradations.

Les affaissements et les flaches dans le revêtement (figure 3.1) sont souvent causés par une instabilité locale de la structure de la chaussée alors que les nids de poule peuvent être la conséquence d'une absence locale de cohésion dans le revêtement routier ou de l'évolution de fissures locales ou de plumage.

Dans un cas comme dans l'autre, les matériaux endommagés dans les zones affaiblies à hauteur de la dégradation doivent être enlevés et remplacés, de sorte qu'il y ait une nouvelle chaussée s'intégrant tout à fait dans le profil du revêtement existant. Le cas échéant, la structure sous-jacente (fondations, sous-fondation, talus, évacuation, etc.) devra être réparée, si la cause des dégradations est de nature structurelle.



Figure 3.1 – Flache

Les matériaux bitumineux appliqués à chaud sont recommandés comme matériau de réparation. La mise en œuvre d'un MBCF sur des enrobés appliqués à froid peut entraîner une instabilité du MBCF. Si l'enrobé à froid n'est pas adapté à cette situation, le MBCF peut emprisonner l'eau résiduelle ou des fluidifiants de l'enrobé à froid. Il se peut donc que les réparations de ce type ne durcissent pas suffisamment.

Il est donc conseillé d'enlever les réparations provisoires effectuées précédemment avec, par exemple, de l'enrobé à froid et de les remplacer par une réparation durable avec des matériaux bitumineux appliqués à chaud, avant d'appliquer une couche de MBCF sur le revêtement routier.

■ 3.1.3 Traitement des fissures

En raison de son épaisseur limitée, le MBCF n'offrira que peu, voire pas de résistance aux fissures dans le revêtement routier existant. A mesure que les fissures s'élargissent, le risque de réflexion des fissures augmente, avec pour conséquence que l'imperméabilité du MBCF est réduite à néant. Pour éviter cela, les fissures dans le revêtement doivent être traitées préalablement d'un point de vue technique. D'un point de vue esthétique, il faut garder à l'esprit qu'avec le temps, la masse de scellement traitée des fissures va se dessiner à travers le MBCF. L'étanchéité à l'eau est maintenue, mais le schéma de fissuration va devenir visible.

On peut répartir les fissures en fonction de leur largeur (tableau 3.1).

Type de fissure	Largeur de fissure (l) en mm
Microfissures	$l \leq 0,5$
Fissures capillaires	$0,5 < l \leq 2$
Fissures	$2 < l \leq 5$
Fissures larges	$l > 5$

Tableau 3.1 – Définitions des types de fissure

La présence de fissures et leur nombre peuvent influencer la porosité de la zone considérée. Il est donc important de faire une distinction dans le traitement des fissures isolées (fissures qui sont présentes seules dans le revêtement, où aucune autre fissure ne peut être trouvée à une distance relativement courte) et des fissures groupées (fissures multiples qui sont situées à une distance limitée (par exemple, de quelques cm à quelques dizaines de cm) les unes des autres.

En fonction du type de fissure et de la manière dont elles se présentent (isolées ou groupées), on peut déterminer la méthode de traitement appropriée à l'aide du tableau 3.2.

Type \ Répartition	Fissure isolée	Fissures groupées
Microfissures	Pas de traitement préalable nécessaire	Même traitement préalable que pour un revêtement moyennement poreux (§ 3.1.4)
Fissures capillaires		
Fissures	Traiter la fissure individuellement	Remplacer le revêtement fissuré
Fissures larges	Remplacer le revêtement fissuré	

Tableau 3.2 – *Traitement préalable nécessaire en fonction du type de fissure et de la répartition*

3.1.3.1 Microfissures ou fissures capillaires ($l \leq 2$ mm)

Pour autant qu'elles aient un caractère isolé, elles peuvent encore être scellées par un MBCF, de préférence avec un mélange fin (chapitre 4 et § 4.2.2.B). En principe, cela ne nécessite aucune réparation préalable ni traitement du revêtement.

Si ces fissures ont toutefois un caractère groupé, c'est-à-dire que plusieurs fissures sont concentrées ou groupées dans une certaine zone du revêtement, elles entraîneront une porosité plus élevée de la zone. Le revêtement sera alors traité de la même manière qu'un revêtement poreux (§ 3.1.4).

3.1.3.2 Fissures d'une largeur entre 2 et 5 mm ($2 < l \leq 5$ mm)

Si le revêtement présente des fissures plus larges que 2 mm, il y a toujours des réparations préalables à réaliser au revêtement. Sinon, ces fissures entraîneront assez vite des fissures de réflexion du MBCF.

Le scellement des fissures isolées comporte la création, par fraisage, dans la fissure, d'une gorge d'une certaine largeur et son remplissage par une masse de scellement bitumineuse. Pour les détails, référez-vous aux chapitres correspondants dans les différents cahiers des charges types pour le traitement des fissures isolées.

Les joints de reprise et les joints d'un revêtement bitumineux, qui sont déjà abîmés et ouverts, sont préalablement nettoyés et rejointoyés de manière similaire.

Toutefois, les fissures groupées sont trop nombreuses pour pouvoir être traitées individuellement. Dans ce cas, on va devoir fraiser localement et sur une largeur limitée le revêtement fissuré et le remplacer.

3.1.3.3 Fissures larges ($l > 5$ mm)

Dans le cas de fissures larges, le revêtement fissuré doit être fraisé et remplacé localement et sur une largeur limitée. Sinon, ces fissures larges entraîneront trop rapidement des fissures réfléchives dans le nouveau MBCF.

Même s'il s'agit de fissures isolées, le fraisage et le rejointoiement avec une masse de scellement des fissures larges sont généralement insuffisants pour réduire le risque de réflexion des fissures.

De plus, à l'endroit de la fissure fraisée, le MBCF reposera sur une masse de scellement relativement large et souple. Il risque donc de se fatiguer rapidement en raison de contraintes de flexion dues au trafic routier, entraînant dégradation et pelade du MBCF. Dans le cas où le revêtement présente déjà du faïençage (figure 3.2, le revêtement est complètement morcelé, et ce qui l'a rendu instable), il doit être localement fraisé et remplacé ou des mesures structurelles seront également nécessaires. Ici, non seulement la porosité élevée représentera un risque de dégradations pour le MBCF par réflexion des fissures présentes, mais l'instabilité aussi. La mise en œuvre d'un MBCF sur de telles surfaces fissurées, sans réparation préalable et durable de cette surface est donc à déconseiller.



Figure 3.2 – Revêtement avec regroupement de fissures larges (faïençage)

Il est tout à fait inutile de traiter un revêtement bitumineux fissuré avec une interface antifissure (comme une grille en fibre de verre, p. ex.) uniquement en combinaison avec un MBCF comme couche de roulement. En effet, un MBCF a une épaisseur de couche très limitée et ne contribuera en rien à la résistance à la flexion de l'interface antifissure. Pour obtenir une résistance à la flexion suffisante et pour que l'interface antifissure (couche d'armature + couche de roulement) fonctionne, la couche antifissure doit toujours être combinée à un revêtement bitumineux de plusieurs centimètres d'épaisseur (3 à 5 cm en fonction de l'interface antifissure choisie, voir cahiers des charges types). En d'autres termes, plus on peut intégrer une interface antifissure en profondeur dans le revêtement bitumineux, plus les performances de cette interface antifissure seront bonnes.

■ 3.1.4 Traitement de zones poreuses

La porosité de la chaussée à recouvrir doit également être prise en compte lors de la détermination de la préparation appropriée pour les travaux de schlammage. Plus le revêtement existant est poreux, plus on devra utiliser de MBCF lors du recouvrement et plus l'émulsion sera absorbée par le revêtement. Ceci peut entraîner des problèmes lors de la pose (mélange trop sec). La qualité et la durabilité du MBCF sont elles aussi compromises.

La porosité d'un revêtement routier dépend entre autres de sa texture, qui peut être mesurée à l'aide d'un simple essai à la tache de sable (EN 13036-1 [NBN, 2010a]). De plus, les fissures groupées (§ 3.1.3) et/ou le plumage augmentent également la porosité d'un revêtement. Ces paramètres permettent de déterminer la classe de porosité (tableau 3.3).

Classe de porosité (p)	Texture		Fissures groupées		Degré de plumage
	MTD* (mm)				
Faible	MTD ≤ 0,8	et	Peu ou pas de microfissures	et	Peu ou pas de plumage
Moyenne	0,8 < MTD ≤ 1,5	ou	Microfissures ou fissures capillaires	of	Plumage
Elevée	MTD > 1,5	ou	Fissuration > 2 mm	et	Plumage important, arrachement (**)

Tableau 3.3 – Définition des classes de porosité

(*) *Mean Texture Depth*, mesurée via l'essai à la tache de sable (EN 13036-1 [NBN, 2010a])

(**) Arrachement = évolution du plumage où un groupement de gravillons contigus issus du plumage se forme à la surface du revêtement

En fonction de la classe de porosité du revêtement à traiter (déterminée à l'aide du tableau 3.3), on peut choisir à l'aide du tableau 3.4 comment traiter préalablement cette porosité.

Classe de porosité (p)	Réparation préalable du revêtement
Faible	Aucune
Moderée	Peut-être nécessaire, via pré-MBCF ou pré-enduit (localement ou non)
Elevée	Nécessaire, remplacer le revêtement abîmé

Tableau 3.4 – Réparation préalable nécessaire en fonction de la classe de porosité

3.1.4.1 Porosité faible

Dans le cas d'une porosité faible, on peut appliquer le MBCF directement sur le revêtement, sans traitement préalable.

3.1.4.2 Porosité modérée

Si le revêtement est moyennement poreux, il doit d'abord être prétraité de manière à ce que sa porosité diminue. Pour cela, on peut appliquer un préenduit ou un pré-MBCF.

Si on utilise un préenduit, on va arroser le revêtement avec une émulsion cationique de bitume routier ordinaire ou de bitume élastomère, puis répandre du sable de concassage grossier (0/2 mm) ou de fins gravillons (2/4 ou 4/6,3 mm). Pour autant que la surface s'y prête, l'émulsion est toujours appliquée avec une rampe d'épandage (en combinaison avec un camion-citerne). Si la surface est trop petite, on utilise une lance et on veille à une répartition uniforme, sans excès de l'émulsion, sinon, le MBCF placé dessus risque de ressuer. Le dosage de l'émulsion dépend de la porosité: plus le revêtement sera poreux, plus il absorbera d'émulsion.

On peut aussi opter pour l'application d'un pré-MBCF, de préférence un mélange de petit calibre (0/2 ou 0/4 mm). Un pré-MBCF est une sorte de couche de conditionnement qui sert à combler la porosité/rugosité et à former une texture adéquate sur la chaussée sur laquelle on peut appliquer correctement le MBCF proprement dit.

Les deux techniques de préenduit ou pré-MBCF peuvent être appliquées ou non sur l'ensemble de la surface localement ou globalement, en fonction de l'homogénéité ou de l'hétérogénéité du revêtement en termes de porosité.

■ 3.1.4.3 Porosité élevée

Au cas où le revêtement présente une porosité élevée, il doit être fraisé localement et remplacé.

■ 3.1.5 Traitement du ressuage

Quand le revêtement bitumineux à recouvrir de MBCF présente un problème de ressuage, il faut en rechercher la cause et, le cas échéant, y remédier avant d'appliquer le MBCF. Dans certaines situations, il faudra même conclure qu'il n'y a pas de solution à base de MBCF pour un revêtement qui présente du ressuage. Si on n'en tient pas compte, on risque tout simplement un renforcement du ressuage du revêtement après recouvrement avec du MBCF.

Le ressuage d'un revêtement bitumineux est caractérisé par un excès de liant à la surface de la couche de roulement, ce qui entraînera une diminution de la rugosité du revêtement. Le liant peut également rester collé aux pneus.

L'excès de liant à la surface d'un revêtement bitumineux peut avoir plusieurs causes:

- un surdosage du liant;
- un mélange non homogène lors de la pose, de sorte que des zones d'une part grasses (riches en bitume) et d'autre part maigres (pauvres en bitume) sont présentes;
- une instabilité du squelette granulaire, qui réduit le pourcentage de vides dans le squelette et pousse le bitume vers la surface;
- un enfoncement des granulats dans la couche sous-jacente.

Si le revêtement à recouvrir est un enduit, il faut prendre les mesures spécifiques préalables décrites au § 8.2 du code de bonne pratique CRR R71/01 «Code de bonne pratique des enduits superficiels» (Centre de Recherches Routières [CRR], 2001). L'explication ci-dessous n'est dans ce cas pas d'application.

Selon le schéma de ressuage à la surface du revêtement, on peut définir trois classes (tableau 3.5).

Classe de ressuage	Description
Léger	Taches de ressuage non successives entre les granulats du revêtement bitumineux. Les granulats sont encore visibles et ne sont pas recouverts par le liant.
Modéré	Les taches de ressuage sont rassemblées en grandes zones où les granulats sont recouverts par un excès de liant. La texture du revêtement est encore visible à travers le film de liant.
Important	Les taches de ressuage sont présentes en abondance et se succèdent en grandes zones. Les granulats ont complètement disparu et la texture n'est plus visible.

Tableau 3.5 – Définition des classes de ressuage

3.1.5.1 Ressuage léger

Si le revêtement est touché par une légère forme de ressuage, il ne faut pas prévoir de préparation préalable du revêtement et on peut appliquer directement un MBCF.

3.1.5.2 Ressuage modéré ou important

En cas de ressuage modéré à important, ce problème doit être traité préalablement. Selon la cause, deux options principales sont envisageables:

A. Élimination de l'excès de liant à la surface

Avec la technique du fraisage fin, le fraisage est effectué à une profondeur limitée afin de n'enlever que la fine couche de liant sur la surface et de libérer à nouveau les granulats. Il est préférable de le faire par temps plus froid pour éviter que le liant ne colle dans le tambour de fraisage. On peut aussi utiliser un tambour de fraisage pour l'effacement des marquages. Les burins sont orientés différemment et on peut gratter une très fine couche du revêtement.

Comme alternative, d'autres techniques peuvent également être appliquées, telles que des disques rotatifs qui frottent la surface de la chaussée, ou l'hydrodécapage. Dans le dernier cas, le résultat dépend de la pression d'eau appliquée, de la température du revêtement et de la vitesse de progression.

Ces techniques peuvent être limitées à la largeur des frayées (en cas de ressuage dans les frayées).

L'important, c'est d'éliminer la cause du ressuage. Sinon, ces techniques n'apporteront qu'une solution temporaire au ressuage du revêtement.

B. Fraisage et remplacement de l'intégralité de la couche

Si l'élimination de l'excès de liant à la surface n'est pas satisfaisante et qu'il y a un risque élevé que le problème de ressuage se reproduise, toute la couche bitumineuse ressuante doit être fraisée et remplacée.

Si la couche ressuante est très riche en liant (par ex. un MBCF ressuant), il est préférable de fraiser plus profondément que l'épaisseur de la couche ressuante bitumineuse (par ex. 1 cm de profondeur dans le revêtement bitumineux sous-jacent) afin de fraiser suffisamment de matériau et d'empêcher le liant fraisé d'adhérer au tambour de fraisage.

La profondeur de fraisage doit également tenir compte de l'épaisseur nominale de la nouvelle couche d'enrobé à poser dans l'évidement fraisé (par ex. 4 cm de profondeur si une couche de roulement de type AC-10surf4-x doit être posée).

C. Enchâssement des pierres

Par souci d'exhaustivité, on peut également indiquer ici que certains entrepreneurs appliquent parfois une technique très spécifique qui consiste à épandre la pierre concassée chaude et à l'enchâsser dans la zone ressuante. Toutefois, cette solution ne doit certainement pas être considérée comme une solution standard. Ce traitement peut être envisagé dans le cas d'un problème sévère de ressuage, mais doit être très limité en surface. Il faut en fait suffisamment de liant à la surface pour pouvoir fixer les pierres chaudes dans le revêtement, sinon, du plumage se produira rapidement.

Pour ce faire, des pierres dépoussiérées et chauffées (160 °C) seront répandues sur les zones présentant du ressuage, puis enchâssées couche par couche dans le liant libre. Le revêtement est également préchauffé zone après zone sans brûler le liant. Ce traitement est répété jusqu'à ce que toute la zone abîmée soit traitée.

Il est important que l'entrepreneur ait suffisamment d'expérience pour estimer la situation, pour prévoir le bon calibre des pierres et veiller à la réussite de cette technique.

On pourrait comme alternative d'abord envisager un enduit sandwich (code de bonne pratique CRR – R71/01 Code de bonne pratique des enduits superficiels, § 8.2) (CRR, 2001).

■ 3.1.6 Inspection de l'évacuation des eaux de la route et préparation des bermes

Un des objectifs des MBCF est d'améliorer l'imperméabilité des revêtements. C'est pourquoi il est crucial d'assurer une évacuation adéquate des eaux de pluie sur le revêtement vers les canaux et les égouts. Il ne servirait à rien de rendre le revêtement imperméable si l'eau de pluie au bord de la route ne pouvait être évacuée. Cette eau affecterait alors la structure de la route.

Il est donc important que les systèmes d'évacuation des eaux de pluie à l'intérieur et autour de la structure routière soient inspectés en vue des travaux schlammage et, si nécessaire, réparés et nettoyés. Il peut s'agir des canaux de drainage, des avaloirs, des fossés, des drains, etc. (par exemple la figure 3.3).

S'il n'y a pas d'évacuation au bord de la route, on vérifiera si les bermes ne constituent pas une obstruction pour l'eau (figure 3.3). Si nécessaire, on prévoira à distance régulière des passages dans les bermes non revêtues.

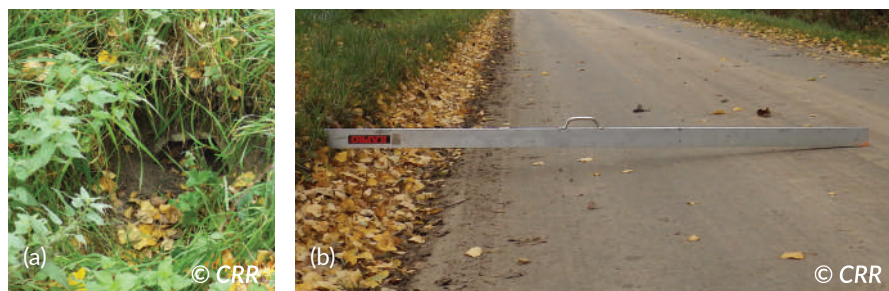


Figure 3.3 – Nettoyer le système d'évacuation bloqué (a) et prévoir des passages dans les bermes (b)

3.2 Travaux préparatoires

3.2.1 Enlèvement des marquages routiers

L'enlèvement des marquages existants est souvent nécessaire parce qu'ils peuvent entraîner une faible adhésion ou des différences de hauteur.

3.2.1.1 Marquages thermoplastiques

Il est important d'enlever les marquages thermoplastiques du revêtement à traiter en raison de leur épaisseur (3 à 4 mm) et de leur mauvaise adhésion avec les MBCF.

3.2.1.2 Marquages à base de peinture routière

Pour la plupart des marquages à base de peinture routière, on n'a pas besoin de traitement spécifique et le mélange de MBCF trouvera suffisamment d'adhésion sur ces marquages. Il est toutefois préférable d'enlever les nouveaux marquages peints ou les marquages comportant plusieurs couches de peinture l'une sur l'autre (figure 3.4), étant donné qu'ils présentent un risque de problème d'adhésion. Les nouveaux marquages sont en effet trop lisses alors que les anciennes couches de peinture peuvent s'écailler et décoller la couche supérieure du MBCF de la route (figure 3.5).



Figure 3.4 - Enlèvement des marquages



Figure 3.5 - Dégradation au traitement superficiel par des marquages qui n'ont pas été enlevés

3.2.2 Nettoyage du revêtement

Le revêtement existant doit être parfaitement propre. Il peut s'avérer nécessaire (beaucoup de saletés sur la route, trafic agricole, etc.) de recourir pour cela à une balayeuse-nettoyeuse haute pression (plus de 90 bars). Il est alors recommandé de prévoir un poste distinct à cet effet dans le cahier spécial des charges.

Là où il n'y a pas de caniveau ou de bordures en béton, les bords de la chaussée réclament une attention particulière. Toutes sortes de saletés (sable, argile, terre) ont tendance à s'y accumuler et à s'y agglomérer. Bien que cela soit souvent difficile, cette saleté doit être complètement éliminée:

si le MBCF est appliqué sur une surface sale, ses bords s'effriteront rapidement et ces dégradations peuvent se propager.

Une attention particulière doit être accordée aux joints (de reprise) de la chaussée (par exemple, les joints de reprise d'un revêtement bitumineux, les joints d'une chaussée en clinkers). Ceux-ci ont besoin d'un nettoyage supplémentaire car la saleté peut facilement s'y accumuler.

Juste avant l'application du MBCF, la poussière restante sur le revêtement est à nouveau brossée ou aspirée mécaniquement.

■ 3.2.3 Protection de surfaces qui ne peuvent pas être recouvertes d'un MBCF

Les éléments qui ne peuvent pas être recouverts de MBCF tels que les couvercles d'égouts, les avaloirs, les caniveaux, les marquages, etc. sont protégés en collant temporairement du papier cartonné dessus ou en y appliquant un film de protection autocollant (figure 3.6 et figure 3.7).

Afin de pouvoir retrouver facilement ces éléments recouverts après la pose de la couche de MBCF et les débarrasser du MBCF, il est nécessaire de mesurer leur position le cas échéant et de la noter ou marquer au bord de la route.



Figure 3.6 – Couverture des impétrants



Figure 3.7 – Couverture d'un caniveau à ne pas traiter

Au début et à la fin du chantier, ainsi qu'aux joints de fin de journée, un film imperméable et suffisamment résistant d'au moins 60 cm de largeur doit être appliqué et collé afin que le MBCF soit droit et perpendiculaire à l'axe routier à ces endroits et pour éviter toute pollution du revêtement adjacent. Ce film est enlevé après l'application du MBCF.

Comme alternative, des agents anti-adhérents respectueux de l'environnement peuvent également être utilisés aux endroits que l'on veut protéger du MBCF. Ces produits empêchent le MBCF d'adhérer à la surface et permettent d'enlever localement et mécaniquement (balais et pelles) le MBCF après rupture.

■ 3.2.4 Application d'une couche de collage

L'application d'une couche de collage sur un revêtement bitumineux peut améliorer l'adhésion du MBCF, certainement dans le cas d'anciens revêtements oxydés et poreux, ou de revêtements qui présentent un léger plumage. L'émulsion pour la couche de collage est dosée de sorte qu'il reste 100 à 250 g/m² de liant résiduel sur le revêtement (en fonction de la texture du revêtement existant et des prescriptions du cahier des charges types dans la Région en question).

L'application de la couche de collage pour les MBCF est similaire à celle pour les revêtements bitumineux. Nous faisons référence au § 3.2 du code de bonne pratique CRR R96 «Code de bonne pratique pour la mise en œuvre des revêtements bitumineux» (CRR, 2018).

La couche de collage est nécessaire sur des revêtements en béton ainsi que sur des revêtements modulaires. Sur du béton, une couche de collage qui est moins acide (pH > 4,5, selon la spécification du type) doit être appliquée de telle sorte que la rupture de l'émulsion soit plus lente et qu'elle puisse mieux adhérer au revêtement en béton (tableau 3.1 du code de bonne pratique CRR R96 «Code de bonne pratique pour la mise en œuvre des revêtements bitumineux») (CRR, 2018). En fonction de la texture de la surface en béton, et en tenant compte des prescriptions des cahiers des charges types des trois Régions, on appliquera entre 100 et 250 g/m² de liant résiduel.

Pour plus d'informations sur les couches de collage en général, consultez le dossier CRR 14 «Les émulsions cationiques bitumineuses en tant que couches de collage - Recommandations pratiques de mise en œuvre» (Destrée & Brichant, 2012).

Chapitre 4

Applications des MBCF

Les MBCF sont principalement appliqués comme traitement superficiel, en une ou en deux couches ou en combinaison avec une technique qui s'apparente à celle des enduits superficiels (enduit scellé par un MBCF).

En Belgique, ils sont utilisés comme technique d'entretien et de réparation pour des:

- voiries locales et régionales soumises à une charge de trafic modérée;
- pistes cyclables et des trottoirs;
- chemins privés, des terrains d'entreprises (notamment pour des PME).

Les MBCF colorés sont souvent utilisés pour augmenter la visibilité des pistes cyclables, des bandes cyclables suggérées sur la chaussée et des îlots.

Il y a aussi d'autres applications spécifiques pour lesquelles les MBCF sont utilisés occasionnellement:

- pour fixer des treillis en acier comme système antifissure;
- comme couche de protection d'une couche de liaison en enrobé mise en œuvre juste avant l'hiver et sur laquelle la couche de roulement n'a plus pu être mise en œuvre avant l'hiver;
- comme couche d'accrochage sur un revêtement en béton comportant des rainures;
- pour l'entretien des zones de stationnement et parkings de centres commerciaux et autres complexes immobiliers. Référez-vous au § 7.4.3 où l'utilisation d'un MBCF est déconseillée pour les aires de stationnement.

Là où l'on attend un trafic limité, par exemple dans les zones résidentielles, il faut tenir compte de l'aspect rugueux du MBCF, qui pourrait avoir un effet esthétique potentiellement préjudiciable. Nous renvoyons à ce sujet au §1.1 et à la figure 1.2, ainsi qu'à l'utilisation d'un compacteur à pneus (voir § 6.9).

Dans d'autres pays, la technique du MBCF est aussi appliquée régulièrement:

- comme technique d'entretien et de réparation pour des voiries soumises à un trafic lourd (p. ex. autoroutes, pistes d'atterrissage d'aéroports);
- comme système antifissure dans la structure d'un revêtement bitumineux;
- comme traitement superficiel à des endroits où le risque d'accidents est plus élevé, pour augmenter la rugosité du revêtement (avec une granulométrie ou un type de granulats adapté).

Pour l'entretien de routes principales (et certainement pour des pistes d'atterrissage), la vitesse de mise en œuvre constitue un atout majeur: la réouverture du site au trafic peut se faire très rapidement.

L'application sur des voiries soumises à un trafic lourd demande des MBCF de meilleure qualité, c.-à-d. des MBCF offrant une meilleure résistance à la déformation, au plumage et à d'autres formes de dégradation. On utilise toujours pour ce faire des émulsions cationiques de bitume polymère (PmB) ou des émulsions cationiques de bitume modifiées au latex. Parallèlement à cela,

les performances pourraient être améliorées en rectifiant la granulométrie et en utilisant certains additifs (comme des fibres). Le terme *microsurfacing* est souvent utilisé pour un MBCF de haute qualité, alors qu'il n'existe pas de description uniforme pour cela. Jusqu'à présent en Belgique, sur des routes soumises à un trafic lourd, l'utilisation des MBCF reste limitée. Par conséquent, ils ont encore beaucoup de potentiel à offrir, à condition de développer l'expertise nécessaire au niveau des MBCF de haute qualité.

En général, les MBCF sont applicables sur différents types de revêtements routiers:

- enrobé;
- MBCF ou enduits;
- béton;
- pavage en béton ou pavés.

Sur un revêtement en béton ou sur des pavés, il est recommandé d'appliquer préalablement une émulsion de bitume avec taux d'acidité approprié ($\text{pH} > 4,5$ à 5) comme couche d'accrochage. Une émulsion trop acide romprait trop rapidement après contact avec le ciment libre à la surface en béton et dès lors, n'accrocherait pas suffisamment. Il en découlerait un risque accru de pelade dans le MBCF. Dans ce cas, on n'applique jamais un MBCF monocouche, mais toujours un MBCF bicouche ou un enduit scellé par un MBCF.

Bien que l'utilisation de MBCF sur des pavages soit possible, elle est moins recommandée. Le risque de fissures réfléchives des joints dans le MBCF est élevé, surtout quand les pavés présentent déjà une certaine instabilité. Pour cette même raison, l'application sur des dalles de béton n'est pas indiquée. Les joints larges et instables seront immédiatement réfléchis dans le recouvrement mince en MBCF.

Les trois techniques d'application (MBCF monocouche, MBCF bicouche et enduit scellé par un MBCF) sont discutées plus en détail au § 4.1. Le choix d'une technique précise dépend du trafic et de l'état du revêtement. Ceci est expliqué au § 4.2, qui donne aussi des recommandations pour les bons choix. Les choix de quelques paramètres de mélange sont également abordés, comme la granulométrie et le type d'émulsion, vu qu'ils doivent aussi être choisis en fonction du trafic et de l'état existant du revêtement. Enfin, le § 4.3 évoque très brièvement quelques applications particulières et le § 4.4 traite de la question de savoir quand l'application va être réalisée.

Comme cela a déjà été dit dans l'introduction, les MBCF ne conviennent pas pour réparer des dégradations importantes. Quand l'état de la voirie n'est plus satisfaisant, il est nécessaire de réaliser préalablement les réparations qui s'imposent afin que le traitement ultérieur avec un MBCF puisse donner un résultat durable. Pour plus de détails sur ces réparations, veuillez vous référer au chapitre 3.

4.1 Types de techniques d'application

4.1.1 MBCF monocouche

Un MBCF monocouche est l'application la plus simple d'un MBCF. On applique une seule couche de MBCF sur le revêtement existant.

Cette technique convient uniquement aux routes soumises à une charge de trafic limitée, comme les zones résidentielles et les routes communales à circulation réglementée, où le revêtement est encore dans un bon état homogène. Cela signifie qu'il ne présente pratiquement pas d'irrégularités et qu'il peut y avoir tout au plus un début de plumage (figure 4.1) ou une légère fissuration. Dès que davantage de dégradations sont présentes, comme de l'orniérage (profondeur > 5 mm), de la fissuration (largeur de fissure > 2 mm), du plumage modéré à important, de l'arrachement ou de l'affaissement, etc. ou que le revêtement ne présente plus une structure homogène en surface, un MBCF monocouche ne suffit plus. Le MBCF est trop mince et ne contribue pas assez structurellement pour éliminer cette dégradation, a fortiori si la dégradation est répartie de manière trop hétérogène.



Figure 4.1 - Exemple d'un plumage naissant

L'objectif principal d'un MBCF monocouche est d'améliorer l'étanchéité du revêtement, en luttant contre le début de plumage et la fissuration naissante, dans le cadre d'une stratégie d'entretien préventif (chapitre 7).

En général, pour un MBCF monocouche, on utilise des granulats de petit calibre (0/4 ou 0/6,3). Plus les granulats des MBCF sont fins, plus ils sont adaptés pour combler la porosité et les fissures fines. De plus, une structure superficielle fine génère moins de bruit de roulement et de résistance au roulement. Par contre, la rugosité va diminuer à mesure que l'on utilise un calibre plus petit.

Plus spécifiquement, on peut également utiliser un MBCF à base d'un calibre 0/2. Ces mélanges très fins trouvent leur application dans une préparation locale du revêtement comme pré-MBCF (compenser la porosité ou comme scellement des joints entre les revêtements modulaires) ou comme MBCF monocouche quand on veut augmenter le confort de roulement du revêtement d'une piste cyclable. La durabilité est limitée en raison de la couche mince et du squelette sableux. Il faut en outre être attentif à la rugosité réduite de ces mélanges bitumineux qui sont riches en liant.

