



Les enrobés bitumineux colorés

Recommandations pratiques pour le choix des matériaux, la conception et la mise en œuvre – Détermination objective de leur couleur



Les enrobés bitumineux colorés

Recommandations pratiques pour le choix des matériaux, la conception et la mise en œuvre – Détermination objective de leur couleur

Avant-propos	4
1. Introduction	5
2. Constituants	6
2.1 Granulats	6
2.1.1 Couleur	6
2.1.2 Autres caractéristiques	8
2.2 Liants	10
2.2.1 Liants pigmentables	10
2.2.2 Caractéristiques des liants pigmentables	11
2.2.3 Choix des liants pigmentables pour les revêtements bitumineux	12
2.3 Pigments	12
2.3.1 Nature des pigments et coloris	12
2.3.2 Types de conditionnement	14
2.3.3 Dosages en pigments	15
2.3.4 Autres propriétés	15
2.3.4.1 Granulométrie	16
2.3.4.2 Pouvoir colorant relatif	16
2.3.4.3 Thermostabilité	16
3. Formulation de l'enrobé	18
3.1 Choix du type d'enrobé et exigences	18
3.2 Etude de formulation	20
3.3 Essais performantiels	24
4. Fabrication en centrale	27
5. Mise en œuvre sur chantier	29
5.1 Plan et méthodologie de pose	29
5.2 Préparation du support et choix de la couche de collage	29
5.3 Propreté du matériel et règles de circulation sur le chantier	30
5.4 Approvisionnement du chantier	31
5.5 Compactage	31
5.6 Traitement des joints	31
5.7 Mise en circulation	32

6.	Détermination de la couleur	33
6.1	Perception de la couleur	33
6.2	Espace colorimétrique $L^*a^*b^*$	34
6.3	Spectrophotomètres	35
6.3.1	Spectrophotomètre de type 45°/0°	36
6.3.2	Spectrophotomètre de type d/8°	36
6.3.3	Comparaison	37
6.4	Méthodes de mesure	37
6.4.1	Méthode de mesure pour les carottes	37
6.4.2	Méthode de mesure pour les chantiers	37
6.4.2.1	Méthode de mesure pour les routes, les pistes cyclables et les trottoirs	37
6.4.2.2	Méthode de mesure pour les places	38
	Perspectives	39
	Documents normatifs	39
	Références	40

Les enrobés bitumineux colorés

Recommandations pratiques pour le choix des matériaux, la conception et la mise en œuvre – Détermination objective de leur couleur

► Avant-propos

Contenu du dossier



Source: Les Matériaux enrobés du Tournaisis (LMET)

Les enrobés bitumineux colorés nécessitent dans la plupart des cas l'utilisation de matériaux particuliers tels que des granulats de couleur, des pigments et des liants pigmentables. L'impact de ces nouveaux matériaux sur les performances des enrobés n'est pas négligeable et doit être pris en compte afin d'obtenir des enrobés performants et durables. De même, la fabrication et la mise en œuvre des enrobés colorés doivent faire l'objet d'une attention particulière.

Ce dossier traite, dès lors, d'un certain nombre de points propres aux revêtements en enrobé bitumineux coloré. Il donne, en particulier, des recommandations pratiques pour le choix des matériaux, la formulation et la réalisation d'un revêtement en enrobé bitumineux coloré durable (d'un point de vue mécanique) et performant. D'autres points comme la durabilité de la couleur actuellement étudiée au CRR, ne sont pas traités ici. Seule la mesure de la couleur des revêtements en enrobé bitumineux coloré est abordée dans ce dossier.

Remerciements

La rédaction de ce dossier a pu être réalisée grâce au support financier du Bureau de Normalisation (NBN) (convention CC-CCN PN/NBN-707-757-907), à toutes les informations utiles fournies par les carrières, les producteurs de liants, de pigments et d'enrobés et au personnel technique de la division concernée du CRR. Qu'ils en soient remerciés ainsi que les membres du groupe de travail BAC 6 sur les «revêtements colorés» pour leur relecture attentive!

Auteurs

Nathalie PIERARD (coordinatrice – n.pierard@brrc.be)
 Pierre-Paul BRICHANT
 Katleen DENOLF
 Alexandra DESTREE
 Joëlle DE VISSCHER
 Ann VANELSTRAETE
 Stefan VANSTEENKISTE

► 1. Introduction

Les revêtements bitumineux colorés sont de plus en plus souvent appliqués sur nos routes ou dans nos espaces publics, surtout en milieu urbain. Ils ont pour rôle d'augmenter la sécurité des usagers en améliorant la visibilité et la lisibilité de la route ou de favoriser une bonne intégration du revêtement dans l'environnement, ou encore de donner un caractère particulier à un espace public. On les retrouve donc au niveau des pistes cyclables, des intersections dangereuses (carrefours, ronds-points, passages pour piétons, etc.) ou encore comme revêtements d'espaces publics importants.