Un MBCF monocouche avec de plus gros calibres (0/10) est à déconseiller pour des endroits soumis à du trafic tangentiel. En raison de l'épaisseur limitée du MBCF monocouche (environ une fois et demie à deux fois la dimension du grain le plus gros), les gros granulats dépasseront davantage de la surface du MBCF et seront fortement exposés aux forces de cisaillement du trafic, alors qu'ils

ne seront que peu, voire pas ancrés dans l'épaisseur du MBCF. C'est la raison pour laquelle les MBCF monocouches de plus gros calibres sont très sensibles au plumage.

L'application d'un MBCF monocouche se limite de préférence à des routes à faible régime (< 50 km/h) et où les charges de trafic sont limitées, comme des voiries communales et des routes dans des zones résidentielles.

Sur du béton, il y a un risque accru d'une moins bonne adhésion de la couche de MBCF (en raison de la formation de poussière après le fraisage, de ciment non lié libre à la surface, du degré d'acidité inadapté de la couche de collage), de sorte que le MBCF peut présenter plus facilement des problèmes de pelade. Un MBCF monocouche est ici moins indiqué.

En Belgique, le MBCF monocouche le plus courant est un MBCF de calibre 0/4 ou 0/6,3 mm.

■ 4.1.2 MBCF bicouche

Pour un MBCF bicouche, deux couches différentes sont mises en œuvre l'une sur l'autre successivement.

Cette technique est applicable sur un revêtement qui présente déjà une certaine dégradation, comme de petites inégalités, des fissures fines et une légère porosité. La répartition des dégradations peut aussi être un peu plus hétérogène.

Les deux couches remplissent chacune un objectif différent et c'est ce qui définit le choix des calibres:

- La première couche de MBCF (en dessous) sert à **conditionner le revêtement existant**. Cela signifie que l'on veut en améliorer l'état de manière à ce que la deuxième couche puisse être appliquée correctement. En fonction de l'état existant, on opte pour:
 - un calibre plus petit (0/2 ou 0/4) si le revêtement existant est poreux et/ou présente des fissures fines. Dans ce cas, l'objectif est d'améliorer l'étanchéité et de rendre le revêtement moins poreux et plus homogène;
 - un calibre plus gros (0/4, 0/6,3 ou moins courant 0/10) si le revêtement existant présente des défauts d'uni. Dans ce cas, l'objectif est de corriger les différences de niveau du revêtement existant. Plus les défauts d'uni sont grands, plus il faudra choisir un gros calibre. Dans le cas où il y a beaucoup de défauts d'uni sur l'ensemble de la surface, la quantité de la première couche peut varier fortement et on décrira alors le MBCF bicouche comme un MBCF de lissage avec un MBCF monocouche par-dessus.
- La deuxième couche de MBCF (au-dessus) sera choisie en fonction des **performances visées** du nouveau revêtement. En fonction du trafic, on opte pour:
 - un calibre plus petit (0/4 ou 0/6,3) pour des routes soumises à un trafic léger à modéré et/ou une limitation de vitesse inférieure. En utilisant ce calibre, on vise une amélioration du confort pour les usagers de la route et une réduction des nuisances sonores;
 - un calibre plus gros (0/6,3 ou moins courant 0/10) pour des routes soumises à un trafic modéré à lourd et/ou une limitation de vitesse supérieure. En utilisant ce calibre, on vise principalement à générer de la rugosité pour offrir davantage de résistance aux charges de trafic supérieures.

Dans le cas d'un MBCF bicouche, les grains plus gros de la deuxième couche peuvent «se nicher» dans la première couche de MBCF sous-jacente, leur permettant de mieux s'ancrer et de dépasser de manière moins proéminente que dans le cas d'un MBCF monocouche. Ils seront dès lors plus résistants au plumage et les calibres plus gros 0/6,3 et 0/10 pourront être utilisés en surface.

Le tableau 4.1 reprend les combinaisons de calibres les plus courantes pour un MBCF bicouche en Belgique, et ce en fonction du type de route, des défauts d'uni présents et de la porosité du revêtement.

Calibre première couche	Calibre deuxième couche	Type de route	Défaut d'uni *	Classe de porosité *
0/4	0/4	Voirie communale locale	Uni	Faible
0/4	0/6,3	Route de liaison /Route régionale		Faible
0/6,3	0/4	Voirie communale locale	Défaut d'uni limité	Modérée
0/6,3	0/6,3	Route de liaison / Route régionale		Modérée

* Voir § 4.2.2 pour la détermination des niveaux de défaut d'uni et de porosité

Tableau 4.1 – Aperçu des calibres les plus courants pour le MBCF bicouche

■ 4.1.3 Enduit scellé par un MBCF

Dans ce cas, la technique de MBCF est combinée avec la technique de traitement superficiel, en l'occurrence l'enduit. Un MBCF monocouche est appliqué par-dessus un enduit monocouche.

Cette technique est abordée brièvement ci-dessous étant donné qu'elle utilise un MBCF. Cependant, les détails relatifs à la conception ne seront pas discutés vu qu'il s'agit de l'une des trois techniques de traitement superficiel possibles (enduits, MBCF et enduits scellés par un MBCF) et que cette technique sort du cadre du présent code de bonne pratique.

Cette technique combine les avantages d'un enduit et ceux d'un MBCF.

Comparativement à un MBCF, l'étanchéité, obtenue par un enduit, est mieux, grâce à l'épaisse couche de collage qui est répandue sur le revêtement existant. Cela permet aussi à un enduit de mieux résister à la réflexion des fissures déjà présentes dans le revêtement et un enduit pourra aussi plus facilement être mis en œuvre sur un revêtement devenu trop poreux et qui présente trop de fissuration et de plumage pour être traité avec un MBCF.

En scellant l'enduit par un MBCF, la texture du revêtement deviendra à terme plus fine, le confort de conduite s'en verra amélioré et le bruit de roulement diminuera par rapport à un enduit. En outre, l'empierrement de l'enduit sera consolidé, de sorte que la perte de pierres de l'enduit dans les premières semaines après la mise en œuvre sera évitée. Cette perte de pierres peut être très gênante dans les centres-villes et cœurs de village, ainsi que dans les quartiers résidentiels.

Il existe en Belgique deux variantes de la technique.

Pour la **première variante** (figure 4.2), on va diminuer la quantité de granulats de l'enduit. Les granulats ne seront donc pas répandus de manière à recouvrir totalement la surface et le liant de l'enduit sera encore visible entre les granulats. On crée ainsi de l'espace entre les granulats de l'enduit entre lesquels le MBCF peut s'insérer. Le MBCF est mis en œuvre le même jour que l'enduit afin que le

trafic ne circule pas sur l'enduit entre-temps. On obtient comme résultat une surface à la structure assez rugueuse, ce qui permet de conserver une adhérence suffisamment élevée et, par temps de pluie, d'éviter la formation d'un film d'eau ininterrompu. Par contre, cette variante engendrera une augmentation du bruit de roulement.

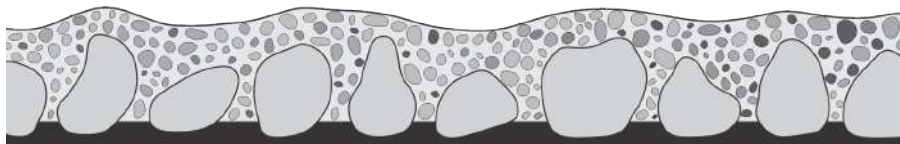


Figure 4.2 – Enduit scellé par un MBCF - Variante 1

La **deuxième variante** (figure 4.3) consiste à réaliser un enduit de bonne qualité, avec une quantité normale de granulats. Dans ce cas, la mosaïque de l'enduit est totalement fermée. Quelques jours plus tard, de préférence pas plus de quatre, le MBCF est mis en œuvre. Dans l'intervalle, l'enduit peut mûrir et le trafic est même autorisé sur l'enduit. Le résultat est une surface à la texture plus fine comparativement à la première variante.

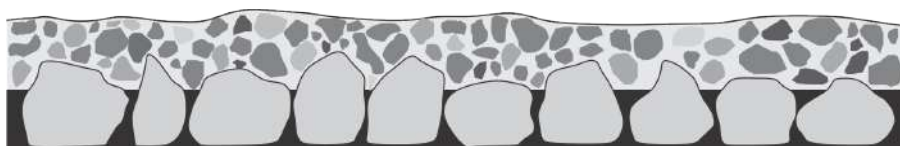


Figure 4.3 – Enduit scellé par un MBCF - Variante 2

4.2 Choix de la technique de MBCF, de la composition et de la granulométrie

Comme déjà mentionné auparavant, le choix de l'application de MBCF dépend du trafic et de l'état du revêtement existant. Ces paramètres sont aussi importants pour la composition du MBCF, en particulier pour la granulométrie des granulats et le type d'émulsion. Ci-dessous est indiqué comment on peut caractériser le trafic et l'état du revêtement existant et quels sont les choix recommandés en fonction de ces caractéristiques.

Dans les tableaux, on retrouve les abréviations suivantes:

- 1C: MBCF monocouche
- 2C: MBCF bicouche
- ES: enduit scellé par un MBCF
- MBCF-L: MBCF de lissage (§ 3.1.1)

4.2.1 Trafic

La classe de trafic peut être caractérisée par deux paramètres:

- le nombre de véhicules par jour par bande de roulement (quel que soit le type: voitures, camionnettes légères, véhicules lourds): plus il y a de véhicules, plus la **fréquence** de charge est élevée;
- le nombre de véhicules lourds par jour par bande: plus la charge d'essieu est lourde, plus le **niveau** de la charge est élevé.

Sur base de ces paramètres, on peut définir trois classes de trafic (tableau 4.2).

Classe de trafic	Fréquence (nombre de véhicules/jour/bande)		Niveau (nombre de véhicules lourds /jour/bande)
Légère	< 1000	et	< 100
Modérée	1000 à 4000	ou	100 à 800
Élevée	> 4000	ou	> 800

Tableau 4.2 – Définition des classes de trafic pour les MBCF

La classe de trafic détermine la technique d'application (tableau 4.3). Un MBCF monocouche par exemple sera uniquement appliqué pour du trafic léger. Pour les classes de trafic supérieures, on aura tendance à utiliser des MBCF de meilleure qualité, qui offrent une meilleure résistance à l'orniérage. L'utilisation d'une émulsion modifiée (PmB ou latex) et le cas échéant d'une granulométrie plus discontinue et d'un calibre plus gros sont indiqués dans ce cas. Il est à souligner que le tableau 4.3 ne donne pas de recommandations pour la couche inférieure du MBCF bicouche. En effet, cette couche fait office de couche de conditionnement (§ 4.1.2) et sa composition va donc principalement être choisie en fonction de l'état du revêtement existant.

Classe de trafic	Technique d'application	Calibre couche MBCF supérieure	Emulsion
Légère	1C, 2C ou ES	0/4 ou 0/6,3	
Modérée	2C ou ES	0/4 ou 0/6,3	
Élevée	2C ou ES	0/6,3 ou 0/10 discontinu	modifiée (PmB ou latex)

Tableau 4.3 – Choix recommandés en fonction de la classe de trafic

Il faut non seulement tenir compte de la charge de trafic, mais aussi de la limitation de vitesse. Plus la vitesse est élevée, plus la texture a de l'importance parce que la rugosité est une exigence majeure. Un plus gros calibre donne plus de macrotexture et est donc recommandé pour des routes où la limitation de vitesse est supérieure. D'autre part, un MBCF avec un plus gros calibre engendrera plus de bruit de roulement qu'un MBCF avec un plus petit calibre. On peut donc suivre la recommandation dans le tableau 4.4 pour le choix des calibres de la couche de MBCF supérieure en fonction de la limitation de vitesse sur la route.

Limitation de vitesse (km/h)	Calibre couche supérieure
≤ 50	0/4 ou 0/6,3*
50 à 70	0/6,3
> 70	0/6,3 ou 0/10*

* Calibres moins courants en Belgique pour cette limitation de vitesse, en raison du bruit

Tableau 4.4 – Choix recommandés en fonction de la limitation de vitesse

■ 4.2.2 Etat du revêtement

Le revêtement existant doit être en bon état. Si ce n'est pas le cas, les réparations nécessaires (chapitre 3) doivent être effectuées avant d'appliquer un traitement superficiel. L'état du revêtement peut être évalué sur base des défauts d'uni, des fissures et de la porosité.

A. Défauts d'uni

Les MBCF permettent de rectifier, jusqu'à un certain point de légers défauts d'uni dans le sens transversal, comme un léger orniérage.

Les défauts d'uni transversal (d) peuvent être mesurés à la règle de 3 m. On adopte la règle empirique selon laquelle avec un MBCF (O/D), on peut corriger les différences de niveau jusqu'à environ 2*D sur toute la largeur de la route. Si les défauts d'uni atteignent localement plus de 2*D, l'épaisseur de couche devient trop élevée à cet endroit par rapport au calibre, avec pour conséquence un risque élevé de ressuage ou de déformation.

Cela signifie que le défaut d'uni maximal que l'on peut rectifier avec un MBCF s'élève à 20 mm et qu'il faut pour cela utiliser un MBCF 0/10.

Un enduit scellé par un MBCF (ES) n'est pas recommandé pour éliminer les défauts d'uni puisque l'enduit ne permet pas d'éliminer ce type de phénomènes. La pose de l'enduit peut en plus échouer dans ces conditions. En outre, l'enduit peut présenter du ressuage (accumulation de liant dans les défauts d'uni).

Si les défauts d'uni deviennent supérieurs à 20 mm, il est recommandé de les éliminer préalablement en le réparant. La procédure est décrite au § 3.1.1.

Le tableau 4.5 donne les choix recommandés en fonction du défaut d'uni transversal. On remarque que le tableau 4.5 ne contient pas de recommandations pour la deuxième couche, parce que celle-ci sera choisie en fonction des performances visées (c.-à-d. la classe de trafic et la limitation de vitesse).

S'il y a beaucoup de défauts d'uni transversaux, il est préférable de décrire un MBCF bicouche comme un MBCF de lissage recouvert d'un MBCF monocouche pour indiquer que les quantités nécessaires de la première couche peuvent être très variables. Toutefois, d'un point de vue technique, il n'y a pas de différence avec un MBCF bicouche.

Défaut d'uni transversal (d) en mm	Réparations préalables	Technique d'application	Calibre première couche MBCF
$d \leq 5$	Aucune	1C ou 2C ou ES ⁽⁴⁾	0/4 ⁽¹⁾ , 0/6,3 ou 0/10
$5 < d \leq 10$	Nécessaire d'éliminer les défauts d'uni, possible via MBCF de lissage	2C (ou MBCF-L+1C) ⁽³⁾ ou ES ⁽⁴⁾	0/4 ⁽²⁾ of 0/6,3 ou 0/10
$10 < d \leq 15$			0/6,3 ⁽²⁾ ou 0/10
$15 < d \leq 20$			0/10
$d > 20$	Nécessaire d'éliminer les défauts d'uni à l'aide d'enrobé à chaud	ES ⁽⁴⁾	0/4 ou 0/6,3 ou 0/10

(1) Recommandé dans le cas de 1C

(2) Risque potentiel de ressuage et d'orniérage en raison de l'épaisseur de couche locale

(3) MBCF-L+ 1C: MBCF de lissage recouvert d'un MBCF monocouche

(4) ES utilisable si le défaut d'uni a été éliminé préalablement

Tableau 4.5 – Choix recommandés en fonction du défaut d'uni transversal

Si le défaut d'uni est la conséquence d'un orniérage, il est recommandé d'utiliser un MBCF avec une émulsion modifiée (PmB ou latex) et/ou un MBCF avec une granulométrie plus discontinue, pour éviter une récurrence rapide de l'orniérage.

Les irrégularités dans le sens longitudinal ne peuvent être que partiellement rectifiées avec la technique du MBCF et dépendent de la longueur du traîneau qui est utilisé. Plus le traîneau est long, plus il sera facile de lisser le défaut d'uni longitudinal

B. Fissures

A mesure que les fissures deviennent plus larges, le risque de réflexion augmente.

Le tableau 4.6 donne les choix recommandés en fonction de la largeur de fissure. Des fissures jusqu'à 2 mm peuvent encore être scellées par un MBCF, de préférence avec un fin mélange. Des fissures plus larges doivent être réparées préalablement (§ 3.1.3). Il est à souligner que le tableau 4.6 ne donne pas de recommandations pour la deuxième couche, parce que celle-ci sera choisie en fonction des performances visées (c.-à-d. la classe de trafic et la limitation de vitesse).

Largeur de fissure (l) en mm	Type de fissure	Réparations préalables (**)	Technique d'application	Calibre première couche MBCF	Emulsion
≤ 0,5	Microfissures	Nécessaires ou non, voir tableau 3.2 au chapitre 3	1C 2C ES	0/2* ou 0/4	
0,5 < l ≤ 2	Fissures capillaires		1C 2C ES	0/2* ou 0/4	
2 < l ≤ 5	Fissures		2C ES	0/4 ou 0/6,3	modifiée (PmB ou latex)
l > 5	Fissures larges		ES	-	modifiée (PmB ou latex)

(*) Uniquement si utilisé comme un «pré-MBCF» (chapitre 3)

(**) En fonction de la largeur et de l'aspect des fissures, il convient de prévoir une réparation préalable différente (§ 3.1.3)

Tableau 4.6 – Choix recommandés en fonction de la largeur de fissure

Plus les fissures sont larges, plus on recommande d'utiliser une émulsion modifiée (PmB ou latex). En raison de leur élasticité élevée, les mélanges avec une émulsion modifiée (PmB ou latex) sont davantage en mesure d'amortir les mouvements au niveau des fissures, de sorte que la réflexion de la fissure à travers le MBCF est ralentie. Toutefois, la technique a également ses limites et comme indiqué au § 3.1.3, une épaisseur limitée d'un MBCF engendrera toujours un risque de fissure par réflexion dans le MBCF. Quand les fissures sont la conséquence d'une instabilité de la structure du revêtement (affaissement, portance insuffisante, fissures de fatigue, mauvaise adhésion des couches bitumineuses entre elles, etc.), il est conseillé d'opter pour le remplacement du revêtement fissuré et de rétablir la stabilité de la structure.

C. Porosité

A mesure que le revêtement existant est plus poreux, on utilisera lors du resurfaçage davantage de MBCF et une quantité plus importante d'émulsion sera aussi absorbée par le revêtement. Lors du choix du calibre et de la formulation du MBCF (quantité d'émulsion), il faut en tenir compte.

La porosité est répartie en trois classes: faible, modérée et élevée (plus de détails dans § 3.1.4).

Si le revêtement est modérément poreux, une quantité supérieure d'émulsion sera absorbée et des problèmes pourraient survenir lors de la pose d'un MBCF (mélange trop sec). Dans ce cas, il est recommandé d'appliquer un MBCF bicouche ou un enduit scellé par un MBCF. En fonction de la

porosité, on augmentera la quantité d'émulsion.

Quand cette porosité est répartie de manière plutôt hétérogène sur le revêtement (p. ex. du plumage uniquement dans les ornières, ou sur les bords du revêtement), il est recommandé de commencer par éliminer cette porosité (locale ou non) en appliquant un «pré-enduit» ou un «pré-MBCF» (chapitre 3) pour diminuer ainsi la variation dans la porosité et éviter d'éventuels problèmes lors de la mise en œuvre des MBCF proprement dits.

Le tableau 4.7 donne un aperçu des recommandations pour le choix du MBCF et du calibre, en fonction des paramètres décrits ci-dessus. Une porosité plus élevée doit être compensée préalablement et réparée (§ 3.1.4). On remarque à nouveau que le calibre de la deuxième couche va surtout dépendre des performances visées et dans une moindre mesure de l'état du revêtement existant.

Classe de porosité (p)	Réparations préalables (***)	Technique d'application	Calibre première couche MBCF
Faible	Aucune	1C*, 2C, ES	0/2 **, 0/4 ou 0/6,3
Modérée	Potentiellement nécessaires	2C, ES	0/2**, 0/4 ou 0/6,3
Élevée	Nécessaires, remplacer le revêtement abîmé	ES	-

(*) Uniquement dans le cas de porosité très faible

(**) Uniquement si appliqué comme pré-MBCF (§ 3.1.4)

(***) Tableau 3.4

Tableau 4.7 – Choix recommandés en fonction de la classe de porosité

Pour expliquer le raisonnement lors du choix d'un traitement au MBCF approprié, ces différents paramètres ont été rassemblés dans un seul tableau de synthèse (tableau 4.8). L'utilisation de ce tableau est expliquée à l'aide d'un exemple (§ 4.5).

4.3 Applications spécifiques

En plus des applications ci-dessus comme traitement superficiel dans le cadre d'une stratégie d'entretien, on peut également utiliser des MBCF en combinaison avec une autre technique/un autre matériau, ou plus profondément dans la structure du revêtement routier. Ci-dessous se trouve une description de deux applications spécifiques rencontrées régulièrement en Belgique.

4.3.1 Comme protection des couches de liaison dans le cas de travaux par phases

Dans le cas de travaux par phases, il se peut toutefois qu'il s'écoule une période de plusieurs mois, parfois même un hiver complet, entre la mise en œuvre de la couche de liaison et de la couche de roulement. Afin de protéger pendant cette période la couche de liaison de la charge du trafic et des conditions climatiques, on peut appliquer un MBCF. Une couche de liaison bitumineuse est en effet produite avec une teneur en liant inférieure à celle d'une couche de roulement. En outre, l'exigence en matière de sensibilité à l'eau pour les couches de liaison est moins stricte, parce que l'on suppose qu'elles sont protégées par la couche de roulement bitumineuse.

■ 4.3.2 Pour la fixation des treillis en acier comme système antifissure

Quand on utilise des treillis en acier comme système antifissure, un MBCF (calibre 0/6,3) est mis en œuvre par-dessus les treillis en acier. Si l'unique couche de resurfaçage est un PA (enrobé drainant), un MBCF bicouche est prévu sur les treillis en acier (MBCF inférieur 0/6,3 et supérieur 0/4).

Ce resurfaçage en MBCF aura plusieurs fonctions:

- couche de protection des treillis en acier pendant l'exécution;
- maintien en place des treillis pendant la réalisation du revêtement bitumineux et éviter qu'ils ne bombent;
- couche de collage pour le revêtement bitumineux mis en œuvre sur ces treillis en acier.

■ 4.4 Période de réalisation

Après le mélange de l'émulsion et des granulats, le processus de rupture commence. La vitesse de rupture dépend de la vitesse du vent, de la température ambiante, de la température des composants et de la température superficielle du revêtement. Plus ces températures sont élevées et plus la vitesse du vent est élevée pendant l'exécution, plus le processus de rupture et le mûrissement du MBCF seront rapides.

Pour la qualité de la mise en œuvre, il est crucial que la vitesse de rupture reste sous contrôle. La rupture ne peut pas aller trop vite afin que le mélange conserve une consistance appropriée pendant toute la période de mise en œuvre. La rupture ne peut pas non plus être trop lente car il faut pouvoir rouvrir rapidement la route au trafic. Le mûrissement doit se faire le plus vite possible afin que le MBCF développe dans un court laps de temps suffisamment de résistance aux charges du trafic.

La formulation du mélange, en particulier le choix de l'émulsion, sera en adéquation avec la période de mise en œuvre. Pendant l'été, on utilisera une émulsion à rupture lente, alors qu'au printemps et à l'automne, on optera pour une émulsion à rupture rapide.

Pour que la rupture se déroule correctement, il est déconseillé de mettre en œuvre un MBCF dans les conditions suivantes:

- La température du revêtement est supérieure à 45 °C et/ou la température de l'air (sous abri) dépasse 30 °C. L'émulsion risque de rompre beaucoup trop rapidement, empêchant le MBCF d'être répandu correctement, d'adhérer suffisamment au revêtement et entraînant même déjà la formation d'agglomérats dans le traîneau.
- La température de l'air et celle du revêtement se situent en dessous de 10 °C. Dans ce cas, il y a trop peu de chaleur pour que la rupture puisse se produire assez rapidement.
- L'humidité de l'air est très élevée (> 85 %) et la température de l'air très basse. L'environnement humide et froid va ralentir la rupture et compromettre la réouverture au trafic.
- Il pleut ou le revêtement est humide (eau stagnante présente sur le revêtement). L'eau présente sur le revêtement va réduire la couche de MBCF. Le MBCF risque de se répandre vers les bords, de ne pas adhérer suffisamment à la surface et la rupture pourrait être fortement ralentie.

Il faut aussi prendre en compte qu'un MBCF après la pose doit continuer à mûrir et que pour cela, il a besoin de chaleur. En fonction des conditions ambiantes et de la composition du MBCF, ce processus de mûrissement peut prendre plusieurs jours (voire plusieurs semaines). Ce mûrissement va donc ralentir, voire s'arrêter temporairement si la température nocturne descend sous la barre des 10 °C, puis reprendra en journée. En outre, l'évaporation de l'eau du MBCF sera plus lente ou

s'arrêtera s'il y a un taux élevé d'humidité dans l'air, ou si le point de rosée est dépassé et qu'il y a de la condensation sur le MBCF frais.

Appliquer des MBCF à la fin de la saison chaude comporte donc le risque que le MBCF mûrisse plus lentement, voire qu'il ne puisse pas mûrir suffisamment avant le début de la saison hivernale. Le MBCF risque d'être plus sensible notamment au plumage et, dans le pire des cas, de subir des pertes de pierres en masse pendant et juste après l'hiver.

Pour éviter les problèmes ci-dessus, les différents cahiers des charges types belges interdisent la mise en œuvre des MBCF pendant la période froide automnale et hivernale. D'un cahier des charges type à l'autre, ces dates peuvent varier légèrement, mais l'idée reste grosso modo la même.

En règle générale, on peut recommander de ne plus placer de MBCF fin septembre. Le risque d'avoir une longue période froide diminue ensuite fortement. L'entrepreneur envisagera alors, en fonction des conditions météorologique du jour ainsi que des prévisions à long terme (jusqu'à 14 jours après l'exécution) si une pose du MBCF est encore possible ou non.

4.5 Tableau de synthèse global et exemple

Les paramètres cités et expliqués au § 4.2 qui jouent un rôle dans le choix d'un traitement au MBCF approprié doivent tous être considérés et évalués ensemble quand on aborde la préparation d'un cahier spécial des charges.

Le tableau 4.8 (§ 4.5.1) donne un aperçu de ces différents paramètres qui jouent un rôle et de l'application et du calibre de MBCF qui est recommandé pour les différents cas.

Un exemple (§ 4.5.2) montre, étape par étape, comment utiliser au mieux ce tableau 4.8 pour arriver à une solution adaptée.

4.5.1 Tableau de synthèse global

Etat du revêtement				Intensité du trafic (tableau 4.2)					
Défaut d'uni (d) (tableau 4.5)	Largeur de fissure (l) (tableau 3.1)		Classe de porosité (p) (tableau 3.3)		Légère	Modérée	Élevée		
	< 2 mm	> 2 mm	Faible	Élevée					
< 5 mm	< 20 mm	> 20 mm	OK	RR	MBCF supérieur - Choix en fonction du conditionnement de la surface du MBCF (tableaux 4.3 et 4.4) (0/4), (0/6,3)		(0/6,3), (0/10)		
Préparation nécessaire du revêtement (voir Chapitre 3)			P-E ou P-MBCF		MBCF inférieur - Choix en fonction du conditionnement du revêtement (tableaux 4.5 à 4.7) (0/2), (0/4), (0/6,3)				
Aucune mesure nécessaire (tableau 4.5)			OK	RR	1C	2C	ES	H2C	HES
Eliminer le défaut d'uni en remplaçant le revêtement			OK	RR		2C	ES		HES
MBCF de lissage est possible (tableau 4.5)			OK	RR		2C	ES		HES
Eliminer le défaut d'uni			OK	RR	1C	2C	ES		HES
Eliminer le défaut d'uni en remplaçant le revêtement			OK	RR	1C	2C	ES		HES
			OK	RR	1C	2C	ES		HES
			OK	RR	1C	2C	ES		HES
			OK	RR	1C	2C	ES		HES
			OK	RR	1C	2C	ES		HES
			OK	RR	1C	2C	ES		HES
			OK	RR	1C	2C	ES		HES
			OK	RR	1C	2C	ES		HES

Tableau 4.8 - Préparation nécessaire et choix du type de MBCF et du calibre en fonction de l'intensité du trafic présent, du défaut d'uni, de la largeur de fissure et de la classe de porosité du revêtement

Type	Ordinaire	De haute qualité
MBCF monocouche	1C	H1C
MBCF bicouche	2C	H2C
Enduit scellé par un MBCF	ES	HES

Code couleur calibres MBCF	
Vert	Courant
Noir	Alternative
Rouge	Moins courant

en jaune =
Recommandé pour la composition de MBCF à base d'émulsion cationique de bitume polymère (PmB) ou d'émulsion cationique de bitume modifiée au latex

OK : aucune préparation nécessaire du revêtement
MBCF-L : MBCF de lissage
P-E : Pré-enduit
P-MBCF : Pré-MBCF
TF : Traitement des fissures (passerelle ou jointoiment)
RR : Remplacement revêtement poreux/fissures larges (fraisage et inlay couche de roulement)

■ 4.5.2 Exemple illustrant le choix du type de MBCF approprié et le calibre

Pour expliquer le tableau 4.8 au § 4.5.1, un exemple détaillé d'une situation fictive dans laquelle un traitement approprié au MBCF doit être prescrit dans un cahier spécial des charges est décrit ci-après.

On a une route existante avec la situation suivante:

Trafic:

- Situation: 800 véhicules/jour/bande de roulement, dont 75 camions;
- Régime de vitesse: vitesse maximale de 70 km/h.

Etat du revêtement:

- Il s'agit d'un revêtement bitumineux.
- A la règle de 3 m, on ne rencontre jamais un défaut d'uni supérieur à 5 mm.
- On peut rencontrer du plumage, mais uniquement dans les ornières (la MTD - *Mean Texture Depth* mesurée à l'essai à la tache de sable donne une valeur de 1,1 mm), en dehors des ornières, la MTD est égale à 0,5 mm.
- Sur l'ensemble du revêtement, on rencontre des fissures transversales isolées (largeur de fissure entre 2 et 5 mm).

Le choix du traitement au MBCF approprié se fait en quatre étapes.

1. Evaluation de l'état du revêtement et détermination de la nécessité de travaux préparatoires au revêtement existant et du type de ceux-ci.
2. Classification de l'intensité du trafic.
3. Choix du traitement approprié.
4. Choix des calibres appropriés des MBCF.

Chaque étape est expliquée ci-après en détail.

Etape 1 – Evaluation de l'état du revêtement et détermination des travaux préparatoires nécessaires

Dans un premier temps, il convient de vérifier si l'état de la route nécessite des travaux préparatoires. La partie gauche du tableau 4.8 permet de le déterminer à l'aide des trois paramètres (défaut d'uni, largeur de fissure et classe de porosité).

1. Défauts d'uni

Vu que le défaut d'uni est inférieur à 5 mm, aucune correction des différences de niveau n'est nécessaire.

Etat du revêtement										
Défaut d'uni (d) (tableau 4.5)			Largeur de fissure (l) (tableau 3.1)			Classe de porosité (p) (tableau 3.3)				
< 5 mm	< 20 mm	> 20 mm	< 2 mm	2 - 5 mm	> 5 mm	Faible	Modérée	Elevée		
Préparation nécessaire du revêtement (Chapitre 3)										
OK	MBCF-L	RR	OK	TF	RR	OK	P-E ou P-MBCF	RR		
Aucune mesure nécessaire (tableau 4.5)	Eliminer le défaut d'uni MBCF de lissage est possible (tableau 4.5)	Eliminer le défaut d'uni en remplaçant le revêtement (Chapitre 3)	✓							
				✓						
					✓					
								✓		
									✓	
										✓
			✓					✓		
			✓						✓	
			✓							✓
						✓		✓		
						✓			✓	
						✓				✓
								✓	✓	

2. Fissures

Le revêtement comporte des fissures qui présentent un caractère isolé, ce qui veut dire qu'elles ne sont pas concentrées en un lieu précis, mais qu'elles se présentent davantage à distance régulière l'une de l'autre. En d'autres termes, elles peuvent être traitées individuellement. Via le tableau 4.8 (ou le tableau 3.2), on peut retrouver qu'un traitement préalable individuel doit avoir lieu. On fraisera individuellement les fissures, puis on les rejointoiera avec de la masse de scellement à chaud.

Nulle part on ne trouve des fissures dont la largeur excède 5 mm. Si cela avait été le cas, il aurait été préférable de remplacer cette partie du revêtement.

Etat du revêtement									
Défaut d'uni (d) (tableau 4.5)			Largeur de fissure (l) (tableau 3.1)			Classe de porosité (p) (tableau 3.3)			
< 5 mm	< 20 mm	> 20 mm	< 2 mm	2 - 5 mm	> 5 mm	Faible	Modérée	Elevée	
Préparation nécessaire du revêtement (Chapitre 3)									
OK	MBCF-L	RR	OK	TF	RR	OK	P-E ou P-MBCF	RR	
Aucune mesure nécessaire (tableau 4.5)	Eliminer le défaut d'uni MBCF de lissage est possible (tableau 4.5)	Eliminer le défaut d'uni en remplaçant le revêtement (Chapitre 3)	✓						
				✓					
					✓				
							✓		
								✓	
									✓
			✓				✓		
			✓					✓	
			✓						✓
						✓		✓	
						✓			✓
						✓			✓
								✓	
					✓				
					✓				

3. Classe de porosité du revêtement

Il y a une différence de texture dans les zones des frayées et en dehors. Dans les frayées, on a un plumage naissant et on peut mesurer une PMT de 1,1 mm. Sur la base de la définition de la classe de porosité (tableau 3.3), il est possible de classer la zone des frayées dans une classe de porosité «modérée» (la PMT se situe entre 0,8 et 1,5 mm et/ou on a aussi du plumage).

- Via le tableau 4.8, on voit qu'ici un P-E (pré-enduit) ou un P-MBCF (pré-MBCF) est nécessaire pour diminuer la porosité. Le cas échéant, on se limite uniquement à ces frayées.
- On préférera un MBCF 0/2 (tableau 4.7) en raison de la classe de porosité modérée dans les frayées (0/4 est plus grossier et est plutôt recommandé pour une porosité plus grossière). En outre, c'est celui qui créera l'inégalité la moins importante par rapport au reste du revêtement car il y a très peu de défaut d'uni dans les frayées.

En dehors des frayées, la valeur de PMT est de 0,5 mm et on ne rencontre pas de plumage. La classe de porosité peut être définie comme «faible». La présence de fissures isolées dans le revêtement n'influence pas la classe de porosité. Pour influencer la classe de porosité, les fissures doivent avoir un caractère concentré (de nombreuses fissures sur une surface restreinte).

- Le tableau 4.8 permet de voir qu'aucun autre traitement préalable n'est nécessaire.

Etat du revêtement										
Défaut d'uni (d) (tableau 4.5)			Largeur de fissure (l) (tableau 3.1)			Classe de porosité (p) (tableau 3.3)				
< 5 mm	< 20 mm	> 20 mm	< 2 mm	2 - 5 mm	> 5 mm	Faible	Modérée	Elevée		
Préparation nécessaire du revêtement (Chapitre 3)										
OK	MBCF-L	RR	OK	TF	RR	OK	P-E ou P-MBCF	RR		
Aucune mesure nécessaire (tableau 4.5)	Eliminer le défaut d'uni MBCF de lissage est possible (tableau 4.5)	Eliminer le défaut d'uni en remplaçant le revêtement (Chapitre 3)	✓							
				✓						
					✓					
								✓		
									✓	
										✓
			✓					✓		
			✓						✓	
			✓							✓
						✓		✓		
						✓				✓
						✓				✓
								✓		

Etape 2 – Classification de l'intensité du trafic

Le tableau 4.2 permet de retrouver que les quantités mesurées de véhicules (voitures particulières et camions mélangés) s'élève à moins de 1 000 véhicules/jour/bande de roulement. De plus, le nombre de véhicules lourds se limite à 100/jour/bande de roulement.

→ Sur cette route, on a une intensité de trafic de classe «légère».

Etape 3 – Choix du traitement de MBCF approprié

Les étapes 1 et 2 montrent dans la partie droite du tableau 4.8 quel type de traitement au MBCF est préférable en fonction du type de trafic et de l'état du revêtement.

Etat du revêtement									Intensité du trafic (tableau 4.2)									
Défaut d'uni (d) (tableau 4.5)			Largeur de fissure (l) (tableau 3.1)			Classe de porosité (p) (tableau 3.3)			Légère	Modérée		Elevée						
< 5 mm	< 20 mm	> 20 mm	< 2 mm	2 - 5 mm	> 5 mm	Faible	Modérée	Elevée	MBCF supérieur - Choix en fonction du conditionnement de la surface du MBCF (tableaux 4.3 et 4.4) (0/4), (0/6,3)			(0/4), (0/6,3)		(0/6,3), (0/10)				
Préparation nécessaire du revêtement (voir Chapitre 3)									MBCF inférieur - Choix en fonction du conditionnement du revêtement (tableaux 4.5 à 4.7) (0/2), (0/4), (0/6,3)									
OK	MBCF-L	RR	OK	TF	RR	OK	P-E ou P-MBCF	RR	1C	2C	ES	2C	ES	H2C	HES			
Aucune mesure nécessaire (tableau 4.5)	Éliminer le défaut d'uni MBCF de lissage est possible (tableau 4.5)	Éliminer le défaut d'uni en remplaçant le revêtement (Chapitre 3)	✓							1C	2C	ES		2C	ES	H2C	HES	
				✓							2C	ES		ES			HES	
					✓								ES		ES			
						✓					1C	2C	ES		2C	ES	H2C	HES
							✓				1C	2C	ES		2C	ES		HES
								✓				2C	ES		ES			
			✓				✓				1C	2C	ES		2C	ES	H2C	HES
			✓					✓			1C	2C	ES		2C	ES		HES
			✓						✓			2C	ES		ES			
						✓			✓			2C	ES		ES			HES
						✓			✓			2C	ES		ES			HES
							✓			✓				ES		ES		
					✓		✓				ES		ES					
					✓		✓				ES		ES					

Dans la situation de l'exemple, on a le choix entre:

- 2C: MBCF bicouche (avec émulsion cationique de bitume polymère (PmB) ou émulsion cationique de bitume modifiée au latex);
- ES-MBCF: enduit scellé par un MBCF (avec émulsion cationique de bitume polymère (PmB) ou émulsion cationique de bitume modifiée au latex).

Dans le cadre de ce code de bonne pratique, on opte pour un MBCF bicouche à base d'une émulsion modifiée (PmB ou latex). On peut également opter pour un enduit scellé par un MBCF, mais cette option n'est pas développée plus en détails dans ce document.

Etape 4 - Choix du calibre approprié pour les MBCF

MBCF inférieur

Le MBCF inférieur doit conditionner le revêtement existant afin que la deuxième couche de MBCF puisse être mise en œuvre de manière optimale. Il faut donc choisir le calibre en fonction des paramètres de condition présents (défaut d'uni, fissures et porosité) sur base des tableaux 4.5, 4.6 et 4.7.

Intensité du trafic (tableau 4.2)		
Légère	Modérée	Elevée
MBCF supérieur - Choix en fonction du conditionnement de la surface MBCF (tableaux 4.3 et 4.4) (0/4), (0/6,3)		
MBCF inférieur - Choix en fonction du conditionnement du revêtement (tableaux 4.5 à 4.7) (0/2), (0/4), (0/6,3)		

Sur base du défaut d'uni et du tableau 4.5, on a le choix entre un 0/4, un 0/6,3 et un 0/10.

Sur base des fissures et du tableau 4.6, on a le choix entre un 0/4 et un 0/6,3.

Sur base de la classe de porosité et du tableau 4.7, on a le choix entre un 0/4 et un 0/6,3 (aussi bien dans les frayées qu'en dehors de celles-ci).

→ Le dénominateur commun de ces choix est le 0/4 ou le 0/6,3.

→ Dans le tableau 4.8, on voit que le calibre 0/4 est indiqué en vert (c'est le calibre le plus courant pour ce type de route et d'intensité de trafic).

→ Le calibre 0/4 est retenu.

MBCF supérieur

C'est le MBCF supérieur qui va déterminer la texture et la rugosité du revêtement. Le calibre doit donc être choisi en fonction du trafic et de la vitesse du trafic (tableaux 4.3 et 4.4).

Intensité du trafic (tableau 4.2)		
Légère	Modérée	Elevée
MBCF supérieur - Choix en fonction du conditionnement de la surface MBCF (tableaux 4.3 et 4.4)		
(0/4), (0/6,3)	(0/4), (0/6,3)	(0/6,3), (0/10)
MBCF inférieur - Choix en fonction du conditionnement du revêtement (tableaux 4.5 à 4.7)		
(0/2), (0/4), (0/6,3)	(0/4), (0/6,3)	(0/4), (0/6,3), (0/10)

Sur base du tableau 4.3 (classe de trafic léger), on a le choix entre un 0/4 et un 0/6,3.

Sur base du tableau 4.4 (régime de vitesse), on peut uniquement choisir un 0/6,3.

→ Le MBCF supérieur doit donc être un MBCF de calibre 0/6,3.

Conclusion

Il y a deux possibilités:

1. On peut appliquer sur cette route un MBCF bicouche à base d'une émulsion modifiée (PmB ou latex) (plus résistante aux fissures réfléchives), où le MBCF inférieur a un calibre 0/4 et le MBCF supérieur un calibre 0/6,3.
2. On peut aussi opter pour l'application d'un enduit scellé par un MBCF.

Comme travaux préparatoires, les fissures existantes doivent être préalablement fraisées individuellement et jointoyées à l'aide d'une masse de scellement à chaud.

Le plumage dans les frayées peut être compensé par l'application (limitée aux frayées) d'un pré-MBCF d'un calibre de 0/2 mm, la veille des travaux de schlammage proprement dits.



Chapitre 5

Formulation des mélanges

La formulation des mélanges constitue une étape indispensable pour mettre en œuvre sur chantier un MBCF de qualité. La préparation du revêtement existant, la production et la mise en œuvre sont les autres piliers de la réussite d'un MBCF.

L'importance de la formulation des mélanges ne cesse de croître, en raison de l'utilisation de MBCF sur des routes au trafic plus intense et des exigences toujours plus strictes en matière de durabilité. En outre, ces dernières années, des changements majeurs sont intervenus en ce qui concerne les matières premières, notamment les émulsions, les bitumes de base, le ciment et toutes sortes d'additifs. S'en tenir à des recettes connues, sans connaître l'impact de tous ces changements sur le processus de rupture et la durabilité du MBCF, n'est pas approprié et conduit à un risque élevé d'échec des travaux de MBCF. Si l'on veut faire face à tous ces changements, il est impératif de recourir à la formulation des mélanges.

En pratique, il est essentiel que la formulation des mélanges soit réalisable en termes de temps et de coût. Cela implique que le nombre d'essais en laboratoire doit être limité et que les adaptations nécessaires du mélange doivent être effectuées de manière rationnelle et ciblée.

La méthode de formulation recommandée par le CRR, telle que décrite dans ce chapitre:

- se base sur une composition de mélange initiale calculée théoriquement, ce qui permet de lancer le programme d'essais expérimental avec un mélange qui, si nécessaire, devra encore être rectifié dans une moindre mesure;
- utilise les méthodes d'essai européennes de la série NBN EN 12274 (NBN, 2005-2018), avec des choix de conditions d'essai adaptés au terrain;
- se déroule selon une procédure rationalisée en vue de limiter le nombre d'essais nécessaires;
- met à profit les connaissances existantes sur l'impact des composants et de leur composition proportionnelle sur les performances du mélange pour rectifier le mélange de manière ciblée et limiter le nombre de variantes de mélange à tester.

La méthode se base sur la grande expérience du CRR en matière d'essais performantiels pour MBCF (A. Destrée et al., 2022) et sur l'état de l'art en matière de formulation des MBCF au niveau international (California Department of Transportation [Caltrans], Division of Maintenance, 2008; Deneuvillers et al., 2017; Fugro Consultants et al., 2010; International Slurry Surfacing Association [ISSA], 2020, 2021; Southern African Bitumen Association [Sabita], 2011).

Le schéma à la figure 5.1 montre les différentes étapes de la procédure, depuis le choix des composants jusqu'au mélange appliqué sur le chantier.

Les conditions météorologiques sur le chantier peuvent changer rapidement, même dans le court laps de temps nécessaire à l'application d'un MBCF. Les adaptations in situ de la composition des mélanges sont donc inévitables et nécessaires pour ajuster la maniabilité et la vitesse de rupture.

Il convient toutefois de limiter les changements sur le chantier aux actions suivantes (voir § 6.5.2):

1. modification de la teneur en eau, en fonction des conditions météorologiques;
2. adaptation de la quantité de ciment pour améliorer la consistance et éventuellement accélérer/ralentir la rupture;
3. augmentation/diminution de la quantité de retardateur de rupture pour ralentir/accélérer la rupture.

Il est fortement déconseillé de changer les composants mêmes sur le chantier.

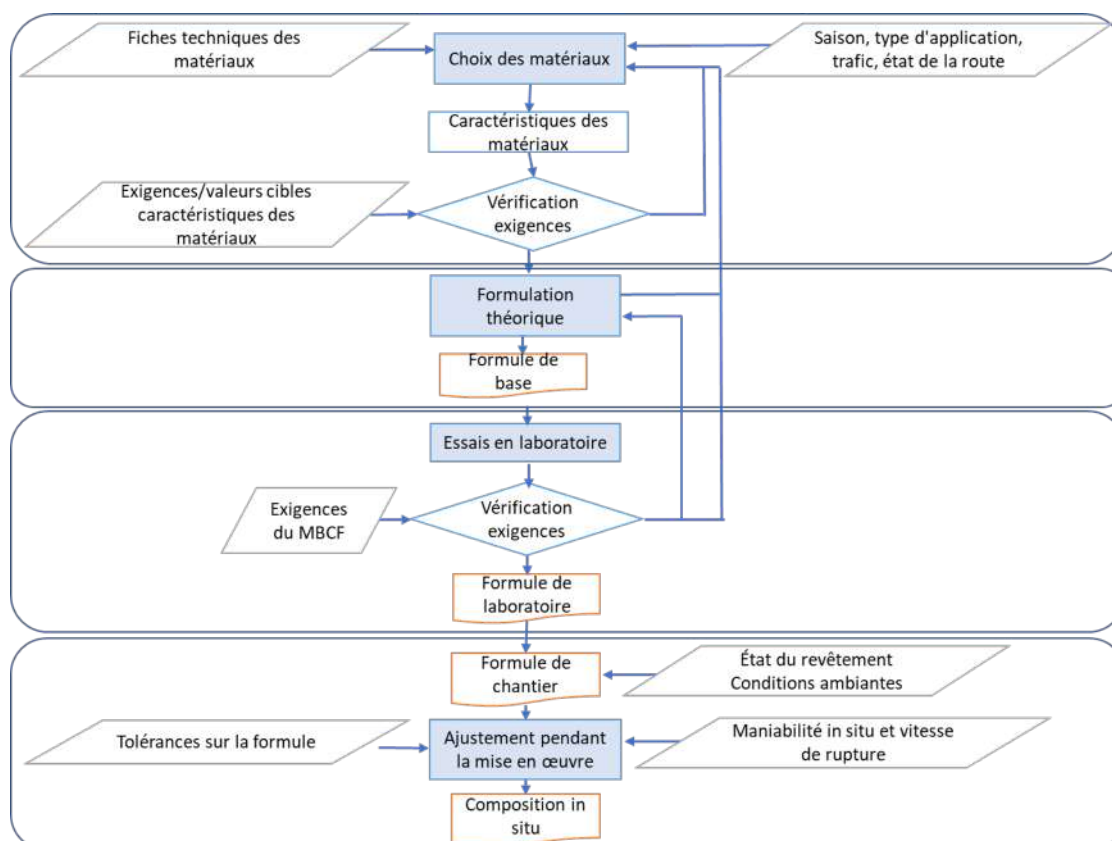


Figure 5.1 – Procédure de formulation des mélanges

Dans les paragraphes qui suivent, les différentes phases sont expliquées plus en détail, depuis le choix des matériaux et la formulation théorique jusqu'à la formulation expérimentale des mélanges.

La figure 5.1 montre qu'à différents moments, il peut s'avérer nécessaire de rectifier la composition et de rétroagir. Le dernier paragraphe de ce chapitre est donc consacré à l'influence des paramètres du mélange sur les performances de ce dernier. Il est nécessaire de comprendre cette influence pour prendre les bonnes décisions dans le processus d'ajustement.

5.1 Choix des matériaux

La formulation des mélanges commence par un choix initial des matériaux, dont les caractéristiques sont vérifiées par rapport aux exigences en vigueur. Pour une description détaillée des matériaux, de leurs caractéristiques et des exigences auxquelles ils doivent satisfaire, veuillez vous reporter au chapitre 2. Ci-dessous sont cités les principaux éléments qui influenceront le choix des matériaux.

■ 5.1.1 Choix des granulats

Si, en tant que formulateur, on souhaite déterminer et ajuster la granulométrie, il faut choisir un sable et une ou plusieurs fractions de gravillons pour composer le granulat. Sinon, on opte pour un mélange granulaire qui a été préalablement recomposé en carrière pour des MBCF.

Le trafic, l'état du revêtement à traiter et la technique d'application choisie (MBCF monocouche, MBCF bicouche ou enduit scellé par un MBCF) sont déterminants pour le choix du calibre maximal. Des recommandations à ce sujet ont été formulées précédemment au chapitre 4. Par exemple, pour les routes à vitesse élevée (> 70 km/h), on choisira un calibre maximal plus gros (0/6,3 mm ou moins courant 0/10 mm) pour des raisons de rugosité. Cependant, le calibre 0/10 mm est à déconseiller pour des endroits soumis à du trafic tangentiel.

Pour les routes caractérisées par la classe de trafic «élevée», c'est-à-dire les routes à fort trafic et trafic lourd telles que définies au chapitre 4, on choisira une granulométrie plutôt discontinue, en raison de sa plus grande résistance à la déformation et de la rugosité.

Outre la granulométrie, la nature et la minéralogie du granulat choisi jouent également un rôle. Le granulat doit être compatible avec l'émulsion afin de permettre une bonne adhésion entre le granulat et le liant résiduel.

Note:

La norme EN 12274-7 (NBN, 2005a) décrit un essai permettant d'évaluer la compatibilité du granulat avec l'émulsion, au moyen d'un essai d'agitation/usure sur des échantillons saturés en eau. Les échantillons sont confectionnés avec une granulométrie normalisée de 0/2 mm, afin d'exclure l'influence de la granulométrie. Jusqu'à présent, les essais réalisés au CRR avec des types de pierre (porphyre et grès) et des émulsions de bitume couramment utilisés en Belgique ont toujours révélé une bonne compatibilité.

■ 5.1.2 Choix de l'émulsion

Le choix de l'émulsion dépend principalement:

- de la saison à laquelle elle est mise en œuvre: la rupture étant très sensible aux conditions ambiantes, les fabricants d'émulsions adaptent leurs formulations en fonction de la saison et utilisent donc une émulsion adaptée à la plage de température prévue sur le chantier;
- du trafic: pour les routes de la classe de trafic «élevée», l'utilisation d'une émulsion modifiée (PmB ou latex, voir § 2.1.2) est fortement recommandée.

En outre, le choix peut également être influencé par les caractéristiques de l'émulsion et du liant résiduel. Pour connaître l'importance de ces caractéristiques sur le terrain (maniabilité, comportement à la rupture et performances du MBCF), veuillez vous reporter au chapitre 2.

■ 5.1.3 Choix du ciment

Le ciment est régulièrement utilisé en Belgique comme filler spécial, pour influencer la rupture et améliorer la consistance du MBCF. Cependant, l'impact du ciment sur le comportement à la rupture est difficile à prévoir: le ciment peut soit accélérer soit retarder la rupture, en fonction du type de ciment et de l'interaction avec l'émulsion choisie, une interaction qui dépend du bitume de base,

des émulsifiants et de leurs dosages, de la taille des gouttes, etc. La nature du granulat pourrait également influencer l'impact du ciment. Il est donc crucial de choisir le ciment dès le début de la formulation et de ne pas déroger à ce choix sur le chantier.

Note:

La norme EN 12848 (NBN, 2009c) (Détermination de la stabilité des émulsions de bitume en mélange avec du ciment) décrit une méthode d'essai simple pour évaluer la stabilité d'une émulsion lorsqu'elle est mise en contact avec du ciment. La norme spécifie l'utilisation d'un ciment standard (ciment de Portland CEM I, type R), car le résultat de l'essai dépend du type de ciment. Au CRR, cet essai a été réalisé avec différents types de ciment, afin d'évaluer l'impact d'un ciment particulier sur la stabilité et la rupture de l'émulsion choisie.

Toutefois, aucune corrélation n'a été trouvée entre le résultat de l'essai et l'impact ultérieur du ciment sur la rupture d'un MBCF contenant ces deux composants (émulsion et ciment). L'utilité pratique de cet essai est donc discutable.

■ 5.1.4 Choix du retardateur de rupture

L'ajout d'un retardateur de rupture peut être nécessaire pour ralentir la rupture les jours où les conditions ambiantes sont très chaudes et sèches. Le dosage de ce retardateur de rupture pourra être déterminé directement à la fabrication en usine ou sur le chantier même. Néanmoins, il est important de choisir le bon produit dès le départ et de vérifier la compatibilité entre l'émulsion et le retardateur de rupture.

■ 5.1.5 Choix d'autres additifs

Si d'autres additifs sont utilisés, tels que de la chaux hydratée, des pigments ou des fibres, il est important de les sélectionner lors de la formulation et de ne plus déroger à ce choix par la suite. En effet, l'impact sur le processus de rupture et les performances est imprévisible, de sorte que la modification de l'additif peut entraîner des effets inattendus et indésirables.

■ 5.2 Formulation théorique

Une fois les matériaux sélectionnés, une composition initiale peut être formulée de manière théorique.

La «formule de base» qui découle de cette phase théorique est un bon point de départ pour la formulation expérimentale des mélanges. Avec une bonne formule de base, le mélange devrait nécessiter moins d'ajustements lors de la phase de formulation expérimentale des mélanges. Cela permet de gagner du temps et de l'argent.

■ 5.2.1 Composition du granulat

La composition du granulat détermine la granularité, ce qui a un impact sur les performances du MBCF. La macrotecture, la rugosité, la résistance au ressuage, à la déformation et au plumage dépendront tous de la granulométrie exacte.

Dans le passé, les cahiers des charges types belges spécifiaient des valeurs limites pour les granulométries des MBCF (voir les versions antérieures SB 250 v2.0 [Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, 2000] et RW99_2004 [Ministère de la Région Wallonne (MRW), Direction Générale des Pouvoirs Locaux (DGPL), 2004]). Les versions actuelles ne prescrivent plus de valeurs limites.

Néanmoins, il est recommandé de confronter la granulométrie aux valeurs limites précédentes et aux directives pour:

- le type «continu» de l'IDRRIM (France) (Deneuvillers et al., 2017);
- le «type III» de l'International Slurry Surfacing Association (ISSA, 2020).

La figure 5.2 illustre ces limites, pour le cas de la classe granulaire 0/6,3 mm. Il est à noter que les limites de l'IDRRIM pour le type «continu» sont plus précises que les anciennes limites des cahiers des charges belges, mais en termes de moyennes, il y a une très bonne corrélation. Les limites maximales du «type III» de l'ISSA correspondent bien aux anciennes exigences des cahiers des charges belges, mais les limites minimales sont plus élevées. L'IDRRIM fournit également des directives pour la granulométrie discontinue, dont les limites sont également données à titre indicatif.

A titre d'illustration, ce graphique comprend quelques granulométries de mélanges recomposés de classe 0/6,3 mm mesurées au CRR. Deux de ces mélanges proviennent de carrières belges (A1 et A2), le troisième provient d'une carrière à l'étranger (A3). Il est à noter que toutes les granulométries sont conformes aux anciennes exigences belges et aux limites plus strictes de l'IDRRIM.

Par rapport à la directive de l'ISSA, seul A1 se situe en dessous de la limite inférieure. Tant les essais en laboratoire que l'expérience sur le terrain montrent que les trois mélanges granulaires conviennent à la formulation de MBCF à haute performance. Les MBCF avec le granulat A1 présentent visiblement plus de macrotexture, vu la granulométrie. Cela garantit une rugosité élevée, mais implique en même temps un risque plus élevé de plumage.

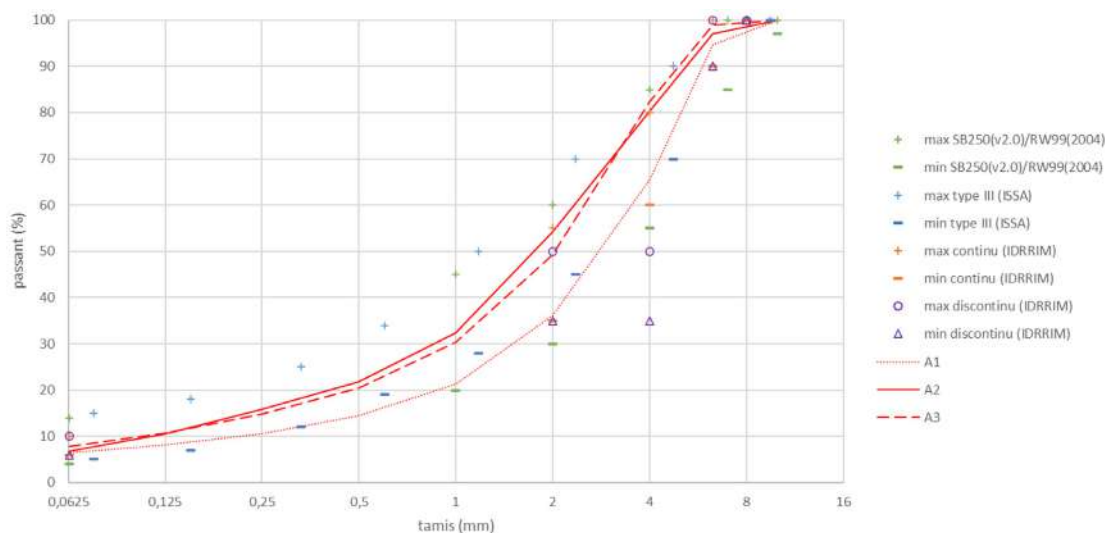


Figure 5.2 – Granulométries de quelques mélanges granulaires typiques pour MBCF (0/6,3), comparées aux anciennes exigences belges et à d'autres directives

Outre l'utilisation d'un mélange recomposé, le formulateur peut choisir de réaliser son propre mélange à partir de deux granulats ou plus. De cette manière, il est possible de réaliser n'importe quelle granulométrie et de l'ajuster en fonction des performances souhaitées. Une granulométrie plus discontinue améliorera la rugosité et la résistance au ressuage et à la déformation, mais peut également comporter un risque accru de plumage.

■ 5.2.2 Quantité d'émulsion

La quantité d'émulsion, exprimée en pourcentage en masse sur le granulat sec, détermine la teneur en liant résiduel et est donc critique pour les performances du mélange. La teneur en liant doit être suffisante pour assurer un bon enrobage des granulats, la cohésion et la résistance à l'usure et au plumage. En revanche, une teneur en liant trop élevée entraîne ressuage et déformabilité.

Théoriquement, la quantité de liant résiduel peut être estimée à partir de la surface spécifique du granulat (Deneuvillers et al., 2017; ISSA, 2005).

La méthode de calcul présentée ci-après est tirée de la référence [1], avec des coefficients adaptés aux tailles de tamis standard pour la Belgique (set de base + set 2):

$$\Sigma = 0,25 * G + 2,25 * S + 15 * s + 170 * f \quad (1)$$

où:

Σ : surface spécifique du granulat

G: refus sur tamis de 6,3 mm (en % en masse)

S: passant au tamis de 6,3 mm moins le refus sur tamis de 0,25 mm (en % en masse)

s: passant au tamis de 0,25 mm moins le refus sur tamis de 0,063 mm (en % en masse)

f: passant au tamis de 0,063 mm (en % en masse)

Le pourcentage de liant résiduel, en pourcentage en masse sur le granulat sec, est alors le suivant:

$$\% \text{ liant} = \alpha * K * (\Sigma)^{1/5} \quad (2)$$

où:

$\alpha = 2,65/\rho$: un facteur de correction qui dépend de la densité du granulat ρ , en Mg/m^3 ($\alpha = 1$ pour $\rho = 2,65 \text{ Mg}/\text{m}^3$)

K: le «module de richesse»

Le «module de richesse» est un chiffre qui indique à quel point le mélange doit être riche en liant. Cela dépend du type de mélange et du calibre maximal. Les valeurs recommandées pour les MBCF sont les suivantes:

K = 4,5 pour un calibre 0/4

K = 4,25 pour un calibre 0/6,3

K = 4,0 pour un calibre 0/10

Appliqué aux granulométries des trois mélanges granulaires de la figure 5.2, on constate de légères différences en fonction de la granulométrie et de la masse volumique (en pourcentage en masse sur le granulat sec):

- A1: 7,0 %
- A2: 7,3 %
- A3: 7,5 %

Lors du calcul du dosage de l'émulsion, il faut alors tenir compte de la teneur exacte en liant dans l'émulsion:

$$\% \text{ émulsion} = 100 * (\% \text{ liant résiduel} / \% \text{ liant dans l'émulsion}) \quad (3)$$

■ 5.2.3 Quantité de ciment

La quantité de ciment varie généralement de 0 à 2 % de la masse du granulat sec. Pour la composition du mélange initial, 0,5 à 1 % est un bon point de départ. Cette quantité peut encore être ajustée dans le programme d'essais.

Il est à noter que le ciment, en tant que fine ajoutée, a également un impact sur la granulométrie, notamment sur le passant au tamis de 0,063 mm. Pour une estimation plus correcte de la quantité d'émulsion, il faudrait donc en principe tenir compte de la granulométrie du mélange granulat-ciment. Cependant, pour des pourcentages de ciment inférieurs à 1 %, la différence sur la quantité d'émulsion estimée n'est pas significative, puisqu'il s'agit d'une première estimation.