On distingue quatre types de revêtements bitumineux colorés:

- les revêtements en **enrobé bitumineux coloré**. Les enrobés bitumineux sont fabriqués en centrale et sont constitués de granulats (sables et pierres), de filler et de bitume. Ils doivent être compactés lors de leur mise en œuvre. Pour obtenir des enrobés colorés, on a recours à un ou plusieurs matériaux spécifiques tels des granulats de couleur, du liant pigmentable et des pigments;
- les revêtements en **asphalte coulé coloré**. L'asphalte coulé est préparé et mis en œuvre à très haute température. Sa composition diffère de celle des enrobés bitumineux classiques par sa plus grande teneur en liant et en filler ainsi que par sa mise en œuvre qui ne nécessite pas de compactage. La couleur de l'asphalte coulé est obtenue grâce à l'utilisation de pigments couplée ou non à l'utilisation de liant pigmentable;
- **les matériaux bitumineux coulés à froid (MBCF) et les enduits superficiels colorés**. Les MBCF et les enduits superficiels sont des revêtements minces ou ultraminces utilisés en traitement de surface. Un MBCF est un coulis bitumineux coulé à froid, préparé et mis en œuvre directement sur chantier en mélangeant une émulsion de bitume, des granulats, de l'eau, du ciment et d'autres additifs. On obtient un MBCF de couleur grâce à l'utilisation de granulats de couleur et d'une émulsion à base de liant pigmentable auxquels est ajoutée une petite quantité de pigments. Les enduits superficiels colorés sont généralement des enduits monocouches (épandage et compactage d'une couche de pierres après épandage d'une émulsion). En Belgique, ils sont généralement à base de pierres de couleur non pré-enrobées et d'émulsion bitumineuse. L'utilisation d'émulsion à base de liant pigmentable n'est pas nécessaire car la couleur de l'enduit est obtenue par la mosaïque formée par les pierres en surface.

Comme annoncé dans l'avant-propos, ce dossier traite des enrobés bitumineux colorés à travers le choix de ses constituants, la formulation des mélanges, leur fabrication et mise en œuvre ainsi que la mesure de leur couleur. Les autres types de revêtements bitumineux colorés ne seront pas abordés. En ce qui concerne le choix du type de revêtements bitumineux colorés, nous renvoyons le lecteur au *Code de bonne pratique pour le choix du revêtement bitumineux lors de la conception ou de l'entretien des chaussées* (CRR R78/06) [1]. Ce choix doit bien entendu se faire de la même manière que dans le cas d'un revêtement bitumineux non coloré.

Les enrobés bitumineux colorés

Recommandations pratiques pour le choix des matériaux, la conception et la mise en œuvre – Détermination objective de leur couleur

► 2. Constituants

L'enrobé bitumineux coloré se distingue des enrobés classiques par sa couleur. La coloration d'un enrobé coloré est obtenue grâce à l'utilisation de matériaux spécifiques tels que les granulats de couleur, les pigments ou les liants pigmentables. La combinaison de deux ou trois de ces matériaux spécifiques permet d'obtenir un revêtement de la couleur souhaitée.

Dans cette partie, les caractéristiques de ces différents constituants sont présentées afin d'en faciliter le choix.

2.1 Granulats

Lors de la formulation de la composition d'un enrobé bitumineux coloré, on sélectionnera des granulats:

- d'une part, dont la couleur se rapproche préférentiellement le plus possible de la teinte souhaitée pour le revêtement coloré (§ 2.1.1 *Couleur*);
- d'autre part, qui satisfont aux prescriptions des cahiers des charges régionaux et aux spécifications de la norme européenne NBN EN 13043 (§ 2.1.2 *Autres caractéristiques*).

2.1.1 Couleur

Le choix de la teinte des granulats destinés à l'élaboration d'un revêtement bitumineux coloré, se révèle d'une grande importance pour en assurer sa pérennité et l'évolution favorable de ses nuances dans le temps. En effet, les enrobés colorés peuvent être formulés à base de granulats utilisés pour les enrobés bitumineux non colorés (grès, porphyre, etc. de teinte généralement bleue ou grise). Cependant, le décapage progressif du film de mastic en surface des granulats, suite aux conditions climatiques (par exemple pluie, ensoleillement, etc.) et au trafic véhiculaire [2, 3], entraînera la mise à nu des matériaux granulaires, surtout dans le cas d'enrobés pierreux tels que des bétons bitumineux très minces (BBTM) et des bétons bitumineux grenus à forte teneur en mastic (SMA), et pourra donner lieu à terme à un rendu esthétique insatisfaisant.