■ 5.2.4 Quantité d'eau

La fluidité, la consistance et le comportement à la rupture sont tous affectés par la quantité d'eau. Après mûrissement, cependant, l'eau est presque entièrement expulsée, et la quantité d'eau n'a donc plus d'impact sur les autres performances (sensibilité au plumage, ressuage, etc.).

La consistance diminue et la fluidité augmente à mesure que le dosage des composants liquides, à savoir l'émulsion et l'eau d'apport, augmente. Suivant cette logique, il est recommandé de faire correspondre la quantité initiale d'eau à la quantité d'émulsion lors de la formulation: plus il y a d'émulsion, moins il faudra ajouter d'eau d'apport.

Sur la base des mesures de la teneur en eau des mélanges en vrac fraîchement mélangés, provenant des différents chantiers de MBCF suivis par le CRR au fil des ans, une valeur cible de 15 % (sur la masse du granulat sec) a été trouvée pour la quantité totale d'eau. Cette quantité totale est, dans le cas d'un MBCF frais, composée de:

- l'eau dans le granulat humide;
- l'eau contenue dans l'émulsion;
- l'eau d'apport.

La formulation en laboratoire part du granulat sec, de sorte que le premier composant (l'eau dans le granulat humide) est égal à zéro. Le deuxième composant est:

$$\% \text{ émulsion} * (100 - \% \text{ liant dans l'émulsion}) / 100 \quad (\text{en \% en masse sur granulat sec})$$

Pour obtenir une teneur en eau totale de 15 % sur la masse de granulat sec, il faut donc ajouter une quantité d'eau supplémentaire égale à:

$$15 - \% \text{ émulsion} * (100 - \% \text{ liant dans l'émulsion}) / 100 \quad (\text{en \% en masse sur granulat sec})$$

Cela donne une valeur initiale appropriée pour le pourcentage d'eau à ajouter, pourcentage qui sera ajusté si nécessaire lors de la formulation expérimentale.

Il convient de noter que la quantité d'eau totale ne peut être contrôlée que dans des conditions de laboratoire, le point de départ étant un granulats sec. Sur le chantier, en revanche, on utilise des granulats humides, dont la teneur en eau est variable et dépend, entre autres, des conditions météorologiques et de l'apport en eau lors de la recombinaison en carrière. La quantité d'eau d'apport supplémentaire est donc rectifiée in situ en fonction de la consistance observée.

5.3 Formulation expérimentale des mélanges

La formulation expérimentale des mélanges vise à qualifier le MBCF par des essais, selon les critères ci-dessous:

1. Temps de mélange: dès que l'émulsion entre en contact avec les autres composants, le mélange n'est miscible que pendant une période limitée, car la rigidité va fortement augmenter à un moment donné. Le temps de mélange doit être supérieur à l'intervalle de temps requis pour le malaxage et l'épandage du mélange sur le chantier. Un temps de mélange trop court entraîne un risque d'agglomération et d'obstruction de la schlammeuse.
2. Consistance: si la consistance est trop élevée (mélange trop «rigide»), la mise en œuvre du MBCF sera compliquée et le MBCF sera a priori moins homogène et moins adhérent au support. Si la consistance est trop faible (mélange trop «fluide»), les risques de ségrégation et de phénomènes d'écoulement sont plus élevés.
3. Cohésion: après avoir été appliqué sur la route, le MBCF doit monter rapidement en cohésion afin de permettre l'ouverture au trafic dans les plus brefs délais. La cinétique de la structure cohésive et la cohésion finale (qui permet l'ouverture du trafic sans endommager le MBCF) sont donc des paramètres essentiels qui déterminent également la formulation des mélanges.
4. Résistance à l'usure: après l'ouverture au trafic, le MBCF doit bien sûr pouvoir résister à l'usure progressive due au trafic véhiculaire, mais aussi à l'eau (l'ennemi juré des revêtements bitumineux).

Si le MBCF ne répond pas à un certain critère, la formulation doit être ajustée.

Les méthodes d'essai recommandées par le CRR pour la formulation expérimentale des mélanges sont discutées plus en détail dans les lignes qui suivent. Vient ensuite la procédure recommandée, conçue pour réduire au maximum le travail expérimental.

La résistance au ressuage et à la déformation est un critère qui ne figure pas dans la liste ci-dessus. Au moment de la publication de ce code de bonne pratique, le CRR dispose d'une méthode d'essai interne basée sur l'essai d'orniérage, mais cet essai est chronophage et n'a pas encore été suffisamment validé. En outre, force est de constater que sur les routes belges avec MBCF, le ressuage est moins fréquent que l'usure et le plumage. On peut en dire autant de l'orniérage, qui reste faible en valeur absolue en raison de la faible épaisseur de couche. A ce jour, un essai d'orniérage n'est donc pas considéré comme une nécessité pour la formulation des mélanges, mais la question pourrait devenir plus pertinente à l'avenir, lorsque l'application des MBCF s'étendra à des routes au trafic plus intense, et que les MBCF seront appliqués en plusieurs couches et en épaisseurs de couche plus importantes.

■ 5.3.1 Méthodes d'essai

■ 5.3.1.1 Temps de mélange

Ce délai qui s'écoule entre le début du malaxage de l'émulsion avec les autres composants et le début de la rupture du MBCF, peut être déterminé simplement en laboratoire (à température contrôlée) en agitant manuellement et à vitesse constante les différents composants dans un récipient jusqu'à observer un changement de la rigidité du MBCF. Il n'existe pas de norme d'essai européenne en la matière. Aussi, le CRR a développé son propre protocole d'essai, basé sur un rapport technique de l'International Slurry Surfacing Association (ISSA, 2017). La précision de la méthode est limitée, étant donné le ressenti subjectif de l'opérateur. Cependant, cet essai est simple et rapide et suffit pour estimer le temps de mélange.

La température ayant un impact significatif sur la rupture, il est extrêmement important d'évaluer le temps de mélange à une température correspondant à la plage de température prévue pour le moment de la mise en œuvre du MBCF.

Une directive de l'International Slurry Surfacing Association (ISSA, 2020) spécifie un temps de mélange minimal de 120 s.

Un temps de mélange trop long n'est pas non plus souhaitable, car cela peut signifier une rupture et une augmentation de la cohésion très lentes. Selon le protocole d'essai de l'International Slurry Surfacing Association (ISSA, 2017), l'essai est arrêté après 300 s de malaxage, ce qui indique également un temps de mélange maximal.

En pratique, le malaxage dans la schlammeuse prend moins de 60 s. Un temps de mélange d'au moins 120 s devrait donc suffire à garantir la fluidité sur le chantier.

■ 5.3.1.2 Consistance

La norme européenne EN 12274-3 (NBN, 2018a) prescrit une méthode d'essai pour déterminer la consistance des MBCF¹. Cette méthode peut être utilisée comme une aide pour formuler un mélange homogène, stable et maniable.

Il s'agit d'un essai simple et rapide (figure 5.3) réalisé à température ambiante (23 ± 5 °C). Un cône est placé sur une plaque métallique gravée d'une échelle. Cette échelle est constituée de 8 cercles concentriques (numérotés de 0 à 7, de l'intérieur vers l'extérieur). La plaque a été préalablement recouverte d'une feuille de papier transparent non absorbant. Le cône métallique est rempli de MBCF à l'aide d'un entonnoir². On extrait ensuite le MBCF du cône dans un mouvement régulier vertical et on mesure le fluage (ou la dispersion diamétrale) du mélange sur l'échelle (en 4 points à 90 ° d'intervalle, à partir du cercle «0»). Au CRR, l'essai est réalisé en triple. Le résultat moyen de ces trois essais individuels, exprimé en centimètres, représente la consistance du mélange.

1 Selon la norme EN 12274-3 (NBN, 2018a), cet essai est exclusivement destiné aux MBCF ($D \leq 4$ mm). Les essais réalisés au CRR avec une granulométrie de 0/6,3 mm ont prouvé que le champ d'application de la norme peut être étendu à ce type de mélange.

2 L'entonnoir est une adaptation du CRR. Il n'est pas décrit dans la norme européenne EN 12274-3 (NBN, 2018a), mais il est recommandé pour un transfert facile et soigné du MBCF dans le cône.

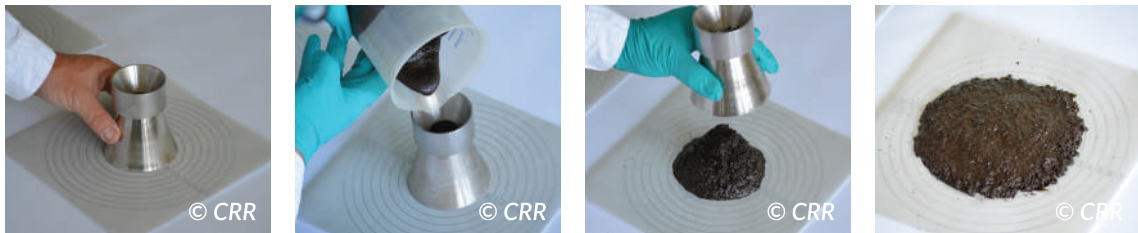
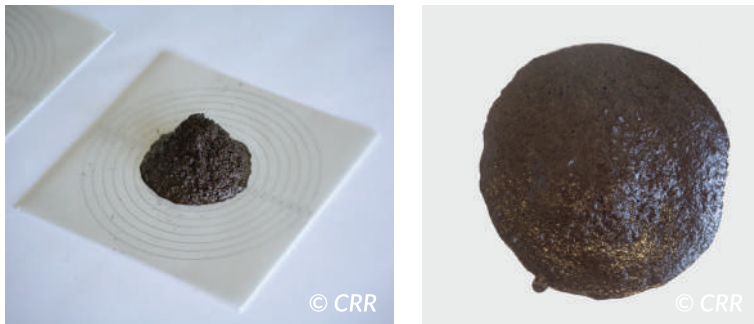


Figure 5.3 – Exemple de réalisation de l'essai de consistance selon la norme EN 12274-3 (NBN, 2018a)

Concrètement, cela signifie que plus le fluage est faible, plus la consistance du MBCF sera élevée. Inversement, plus le fluage est important, plus la consistance du MBCF sera faible (figure 5.4). La composition du MBCF doit donc être adaptée en fonction des résultats obtenus lors de cet essai de consistance.



Consistance élevée
(Faible dispersion diamétrale)

Consistance faible
(Forte dispersion diamétrale)

Figure 5.4 – Exemple de deux consistances pour MBCF (élevée et faible)

La température ayant un impact significatif sur la consistance après malaxage, il est extrêmement important de réaliser l'essai à une température correspondant à la plage de température prévue pour le moment de la mise en œuvre du MBCF.

Une directive de l'International Slurry Surfacing Association - ISSA (ISSA, 2020) considère qu'un fluage de 2 à 3 cm est optimal.

5.3.1.3 Cohésion

La norme européenne EN 12274-4 (NBN, 2018b) prescrit une méthode d'essai qui se rapproche d'un essai de torsion sur des échantillons circulaires. L'essai peut être effectué à différents moments après la préparation de l'échantillon. Ainsi, il est possible d'évaluer le temps pour la montée en cohésion et, par conséquent, le délai de réouverture au trafic du MBCF.

L'essai normatif (figure 5.5) est réalisé à température ambiante ($23 \pm 5^\circ\text{C}$) et son principe consiste à appliquer un tampon en caoutchouc sur un échantillon circulaire de MBCF (immobilisé sur un support en feutre bitumé) avec une pression constante ($200 \pm 4 \text{ kPa}$). À l'aide d'une clé dynamométrique, une torsion est appliquée sur le MBCF par l'intermédiaire du tampon en caoutchouc. Des mesures de couple de torsion sont effectuées soit à un moment fixe soit à des intervalles de temps

fixes après la fabrication de l'échantillon de MBCF. Après l'essai, une inspection visuelle de l'état de l'échantillon de MBCF est effectuée. Quatre types de «schémas de dégradation» sont référencés dans la norme EN 12274-4 (NBN, 2018b) et illustrés à la figure 5.6.

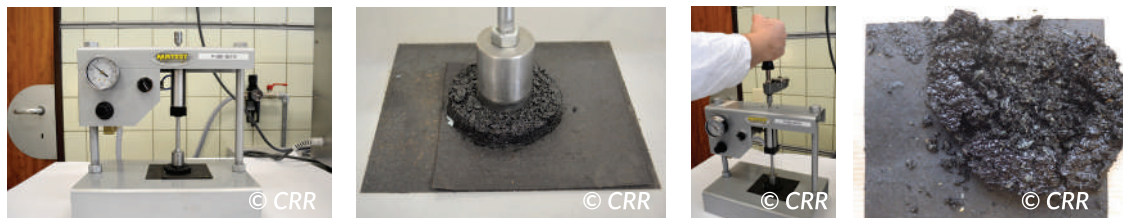
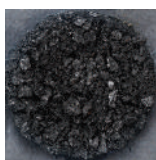


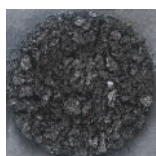
Figure 5.5 – Illustration de l'exécution de l'essai de cohésion selon la norme EN 12274-4 (NBN, 2018b)



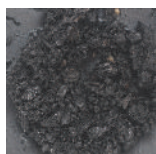
N (normal): l'échantillon est légèrement endommagé par une perte de granulats



S (spin): seule la couche bitumineuse a disparu de la surface de l'échantillon



C (cracked): L'échantillon est fissuré



D (disintegrated): L'échantillon s'est désagrégé

Figure 5.6 – Les quatre schémas de dégradation indiqués dans la norme EN 12274-4 (NBN, 2018b)

Au moment de la rédaction de ce code de bonne pratique, au CRR:

- les mesures de couple de torsion ont été effectuées à des intervalles de 30, 60, 90 minutes et 24 heures après la coulée du MBCF dans le moule métallique;
- l'essai est réalisé en triple. Le résultat moyen de ces trois essais individuels, exprimé en Nm, représente la cohésion du mélange aux quatre temps de mûrissement précités.

Concrètement, pour la valeur numérique du couple de torsion, plus le moment (exprimé en Nm) est élevé, plus le MBCF présentera une cohésion élevée (figure 5.7).

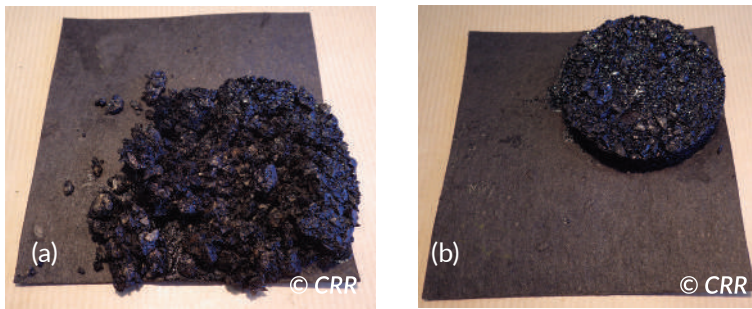


Figure 5.7 – Illustration d'un MBCF présentant une faible cohésion (a) et une forte cohésion (b) après la réalisation de l'essai de cohésion selon la norme EN 12274-4 (NBN, 2018b)

En Belgique, les entrepreneurs visent un délai d'ouverture au trafic le plus réduit possible pour limiter au maximum la gêne occasionnée aux usagers de la route. Il se situe préférentiellement entre 30 et 60 minutes. Passé ce délai, qui est fonction des conditions de travail et météorologiques, le MBCF a atteint une cohésion lui permettant de supporter le trafic véhiculaire.

Une directive de l'International Slurry Surfacing Association - ISSA (ISSA, 2020) spécifie des valeurs de couple de torsion minimales à atteindre après 30 et 60 minutes pour assurer une ouverture rapide au trafic (tableau 5.1). Ces valeurs sont censées garantir que le MBCF ne subira pas de dégradations lors de l'ouverture au trafic.

Temps de mûrissement	Couple de torsion
30 minutes	$\geq 1,2$ Nm
60 minutes	$\geq 2,0$ Nm

Tableau 5.1 – Couple de torsion minimal à atteindre pour des temps de mûrissement de 30 et 60 minutes pour des MBCF prévus pour une remise en circulation rapide selon la directive (ISSA, 2020)

5.3.1.4 Essai d'usure

La norme européenne EN 12274-5 (NBN, 2018c) prescrit une méthode d'essai qui peut être utilisée comme une aide à la formulation des MBCF, afin d'évaluer les éléments suivants:

- la résistance à l'usure des MBCF après un mûrissement «favorable», à une température de (60 ± 5) °C;
- la quantité minimale d'émulsion pour obtenir des MBCF destinés à différentes classes de trafic (annexe A de la norme);
- la résistance à l'usure des MBCF au jeune âge, dans différentes «conditions météorologiques» et ce en appliquant différentes procédures de mûrissement (température, hygrométrie) (annexe B de la norme).

L'essai normatif (figure 5.8) est basé sur une procédure d'abrasion au moyen d'un cylindre en caoutchouc dur. Ce cylindre exerce un mouvement de rotation planétaire (61 cycles par minute) sous pression verticale (force = $22,3 \pm 2,0$ N) sur la surface de l'échantillon de MBCF pendant 5 minutes. Cet échantillon a été préalablement vieilli dans une étuve (à 60 °C, jusqu'à obtention d'une masse constante) et saturé d'eau par immersion pour une durée de 60 à 75 min. Les éprouvettes sont testées sous l'eau (à 25 ± 2 °C) et la perte de poids liée à l'usure du MBCF est déterminée par pesage.

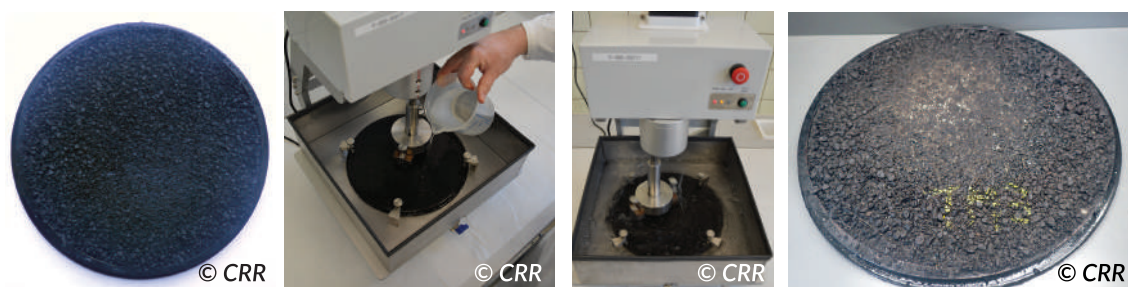


Figure 5.8 – Illustration de l'exécution de l'essai d'usure selon la norme EN 12274-5 (NBN, 2018c)

Au CRR, l'essai est toujours réalisé en triple. Le résultat moyen de ces trois essais individuels, exprimé en g/m^2 , représente la sensibilité à l'usure du mélange.

Concrètement, cela signifie que plus la perte de poids est faible, plus le MBCF sera cohésif et résistant à l'usure. Inversement, plus la perte de poids sera importante, moins le MBCF sera cohésif et résistant à l'usure (figure 5.9).

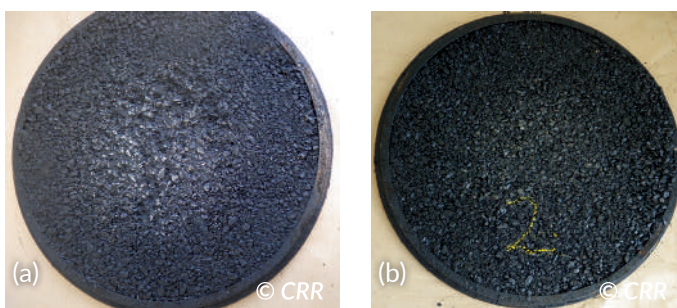


Figure 5.9 – Illustration d'un MBCF présentant une faible résistance à l'usure (a) et une forte résistance à l'usure (b) après la réalisation de l'essai d'usure selon la norme EN 12274-5 (NBN, 2018c)

Selon la directive ISSA, 2021, une perte de matériau moyenne maximale de $540 \text{ g}/\text{m}^2$ est requise pour obtenir un mélange présentant une bonne résistance à l'usure. Sur la base des résultats des essais effectués avec des MBCF belges, on peut conclure que cette exigence est stricte, mais néanmoins réalisable.

■ 5.3.2 Procédure de formulation expérimentale

La figure 5.10 présente la procédure de formulation expérimentale recommandée. La possibilité d'atteindre les valeurs limites pour les résultats des essais a été démontrée en utilisant des mélanges avec les composants habituels utilisés en Belgique. Si un résultat d'essai n'est pas concluant, la formulation doit être ajustée et, en fonction de la nature de la rectification, il convient de recommencer les essais précédents. La figure 5.10 contient également les options recommandées pour ajuster la composition du mélange.

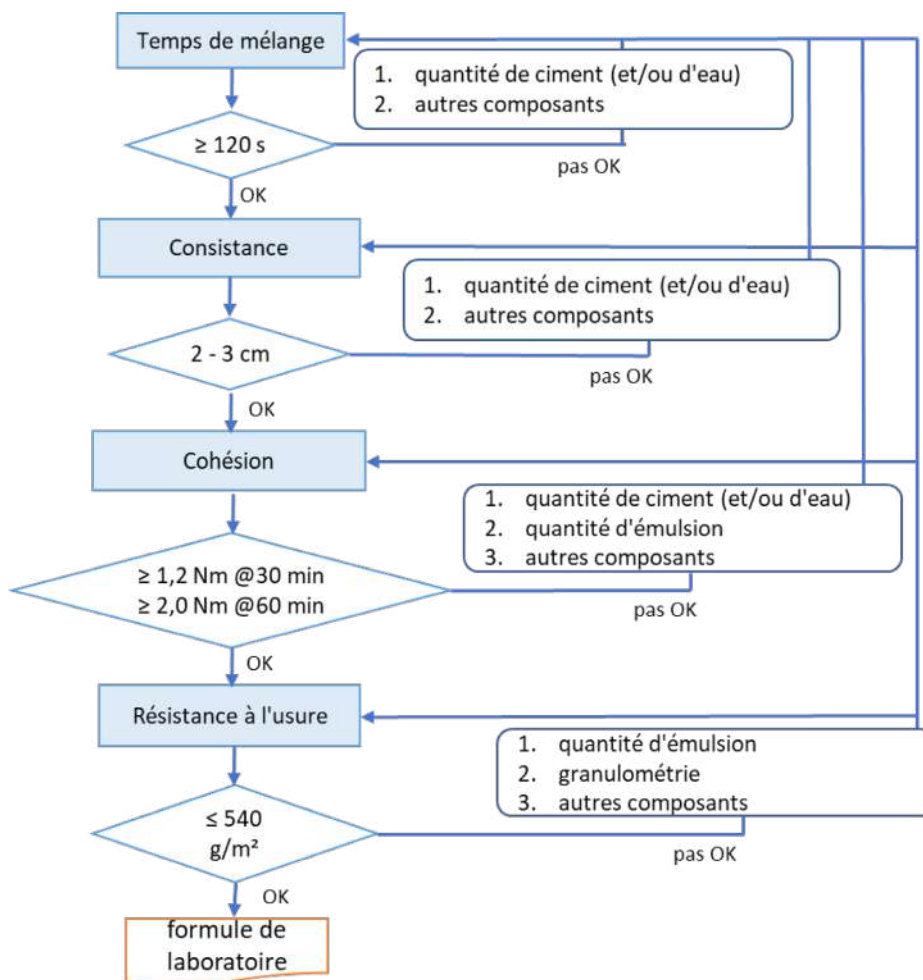


Figure 5.10 – Diagramme de la formulation expérimentale des mélanges

Logiquement, on commence par la vérification du temps de mélange et de la consistance, des propriétés qui sont cruciales pour la maniabilité et la qualité du travail fourni sur le chantier. Lorsque le temps de mélange et la consistance sont appropriés, le mélange est soumis aux essais plus complexes de cohésion et de résistance à l'usure.

Toutes les expériences et la littérature sont unanimes sur l'impact de la teneur en émulsion sur la résistance à l'usure, qui augmente à mesure que la teneur en émulsion augmente. Par conséquent, l'essai d'usure selon la norme EN 12274-5 (NBN, 2018c) déterminera une teneur minimale en émulsion.

En principe, il existe également une limite maximale pour la teneur en émulsion. La résistance au ressuage et à la déformation diminue à mesure que cette teneur augmente. Les exigences en matière de résistance à l'usure, d'une part, et de résistance au ressuage et à la déformation, d'autre part, déterminent donc ensemble un intervalle dans lequel doit se situer la quantité d'émulsion (figure 5.11). En supposant que cet intervalle soit suffisamment large, on peut ajuster la quantité d'émulsion pour atteindre en toute sécurité l'exigence de résistance à l'usure. Cette approche est largement justifiée par le constat que, sur les routes belges, le ressuage et la déformation sont beaucoup moins fréquents que le plumage et l'usure.

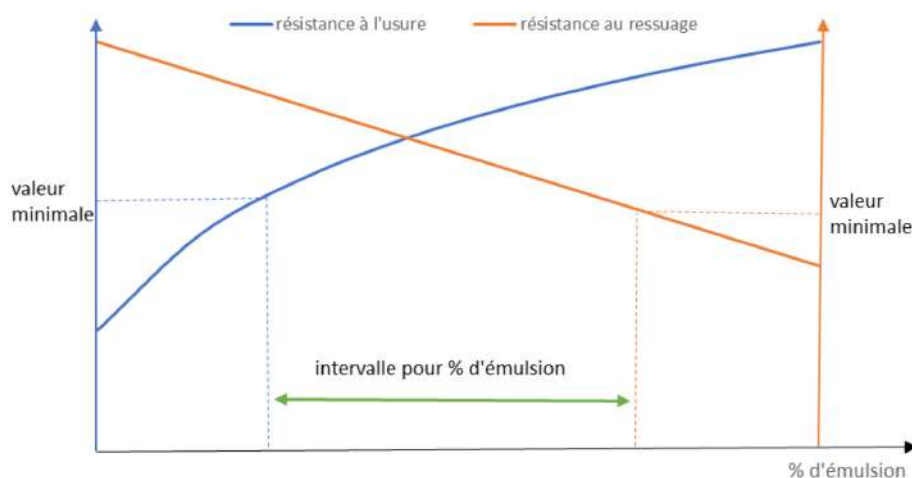


Figure 5.11 – Illustration de l'évolution de la résistance à l'usure et au ressuaage en fonction de la quantité d'émulsion

La question clé pour cette procédure de formulation est, chaque fois qu'un résultat d'essai n'est pas concluant: quels paramètres du mélange peuvent être rectifiés et quel sera l'impact sur les autres caractéristiques performantielles? Le paragraphe suivant fournit des directives pour aider le formulateur du mélange dans le processus d'ajustement.

5.4 Influence des paramètres du mélange sur les performances

Lors de la mise sur pied et de l'amélioration des méthodes d'essai au CRR, l'influence des différents paramètres du mélange sur les performances des MBCF a été systématiquement étudiée. En outre, une étude bibliographique approfondie a été entreprise pour rassembler toutes les informations disponibles concernant cette influence. Cela a permis d'obtenir un aperçu global, indiquant l'influence des paramètres du mélange sur chaque caractéristique performantielle individuelle (tableau 5.2).

La première colonne du tableau 5.2 contient les paramètres de formulation, répartis en 4 groupes:

1. Quantités des composants
2. Caractéristiques du squelette granulaire
3. Propriétés de l'émulsion
4. Propriétés du liant résiduel

Les colonnes suivantes indiquent pour chaque caractéristique performantielle l'impact le plus probable lorsque le paramètre de formulation correspondant est modifié, tous les autres paramètres du mélange restant inchangés.

Il convient de noter qu'il n'est pas toujours possible de prédire l'impact d'une modification particulière d'un paramètre du mélange. Certaines cellules présentent à la fois une possible diminution et une augmentation. Cela peut révéler l'existence d'un optimum, auquel cas l'impact dépendra de la position par rapport à l'optimum. Une autre explication aux observations apparemment contradictoires est que la rupture de l'émulsion et le développement de la cohésion sont des processus très complexes qui sont influencés par tous les composants et leurs interactions. L'impact de la modification d'un paramètre peut donc varier d'un mélange à l'autre, en fonction des autres composants du mélange.

Si l'on considère l'émulsion, peu de propriétés peuvent être directement reliées aux performances du MBCF, à l'exception de la valeur de rupture, de la viscosité et de la quantité d'émulsifiant, dont dépend la valeur de rupture même. En revanche, les propriétés du liant résiduel exercent une influence importante, similaire à celle qu'elles ont dans tous les types de mélanges bitumineux. Pour des routes à fort trafic, une émulsion modifiée (PmB ou latex) est donc recommandée.

Il y a aussi quelques cellules vides dans le tableau 5.2, quand il n'y a pas encore assez de données sur un impact possible. Ce tableau 5.2 sera complété et amélioré au fil du temps, à mesure que des données supplémentaires ressortiront des essais en laboratoire et des observations sur le terrain.

Le tableau de synthèse (tableau 5.2) est donc un outil simple permettant de voir rapidement quel(s) paramètre(s) peut (peuvent) être modifié(s) pour optimiser une caractéristique performantielle précise et comment cela peut potentiellement influencer les autres caractéristiques. Toutefois, le formulateur doit être conscient du fait que de nombreux paramètres peuvent avoir un effet variable, en fonction des quantités et des interactions avec les autres composants. L'influence d'une certaine modification n'est donc pas toujours claire ni prévisible. Cela souligne la grande importance des méthodes d'essai, car le formulateur devra toujours, en fin de compte, effectuer les essais pour vérifier les effets prévus et s'assurer que toutes les exigences sont respectées.

		Temps de mélange	Consistance	Montée en cohésion	Résistance à l'usure	Résistance au ressuage et à l'orniérage
Quantités	% d'émulsion ↗	↗	↘	↘ (1)	↗ (1)	↘
	% d'eau ↗	↗	↘	↘ (1)	aucun	aucun
	% de ciment ↗	↘ ou ↗	↗ ou ↘	↗ (1)	↗ ou →	↗
	% de retardateur de rupture ↗	↗	↘	→ (1)	(3)	(3)
	% de chaux hydratée ↗			↘ ou ↗	↗	↗
Granulo-métrie	passant au tamis de 0,063 mm ↗	↘	↗	↗	↗	↗
	grossier/moyennement grossier (discontinuité) ↗	↗	↘	↘ (2)	↘ (2)	↗
	calibre maximal des grains ↗	aucun	aucun	aucun	↘	↗
Caractéristiques de l'émulsion	valeur de rupture ↗	↗	↘ ou →	↘ ou →	aucun	aucun
	viscosité ↗	↘ ou →	↗	aucun	aucun	aucun
	% d'émulsifiant ↗	↗	→	↘ ou →	(3)	(3)
Caractéristiques du liant	avec polymère	aucun	→	↗	↗	↗
	paraffinique (vs naphthénique)	aucun	↘	↘	↘	
	pen ↗ (et TA&B ↘)	aucun	aucun	↘ ou ↗	↗ ou ↘	↘
	module complexe ↗	aucun	aucun	↘ ou ↗	↗ ou ↘	↗

(1) Tendance la plus probable, mais aussi indications dans la littérature d'une influence contraire

(2) En raison de la macrotexture

(3) Peut avoir un effet indésirable si incompatibilité avec l'émulsion, ou lors de la formation de mousse en cas de surdosage

Tableau 5.2 – Impact le plus attendu des paramètres du mélange sur les performances (indicatif)

Chapitre 6

Exécution des MBCF

Non seulement la composition du MBCF doit être correcte, mais les travaux préparatoires et la mise en œuvre elle-même (aussi bien du support à recouvrir, voir chapitre 3, que de la zone de chantier) doivent être effectués avec le plus grand soin afin d'obtenir un résultat de qualité. La mise en œuvre réussie du MBCF exige une grande expérience et une bonne connaissance du produit. Une connaissance approfondie des techniques d'exécution et des paramètres influençant la réussite de la construction d'un MBCF, par l'expérience et/ou la formation, est indispensable pour toutes les personnes impliquées dans l'exécution. Il est également important d'utiliser correctement le matériel adéquat (camion, type de traîneaux, rouleaux, etc.). L'organisation du chantier implique également beaucoup de travail.