Par conséquent, il est conseillé de rechercher des granulats dont la couleur se rapproche le plus possible de la couleur finale souhaitée pour le revêtement bitumineux. Si l'on ne trouve pas de teintes similaires, on sélectionnera préférentiellement des granulats clairs (beiges, blancs) pour que ceux-ci aient un effet le plus neutre possible [4].

Si l'on souhaite fabriquer un revêtement bitumineux coloré de teinte (figure 1):

- **rouge**, on sélectionnera préférentiellement des granulats de teinte rouge, orangée ou rosée voire brune en dernier recours. Ce dernier coloris serait plus adapté aux enrobés rouges à base de bitume pigmentable (§ 2.2 *Liants*) étant donné la couleur rouge foncé voire brune de ce type d'enrobé;
- **claire (jaune, beige, blanc)**, on choisira des matériaux granulaires de même teinte ou de teinte similaire (brun, ocre, blanc) à celle du revêtement désiré;
- **ocre**, on préférera des granulats beiges ou beige orangé voire bruns si les teintes précitées ne sont pas disponibles;

- **gris**, on incorporera au mélange des matériaux granulaires gris clair, gris foncé, bleu clair ou bleu foncé selon la teinte finale souhaitée de l'enrobé coloré;
- **bleu**, on prendra des granulats bleus ou gris; les teintes claires ou foncées seront sélectionnées selon la couleur finale souhaitée du revêtement bleu;
- **vert**, on utilisera des pierres verdâtres ou bleues à tendance verte.

Notons que les deux dernières teintes de revêtements bitumineux colorés précitées ne sont plus couramment posées en Belgique, les pigments bleus et verts nécessaires à leur fabrication étant les plus chers actuellement sur le marché.



Figure 1 – Exemples de granulats de couleur utilisables pour la fabrication d'enrobés bitumineux colorés

D'un point de vue économique et environnemental, il se révèle important de tenir compte des ressources locales disponibles. La Belgique disposant d'une richesse naturelle en roches [5, 6], les granulats exploités ont différentes origines:

- ils sont extraits de carrières (matériaux concassés) de différentes natures:
 - porphyre (appelé également microdiorite);
 - grès;
 - calcaire;
 - silex;
 - quartzite;
 - quartz;

Les enrobés bitumineux colorés

Recommandations pratiques pour le choix des matériaux, la conception et la mise en œuvre – Détermination objective de leur couleur

- ils sont extraits de gravières (matériaux alluvionnaires), leur nature est siliceuse ou siliceuse-calcaire. Ces graviers:
 - proviennent des rivières ou d'anciens bras de rivières, principalement dans la province du Limbourg (graviers de Meuse limbourgeois);
 - sont dragués du fond de la mer, on parle alors de granulats «marins».

Leurs couleurs sont relativement variées. Sur base d'un classement visuel (qualitatif) [7], les couleurs suivantes sont répertoriées: noir, gris (foncé, bleuté, brunâtre à lie-de-vin, rosé), bleu, blanc, vert, brun ocre et blanc (en mélange)¹, rouge et jaune.

Les gisements de type sédimentaire (grès et calcaire) utilisés pour la production de granulats peuvent présenter une hétérogénéité en termes de couleur, qui peut varier de banc en banc. Cela sera typiquement plus marqué pour les grès que pour les calcaires. Les gisements de type magmatiques (porphyre) sont par contre relativement très homogènes en termes de couleur.

A l'heure actuelle, seul le cahier des charges type de la Wallonie CCT Qualiroutes (version 2013) donne des prescriptions de chromaticité (a^* , b^*) et de luminosité (L^*) auxquelles doivent répondre les granulats pour la fabrication d'enrobés bitumineux colorés [8] (§ 6. Détermination de la couleur).

2.1.2 Autres caractéristiques

Outre leurs propriétés colorimétriques, les granulats de couleur utilisés pour la fabrication des enrobés bitumineux colorés devront en priorité satisfaire aux exigences des cahiers des charges régionaux et, par conséquent, être conformes à la norme NBN EN 13043 précitée, et être porteurs du marquage CE. Ces exigences concernent les caractéristiques:

- **géométriques:** classe granulaire, granularité, coefficient d'aplatissement, teneur en fines, etc.;
- **physiques:** résistance à la fragmentation, à l'usure, au polissage, etc.;
- **chimiques:** composition chimique-minéralogique, etc.