Dans ce chapitre, les points d'attention essentiels relatifs à la préparation et à l'exécution du chantier sont décrits en détail. Pour terminer, les principales dégradations possibles dans un MBCF sont discutées.

6.1 Zone de stockage

Une machine à MBCF est limitée dans la quantité de matériaux qu'elle peut transporter en une seule fois. Par conséquent, seule une longueur limitée de bande de MBCF (quelques centaines de mètres) peut être posée, en fonction de l'épaisseur de MBCF prévue. Lorsque l'un des matériaux est épuisé, il faut réapprovisionner la machine à MBCF. Par conséquent, il faut prévoir un endroit à proximité du chantier où l'on peut, entre autres, placer un stock de granulats et où l'on peut placer des camions-citernes contenant de l'émulsion et de l'eau.

6.1.1 Emplacement

Il est recommandé que le lieu de stockage soit aussi proche que possible du lieu d'exécution. Le camion devra retourner à cet endroit chaque fois que la machine sera vide. Des distances trop longues entraîneront des retards importants dans l'exécution.

6.1.2 Support

Le support du lieu de stockage doit être de préférence en asphalte, en béton ou en pavés.



Figure 6.1 – Stock de granulats sur des supports non revêtus (à gauche) et revêtus (à droite)

Dans le cas d'un support non revêtu, il y a un risque de contamination des granulats par des matériaux provenant de ce support. Cela se produit notamment lors du chargement, lorsque le bac du chargeur ou le grappin du camion s'enfonce partiellement dans le support non revêtu. De grosses pierres (d'un calibre supérieur à celui des granulats prévus pour le MBCF) et des impuretés vont alors se retrouver dans le mélange. Celles-ci peuvent causer des dommages pendant et après l'exécution (voir § 6.11).

Si l'on ne dispose que d'un lieu de stockage avec un sol non revêtu, il est recommandé de charger les granulats à quelques centimètres au-dessus de la surface au sol. De cette façon, la contamination des granulats peut être évitée.



Figure 6.2 – Stock de granulats prélevés à quelques centimètres au-dessus de la surface au sol

■ 6.1.3 Aménagement du lieu de stockage

Le lieu de stockage doit être suffisamment grand pour être facilement accessible, tant pour la livraison des granulats que pour la mise en place de l'équipement et le chargement et le nettoyage de la machine à MBCF. Les matériaux et équipements suivants sont présents sur le lieu de stockage:

- un ou plusieurs stocks d'agrégats pour une ou plusieurs couches de MBCF;
- camion-citerne avec de l'eau;
- camion(s)-citerne(s) avec de l'émulsion;
- stock de ciment et d'additifs (par exemple, retardateurs de rupture, pigments, fibres);
- chargeur sur pneus;
- véhicules de chantier;
- machine à MBCF;
- rouleau;
- les traîneaux.

Il est recommandé de placer les granulats de différents calibres suffisamment loin les uns des autres pour éviter tout mélange ou malentendu lors du chargement.

Si la machine à MBCF elle-même n'est pas équipée d'une grue de chargement, le chargeur doit pouvoir passer en toute sécurité et sans à-coups devant la machine et les granulats pendant le chargement.



Figure 6.3 – Zone de stockage avec des granulats et deux camions-citernes

Il est recommandé de prendre les précautions nécessaires pour protéger le voisinage et l'environnement de toute contamination pendant le transfert de l'émulsion.

Avant de commencer la journée de travail, le traîneau est nettoyé en brûlant le MBCF qui s'est déposé. Si cela n'est pas fait, les parties mobiles du traîneau risquent d'être bloquées par le MBCF qui s'est déposé. Une zone doit être prévue sur le site de stockage pour le nettoyage du traîneau et la collecte des résidus brûlés afin qu'ils ne contaminent pas le lieu de stockage des granulats. L'utilisation d'un solvant biologique est également recommandée pour ralentir l'adhésivité du MBCF sur les éléments du traîneau. Il importe de toujours respecter les instructions d'utilisation et de sécurité de ces produits.



Figure 6.4 – Nettoyage du traîneau

■ 6.1.4 Protection des granulats

Il est important de synchroniser autant que possible la livraison des granulats et la date d'exécution. Lorsque les granulats sont livrés trop longtemps à l'avance (à savoir plus de deux semaines), le risque de contamination et d'exposition aux précipitations ou à la chaleur et au soleil augmente. Les granulats doivent contenir la bonne quantité d'humidité, afin d'empêcher la ségrégation des particules fines dans le granulat. Cette teneur en eau est également prise en compte lors de la production et de la composition du granulat de MBCF en carrière (on ajoute parfois déjà de l'eau, voir § 2.1.1.4). Les précipitations et la déshydratation sont donc deux éléments préjudiciables à la composition et à la qualité. De plus, lorsque la teneur en eau du granulat varie fortement sur le chantier, cela doit être compensé par l'eau d'apport (§ 2.1.3 et § 6.5.2).

■ 6.2 Aménagement du chantier

Les applications d'entretien avec un MBCF causent généralement peu de perturbations. Idéalement, la route à traiter est provisoirement complètement fermée à la circulation. Le traitement des rues avec un MBCF n'entraîne normalement qu'une journée de désagrément pour les riverains et les usagers de la route, après quoi la route peut être rouverte à la circulation.

Il arrive qu'une fermeture complète soit impossible et les travaux devront être réalisés par phases. La circulation est autorisée en alternance sur la voie libre. En fonction de la longueur du tronçon à traiter, des feux de circulation seront utilisés à cet effet, en combinaison ou non avec des signaleurs.



Figure 6.5 – Mise en œuvre par étapes d'un MBCF

Les mesures à prendre pour la régulation du trafic et l'aménagement du site dépendent du type de route (communale ou régionale). Ces mesures sont incluses dans l'autorisation de chantier en concertation avec le maître d'ouvrage et la police locale. L'entrepreneur demande l'autorisation de chantier avant de commencer les travaux. Elle contient toutes les obligations légales pour la mise

en place du chantier et l'organisation des déviations éventuelles.

Lors de la division du chantier, l'entrepreneur coordonnera la séquence des différentes voies de MBCF, et par conséquent le phasage des travaux, de manière à éviter de devoir faire passer la machine à MBCF ou les véhicules des riverains, entre autres, dans les voies de MBCF fraîches. Sinon, cette trace resterait visible par la suite sous la forme d'une trace de pneu (voir figure 6.6). D'autre part, il y a aussi le risque que ces riverains tachent leurs allées ou leur propriété avec du bitume.

Il est donc essentiel que les riverains soient informés en temps utile des travaux et de leurs différentes phases afin qu'ils puissent prendre les mesures nécessaires. L'information aux riverains (par la distribution de bulletins d'information par exemple) incombe normalement à l'autorité adjudicatrice, sauf si un poste dans le cahier spécial des charges prévoit que c'est à l'entrepreneur de le faire.



Figure 6.6 – Trace de pneu dans un MBCF frais

6.3 Chargement de la machine à MBCF

Lorsqu'un des matériaux de la machine à MBCF est épuisé, la machine doit se rendre au lieu de stockage pour être rechargée. Le sable, l'eau et l'émulsion sont généralement renouvelés à chaque chargement. Les additifs tels que le ciment et les retardateurs de rupture, qui sont dosés en très petites quantités, sont complétés ou non, selon la consommation, lors du chargement suivant. Pour les retardateurs de rupture, dans la plupart des cas, un petit réservoir de quelques centaines de litres est prévu. Le ciment entre dans la trémie à ciment située à l'arrière de la machine à MBCF. La trémie à ciment peut être constituée d'une ou deux cuves, chacune de quelques centaines de litres également.

Le sable est chargé dans la benne de la machine à MBCF à l'aide d'un chargeur ou d'une grue. Selon le type de machine à MBCF et compte tenu de la charge d'essieu maximale autorisée du camion, celui-ci pourra charger de 6 m³ à 12 m³ de sable à la fois (*Breining P*, s.d.). Pendant le chargement de la machine à MBCF, il est conseillé de vérifier visuellement que les granulats ne contiennent pas d'impuretés.



Figure 6.7 – Chargement du sable à l'aide d'une grue (photo de gauche) ou d'un chargeur sur pneus (photo de droite)

Le réservoir d'émulsion de la machine à MBCF est rempli en reliant la citerne d'émulsion à la pompe à émulsion pour qu'elle puisse être pompée. En fonction de la machine utilisée, quelque 2 000 à 5 000 litres d'émulsion peuvent être chargés dans la machine (*Breining P, s.d.*). Les précautions suivantes doivent être prises pour la sécurité des travailleurs et pour éviter les fuites d'émulsion:

- vérifier les raccords pour s'assurer qu'ils sont bien serrés;
- lors du débranchement du tuyau, il faut veiller à ce que l'extrémité du tuyau ne tombe pas sur le sol, mais reste suffisamment haute pour que le tuyau ne se vide pas sur le sol.

Le remplissage du réservoir d'eau s'effectue de la même manière en reliant la citerne d'eau au réservoir d'eau de la machine à MBCF ou en le remplissant directement au moyen d'un col-de-cygne.

Le rechargement de la machine à MBCF et le nettoyage éventuel du traîneau prennent un certain temps. On peut facilement compter sur 30 à 60 minutes.

A la fin de chaque journée de travail, la machine à MBCF est entièrement vidée et nettoyée. Cela permet d'éviter que:

- l'émulsion dans le réservoir se rompe et obstrue le système de pompe (filtre) (voir figure 6.8);
- le ciment contenu dans la trémie durcisse au contact de l'eau (humidité de l'air) et se solidifie;
- les émulsions et les additifs qui restent, soient utilisés par inadvertance dans un mélange ultérieur pour une nouvelle couche de MBCF (avec une recette différente et éventuellement d'autres composants), que ce soit ou non dans le même ouvrage.



Figure 6.8 – Filtre à émulsion sale de la machine à MBCF

6.4 Équipement

6.4.1 La machine à MBCF

Le MBCF est réalisé sur place dans une machine à MBCF spécialement conçue à cet effet.



Figure 6.9 – Machine à MBCF sans et avec le châssis de camion (Source: Strassmayr)

Une machine à MBCF est généralement montée sur un châssis de camion ou une remorque et se compose des éléments suivants:

- trémie à granulats;
- réservoir d'émulsion;
- réservoir d'eau;
- trémie de stockage pour ciment;
- réservoir(s) pour les additifs (tels que les retardateurs de rupture ou les pigments);
- malaxeur;
- traîneau.

La production du MBCF est un processus entièrement continu et se déroule selon la figure 6.10 ci-dessous. Les granulats sont transportés du bac à granulats (1) vers le malaxeur (7) par une bande transporteuse (4). Avant que les granulats ne tombent dans le malaxeur, du ciment est ajouté depuis l'alimentateur de ciment (2). L'eau (10), l'émulsion (11) et éventuellement les retardateurs de rupture (12) sont injectés dans le malaxeur avec les granulats (5+6). Le mélange est mélangé brièvement et intensivement dans le malaxeur. Le MBCF (8) tombe alors dans le traîneau (9).

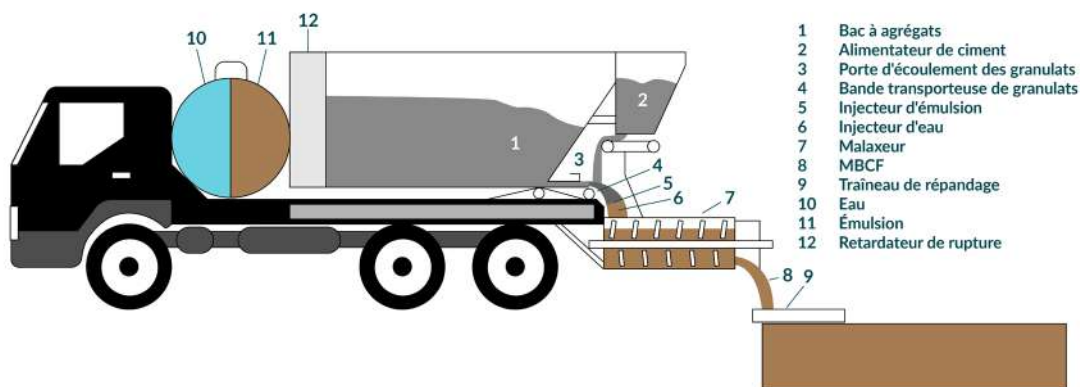


Figure 6.10 – Éléments d'une machine à MBCF

6.4.1.1 Dosage et commande

Il est extrêmement important que tous les matériaux soient correctement dosés selon la recette du MBCF conçu (voir chapitre 5) afin d'obtenir un mélange de qualité. Selon le type et l'âge de la machine, le dosage se fera automatiquement ou manuellement. On préférera un mélange dosé automatiquement. Le système informatique propose une vitesse de conduite optimale en fonction du débit de la production. Dans le cas d'un dosage manuel, la quantité de matériaux pour le MBCF sera régulée par l'ouverture ou la fermeture des roues de réglage par matériau.



Figure 6.11 – Système de dosage automatique (à gauche) et manuel (à droite)

Il est recommandé de vérifier et d'étalonner régulièrement les systèmes de dosage pour en assurer le bon fonctionnement. Sur la base de la certification CE, un entrepreneur inclura la fréquence de cette opération dans son manuel FPC- Factory Production Control (ou autocontrôle). La norme de produit NBN EN 12273 (NBN, 2008) pour les MBCF prévoit au moins un étalonnage par an.

6.4.1.1.1 Granulats

La vitesse de la bande transporteuse amenant les granulats au malaxeur est variable et, dans le cas d'une machine à MBCF à commande automatique, liée au débit demandé. Certaines machines sont également équipées de systèmes de pesage spécifiques pour les granulats.

6.4.1.1.2 Émulsion

Le dosage de l'émulsion doit être adapté au débit des granulats (processus de production continu). En général, le dosage peut être effectué de deux manières:

- Dans les machines plus anciennes, le réservoir d'émulsion est pressurisé et le débit de décharge est réglé par des roues de réglage manuelles.
- Sur les machines récentes, une pompe volumétrique assurera le bon dosage de l'émulsion.

6.4.1.1.3 Eau d'apport et autres additifs

L'eau et les autres additifs liquides ou hydrosolubles (comme les retardateurs de rupture, § 6.5.2) sont dosés au moyen de pompes volumétriques dans les machines récentes et au moyen de roues de réglage dans les machines plus anciennes, par analogie avec l'émulsion.

Le ciment ou éventuellement d'autres additifs en poudre sont dosés à l'aide d'une vis sans fin hydraulique.

6.4.1.2 Malaxeur

Tous les matériaux sont réunis dans le malaxeur, qui se compose généralement de deux axes parallèles munis de palettes à un certain angle.



Figure 6.12 – Malaxeur (Source: Colas Belgium SA)

Lorsque les granulats, à une extrémité de la bande transporteuse, tombent dans le malaxeur, l'eau, l'émulsion et les éventuels additifs liquides sont injectés. Tous les ingrédients sont mélangés vigoureusement pendant un court instant. Les palettes sont placées à des angles différents, selon qu'elles se trouvent au début, au milieu ou à la fin du malaxeur. En raison des différentes orientations, le MBCF sera repoussé dans une certaine zone plus rapidement ou plus lentement, ce qui permet également un meilleur mélange. À l'autre extrémité, les palettes poussent le MBCF vers l'extérieur, où il tombe finalement dans le traîneau posé au sol par l'intermédiaire d'une goulotte. La production du MBCF est un processus continu.

Il existe plusieurs types de malaxeurs de différentes longueurs et largeurs, avec des capacités de production allant de presque 30 à 90 tonnes par heure pour les machines conventionnelles. Avec cette machine compacte, la production est plutôt limitée de 2,4 à 24 tonnes par heure (*Fast and economical with micro surfacing*, s.d.).

■ 6.4.2 Le traîneau

Le traîneau appliquera le mélange de MBCF sur le revêtement à l'épaisseur, l'inclinaison et la largeur souhaitée.

Le type de traîneau utilisé est indépendant de la machine à MBCF utilisée. Le traîneau même repose à gauche et à droite (et éventuellement aussi au milieu) sur de longs patins métalliques avec lesquels il est tracté sur le revêtement routier existant par la machine à MBCF.

Le type de traîneau sera choisi par l'entrepreneur en fonction de la largeur de la bande de MBCF à réaliser et peut dès lors avoir une largeur fixe (p. ex. 1 m, 2 m ou 3 m) ou variable qui peut être réglée mécaniquement ou hydrauliquement. Dans ce dernier cas, la largeur du traîneau pourra être ajustée pendant l'exécution en fonction de la géométrie de l'ouvrage. Souvent, une bande de MBCF sera répartie sur toute la voie, mais la largeur peut donc aussi être adaptée à la largeur de voie à traiter.

Le traîneau est équipé par défaut d'un système de réglage en hauteur permettant de régler la pente transversale ou le profil en toit souhaité (figure 6.13). Cela se fait par le biais de deux roues de réglage aux deux extrémités du traîneau et d'une troisième roue au centre.



Figure 6.13 – Traîneau avec deux roues de réglage sur les côtés et un troisième point de réglage au centre pour régler la hauteur

Un système de mélange est placé au sein du traîneau (figures 6.14 et 6.15). Le système de mélange est constitué de deux axes sur lesquels sont fixées des petites pales à pas opposé pour maintenir en mouvement le MBCF coulé dans le traîneau depuis le malaxeur et éviter ainsi la ségrégation.



Figure 6.14 – Traîneau avec système de mélange

Figure 6.15 – Mécanisme de mélange dans le traîneau

Le traîneau est équipé par défaut d'une bavette flexible en caoutchouc, dont la fonction est abordée au § 6.5.3.



Figure 6.16 – Traîneau avec bavette flexible en caoutchouc

■ 6.4.3 Le rouleau à pneus

Afin de favoriser le compactage du MBCF et d'accélérer la montée en cohésion du MBCF, l'utilisation d'un rouleau à pneus et de son effet de pétrissage est recommandée (voir § 6.9). Cela permettra également d'accélérer l'évolution de la texture souhaitée dans les situations où la charge de trafic est limitée (voir § 6.8).



Figure 6.17 – Rouleau à pneus

En général, on utilise des rouleaux à pneus de 5 à 7 tonnes. Des rouleaux plus lourds peuvent éventuellement être utilisés, mais il faut veiller à ne pas endommager le MBCF, ce qui dépendra du type et du calibre du mélange appliqué et de la vitesse de rupture (le MBCF doit être suffisamment stable pour supporter le poids).

Il est préférable d'éviter l'utilisation de rouleaux avec des cylindres en acier ou de rouleaux combinés (combinaison de pneus et cylindre en acier). Le cylindre en acier n'a aucun effet de pétrissage et risque de briser le granulat du MBCF.

■ 6.4.4 Le camion-citerne pour l'émulsion

L'émulsion est fabriquée à des températures supérieures à 100 °C (Balavoine, 2006). Elle est stockée temporairement dans l'usine pour qu'elle puisse refroidir jusqu'à sa température de travail, après quoi elle peut être livrée sur le chantier (normalement dans les 24 à 48 heures suivant la production).

Sur le camion-citerne pour la livraison de l'émulsion se trouve un thermomètre avec lequel on peut lire la température de cette émulsion. Il sera livré de l'usine à une certaine température. En étant stationné sur le lieu de stockage, le camion-citerne et donc aussi l'émulsion adopteront la température ambiante au fil du temps.

Il est important de lire la température de l'émulsion livrée et stockée sur le chantier dans le camion-citerne afin de pouvoir en tenir compte lors de la construction du MBCF (voir § 6.5.2). La température d'une émulsion de MBCF est l'un des facteurs qui influencent la vitesse de rupture et aussi la vitesse de la montée en cohésion. Plus cette température est élevée, plus l'énergie est disponible, et plus les réactions chimiques et physiques dans la couche de MBCF sur la surface de la route seront rapides.

■ 6.5 Épandage du MBCF

Le MBCF est mélangé sur place dans la machine à MBCF (voir § 6.4.1) et épandu sur le revêtement tout en roulant (voir le principe à la figure 6.18). Le MBCF frais qui a initialement une couleur brune, va durcir et évoluer vers une surface noire (§ 6.6)

Avant d'épandre le MBCF, il est important de tenir compte des travaux préparatoires qui doivent encore être effectués:

- réparations préliminaires du revêtement (voir § 3.1);
- nettoyage du revêtement, application éventuelle d'une couche de collage, masquage des éléments de voiries, etc. (voir § 3.2).



Figure 6.18 – Illustration de la machine à MBCF et du principe d'épandage du MBCF

■ 6.5.1 Conditions météorologiques

La mise en œuvre du MBCF est une «technique à froid» basée sur des émulsions. Les bonnes conditions météorologiques jouent un rôle important à cet égard, tant pour la construction correcte du MBCF que pour la prise ultérieure du MBCF comme prévu. Des conditions trop chaudes ou trop froides, ainsi que la pluie, peuvent nuire à la bonne réalisation du MBCF (rupture retardée ou accélérée, etc.). Ce point est décrit en détail au chapitre 4.4.

L'humidité de l'air déterminera également si l'eau contenue dans le MBCF s'évaporerait facilement ou non, et si le processus de rupture et de mûrissement du MBCF pourra pour cette raison se dérouler suffisamment rapidement. Plus l'humidité est élevée, moins le MBCF pourra libérer facilement son eau dans l'air. Cela retardera l'ouverture à la circulation dans un premier temps, mais déterminera également à plus long terme si la montée en cohésion du MBCF se déroulera correctement.

Il est donc crucial de surveiller de près les conditions météorologiques pendant la préparation du chantier de MBCF. Si nécessaire, les travaux de MBCF devront être reportés à une date ultérieure avec de meilleures conditions météorologiques.

Le maître d'ouvrage doit également planifier ses travaux de MBCF de manière à ce qu'ils tombent de manière optimale dans la saison du MBCF (c'est-à-dire d'avril à septembre).

6.5.2 Ajustement de la consistance et du comportement à la rupture via l'eau d'apport et des additifs

Dans un premier temps, un MBCF est formulé en laboratoire (voir chapitre 5) afin d'obtenir:

- une bonne consistance lors de l'épandage;
- une augmentation rapide de la cohésion après l'application;
- une bonne résistance à l'usure, au plumage et au ressuage à long terme.

Une bonne consistance et une augmentation rapide de la cohésion sont cruciales pour la réussite du MBCF.

Si la consistance du mélange est trop faible, les granulats s'enfonceront dans le traîneau lors de l'épandage. Il peut en résulter une accumulation de granulats juste devant la bavette en caoutchouc, ce qui entraîne une obstruction du traîneau, un renflement, des ondulations, des irrégularités et des stries. En outre, l'émulsion s'écoule au bord de la bande de MBCF lors de l'épandage sur la surface de la route. Un MBCF qui n'a pas été mélangé n'aura aucune cohésion, ce qui entraînera des dommages (du plumage p. ex.) pendant et après l'exécution.

Une couche de MBCF de faible consistance peut également mettre plus de temps à durcir (évaporation de l'eau), ce qui retardera l'exécution des MBCF (attente plus longue pour pouvoir placer plusieurs couches immédiatement les unes après les autres) et ne garantira plus une ouverture fluide à la circulation.

D'autre part, un MBCF de consistance trop élevée (figure 6.19) sera plus difficile à traiter et à épandre. Dans des cas extrêmes, le traîneau peut alors se bloquer complètement.



Figure 6.19 – MBCF avec une consistance trop élevée pendant l'exécution

La montée en cohésion doit aussi être suffisamment rapide pour que la pose du MBCF se déroule bien. Une couche de MBCF à cohésion très lente entraîne des retards dans la mise en œuvre (attente plus longue pour placer plusieurs couches immédiatement les unes après les autres) et un long délai d'ouverture à la circulation (avec le risque d'endommager prématurément la couche de MBCF). Néanmoins, une rupture trop rapide du MBCF affectera la consistance et causera des désagréments pendant la mise en œuvre (épandage difficile), pouvant même obstruer la machine à MBCF ou le traîneau.

La consistance et l'augmentation de la cohésion dépendent à leur tour de la manière dont se déroule le processus de rupture du MBCF, et sont donc déterminées, entre autres, par les conditions ambiantes pendant la mise en œuvre (température, humidité de l'air, etc.). Plus la température ambiante est élevée, et plus l'air et la surface de la route sont secs, plus la rupture et la montée en cohésion seront rapides.

Lors de la formulation du mélange en laboratoire, ces conditions ambiantes sont parfaitement contrôlées. Sur le chantier, cependant, les conditions ambiantes ne sont pas sous contrôle. Afin de les anticiper, le fabricant de l'émulsion, en concertation avec l'entrepreneur, peut ajuster l'émulsion à produire, et l'indice de rupture correspondant¹, à la température et à l'humidité ambiantes moyennes attendues sur le chantier en ajoutant des retardateurs de rupture à l'émulsion avant sa fabrication.

En outre, il existe de nombreux autres facteurs moins contrôlables sur le chantier, tels que les variations de température au cours de la journée, la température de l'émulsion fournie, le dosage très précis de tous les ingrédients et la capacité d'absorption du support. Par conséquent, la consistance et la vitesse de cohésion ne sont pas toujours appropriées sur le chantier, et des corrections doivent être apportées sur place au MBCF produit sur site. Ces corrections doivent se limiter à modifier l'eau d'apport, à ajuster la quantité de ciment ou à augmenter/diminuer la quantité de retardateur de rupture. Il est fortement recommandé de ne pas modifier les composants du mélange de MBCF sur le chantier.

Pendant l'exécution, l'opérateur peut ajuster la consistance du MBCF en ajoutant plus ou moins d'eau par rapport à la recette de MBCF prévue sur chantier. Il peut ainsi influencer directement la fluidité du MBCF. Cependant, il y a une limite à cela. Plus on ajoute d'eau, plus il faudra de temps, en fonction des conditions environnementales (température, humidité, ombre, etc.), avant que cette eau s'évapore de la couche de MBCF, et plus la montée en cohésion sera lente. L'ouverture à la circulation peut en être retardée. D'autre part, un excès d'eau peut entraîner une ségrégation du mélange de MBCF.

En outre, en ajustant (en plus ou en moins) les additifs dans le MBCF, l'opérateur peut ajuster la vitesse de rupture de l'émulsion dans certaines limites, lorsque les conditions ambiantes s'écartent globalement un peu de ce qui était prévu. Selon que la vitesse de rupture doit être accélérée ou ralentie, les deux additifs suivants sont utilisés pour la régler:

- Ciment:

La quantité de ciment, prévue dans la formulation du mélange, peut être modifiée en cours d'exécution pour contrôler la vitesse de rupture. Dans la plupart des cas, le ciment a un effet accélérateur, mais il peut aussi avoir un effet décélérateur (voir chapitre 2). Il est donc important et recommandé d'utiliser le même ciment (type et fournisseur) que dans la formulation du mélange (voir chapitre 5).

¹ Tous les fabricants ne peuvent pas adapter l'indice pendant la production. Au moment de la rédaction de ce code de bonne pratique, il était également impossible de rectifier l'indice de rupture de l'émulsion à base de bitume paraffinique.

- Retardateurs de rupture:

Les retardateurs de rupture sont une solution tensioactive (savonneuse) et sont ajoutés sous forme liquide pour augmenter le temps de rupture, et donc le temps de mélange. Ils sont généralement appliqués lorsque la température est plus élevée que prévu en fonction de l'indice de rupture de l'émulsion fournie sur place. Ils peuvent également être ajoutés lorsqu'un travail manuel important est prévu et qu'un temps de mise en œuvre plus long est donc nécessaire. Toutefois, en cas d'excès, cela peut entraîner la formation de mousse et une réduction de l'adhésivité du granulat de la couche de MBCF (voir § 2.1.5.1). En outre, un excès de bulles d'air peut se former dans la masse du MBCF.

L'ajout/la réduction de ciment et de retardateurs de rupture peut également varier au cours d'une même journée de travail. Par exemple, le matin, lorsqu'il fait plus froid, vous devrez peut-être accélérer la rupture ou l'après-midi, lorsque les températures sont plus élevées, vous devrez peut-être la ralentir pour obtenir une rupture similaire tout au long de la journée de travail.

■ 6.5.3 Épandage la couche de MBCF

Le MBCF est étalé sur la surface à traiter à l'aide d'un traîneau. La hauteur d'épandage du traîneau est réglée au début des travaux sur les deux côtés du traîneau. Cette hauteur dépendra du type et du calibre du MBCF à épandre sur la chaussée. On obtient ainsi une épaisseur de MBCF d'environ 1,5 à 2 fois le plus gros calibre (D) du granulat utilisé dans le MBCF (voir figure 6.24).

Par conséquent, la quantité (kg/m²) de MBCF variera également en fonction du type de MBCF et du calibre des gravillons. Mais la quantité consommée dépendra également de l'état du revêtement sur lequel le MBCF est appliqué, et, par exemple, des nombreuses irrégularités ou porosités éventuelles à compenser. En plus de la hauteur, l'inclinaison transversale souhaitée doit également être réglée à l'aide des dispositifs situés sur le traîneau (voir § 6.4.2).

Si l'on souhaite mesurer la quantité de MBCF traitée pendant la mise en œuvre (kg/m²), on peut peser le poids du camion à vide et en pleine charge en prévoyant des plateaux de pesée mobiles sur le chantier. Les charges par essieu du camion peuvent alors être pesées avant et après la pose de chaque bande de MBCF. Une autre méthode peut consister à faire rouler le camion jusqu'à un pont-basculé situé à proximité à chaque fois, ce qui peut prendre plus de temps. Les machines à MBCF les plus récentes, pilotées par ordinateur, sont dotées d'un système d'enregistrement automatique de la consommation de tous les composants du MBCF via une mesure du dosage et le pesage du poids du matériau sur la bande transporteuse. En fin de journée, un récapitulatif des matériaux consommés peut être demandé et imprimé via l'ordinateur.

L'opérateur, situé à l'arrière du camion, est la personne qui dirige les travaux de MBCF. Il regarde le traîneau du haut et évalue si le MBCF a la consistance attendue, et ajuste cette consistance si nécessaire en ajoutant plus ou moins d'eau d'apport et/ou d'additifs (voir § 6.5.2).



Figure 6.20 – Machine à MBCF avec opérateur

Il supervisera également le flux de production afin que le MBCF dans le traîneau atteigne une hauteur correcte et qu'il ne déborde pas ou ne soit pas insuffisamment rempli. Il déterminera quand le MBCF est produit et quand cela s'arrête.

À l'arrière de la machine, au-dessus du traîneau, il y a souvent une goulotte de distribution qui peut guider le mélange de MBCF qui est déversé du malaxeur vers le traîneau. La position où le MBCF tombe dans le traîneau peut être contrôlée au moyen de cette goulotte de distribution. Dans une exécution avec profil en toit, le MBCF tombera au milieu du traîneau et s'écoulera des deux côtés. Dans une exécution en pente, le MBCF tombera sur le côté le plus élevé du traîneau afin d'éviter une accumulation excessive sur le côté le plus bas du traîneau (figure 6.14). Pour éviter la ségrégation dans le traîneau, le mélange est maintenu en mouvement par le système de mélange dans le traîneau (figure 6.14).



Figure 6.21 – Remplissage du traîneau du côté le plus haut via une goulotte

La bavette en caoutchouc située à l'extrémité du traîneau permet de lisser la surface du MBCF. Les deux bords sont lissés avec une raclette par deux travailleurs supplémentaires.



Figure 6.22 – Bavette en caoutchouc



Figure 6.23 – Les bords sont lissés avec des raclettes

La hauteur réglée du traîneau, et la hauteur du MBCF dans le traîneau, en combinaison avec l'élasticité de la bavette déterminent l'épaisseur finale et la régularité de la couche de MBCF. Si la pression exercée par le MBCF sur la bavette est insuffisante ou si la bavette est trop rigide, elle ne s'ouvrira pas ou s'ouvrira insuffisamment, ce qui entraînera une couche plus mince ou irrégulière (voir § 6.11.1.2).

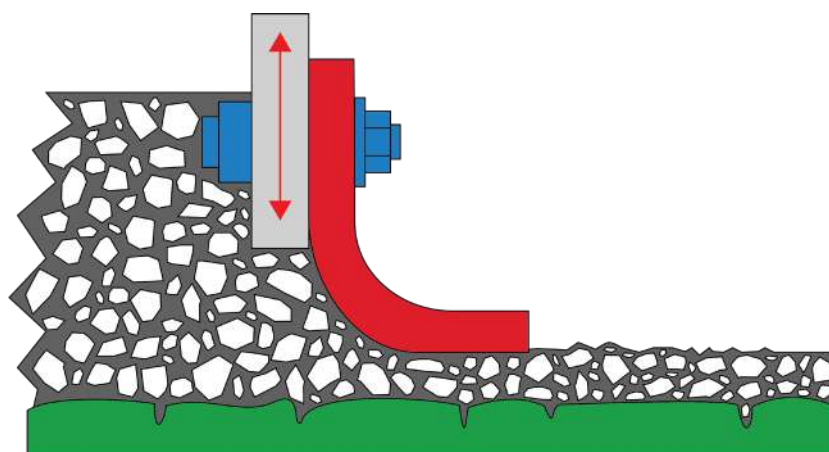


Figure 6.24 – Représentation schématique de la bavette du traîneau

Au lieu d'une bande élastique de mise à niveau, le traîneau peut également être équipé d'une barre rigide fixe sur toute la largeur du traîneau et peut alors être utilisé lorsqu'un MBCF de lissage est appliqué (voir § 3.1.1).

■ 6.5.4 Travail manuel pour les géométries plus complexes

Le MBCF est placé en un seul mouvement fluide alors que la machine à MBCF roule. En cas de géométrie complexe, par exemple en présence de chicanes ou de petits renforcements pour une zone de stationnement, il n'est pas possible de placer le MBCF en un seul mouvement avec le camion.

Dans ce cas, il est possible de préparer une quantité de MBCF, de la déverser sur la chaussée (plutôt qu'au sein du traîneau) et de l'épandre manuellement. Si possible, cette méthode de travail doit être évitée. Avec le travail manuel, il y a un risque que le MBCF soit rendu trop liquide par un ajout excessif d'eau, ce qui peut provoquer une ségrégation et une mauvaise cohésion de la couche de MBCF, entraînant du plumage.



Figure 6.25 – Voie de stationnement où le MBCF a été posé manuellement (photo de gauche); plumage (photo de droite)

6.5.5 Bandes de MBCF adjacentes

Lors de la pose de deux bandes de MBCF l'une à côté de l'autre, un chevauchement minimum doit être respecté afin de ne pas générer un joint longitudinal ouvert. Lorsque deux bandes de MBCF sont placées l'une à côté de l'autre, il est nécessaire d'attendre, pour la pose de la seconde bande, que la première soit complètement rompue et qu'elle ait déjà acquis une certaine cohésion, avant de rouler dessus avec la machine à MBCF. Il faut éviter à tout prix de conduire la machine à MBCF dans un MBCF frais qui n'a pas encore été rompu ou mûri (figure 6.26). Les pneus vont enfoncer le MBCF et réduire localement son épaisseur. Ces traces de roues restent visibles même après le durcissement du MBCF (§ 6.11).



Figure 6.26 – Camion roulant sur un MBCF frais

Lorsque la machine à MBCF roule sur le MBCF qui est rompu, les roues de la machine risquent d'endommager la couche de MBCF et d'arracher des matériaux du MBCF. Pour prévenir ce risque, le camion peut être équipé d'un système qui pulvérise de l'eau sur les pneus. Ainsi, le MBCF collera moins aux pneus.



Figure 6.27 – Camion équipé d'un système de pulvérisation pour les pneus

6.6 Rupture et mûrissement du MBCF

Après l'application de la couche de MBCF, le bitume contenu dans l'émulsion doit d'abord se séparer de l'eau. La séparation du bitume de l'émulsion est appelée rupture de l'émulsion (voir § 2.1.2.3) et s'accompagne d'un changement de couleur du brun au noir. Dans une deuxième phase, lors du mûrissement, la couche de MBCF obtiendra la cohésion et l'adhésion souhaitées. La rupture et le mûrissement sont deux phases très importantes dans la construction de la couche de MBCF. L'évolution dans le temps du MBCF après sa sortie de la machine à MBCF est représentée schématiquement à la figure 6.28).

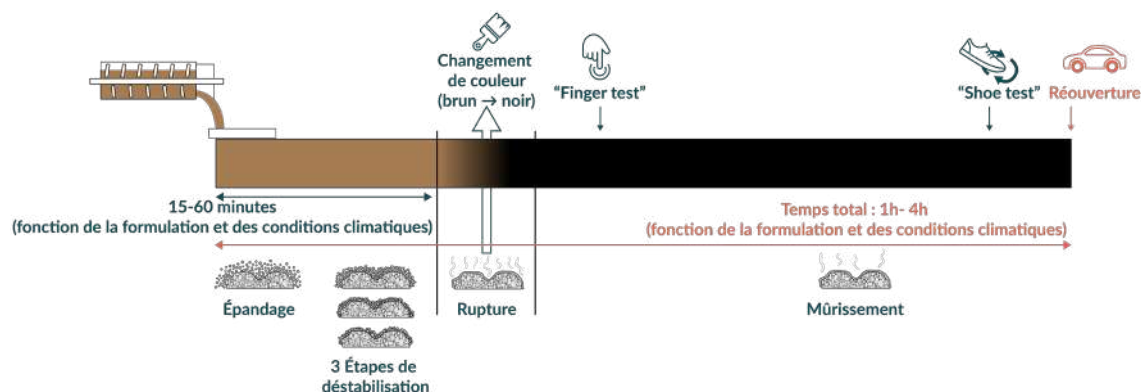


Figure 6.28 – Évolution schématique dans le temps du MBCF après sa sortie de la machine à MBCF

6.6.1 La phase de rupture

Il s'agit de l'ensemble des phénomènes qui conduisent à la formation d'une phase bitumineuse continue. Les globules de l'émulsion initialement individualisés sont engagés dans un processus irréversible menant au rapprochement de ces globules et à la séparation du bitume et de l'eau. Le bitume adhère au granulat du MBCF et l'eau se dépose à la surface du MBCF. La vitesse à laquelle ce processus se produit est indiquée, entre autres, par l'indice de rupture de l'émulsion (§ 2.1.2.5). Par défaut, trois types d'émulsion (indice de rupture) différents sont réalisés pour les différentes périodes de la saison d'exécution:

- début de la saison: avril - mai;
- milieu de la saison: juin - juillet - août;
- fin de la saison: septembre - octobre.

La rupture se marque par le passage d'une couleur brune à une couleur noire lorsque le bitume se transforme en un fin film continu. Au fur et à mesure que le bitume se sépare de l'eau, la couleur fonce jusqu'à ce que le MBCF devienne complètement noir. Dans des circonstances normales, cela prend environ quinze à soixante minutes et peut être plus ou moins rapide en fonction des conditions météorologiques.



Figure 6.29 – A gauche, MBCF déjà rompu (noir); à droite MBCF (brun) avant la phase de rupture

■ 6.6.2 La phase de mûrissement

Il s'agit de l'ensemble des phénomènes qui conduisent à la poursuite de l'évacuation de l'eau et à l'état où le liant atteint ses propriétés finales d'adhésivité et de cohésivité. Cette phase ne peut avoir lieu que si la rupture est suffisamment engagée. L'eau de l'émulsion qui est libérée pendant la phase de rupture s'écoule et/ou s'évapore.

Sur chantier, un «test du doigt» (voir «*Finger test*», figures 6.28 et figure 6.30) peut donner une indication de la phase dans laquelle le MBCF se trouve. Lorsque la phase de mûrissement est suffisamment entamée, on ressent une sensation collante lorsque l'on appuie son doigt sur le MBCF sans que du bitume ne reste adhérent sur le doigt après avoir appliqué cette pression. La montée en cohésion nécessaire à l'ouverture à la circulation devra certainement se poursuivre après cela. Le temps nécessaire à cette opération dépendra de la formulation du mélange et des conditions météorologiques (§ 6.7).



Figure 6.30 – «Test du doigt» dans lequel la phase de mûrissement n'est pas suffisamment engagée, du bitume reste collé au doigt

6.7 Ouverture à la circulation

Lors de l'application du MBCF, la perturbation du trafic est réduite au minimum. La route peut généralement être rouverte à la circulation peu après les travaux et le jour même.

Ceci n'est possible que lorsque le MBCF est complètement rompu et a suffisamment mûri pour constituer une cohésion suffisamment élevée et après un éventuel compactage. Un «test de torsion du pied» (voir «Shoe test», à la figure 6.28) peut donner une indication à ce sujet et consiste à effectuer un mouvement de torsion unique avec le pied, en appliquant une force à la surface. La cohésion qui a été développée sera certainement insuffisante si la cohésion du MBCF peut être endommagée lors d'un test de torsion du pied. Cela doit également être pris en compte lors d'une construction par étapes, lorsque le trafic est interverti.

Dans le cadre d'une mise en œuvre par étapes, une voie sera construite en premier tandis que la circulation sur l'autre voie sera alternée. Ensuite, le trafic sera basculé sur le MBCF construit afin que l'autre voie puisse être construite. Si le basculement a lieu trop tôt et que le MBCF est rompu mais pas encore suffisamment mûr, il y aura immédiatement du plumage dans les frayées en raison de la cohésion insuffisante du MBCF.



Figure 6.31 – Plumage du MBCF dans les frayées dû à une ouverture prématurée à la circulation



Figure 6.32 – Ouverture de la route après rupture et mûrissement complets

6.8 Texture

La texture de la surface d'une route est un paramètre important, car elle contribue, entre autres, à l'adhérence et donc à la sécurité de la route. La texture d'un MBCF est en partie déterminée par la granulométrie du MBCF. Un mélange à base de granulats 0/6.3 aura une texture plus rugueuse qu'un mélange à base de granulats 0/4. En fonction de l'intensité du trafic sur une route, il est décidé d'utiliser ou non un granulats plus grossier dans la couche supérieure (voir chapitre 4).

Une couche de MBCF récemment posée présente toujours une texture assez rugueuse, quel que soit le calibre choisi, qui diminue encore après l'ouverture à la circulation. L'effet de compactage des véhicules compacte davantage le MBCF et lui donne une texture plus fermée. L'aspect rugueux du MBCF fraîchement posé évolue progressivement vers un aspect qui ressemble davantage à un revêtement en asphalte (figures 6.33 et 6.34). La vitesse à laquelle cela évolue dépend beaucoup de l'intensité du trafic sur la route traitée avec un MBCF (voir aussi les recommandations pour l'utilisation d'un compacteur à pneus au § 6.9).



Figure 6.33 – Texture rugueuse juste après la mise en œuvre et avant l'ouverture à la circulation



Figure 6.34 – Texture fermée par la circulation un an après la construction

L'effet du trafic sur la texture du MBCF se manifestera principalement là où ce trafic circule le plus, donc principalement dans les frayées. La zone située entre les frayées conservera une texture moins fermée au fil du temps. Cet effet sera d'autant plus prononcé que le trafic est faible. Le même effet peut être obtenu sur les bords de la route ou dans les renforcements comme des refuges de stationnement. Lorsqu'il y a moins de trafic, le MBCF sur les bords présente plus de texture et reste plus rugueux. Une texture aussi rugueuse et ouverte dans le MBCF sera éventuellement plus susceptible au plumage sous l'effet du trafic et des intempéries.

La présence ou l'absence de marquage au sol peut entraîner une augmentation ou une diminution du trafic canalisé. Lorsqu'il y a un marquage central, tous les véhicules roulent davantage au même endroit que lorsqu'il n'y a pas de marquage. Sans marquage, la zone fermée dans les frayées est considérablement plus large.



Figure 6.35 – Route avec marquage central: texture plus dense dans les frayées qu'entre les frayées

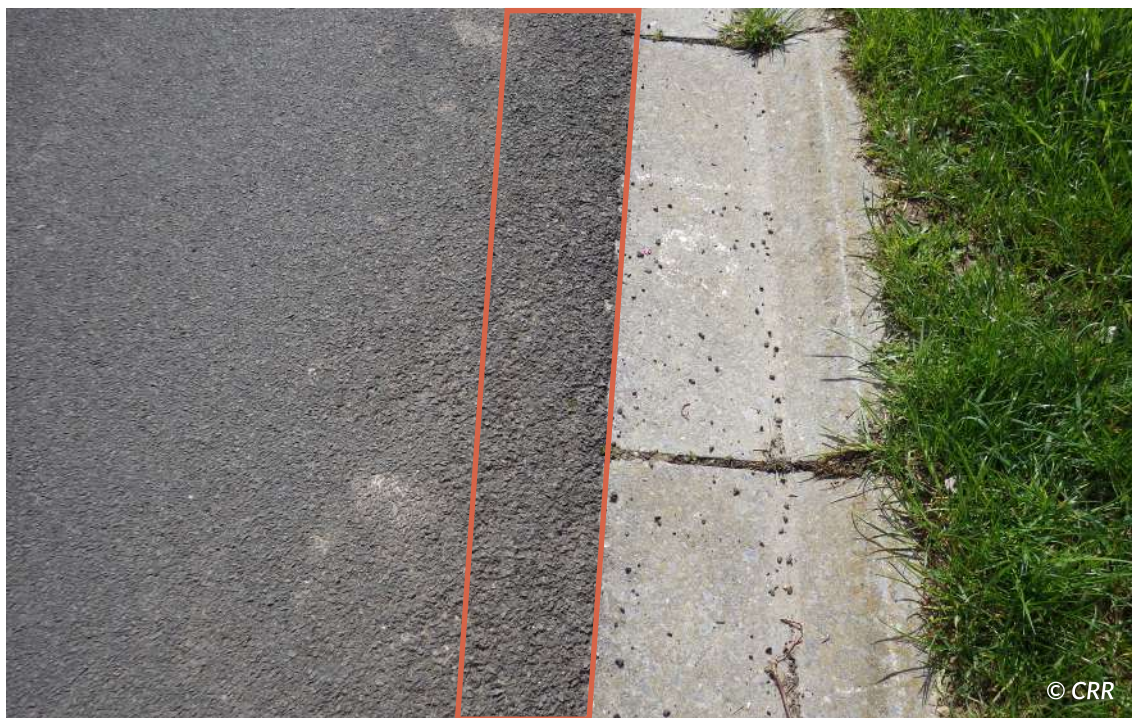


Figure 6.36 – Route avec zone de bord ouverte et rugueuse dans la couche de MBCF

6.9 Compacteurs

Le passage du trafic sur le MBCF fraîchement posé aura un effet de compactage, contribuant à augmenter la cohésion du MBCF, à réduire les vides (et donc indirectement à réduire la sensibilité à l'eau), et à diminuer la rugosité de la texture du MBCF obtenue après la mise en œuvre

Dans les situations où l'intensité du trafic n'est pas suffisamment élevée, et où le post-compactage par le trafic est donc insuffisant, il peut être recommandé de compenser en prévoyant un passage supplémentaire du compacteur à pneus sur la couche de MBCF juste après sa mise en œuvre.



Figure 6.37 – Compacteur à pneus

Sur les routes dont le volume de trafic est suffisamment élevé, le passage de la circulation sera suffisant pour contribuer à compacter davantage le MBCF pendant la phase de mûrissement finale après l'ouverture à la circulation dans un laps de temps suffisamment court. Dans ce cas, l'utilisation d'un compacteur à pneus peut toujours contribuer à un compactage initial contrôlé du MBCF avant l'ouverture à la circulation, mais ne constitue pas une opération standard dans la mise en œuvre d'un MBCF.

La recommandation de compacter le MBCF avec un compacteur à pneus s'applique donc particulièrement aux routes à faible intensité de trafic, comme par exemple les routes dans les zones résidentielles, les culs-de-sac, les pistes cyclables et autres. Dans ces situations, le passage du trafic après la mise en œuvre du MBCF sera insuffisant, et il est par conséquent fort probable que l'évolution et le post-compactage du MBCF soient trop lents, ce qui rendrait dès lors le MBCF plus sensible aux dégradations (par exemple, plumage). Cette opération de compactage supplémentaire doit être prévue dans le cahier spécial des charges.

L'utilisation d'un compacteur à pneus est également recommandée en cas de travaux de MBCF sur des revêtements soumis à un trafic lourd (par exemple, autoroutes ou pistes d'aéroport) ou lors de mises en œuvre réalisées en fin de saison (lorsque les conditions météorologiques ne sont plus idéales dans les semaines qui suivent la mise en œuvre), à nouveau parce qu'une cohésion plus rapide peut être obtenue ainsi qu'un taux de vides plus faible.

Le compactage du MBCF ne se fera que quand le MBCF sera en phase de mûrissement et qu'il ne collera plus aux pneus. La couche de MBCF sera encore suffisamment malléable et ductile. Le moment exact dépend de la vitesse de rupture du MBCF et, par conséquent, des conditions météorologiques et du type d'émulsion (indice de rupture) utilisée pour fabriquer le MBCF. Si le compactage est réalisé trop tôt, le MBCF sera encore trop liquide et le compactage provoquera la rupture du mélange.

Le compactage se fait toujours parallèlement au sens du trafic. En général, au moins trois passes de rouleau sont effectuées. Une première passe entraînera l'expulsion d'une grande quantité d'eau du MBCF, sa structure sera compactée et le pourcentage de vides diminuera. Le nombre exact de passes dépend de l'état du MBCF et des conditions ambiantes. L'objectif est de compacter jusqu'à ce que le mélange ne libère plus d'eau et que la texture souhaitée soit obtenue.

Le compactage se fait toujours avec un compacteur à pneus. Il est déconseillé d'utiliser un compacteur à cylindre lisse ou un compacteur combiné car le cylindre en acier peut broyer les granulats.

Le compacteur à pneus peut être équipé d'un système d'arrosage qui maintient les pneus humides afin d'éviter l'arrachement de la couche de MBCF qui vient d'être posée.



Figure 6.38 – Compacteur avec système de pulvérisation pour maintenir les pneus humides

6.10 Application des marquages

Après l'application des couches de MBCF, les marquages routiers peuvent être réappliqués. Il est recommandé d'attendre que le MBCF soit complètement sec et suffisamment compacté, soit par le trafic, soit au rouleau, avant d'appliquer ces marquages routiers, afin que la texture soit suffisamment fermée.

Pour des marquages thermoplastiques, le délai d'attente entre la pose du MBCF et celle des marquages routiers est préférentiellement de 2 à 3 semaines. Par contre, en peinture, les marquages peuvent être réalisés dans un délai plus court, mais un délai minimum d'une semaine est recommandé. Il importe ici que toute l'eau se soit évaporée du mélange de MBCF afin d'éviter les problèmes d'adhésion et pour qu'elle ne puisse pas être piégée par le marquage. L'eau piégée peut causer des dommages par temps de gel.

6.11 Dégradations possibles dans un MBCF

Les dégradations dans le MBCF peuvent survenir à différents moments, et peuvent être divisés en deux grands groupes:

- D'une part, il existe des scénarios de dégradations qui surviennent pendant la mise en œuvre et qui peuvent donc être évités pendant la construction.
- D'autre part, il y a les dégradations qui se développent après la construction en raison de la circulation et des conditions météorologiques.

Il est important de noter que la plupart des dégradations qui se produisent pendant la mise en œuvre peuvent s'estomper avec le temps ou être refermées et compactées par le trafic et susceptibles d'entraîner après un an des irrégularités esthétiques. En revanche, le deuxième groupe de dégradations, celles qui surviennent pendant la durée de vie, sont plus susceptibles de s'aggraver avec le temps.

6.11.1 Les dégradations se produisant pendant la mise en œuvre

6.11.1.1 Rainures

Les rainures se produisent lorsqu'il y a des impuretés ou des composants étrangers à la composition du MBCF, qui peuvent rester coincés derrière la bavette du traîneau et être ainsi entraînés par le traîneau et laissant une rainure dans la couche de MBCF. Dans la plupart des cas, il s'agit de gravillons dont le calibre est bien supérieur à la granulométrie maximale du MBCF. Ces gravillons peuvent s'introduire dans le mélange lorsque le stock se trouve dans une zone non revêtue, par exemple. Ils peuvent également être le résultat d'une erreur de production de la part de la carrière.



Figure 6.39 – Rainures causées par de gros gravillons juste après la mise en œuvre du MBCF

Si le gros gravillon trace un sillon sur toute l'épaisseur de la couche du MBCF, l'étanchéité et donc la durabilité du MBCF peuvent être compromises. Cependant, les rainures de profondeur limitée sont dans la plupart des cas refermées rapidement par le trafic et ne sont pas nécessairement problématiques mais constituent plutôt un problème esthétique.



Figure 6.40 – Rainure fermée: à gauche, situation lors de la mise en œuvre, à droite, le même gravillon après un an

Dans la plupart des cas, les rainures causées par des impuretés peuvent être évitées en vérifiant visuellement le stock de granulats avant le chargement et en accordant l'attention nécessaire au chargement sur une surface non revêtue (§ 6.3).

6.11.1.2 Tôle ondulée transversale

Lorsque la surface de la route présente un motif régulier d'ondes transversales, on parle de formation de tôle ondulée. Des tôles ondulées peuvent apparaître si le traîneau n'est pas tiré vers l'avant en un seul mouvement régulier.

Un phénomène de tôle ondulée peut également se produire lorsque l'interaction entre la bavette dans le traîneau, d'une part, et la pression du MBCF dans le traîneau sur cette bavette, d'autre part, n'est pas équilibrée. Cela peut être le cas si la hauteur d'approvisionnement dans le traîneau est insuffisante et que la pression contre la bavette élastique est insuffisante. Par conséquent, la bavette ne s'ouvre pas ou s'ouvre de manière irrégulière. L'ouverture et la fermeture irrégulières de la bavette entraînent une répartition inégale du MBCF (les épaisseurs sont différentes) et se manifestent par la formation de tôles ondulées.

Ces tôles ondulées peuvent également être le résultat d'une mauvaise consistance, entraînant la ségrégation des granulats et leur accumulation juste devant la bavette.



Figure 6.41 – MBCF ocre avec des tôles ondulées transversales

De plus, l'absence de parallélisme entre la bavette et la surface de la route à recouvrir peut entraîner une hauteur d'ouverture irrégulière sous la bavette et par conséquent une ouverture incontrôlée de la bavette. Ce phénomène de tôle ondulée peut parfois être observé aux bords des revêtements routiers à recouvrir, lorsque les bords du revêtement bitumineux sont plus inclinés.

6.11.1.3 Bosses

Une bosse est une élévation dans le sens transversal ou longitudinal de la surface de la route. Ce défaut peut être dû au chevauchement de différentes bandes de MBCF lors de l'application du MBCF.

6.11.1.4 Traces de la machine à MBCF

Des traces de pneus peuvent apparaître dans le MBCF pendant l'exécution quand la machine à MBCF roule dans le MBCF humide (figure 6.42). Les riverains ou les usagers de la route qui ne respectent pas les panneaux peuvent également causer ce type de dommages. Les roues vont repousser partiellement le MBCF frais et laisser une trace qui reste visible. Pour les routes soumises à un trafic dense ces traces peuvent éventuellement être progressivement aplanies.



Figure 6.42 – Trace de roue dans un MBCF humide (photo de gauche), qui reste visible même après un an (photo de droite)

Le traîneau peut également laisser une trace lorsqu'il est tiré sur le MBCF frais (figure 6.43). Si les côtés de la voie en MBCF ne sont pas correctement finis, une marque de traînée du traîneau restera visible dans la surface du MBCF.



Figure 6.43 – Retouche de la trace laissée par le traîneau

6.11.1.5 Joint longitudinal d'étanchéité

Lorsque deux bandes adjacentes sont posées l'une à côté de l'autre avec un chevauchement insuffisant et sans que les deux bandes ne se touchent, il y a un joint longitudinal ouvert ou béant. Lorsque le coulis durcira, la surface de la route sous-jacente restera visible au niveau de ce joint.

6.11.2 Dégradations après la mise en œuvre

6.11.2.1 Plumage

Le plumage est la perte de pierres de la matrice de la couche de MBCF sous l'effet d'un trafic intense, aggravé ou non par les effets du temps (eau, gel, soleil, oxygène). Le plumage évolue d'une perte individuelle de pierre, où une seule pierre est perdue de la mosaïque à quelques endroits, à des zones érodées avec une perte plus continue de granulat (figure 6.44).

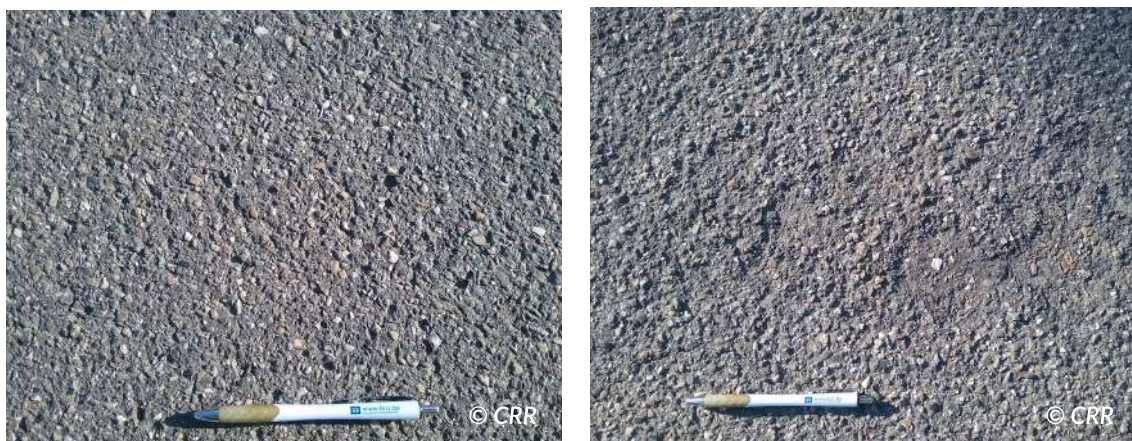


Figure 6.44 – Perte individuelle de pierre à gauche et zone sujette au plumage à droite

Au début du phénomène, le plumage se situe à la surface du MBCF (une pierre de profondeur). À un stade avancé, le plumage peut évoluer et pénétrer plus profondément dans toute l'épaisseur de la couche du MBCF.

Les causes du plumage sont multiples. Il peut éventuellement indiquer une mauvaise cohésion du MBCF due, entre autres, à la conception du mélange, à une erreur de production, une fermeture de texture insuffisante ou à une ouverture prématurée à la circulation.

6.11.2.2 Formation de pelades

Dans le cas de pelades, une zone limitée provoquera le décollement de la couche de MBCF dans toute son épaisseur et son arrachement/détachement du reste de la couche de MBCF. Dans la plupart des cas, les pelades indiquent une mauvaise adhésion entre la couche de MBCF et la chaussée sous-jacente.

Les pelades sont de tailles diverses, de quelques centimètres à plusieurs mètres de diamètre, et sont caractérisées par des bords de fracture plutôt verticaux.



Figure 6.45 – Formation de pelades

6.11.2.3 Ressuage et pseudo-ressuage

Le ressuage est caractérisé par la présence excessive de liant bitumineux à la surface de la couche de MBCF. L'excès de liant à la surface donne des zones noires et brillantes avec une perte de macrotexture et une faible rugosité (lisse). On dit qu'il y a ressuage lorsque l'excès est dû à la remontée du liant à la surface du MBCF.



Figure 6.46 – Ressuage dans les frayées de gauche

Lorsque des taches similaires se produisent en raison de l'enfoncement des granulats, on parle de pseudo-ressuage. Le ressuage et le pseudo-ressuage sont difficiles à distinguer visuellement.

6.11.2.4 Zones de poinçonnement

Les zones de poinçonnement apparaissent aux endroits où les véhicules effectuent de courtes manœuvres (stationnement ou virage court aux entrées et sorties des habitations). Localement, des zones circulaires d'un diamètre d'environ 15 cm à 20 cm (zone de contact des pneus) apparaissent (figure 6.47). Du fait de la torsion, les granulats de la couche de MBCF sont réorientés, ce qui donne lieu à une augmentation de la texture avec ou sans perte de pierre.

Les zones de poinçonnement apparaissent généralement peu de temps après la pose (dans la première année suivant la pose) et dans des conditions chaudes (ramollissement du liant). Au fur et à mesure que l'âge du MBCF augmente, sa déformabilité diminue et il en va de même pour le risque de zones de poinçonnement. Dans la plupart des cas, cela sera limité à la première année après la mise en œuvre. Dans des cas exceptionnels et dans des conditions climatiques extrêmes (longue période de chaleur), des zones de poinçonnement peuvent encore apparaître ultérieurement.

Dans la plupart des cas, la texture de ces zones de poinçonnement est rétablie par la circulation. Ces zones de poinçonnement peuvent rester visibles par la suite, notamment en cas de faible intensité de trafic, comme des zones localisées où il peut y avoir ou non une légère forme de plumage.



Figure 6.47 – Zones de poinçonnement

6.11.2.5 Déplacements et formation de bosses

Aux endroits où les forces tangentielles deviennent trop importantes, la couche de MBCF peut également être repoussée horizontalement par la circulation, ce qui entraîne la formation de bosses perpendiculairement au sens dans lequel s'exerce la force tangentielle. On peut citer comme exemples:

- MBCF sur un rond-point (les bosses seront parallèles comme des cercles concentriques parallèles au cercle du rond-point), voir figure 6.48;
- des bosses transversales dans les zones de freinage au niveau de feux de circulation ou d'un carrefour.



Figure 6.48 – Formation de bosse en raison du changement d'axe imposé par le rond-point

6.12 Réception des travaux

Afin d'évaluer les dégradations et de savoir si elles sont acceptables ou non, la méthode d'inspection visuelle décrite dans la norme européenne NBN EN 12274-8: Matériaux bitumineux coulés à froid - Méthodes d'essai - Partie 8: Evaluation visuelle des défauts peut être utilisée au moment de la réception, un an après la mise en œuvre (NBN, 2005b).

Toutefois, les recherches menées par le CRR ont montré que la méthode qualitative NBN-EN-12274-8 (NBN, 2005b) est très complexe et donne lieu à des résultats très variables, même entre différents opérateurs bien formés.

En cas de doute concernant l'évaluation visuelle des dégradations, la méthode de mesure CRR MF 106 (Beaumesnil & Duerinckx, 2023) peut être consultée. Cette méthode de mesure a été spécialement développée, via le suivi de diverses planches d'essais dans le cadre du projet NBN (BeP2S -Better Performing Slurry Surfacing) et en concertation avec le comité miroir belge du groupe de travail européen CEN/TC227/WG 2 Surface Dressing, Sprays and Slurry Surfacing (incorporating Microsurfacing), pour l'évaluation incontestable des dégradations d'une mise en œuvre de MBCF.



Chapitre 7

Gestion routière durable avec des MBCF

7.1 Durabilité des MBCF

Les MBCF offrent de très nombreux avantages sur le plan économique et technique, mais aussi sur le plan humain et environnemental. On peut donc à juste titre parler d'une technologie durable, qui donne de bons résultats sur le plan écologique, économique et social (figure 7.1).

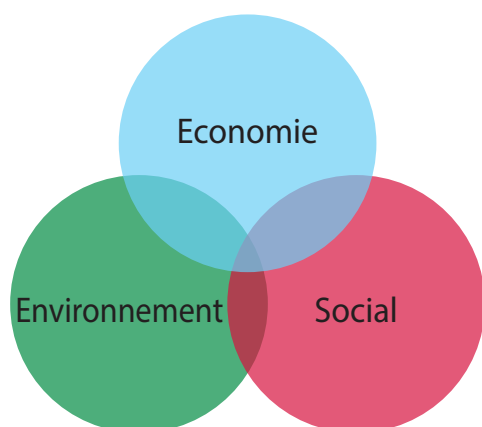


Figure 7.1 - Les trois piliers du développement durable

Les avantages économiques peuvent être démontrés et chiffrés au moyen des coûts annuels équivalents, associés à une stratégie d'entretien régulier avec MBCF. Cette possibilité est illustrée au moyen d'un exemple de calcul au § 7.3.

Ci-dessous sont énumérés les différents avantages sur le plan écologique et social.

Avantages écologiques et environnementaux

- Contrairement aux autres couches bitumineuses, les MBCF sont appliqués à froid. L'application à froid signifie que lors de la production, on consomme moins d'énergie, on produit moins de CO₂ et il y a moins d'émissions, entre autres de gaz de combustion, en faveur en premier lieu des ouvriers de chantiers routiers, d'autre part des riverains et de la société en général.
- Les MBCF étant mélangés in situ, on évite aussi le transport. Les granulats peuvent être transportés directement vers le chantier, sans arrêt intermédiaire dans une centrale d'enrobage.
- Il faut utiliser moins de matériel (compacteurs et autres) sur le chantier, ce qui permet une économie d'énergie supplémentaire et évite une production de CO₂.
- La vitesse de la technique du MBCF et l'allongement de la durée de vie des MBCF limitent les nuisances causées par les embouteillages, ce qui signifie indirectement aussi une économie d'énergie conséquente, une diminution du CO₂ et une amélioration de la qualité de l'air.

- Grâce au maintien de la planéité du revêtement, la résistance au roulement reste faible. Or, des études démontrent qu'une faible résistance au roulement réduit significativement la consommation de carburant. Cela s'applique à tous les véhicules qui roulent sur la route pendant leur durée de vie, de sorte que l'économie totale en carburant et la diminution des émissions de CO₂ sont très importantes.
- Très peu de matières premières sont nécessaires parce que l'épaisseur de couche se limite à une fois et demie à deux fois la dimension des plus gros grains. De plus, la consommation de matériau est compensée par le report du remplacement des couches sous-jacentes.

Avantages sociaux

- De larges fissures, des trous et des affaissements constituent surtout un danger pour les usagers faibles que sont les cyclistes, les cyclomotoristes et les piétons. Des situations dangereuses de ce type peuvent être évitées par un entretien préventif régulier avec MBCF.
- La planéité des chaussées peut toujours être entretenue, ce qui augmente la sécurité et le confort et diminue le bruit routier, la consommation de carburant et par conséquent aussi les émissions de CO₂ et de particules fines.
- Une bonne adhérence est d'une importance capitale pour la sécurité routière.
- Les MBCF se prêtent très bien à des applications colorées. Des surfaces colorées permettent d'améliorer la sécurité et la visibilité, ce qui est surtout nécessaire dans les noyaux urbains et dans les cœurs de village où tous les types d'usagers partagent la route. De plus, l'impact esthétique des voiries colorées est aussi important pour le bien-être de l'homme.
- Les conditions de travail pour les ouvriers de chantiers routiers sont meilleures et plus sûres lors de l'application de MBCF que lors de la mise en œuvre d'enrobé à chaud, certainement par de très chaudes journées d'été. Il n'y a pas de développement de gaz de combustion ni de risques de brûlures.
- Les avantages environnementaux cités plus haut sont tous favorables à la santé, à la sécurité et au confort des ouvriers, des usagers, des riverains et de la société en général.

7.2 Stratégie d'entretien préventif efficiente

Un MBCF est le plus efficace dans le cadre d'une stratégie d'entretien préventif, qui implique d'être réalisé avant que l'étanchéité ne soit compromise et que les premiers signes de dégradation ne soient visibles. Les frais se limiteront principalement aux coûts du MBCF alors qu'on réalisera un gain considérable sur la durée de vie.

Si l'on postpose plus longtemps l'entretien, les frais vont augmenter davantage parce que des réparations préalables seront nécessaires, comme le colmatage des fissures et le rebouchage des nids de poule (chapitre 3). On parle dans ce cas d'un entretien curatif. Malgré les réparations, les couches sous-jacentes seront déjà affaiblies à cause de la pénétration de l'eau et de l'exposition directe au trafic et aux conditions climatiques. Dès lors, l'état aussi bien du nouveau MBCF que des couches sous-jacentes va se dégrader plus vite et le bénéfice obtenu en termes de durée de vie sera moins grand.

La figure 7.2 illustre l'impact des deux types de stratégie d'entretien sur l'évolution de l'état de la route et la durée de vie.

La ligne verte est un exemple de stratégie d'entretien préventif, où le traitement de surface est appliqué lorsque l'état de la route existante est encore bon. Il n'y a donc pas besoin de réparations lourdes et l'état de la route revient à un niveau proche de l'état initial. Cet entretien peut être répété plusieurs fois, de sorte que l'état de la route reste longtemps à un niveau élevé.

La ligne rouge est un exemple de stratégie curative. Le traitement de surface est reporté trop longtemps, il est donc nécessaire d'effectuer des réparations préalables. Malgré les travaux de

réparation, on ne s'approche plus du niveau de l'état initial et la détérioration de l'état se poursuit à un rythme plus rapide, car les couches sous-jacentes ont déjà été affectées elles aussi.

En conséquence, on retombera beaucoup plus vite à un niveau bas, les travaux de réparation curatifs devenant trop coûteux et donnant des résultats insuffisants.

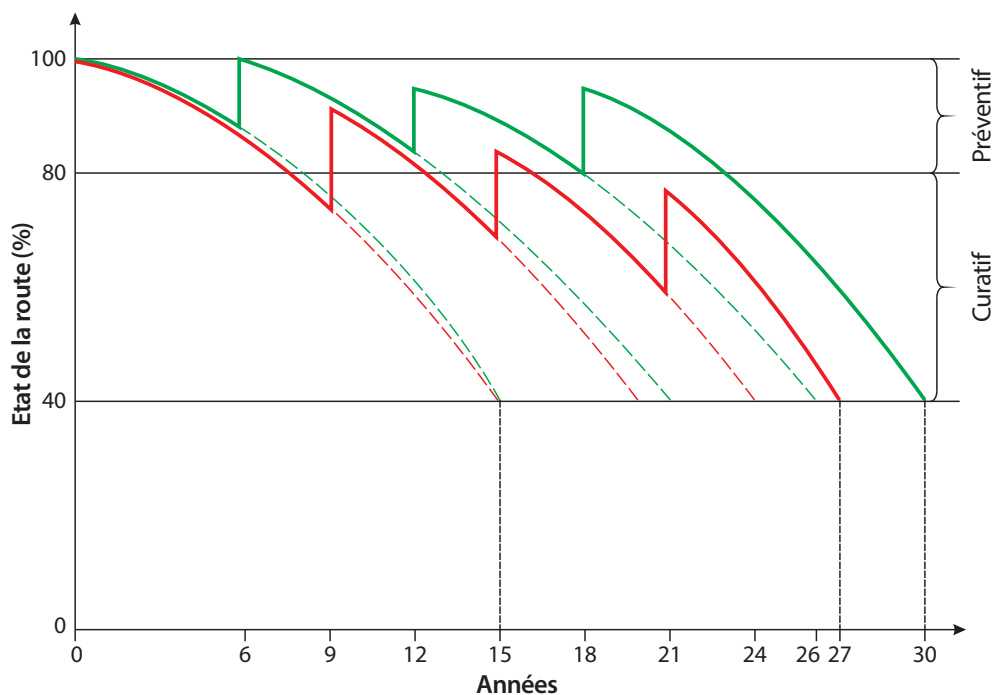


Figure 7.2 - Comparaison entre un entretien préventif et curatif et impact sur l'état de la route et la durée de vie

On peut en conclure que les MBCF utilisés dans une démarche d'entretien préventif représentent une stratégie d'entretien efficiente. Avec des frais limités et une répartition équitable des coûts dans le temps, on peut maintenir un plus grand nombre de voiries à un niveau de qualité élevé et, parallèlement, prolonger la durée de vie du revêtement sous-jacent.

7.3 Exemple d'une analyse des coûts

Une analyse des coûts à long terme permet de calculer l'économie que l'on peut réaliser grâce à un traitement de surface avec des MBCF. Ceci est illustré ci-après au moyen d'un exemple de calcul, basé sur les stratégies d'entretien à la figure 7.2.

Les résultats du calcul dépendent des hypothèses et des données utilisées. Le prix de revient des traitements superficiels (y compris les réparations préalables) est variable et repose sur des estimations. Les durées de vie escomptées et la prolongation de la durée de vie que l'on obtient grâce à l'entretien sont aussi des variables difficiles à évaluer. Le résultat des calculs ci-dessous doit être interprété à la lumière de ces informations et il faut insister sur le fait que la classification des scénarios comparés peut changer quand certaines hypothèses et données varient.

L'exemple concerne un cas hypothétique d'une voirie communale avec une couche de roulement en béton bitumineux. On part du principe que la structure sous-jacente est encore en très bon état et ne nécessite donc aucune réparation.

Sans aucun traitement superficiel, on compte sur une durée de vie approximative de quinze ans pour la couche de roulement. Comme indiqué à la figure 7.2, cela correspond à la période à laquelle l'état a diminué jusqu'au niveau minimum acceptable.

L'application de traitements superficiels réguliers avec un MBCF bicouche permet d'allonger la durée de vie et de limiter les frais à long terme. Le tableau 7.1 présente les hypothèses de coûts correspondant aux deux stratégies d'entretien de la figure 7.2. Pour le MBCF bicouche, un coût de 3,5 €/m² a été estimé, auquel il faut ajouter le coût des réparations préliminaires.

On constate que le prix de revient par traitement augmente avec le nombre de traitements, parce que davantage de réparations préalables seront nécessaires. Le prix de revient augmente également à mesure que le traitement superficiel est reporté, comme c'est le cas dans la stratégie curative.

En outre, l'allongement de la durée de vie devient moins important parce que la couche sous-jacente se dégrade progressivement plus vite à mesure que l'on retarde le traitement. Tout ceci explique les chiffres du tableau 7.1. Tant que la courbe de l'état du revêtement (figure 7.2) se trouve dans la zone de l'entretien préventif, aucun frais n'est calculé pour des réparations préalables.

	Entretien préventif (opportun)					Entretien curatif (tardif)				
	Années	Coût total (€/m ²)	Coût des réparations (€/m ²)	Prolongation de la durée de vie	Durée de vie totale (années)	Années	Coût total (€/m ²)	Coût des réparations (€/m ²)	Prolongation de la durée de vie	Durée de vie totale
Initialement					15					15
1^{ère} application	6	3,5	0	6	21	9	5,5	2	5	20
2^{ème} application	12	3,5	0	5	26	15	5,5	2	4	24
3^{ème} application	18	4,5	1	4	30	21	6,5	3	3	27

Note: tableau basé sur une estimation actuelle des coûts (en 2019)

Tableau 7.1 – Hypothèses et données sur lesquelles est basé l'exemple de calcul pour le cas du traitement superficiel avec un MBCF bicouche

Les coûts totaux considérés sur l'ensemble du cycle de vie comprennent l'investissement initial, les frais pour les traitements de surface sur l'ensemble de la durée de vie et les frais de démolition à la fin de la durée de vie. Les frais pour les traitements de surface et les frais de démolition sont des frais futurs et ils doivent donc être convertis en frais actuels, compte tenu du taux réel. De cette façon, la valeur actuelle nette (VAN) est calculée sur l'ensemble du cycle de vie (Morian, 2011):

$$VAN = INV + \sum_{i=1}^n \frac{FFi}{(1+r)^i}$$

où

- VAN: valeur actuelle nette (en €/m²)
- INV: investissement initial (en €/m²)
- FFi: frais futurs (entretien et démolition) planifiés dans l'année i (en €/m²)
- n: durée totale du cycle de vie (en années)
- r: le taux réel (différence entre taux et inflation)

La figure 7.3 montre les résultats des scénarios d'entretien préventif (en temps opportun) et d'entretien curatif (tardif), comparativement à l'absence d'entretien, selon les hypothèses du tableau 7.1. Le coût d'investissement initial était estimé à 15 €/m², les frais de démolition à 10 €/m² et le taux d'intérêt réel à 1 %.

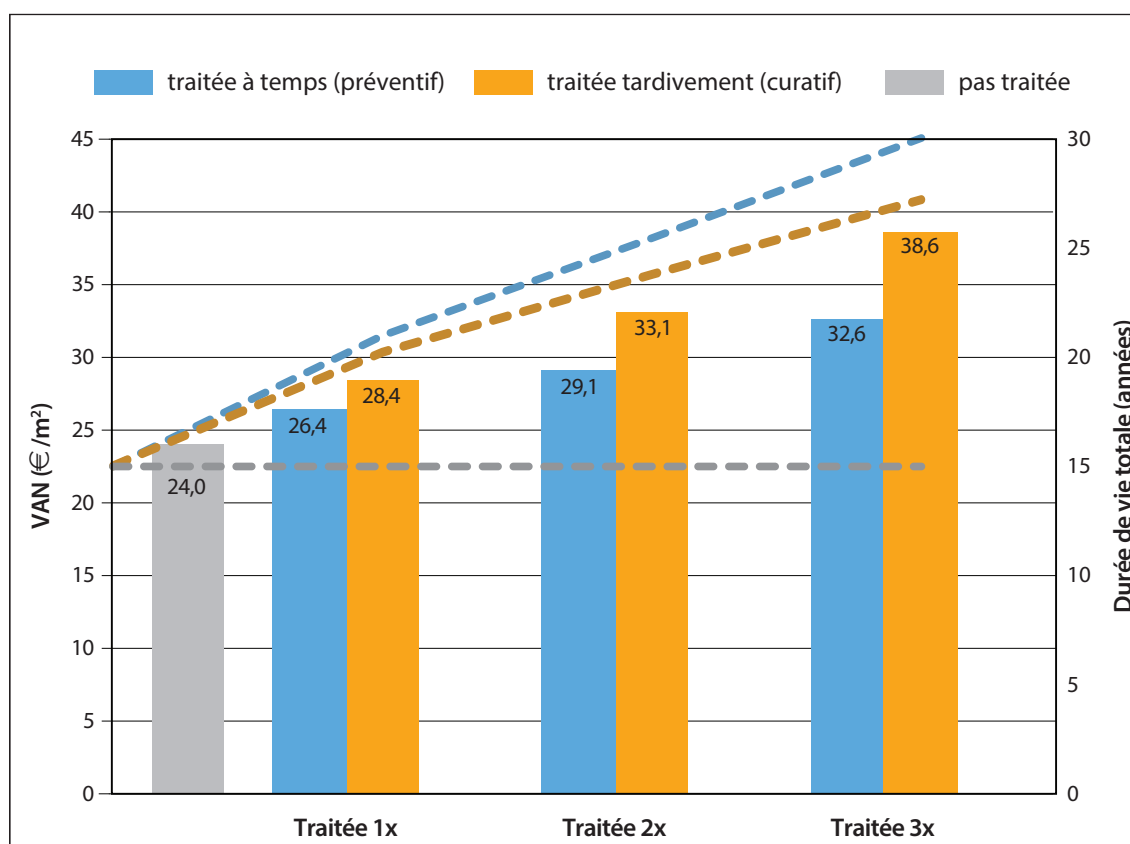


Figure 7.3 - Valeur actuelle nette (VAN) de la couche de roulement en béton bitumineux (sans et avec traitements superficiels); les lignes indiquent la durée de vie totale correspondante

Plus on planifie de traitements superficiels, plus la valeur actuelle nette augmente, mais la durée de vie du revêtement augmente également. La valeur actuelle nette en soi n'est donc pas un grandeur appropriée pour permettre une comparaison entre les différents scénarios avec une durée de vie différente.

Pour ce faire, il faut convertir la valeur actuelle nette totale en coût annuel équivalent (CAE) au moyen de la formule suivante (Morian, 2011):

$$CAE = VAN \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1}$$

où

- CAE: coût annuel équivalent (en €/m²)
- n: la durée de vie totale (en années)
- r: le taux réel

Ce coût annuel équivalent est illustré à la figure 7.4.

Enfin, la figure 7.5 montre l'économie que l'on réaliserait dans ce cas précis en appliquant un MBCF bicouche. On constate que l'économie est la plus élevée quand le traitement superficiel est appliqué en temps utile. Deux à trois applications opportunes pendant le cycle de vie de la couche de roulement pourraient signifier une économie annuelle d'environ 25 %. Une quatrième application (ou plus) du traitement superficiel par contre n'engendre plus d'économie supérieure (par rapport à trois traitements), parce que les coûts des réparations préalables deviennent trop élevés par rapport à l'allongement de la durée de vie qui en résulte.

Un traitement tardif entraîne une économie nettement moindre par rapport à un traitement réalisé dans les temps.

Nous souhaitons attirer votre attention sur le fait que les conclusions peuvent changer, quand les hypothèses et les prix de revient changent dans l'exemple de calcul.

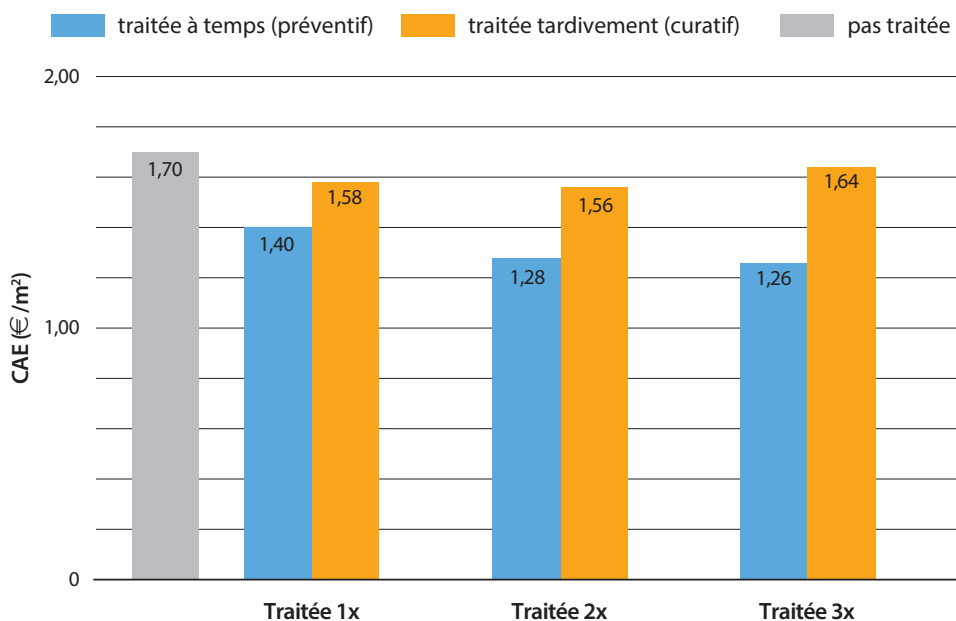


Figure 7.4 - Coûts annuels équivalents (CAE) de la couche de roulement en béton bitumineux (sans et avec traitements de surface)

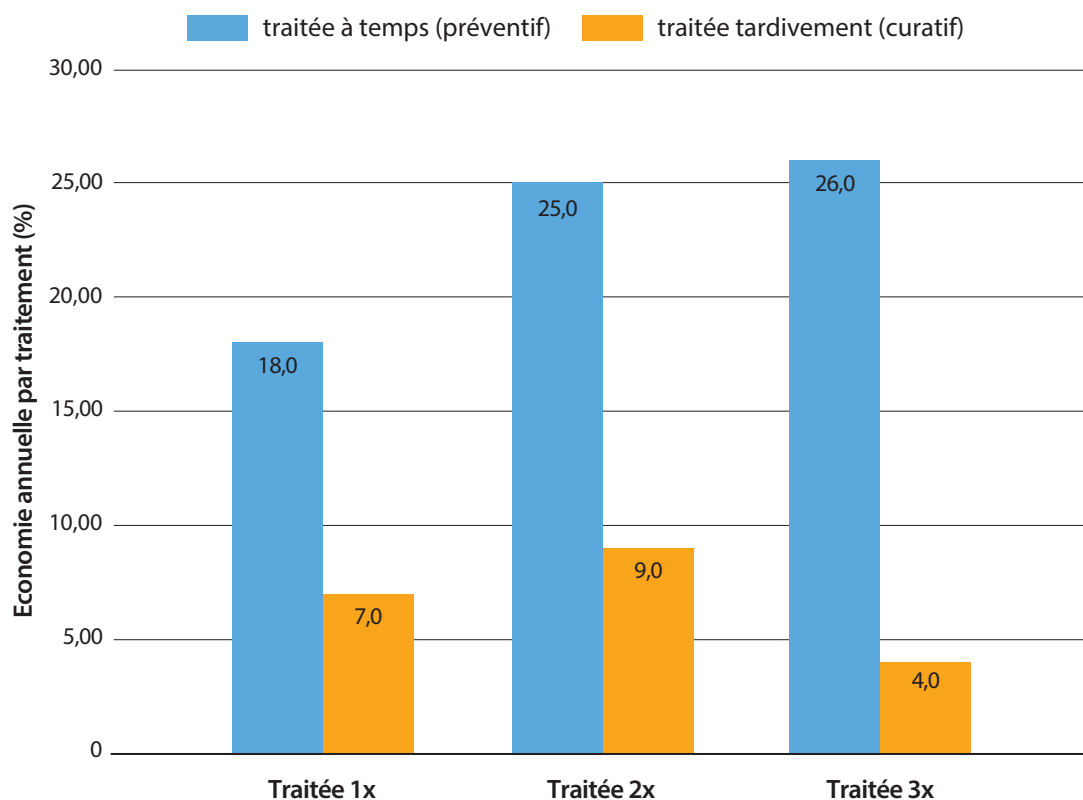


Figure 7.5 - Economie sur les coûts annuels équivalents de la couche de roulement en béton bitumineux (sans et avec traitements superficiels)

Cet exemple de calcul s'est limité à l'économie sur les coûts sur le cycle de vie de la couche de roulement. Cependant, l'entretien de l'étanchéité et le maintien en bon état de la couche de roulement ont également un impact positif sur le maintien de l'état des sous-couches. Par conséquent, le cycle de vie de l'ensemble de la structure augmentera également. L'économie qui en résulte n'a pas encore été prise en compte.

De plus, l'exemple ci-dessus ne calcule que l'avantage financier pour le gestionnaire routier. Les usagers de la route et les entreprises locales tirent également des avantages économiques de la qualité des routes et de leur entretien, ce qui réduit la congestion et les inconvénients. En fin de compte, la pose d'un MBCF est rapide puisqu'une équipe qui met en œuvre un MBCF peut appliquer 5 000 à 7 000 m² de MBCF par jour. La route peut alors être rouverte au trafic rapidement, ce qui signifie moins de nuisances au trafic, non seulement pour les riverains, mais aussi pour les entreprises locales.

7.4 Évaluation de l'adéquation de la route pour l'application d'un MBCF

7.4.1 Introduction

Comme démontré dans les sections précédentes, les MBCF sont très efficaces dans le cadre d'une stratégie d'entretien préventif.

Afin de pouvoir décider objectivement de l'utilité d'une application d'un MBCF sur une route existante, l'état général de la route pourra être déterminé à l'aide de l'indice visuel pour l'application d'un MBCF (IV_{MBCF}). Cet indice visuel pour l'application d'un MBCF est un score global qui est calculé à partir des dégradations observées et comme une somme pondérée. Chaque dégradation a son propre poids. L'indice visuel est un chiffre entre 0 et 1. Plus la valeur est faible, plus l'état de la route est mauvais.

Ce n'est que lorsque l'indice visuel pour l'application d'un MBCF est supérieur à une limite bien définie qu'il est judicieux d'envisager encore une route pour l'application d'un MBCF, sous réserve des réparations préalables nécessaires de la chaussée existante (chapitre 3).

7.4.2 Détermination de l'indice visuel pour les applications de MBCF

7.4.2.1 L'inspection visuelle

Afin de déterminer l'indice visuel d'une chaussée, une inspection visuelle est d'abord nécessaire. Au cours de l'inspection visuelle, toutes les dégradations visibles sont mesurées et enregistrées comme décrit dans la méthode de mesure CRR MF 89 (Van Geem et al., 2020). Pour effectuer une inspection visuelle correcte, il faut un inspecteur qualifié et de bonnes conditions météorologiques. Des recherches ont montré qu'il est conseillé de faire suivre à l'inspecteur une formation spécifique afin qu'il puisse reconnaître correctement les dégradations et que la répétabilité et la reproductibilité de l'inspection puissent être garanties.

Une inspection visuelle peut être effectuée à pied sur le terrain. Ici, l'inspecteur parcourt la section de la route et enregistre les dégradations observées visuellement. Diverses aides électroniques peuvent également être utilisées pour effectuer l'inspection visuelle, par exemple si la section est trop dangereuse pour être inspectée à pied. Ces aides, telles que l'Imajbox®, sont décrites dans la méthode de mesure CRR MF 89 (Van Geem et al., 2020).



Figure 7.6 – Véhicule de mesure CRR équipé de l'Imajbox®

Grâce à ce système, avant la mise en œuvre, il est possible de réaliser des images des sections de route pour lesquelles on pense qu'un traitement avec un MBCF serait approprié. Il faut beaucoup de lumière et une surface de route sèche pour obtenir des images utilisables. À l'aide d'un logiciel spécial (ImajView® [imajview, s.d.]), les images réalisées peuvent ensuite être traitées au bureau. Cette méthode d'inspection ne permet pas vraiment de gagner du temps, mais elle est beaucoup plus sûre pour l'inspecteur (pas d'exposition à la circulation). Un autre avantage est que les données et les images restent disponibles sous forme numérique et peuvent être consultées ultérieurement.

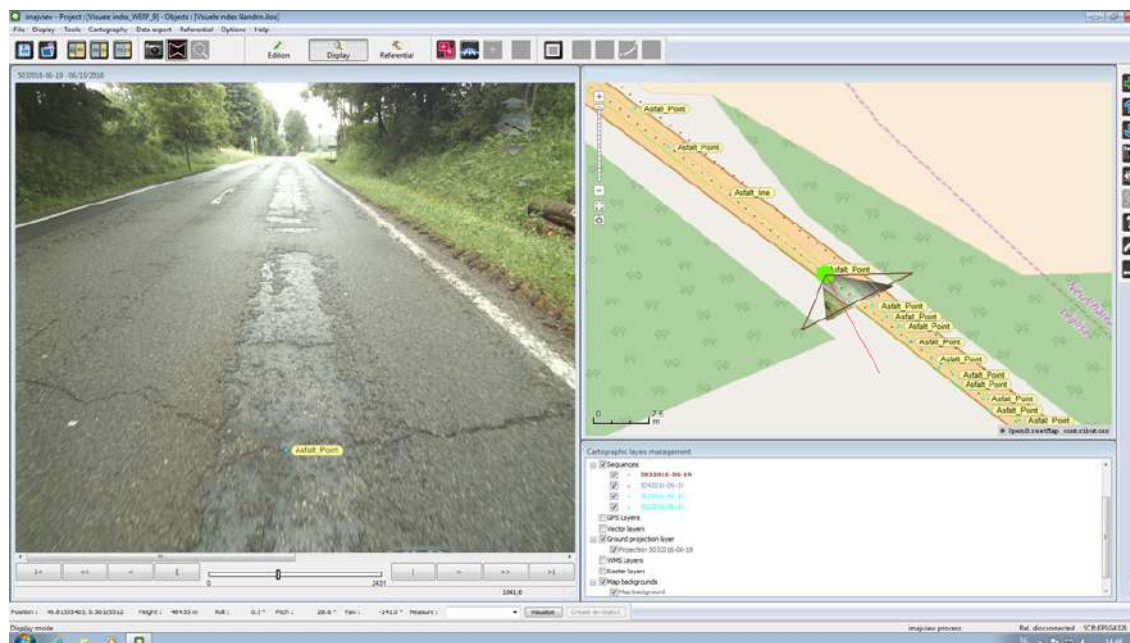


Figure 7.7 – Inspection visuelle avec Imajview® en utilisant les images de l'Imajbox®

Lorsque l'état de la surface de la route est trop mauvais, comme le montre la figure 7.8, une inspection visuelle n'est plus pertinente. Un traitement avec un MBCF n'offre aucune valeur ajoutée pour la durabilité de la surface de la route. Dans la plupart des cas, ce type de dégradation indique que, outre la couche supérieure, une ou plusieurs des couches inférieures sont déjà tellement endommagées que la capacité portante et la stabilité de la route sont menacées. Dans ce cas, la route doit être rénovée sur le plan structurel.



Figure 7.8 – Revêtement routier en fin de vie

Le faïençage d'une couche de roulement en enrobé peut, dans des cas exceptionnels, en l'absence de déformations majeures, également être également dû à une adhésion insuffisante aux sous-couches bitumineuses. Dans ce cas, la couche supérieure doit être remplacée localement avant l'application du MBCF.

7.4.2.2 Calcul de l'indice visuel pour les applications de MBCF (I_{VMBCF})

En général, l'indice visuel est calculé selon la méthode de mesure MF 89 (Van Geem et al., 2020) en associant les dégradations de l'inspection visuelle aux facteurs de pondération respectifs et en calculant la somme pondérée de toutes les dégradations enregistrées. Ces facteurs de pondération, issus de la méthode de mesure MF 89 (Van Geem et al., 2020), qui sont attribués aux différentes dégradations, sont spécifiquement destinés à attribuer à la surface de la route un score qui indique si l'entretien est possible ou non en général.

Pour l'application d'un MBCF, l'indice visuel obtenu selon la méthode de mesure MF 89 (Van Geem et al., 2020) ne donne pas un aperçu suffisant de la stabilité de la route, car les dégradations plus sévères, qui sont liées à des problèmes structurels, n'ont pas assez de poids par rapport aux dégradations superficielles. Il est nécessaire d'ajuster les facteurs de pondération attribués aux dégradations en fonction de l'application prédéfinie du MBCF. Les dégradations structurelles (par exemple du faïençage) se voient attribuer une valeur plus élevée que les dégradations superficielles, qui peuvent être compensées par un MBCF et sont alors évaluées par une valeur inférieure (comme du plumage à la surface de l'enrobé). Le tableau 7.2 donne un aperçu des facteurs de pondération selon la méthode MF 89 (Van Geem et al., 2020) d'une part, et des facteurs de pondération ajustés pour la maintenance avec un MBCF d'autre part.

	Méthode de mesure CRR MF 89	Ajustement pour les applications de MBCF
Dégradation des revêtements bitumineux	Facteur de pondération pour des chaussées en asphalte	Facteur de pondération pour des MBCF
Fissure longitudinale	0,6	1
Fissure transversale	0,6	0,5
Faïençage	0,7	1
Orniérage	1	0,6
Flache	1	0,6
Affaissement	0,5	0,6
Nid de poule	1	0,6
Joint longitudinal ouvert	0,25	0,5
Plumage	1	0,25
Pelade	1	0,6
Ressuage	1	0,4

Tableau 7.2 – Facteurs de pondération selon la méthode CRR MF 89 et facteurs de pondération ajustés pour les applications de MBCF

En appliquant les facteurs de pondération ajustés du tableau 7.2, l'indice visuel pour les applications de MBCF (IV_{MBCF}) est ensuite calculé sur la base de l'inspection visuelle effectuée selon la méthode de mesure MF 89 (Van Geem et al., 2020). Cela permet d'avoir une meilleure idée de l'état structurel du revêtement existant sur le chantier et d'évaluer s'il est toujours approprié de traiter le revêtement avec un MBCF.

7.4.2.3 Évaluation de l'indice visuel pour les applications de MBCF

Sur la base du projet de recherche prénormatif du NBN «Méthodes d'essai européennes pour MBCF» BeP2S (Better Performing Slurry Surfacing), une valeur limite de $IV_{MBCF} > 0,6$ peut être proposée comme critère d'évaluation de l'aptitude d'un revêtement routier à être traité avec une couche de MBCF. En d'autres termes, lorsque l'indice visuel pour le MBCF IV_{MBCF} est supérieur à 0,6, la section de route (sous réserve des réparations préliminaires locales nécessaires, chapitre 3) peut encore être considérée comme adaptée à l'application de MBCF. Les dommages structurels sont limités et les dommages à la surface du revêtement sont traitables.

En particulier lorsque l'état de la surface de la route est encore meilleur, un traitement avec un MBCF est recommandé dans le cadre d'une **stratégie d'entretien préventif**. L'effet du traitement sera meilleur et plus durable que lorsque les dégradations se sont développées davantage. **Une valeur de 0,8** (seuls des dommages naissants sont présents) **pour l'indice visuel du MBCF (IV_{MBCF})** peut être utilisée comme valeur seuil.

Cette méthode doit toujours être interprétée en fonction des types de dégradations présents. L'indice calcule un score global de l'état de la surface de la route. Cette méthode ne donne aucune information sur la façon dont le MBCF pourrait se comporter à l'endroit d'un type particulier de dégradation. Par exemple, si la surface de la route ne présente que des fissures transversales dues au retrait thermique de la couche de fondation, l'indice peut rester élevé, mais le recouvrement de la surface de la route par un MBCF n'est peut-être pas la bonne méthode, car on peut s'attendre à ce que ce MBCF se fissure très rapidement par réflexion à l'emplacement des fissures transversales, qui continueront à se déplacer activement tout au long de l'année.

7.4.3 Circonstances spécifiques dans lesquelles des applications en MBCF ne constituent pas une solution idéale

Ce n'est pas seulement l'état de la route qui détermine si un MBCF peut être appliqué ou non. La charge de trafic est également un facteur déterminant dans le choix de la technique d'entretien appropriée. Dans certains cas, le choix d'un traitement au MBCF est déconseillé (chapitre 4).

En raison des forces tangentielles locales élevées, il n'est pas recommandé d'appliquer un MBCF sur un rond-point et dans les virages très serrés. Le MBCF sera poussé vers l'extérieur par l'action continue de ces forces et s'accumulera sur l'extérieur des ornières (§ 6.11.2.5). Le trafic lourd peut également créer de telles bosses dans les zones de freinage au niveau des feux de circulation en raison des forces de freinage.

L'application de MBCF sur les aires de stationnement n'est pas non plus recommandée, étant donné les forces tangentielles élevées dues aux manœuvres des véhicules, qui se font souvent aux mêmes endroits, combinées à l'intensité relativement faible du trafic qui ne contribuera guère à faire évoluer la texture ou à la refermer.



Bibliographie

- Balavoine, G., Bertaud, M. & Bilal, J. (2006). *Les émulsions de bitume*. Editions RGRA; Union des Syndicats de l'Industrie Routière Française (USIRF).
- Beaumesnil, B. & Duerinckx, B. (2023). *Inspection visuelle des dégradations pour les MBCF* (Méthode de Mesure CRR No. MF 106). Centre de Recherches Routières (CRR).
- Breining P. (s.d.). Secmair Fayat Group. <https://secmair.fayat.com/en/produits/machine-matieres-bitumeuses-coules-froid/breining-p>
- Bruxelles Mobilité. (2016). CCT 2015: *Cahier des charges type relatif aux voiries en Région de Bruxelles-Capitale*. <https://mobilite-mobiliteit.brussels/sites/default/files/2022-01/cahier%20des%20charges-type%202015.pdf>
- Bureau de Normalisation. (2002+2004). *Granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels utilisés dans la construction des chaussées, aérodromes et d'autres zones de circulation* (NBN EN 13043+AC). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-13043-2002_31715/
- Bureau de Normalisation. (2005a). *Matériaux bitumineux coulés à froid: Méthodes d'essai. Partie 7: Essai d'abrasion par agitation* (NBN EN 12274-7). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-12274-7-2005_12512/
- Bureau de Normalisation. (2005b). *Matériaux bitumineux coulés à froid: Méthodes d'essai. Partie 8: Evaluation visuelle des défauts* (NBN EN 12274-8). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-12274-8-2005_2398/
- Bureau de Normalisation. (2008). *Matériaux bitumineux coulés à froid: Spécifications* (NBN EN 12273). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-12273-2008_19947/
- Bureau de Normalisation. (2009a). *Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 10: Détermination des fines: Granularité des fillers (tamisage dans un jet d'air)* (NBN EN 933-10). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-933-10-2009_25922/
- Bureau de Normalisation. (2009b). *Bitumes et liants bitumineux: Détermination de la polarité des émulsions de bitume* (NBN EN 1430). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-1430-2009_22988/
- Bureau de Normalisation. (2009c). *Bitumes et liants bitumineux: Détermination de la stabilité des émulsions de bitume en mélange avec du ciment* (NBN EN 12848). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-12848-2009_32499/
- Bureau de Normalisation. (2010a). *Caractéristiques de surface des routes et aérodromes: Méthodes d'essai. Partie 1: Mesurage de la profondeur de macrotecture de la surface d'un revêtement à l'aide d'une technique volumétrique à la tache* (NBN EN 13036-1). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-13036-1-2010_34013/
- Bureau de Normalisation. (2010b). *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. (2011a). *Ciment. Partie 1: Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants* (NBN EN 197-1). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-197-1-2011_14850/
- Bureau de Normalisation. (2011b). *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. (2011c). *Bitumes et liants bitumineux: Détermination du temps d'écoulement à l'aide d'un viscosimètre à écoulement. Partie 1: Emulsions de bitume* (NBN EN 12846-1). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-12846-1-2011_16247/
- Bureau de Normalisation. (2012a). *Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 1: Détermination de la granularité: Analyse granulométrique par tamisage* (NBN EN 933-1). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-933-1-2012_12561/
- Bureau de Normalisation. (2012b). *Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 3: Détermination de la forme des granulats: Coefficient d'aplatissement* (NBN EN 933-3). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-933-3-2012_28886/
- Bureau de Normalisation. (2012c). *Bitumes et liants bitumineux: Détermination de la teneur en eau dans les émulsions de bitume: Méthode de distillation azéotropique* (NBN EN 1428). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-1428-2012_28371/
- Bureau de Normalisation. (2013a). *Bitumes et liants bitumineux: Détermination du résidu sur tamis des émulsions de bitume et détermination de la stabilité au stockage par tamisage* (NBN EN 1429). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-1429-2013_35932/
- Bureau de Normalisation. (2013b). *Bitumes et liants bitumineux: Cadre de spécifications pour les émulsions pour les émulsions cationiques de liants bitumineux* (NBN EN 13808). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-13808-2013_15755/
- Bureau de Normalisation. (2015a). *Chaux de construction. Partie 1: Définitions, spécifications et critères de conformité* (NBN EN 459-1). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-459-1-2015_32558/
- Bureau de Normalisation. (2015b). *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. (2015c). *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-1427-2015_4598/
- Bureau de Normalisation. (2016a). *Bitumes et liants bitumineux: Détermination du comportement à la rupture. Partie 1: Détermination de l'indice de rupture des émulsions cationiques de bitume, méthode des fines minérales* (NBN EN 13075-1). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-13075-1-2016_17943/
- Bureau de Normalisation. (2016b). *Mélanges bitumineux: Spécifications pour le matériau. Partie 8: Agrégats d'enrobés* (NBN EN 13108-8). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-13108-8-2016_39020/

- Bureau de Normalisation. (2016c). *Bitumes et liants bitumineux: Détermination de la teneur en eau des émulsions de bitume: Méthode par évaporation à la balance dessiccatrice* (NBN EN 16849). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-16849-2016_39791/
- Bureau de Normalisation. (2005-2018). *Matériaux bitumineux coulés à froid: Méthode d'essai* (NBN EN 12274[-1-7]). <https://www.nbn.be/shop/fr/chercher/?src=t&k=12274>
- Bureau de Normalisation. (2018a). *Matériaux bitumineux coulés à froid: Méthode d'essai. Partie 3: Consistance* (NBN EN 12274-3). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-12274-3-2018_40305/
- Bureau de Normalisation. (2018b). *Matériaux bitumineux coulés à froid: Méthode d'essai. Partie 4: Détermination de la cohésion du mélange* (NBN EN 12274-4). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-12274-4-2018_17236/
- Bureau de Normalisation. (2018c). *Matériaux bitumineux coulés à froid: Méthode d'essai. Partie 5: Détermination de la teneur minimum en liant et de la résistance à l'usure* (NBN EN 12274-5). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-12274-5-2018_12579/
- Bureau de Normalisation. (2018d). *Bitumes et liants bitumineux: Détermination du retour élastique des bitumes modifiés* (NBN EN 13398). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-13398-2018_25321/
- 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). *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-1097-8-2020_21046/
- Bureau de Normalisation. (2022a). *Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 5: Détermination du pourcentage de surfaces cassées dans les gravillons et graves naturelles* (NBN EN 933-5). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-933-5-2022_114303/
- Bureau de Normalisation. (2022b). *Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 9: Qualification des fines: Essais en bleu de méthylène* (NBN EN 933-9). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-933-9-2022_110796/
- Bureau de Normalisation. (2022c). *Bitumes et liants bitumineux: Détermination du pH des émulsions bitumineuses* (NBN EN 12850). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-12850-2022_113216/
- California Department of Transportation, Division of Maintenance. (2008). Chapter 8: Slurry seals. In *Maintenance technical advisory guide (MTAG). Volume I: Flexible pavement preservation* (Second edition). https://www.csuchico.edu/cp2c/_assets/documents/caltrans/fpmtag-chapter-8---slurry-seals.pdf
- Centre de Recherches Routières. (2001). *Code de bonne pratique des enduits superficiels* (Recommandations CRR No. R71/01). <https://brrc.be/fr/expertise/expertise-apercu/code-bonne-pratique-enduits-superficiels>
- Centre de Recherches Routières. (2018). *Code de bonne pratique pour la mise en œuvre des enrobés bitumineux* (Recommandations CRR No. R96). <https://brrc.be/fr/expertise/expertise-apercu/code-bonne-pratique-mise-oeuvre-revetements-bitumineux>

- Delfosse, F., Eckmann, B., Le Roux, A., Le Roux, C., Odie, L., Potti, J.J. & Sanchez Polo, J. (2001). Characterisation of aggregates in relation to the breaking behaviour of emulsions in cold mixes. *Revue générale des routes (RGR)*, (798), 1-7.
- Deneuvillers, C., Gallimard, M. & Samanos, J. (2000). Méthodologie d'étude et de formulations des enrobés coulés à froid. *Revue générale des routes (RGR)*, (781), 48-52.
- Deneuvillers, C., Odié, L. & Urbain, J.-É. (Eds.). (2017). *Matériaux bitumineux coulés à froid* [Guide technique] (Collection Références). Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, L'Environnement, La Mobilité et l'Aménagement (CEREMA). <https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/materiaux-bitumineux-coules-froid>
- Destrée, A. & Brichant, P.-P. (2012). *Les émulsions cationiques bitumineuses en tant que couches de collage* (Dossier CRR No. 14, annexe au Bulletin CRR No. 90). Centre de Recherches Routières (CRR). <https://brrc.be/fr/expertise/expertise-aperçu/emulsions-cationiques-bitumineuses-tant-que-couches-collage>
- Destrée, A., Tanghe, T., Vansteenkiste, S. & De Visscher, J. (2022). Reliable laboratory test: A prerequisite for the design of high-quality slurry surfacing mixture. *Advances in materials science and engineering*, 22, Article 7157233. <https://doi.org/10.1155/2022/7157233>
- Fast and economical with micro surfacing: SM from Schäfer-Technic.* (s.d.). Schäfer-Technic. <https://www.schaefer-technic.com/en/products/microsurfacing-machinery>
- Fugro Consultants; Mactec; Consolidated Engineering Labs & APTEch. (2010). *Slurry seal / Micro-surface mix design procedure: Phase II report*. California Department of Transportation (Caltrans). https://cdn.ymaws.com/slurry.site-ym.com/resource/resmgr/files/Phase_II_Report_FINAL_JAN_9_.pdf
- Giorgi, C.E., Loup, F., Simard, D. & Thomas, J. (2016, Juin 1-3). Design and industrial application of a microsurfacing pavement based on non-Venezuelan bitumen. In *Proceedings of the 6th Eurasphalt & Eurobitume congress, Prague, Czech Republic*. Eurasphalt; Czech Technical University.
- Gontier, F. (2016, novembre 8). *Entretien et renforcement des chaussées par l'utilisation de fibres de verre: L'expérience Colas* [Lecture]. Journée d'étude de la route et des infrastructures (JERI 2016): Maîtrise de l'altération, Lausanne, La Suisse. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL); Nibux; Laboratoire des Voies de Circulation (LAVOC); Infralab. <https://docplayer.fr/52326575-Entretien-et-renforcement-des-chaussees-par-l-utilisation-de-fibres-de-verre-l-experience-colas.html>
- Heitzman, M. (2018, mars 27-29). *N9 OK DOT OGFC: Friction and bond strength study* [Lecture]. 2018 NCAT test track conference, Auburn, AL, USA. Auburn University, National Center for Asphalt Technology (NCAT). <http://www.pavetrack.com/180327/22.pdf>
- Herrero, L. (2018, juin 21). *M.B.C.F.* [Lecture]. Journée technique revêtements superficiels: Enduits superficiels (ESU); Matériaux bitumineux coulés à froid (MBCF) & Revêtements superficiels combinés (RSC), Rennes, France. Association des Directeurs Techniques des Métropoles, des Départements et des Régions (ADTECH); Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité (IDRRIM). https://www.cerema.fr/system/files/documents/2018/06/6_HERRERO_MBCF.pdf
- Imajview: Spatial data engineering: Power your data.* (s.d.). imajing. <https://imajing.eu/mobile-mapping->

[technologies/imajview-spatial-data-engineering/](#)

- Institut National de Recherche et de Sécurité. (2017). *Poly(styrène/butadiène) SB*. https://www.inrs.fr/publications/bdd/plastiques/polymere.html?refINRS=PLASTIQUES_polymere_25
- International Slurry Surfacing Association. (2005). *Surface area method of slurry seal design* (ISSA Technical Bulletin No. 118, deuxième révision). https://cdn.ymaws.com/www.slurry.org/resource/resmgr/Technical_Bulletins/TB_118.pdf
- International Slurry Surfacing Association. (2017). *Test method for determining mix time for slurry surfacing systems* (ISSA Technical Bulletin No. 113, herziening 04/2017). https://cdn.ymaws.com/www.slurry.org/resource/resmgr/Technical_Bulletins/TB_113_MixTime_13April2017_F.pdf
- International Slurry Surfacing Association. (2020). *Recommended performance guideline for emulsified asphalt slurry seal* (ISSA Publication No. A105, modifié mai 2020). https://cdn.ymaws.com/www.slurry.org/resource/resmgr/files/guidelines_-_new_versions/a105_revision_for_publicatio.pdf
- International Slurry Surfacing Association. (2021). *Recommended performance guideline for micro surfacing* (ISSA Publication No. A143, modifié août 2021). https://cdn.ymaws.com/www.slurry.org/resource/resmgr/tbs/A143_Revision_for_Publicatio.pdf
- Lapeyronie, V. & Bouveret, B. (2015). Les enrobés acoustiques: La réponse de Colas aux émissions sonores. *CAMPUSmag*, (2), 13-17.
- Le Bec, S. (2006, mars 23-24). *La pratique des enrobés coulés à froid: De la formulation à l'application* [Lecture]. Congrès Bitume Québec, Mont Ste-Anne, Québec. <https://docplayer.fr/51432711-La-pratique-des-enrobes-coules-a-froid-de-la-formulation-a-l-application-congres-bitume-quebec-23-au-24-mars-2006-mont-ste-anne-quebec.html>
- Le Bec, S. (2009, novembre 24). *Les enrobés coulés à froid: Principes généraux et méthode de formulation* [Lecture]. Formation technique Bitume Québec: Dernières avancées des produits et des procédés spéciaux applicables aux chaussées souples. <https://docplayer.fr/61837337-Les-enrobes-coules-a-froid.html>
- Le Bec, S. (2012, décembre 4-5). *Les émulsions de bitume: Formulation et fabrication selon leur usage* [Lecture]. Formation technique 2012: Utilisation des liants bitumineux en centrale et chantier, Montréal, Québec. Bitume Québec. <https://www.scribd.com/document/485353333/Emulsion-Du-Bitume>
- Le Cunff, F. (2018, juin 21). *Spécificités des liants bitumineux pour revêtements superficiels* [Lecture]. Journée technique revêtements superficiels: Enduits superficiels (ESU); Matériaux bitumineux coulés à froid (MBCF) & Revêtements superficiels combinés (RSC), Rennes, France. Association des Directeurs Techniques des Métropoles, des Départements et des Régions (ADTECH); Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité (IDRRIM). https://www.cerema.fr/system/files/documents/2018/06/4_LE-CUNFF_liants.pdf
- Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Pouvoirs Locaux. (2004). *Cahier des charges type RW 99* (Version 2004). http://qc.spw.wallonie.be/fr/qualiroutes/index_cct_arch.html
- Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap. (2000). *Standaardbestek 250 voor de wegenbouw* (Version 2.0). <https://wegenverkeer.be/sites/default/files/uploads/documenten/SB%20250%20versie%202.0.pdf>
- Morian, D.A. (2011). *Cost benefit analysis of including microsurfacing in pavement treatment strategies & cycle maintenance* (FHWA No. PA-2011-001-080503, rapport final). Pennsylvania Department of Transportation (PennDOT). <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/18555>

- Ng, T. (2015, janvier 20-22). *Slurry and micro-surfacing mix design* [Lecture]. ISSA 2015 slurry systems workshop, Las Vegas, NV, USA. International Slurry Surfacing Association (ISSA). <https://cdn.ymaws.com/www.slurry.org/resource/resmgr/files/W04-MixDesignsforSlurryMicro.pdf>
- Organisme Impartial de Contrôle de Produits pour la Construction. (2021a). *Prescriptions techniques pour liant synthétique pigmentable et émulsions cationiques à base de liant synthétique pigmentable* (Prescriptions Techniques COPRO No. PTV 858, version 2.0). <https://www.copro.eu/fr/ptv-858>
- Organisme Impartial de Contrôle de Produits pour la Construction. (2021b). *Règlement d'application pour la certification de produits de liant synthétique pigmentable et émulsions cationiques à base de liant synthétique pigmentable sous la marque COPRO* (Règlement d'Application COPRO No. TRA 58, version 2.0). <https://www.copro.eu/fr/tra-58>
- Pane, C., Soubigou, C. & Paroïelle, P. (2008). Les émulsions claires et leurs principaux domaines d'application. *Revue générale des routes* (RGR), (870), 45-52.
- Piérard, N., Brichant, P.-P., Denolf, K., Destrée, A., De Visscher, J., Vanelstraete, A. & Vansteenkiste, S. (2013). *Les enrobés bitumineux colorés: Recommandations pratiques pour le choix des matériaux, la conception et la mise en œuvre; Détermination objective de leur couleur* (Dossier No. 17, annexe au Bulletin CRR No. 97). Centre de Recherches Routières (CRR). https://brrc.be/sites/default/files/2019-10/dossier_17Fr.pdf
- Robati, M., Carter, A. & Perraton, D. (2013, novembre 17-20). Incorporation of reclaimed asphalt pavement and post-fabrication asphalt shingles in micro-surfacing mixture. In *Proceedings of the 58th annual conference of the Canadian Technical Asphalt Association (CTAA), St. John's, Newfoundland and Labrador, Canada*.
- Roussel, M.-F. (2013, octobre 25). *Enrobés coulés à froid: ECF* [Lecture]. Assemblée générale ordinaire annuelle SPRIR Routes d'Alsace: Exposés techniques, Strasbourg, France. Syndicat Professionnel Régional de l'Industrie Routière (SPRIR), Routes D'Alsace. <https://docplayer.fr/19632568-.html>
- Southern African Bitumen Association. (2011). *Best practice for the design and construction of slurry seals* (Sabita Manual No. 28). <http://www.sabita.co.za/wp-content/uploads/2017/08/Download-for-Manual-28.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
- Van Geem, C., Massart, T., Van Buylaere, A., Draps, M., Laforce, M. & Hindrijckx, M. (2020). *Inspection visuelle & gestion de réseaux routiers (villes et communes) + Catalogue des dégradations* (Méthode de Mesure CRR No. MF 89, révision 1). Centre de Recherches Routières (CRR). <https://brrc.be/fr/expertise/expertise-aperçu/revision-mf-89-inspection-visuelle-gestion-reseaux-routiers>
- Virginia Department of Transportation, Materials Division. (2011). *Slurry surfacing certification study guide*. https://www.virginiadot.org/VDOT/Business/asset_upload_file245_118183.pdf
- Vivier, M. (1992). *Composition bitumineuse pour enrobés coulés à froid et procédé de réalisation d'un tel enrobé* (Brevet Européen No. EP 0 344 382 B1). Office Européen des Brevets (EPO). <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/008200391/publication/EPO344382B1?q=ep0344382b1>
- Vlaamse Overheid, Agentschap Wegen en Verkeer. (2021). *Standaardbestek 250 voor de wegenbouw* (Version 4.1a). <https://wegenenverkeer.be/zakelijk/documenten/standaardbestek>

Annexe 1 – Les essais de caractérisation géométriques et mécaniques des granulats

Essais de caractérisations géométriques des granulats

1. La granularité

La granularité des classes granulaires doit être déterminée, selon la norme EN 933-1 (NBN, 2012a), via une analyse granulométrique par tamisage. Le principe de l'essai de la norme EN 933-1 (NBN, 2012a) consiste à séparer, au moyen d'une série de tamis, un matériau en plusieurs classes granulaires de dimensions décroissantes. Le procédé adopté est le tamisage par lavage suivi d'un tamisage à sec. Les masses des grains retenues sur les différents tamis sont rapportées à la masse initiale de l'échantillon. Les pourcentages cumulés passant à travers chaque tamis sont présentés sous forme numérique et si nécessaire sous forme graphique (on parle de courbe granulométrique).

2. La qualité des fines (essai au bleu de méthylène)

L'essai au bleu de méthylène (Methylene Blue-MB en anglais) est réalisé en Belgique selon l'annexe A de la norme EN 933-9 (NBN, 2022b), sur la fraction 0/0,125 mm d'un sable 0/2. Le principe de cet essai normatif est d'ajouter successivement des doses d'une solution de bleu de méthylène (colorant) à la suspension (mélange d'eau et de la fraction 0/0,125 mm). Le bleu de méthylène est adsorbé préférentiellement par les argiles gonflantes (type montmorillonite) et les matières organiques. On vérifie l'adsorption du colorant par la prise d'essai en réalisant un test à la tache sur du papier filtre pour déceler la présence de colorant libre.

3. Le coefficient d'aplatissement

Il est déterminé selon la norme EN 933-3 (NBN, 2012b) en effectuant un double tamisage, au moyen de tamis d'essais à mailles carrées et ensuite de tamis à barreaux ayant des fentes parallèles.

4. L'angularité

Elle est déterminée selon la norme EN 933-5 (NBN, 2022a) en analysant le pourcentage en masse de surfaces cassées dans les gravillons (Cx/y avec C pour Crushed particles en anglais). Le principe est de déterminer visuellement et manuellement les paramètres x et y. Cette détermination est réalisée en deux étapes en faisant la distinction:

- entre les grains semi-concassés (x) (< 50 % surfaces arrondies) et les grains semi-roulés (> 50 % surfaces arrondies);
- sur la fraction des semi-roulés entre les grains totalement roulés (y) (> 90 % surfaces arrondies) et les autres grains semi-roulés.

Essais de caractérisations mécaniques des granulats

1. La résistance à la fragmentation

Elle est mesurée par l'essai Los-Angeles (LA) conformément à la norme EN 1097-2 (NBN, 2020a). Le principe de cet essai normatif est de placer dans un tambour en rotation des fractions granulaires (10/14 mm) en présence de boulets d'aciers. La friction des granulats entre eux et contre les boulets et les parois du tambour va provoquer leur dégradation. Le degré de fragmentation est apprécié par ce coefficient Los-Angeles qui représente le pourcentage de l'échantillon initial qui a été réduit à une taille inférieure à 1,6 mm durant ce processus.

2. La résistance à l'usure

Elle est mesurée par l'essai Micro-Deval (MDE) en présence d'eau conformément à la norme EN 1097-1 (NBN, 2011b). Le principe de cet essai normatif est de soumettre des fractions granulaires (10/14 mm) à un cycle d'usure, en présence d'eau, cela par contact avec des billes d'acier à l'intérieur d'un cylindre en rotation. Le degré d'usure est apprécié par ce coefficient Micro-Deval qui représente le pourcentage de l'échantillon initial qui a été réduit à une taille inférieure à 1,6 mm durant ce processus.

3. Le coefficient de polissage accéléré

Il est mesuré par l'essai PSV (En anglais, Polished Stone Value) conformément à la norme EN 1097-8 (NBN, 2020b). Le principe de cet essai normatif est de faire subir à un échantillon (mosaïque de granulats 7,2/10 mm) un double polissage par action de deux poudres abrasives d'émeri.

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

Plus d'informations:

<https://brrc.be/fr/expertise/publications>

Pour commander cet ouvrage:

publication@brrc.be




Référence: R 98 Rév. 1 – Prix: 18 € (hors TVA de 6 %)

Egalement 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 105	Code de bonne pratique pour la formulation des enrobés bitumineux	16,00 €
R 104	Code de bonne pratique pour l'essai de compression cyclique uniaxial pour l'asphalte coulé	10,00 €
R 102	Pour le choix du revêtement bitumineux lors de la conception ou de l'entretien des chaussées	20,00 €
R 96	Code de bonne pratique pour la mise en oeuvre 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 oeuvre 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 les revêtements industriels extérieurs en béton	20,00 €

Autres collections 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
1200 Bruxelles
Tél.: 02 775 82 20
www.brcc.be/fr

Le présent code de bonne pratique dédié aux MBCF résulte d'une étude prénormalisation de quatre ans subsidié par le bureau de normalisation (NBN) (contrat CCN NBN/PN16A04-B04) et de la collaboration précieuse des exploitants des carrières, des producteurs d'émulsions et additifs, des entrepreneurs de MBCF et des administrations routières de Wallonie et de Flandre.

Un MBCF (Matériau Bitumineux Coulé à Froid) est un mélange bitumineux d'agrégats minéraux, d'émulsion, d'eau et d'additifs éventuels (ciment, régulateur de rupture, pigment). On distingue quatre types de MBCF, sur base du calibre du mélange granulaire: 0/2, 0/4, 0/6,3 et 0/10 mm. Les MBCF sont appliqués comme traitement de surface, en une ou en deux couches.

Ce code de bonne pratique dédié aux matériaux bitumineux coulés à froid est constitué de sept chapitres et d'une annexe. Pour commencer, un premier chapitre introductif décrit la technologie, les finalités et l'importance des MBCF. Dans le chapitre 2 suivent une description des composants des MBCF, l'application du marquage CE et la définition des familles de produits MBCF. Le chapitre 3 aborde quant à lui les réparations préalables nécessaires et les travaux préparatoires, qui sont d'une importance cruciale pour la durabilité des MBCF. Ensuite, le chapitre 4 s'intéresse aux types d'applications. Il indique également où et quand un traitement superficiel avec un MBCF est approprié. Le choix de l'application de ces MBCF est illustré concrètement à l'aide d'un exemple. Le chapitre 5 est dédié à la méthodologie de formulation du MBCF et aux essais normatifs qui peuvent être utilisés pour établir les compositions des MBCF. Le chapitre 6 est consacré à l'exécution des MBCF. Le dernier chapitre approfondit l'aspect durabilité des MBCF; d'une part, en choisissant une stratégie d'entretien préventif et, d'autre part, en sélectionnant correctement les routes sur lesquelles un traitement avec un MBCF a un sens. Les essais de caractérisation géométriques et mécaniques des granulats (décrits dans le chapitre 2) sont brièvement explicités en annexe 1.

Mots-clés ITRD

0177 - RECOMMANDATION ; 1586 - CERTIFICATION ; 3623 - MISE EN OEUVRE (APPL) ; 4355 - EAU ; 4577 - GRANULAT ; 4714 - COMPOSITION DU MÉLANGE ; 4729 - ENROBÉ COULÉ À FROID ; 4993 - EMULSION ; 9084 - EMPLOI (UTIL)