Les caractéristiques précitées sont les mêmes que celles établies pour les enrobés non colorés et elles sont nécessaires pour garantir les performances des enrobés bitumineux, notamment en termes de durabilité et de sécurité des usagers. Cependant, il peut être difficile de faire coïncider les qualités esthétiques du revêtement coloré (choix adéquat de la teinte du granulat de couleur - § 2.1.1 Couleur) et les caractéristiques physico-chimiques et/ou géométriques des matériaux granulaires de couleur entrant dans sa composition [9] et cela, plus particulièrement, pour les revêtements bitumineux soumis aux sollicitations mécaniques d'un trafic lourd ou à des forces tangentielles.

Deux problématiques principales semblent émerger actuellement:

- 1) il est **difficile de trouver en Belgique des granulats de teinte uniforme claire (jaune, beige ou blanc)² ou rouge/rose** qui répondent à l'ensemble des prescriptions imposées dans les cahiers des charges régionaux en termes de caractéristiques physiques et/ou géométriques, comme par exemple:

¹ Cette teinte est majoritairement celle rencontrée pour les granulats de Meuse ou marins.

² Il existe bien entendu des granulats de Meuse ou marins qui présentent ces teintes mais en mélange.

- **la valeur minimale pour le coefficient de polissage accéléré imposée pour certaines catégories de trafic** (PSV₅₀, cela signifie que la valeur doit être ≥ 50). Il est difficile d'atteindre cette valeur avec des granulats de teinte claire (jaune, beige ou blanc) de type calcaire gréseux ou grès schisteux; il en est de même pour ceux de teinte rouge/rose tels les marbres;
- **les classes granulaires couramment exigées pour la fabrication d'enrobés bitumineux**. Pour la majeure partie des granulats de teinte claire ou rouge/rose, les calibres prévus par les cahiers des charges régionaux ne sont pas disponibles. Leur production est, en effet, souvent destinée à des applications à but ornemental (p. ex. sentiers privés), qui ne rentrent pas dans le domaine d'application de la NBN EN 13043. A titre d'exemple, certains types de granulats peuvent être disponibles dans la classe granulaire 5/15 ou 4/8 mais pas dans la classe granulaire 4/6,3 exigée dans le cahier des charges type flamand SB 250 (version 2.2);

Une solution à l'indisponibilité des granulats belges de teinte claire ou rouge conformes serait l'utilisation de produits importés. Il faut cependant être conscient, lors de la sélection de ce type de granulats, que les caractéristiques géométriques et physiques (et leurs tolérances associées) utilisées en Belgique ne sont pas nécessairement les mêmes que celles choisies par les autres pays. Si nous nous focalisons plus spécifiquement sur la problématique des caractéristiques géométriques, on constate:

- qu'en termes de classes granulaires, certains produits présentent une codification différente (d/D). Outre le set de tamis de base, chaque pays a en effet le choix d'utiliser en plus le set de tamis de la série 1 ou 2. Selon la série choisie, on parlera par exemple de classe 6,3/10 (série 2) ou 8/11 (série 1). La Belgique a retenu le set de base plus la série 2 comme, entre autres, la France. Par contre, l'Allemagne et les Pays-Bas ont fait le choix de la série de base plus la série 1;
- qu'au niveau des teneurs en fines des matériaux granulaires, les granulats pour les enrobés doivent correspondre en Belgique à la catégorie f_2 (la teneur en fines est $\leq 2\%$) car il est d'usage de faire appel à des granulats lavés, ce qui n'est par exemple pas le cas en France. Il est donc important de vérifier la teneur maximale en fines présente dans les granulats de couleur importés;

2) il est possible de rencontrer des **problèmes d'adhésivité des liants avec les granulats de couleur** dont les caractéristiques chimiques démontrent une présence élevée d'oxydes de fer³ ou de certains minéraux siliceux⁴.

Exécuter un essai pour déterminer l'affinité granulat-bitume selon le § 7 de la norme NBN EN 12697-11 (*Méthode de désenrobage à l'eau bouillante*) est à recommander lorsque des granulats de teintes prononcées (c'est-à-dire avec une teneur élevée en oxyde de fer ou en certains minéraux siliceux) sont utilisés dans la fabrication des enrobés bitumineux colorés. Lorsque l'adhésivité mesurée en laboratoire semble problématique, on se tournera vers un choix de filler approprié, ou l'utilisation de dopes d'adhésivité.

Un document disponible au CRR récapitule les producteurs/fournisseurs belges et étrangers qui commercialisent des granulats de couleur. Cette liste ne se veut pas exhaustive, elle a pour seul objectif de guider les entrepreneurs dans la sélection des matériaux granulaires.

³ Le grès rouge ou le porphyre rouge de France sont des exemples de granulats présentant une teneur élevée en oxydes de fer.

⁴ Ces minéraux sont, par exemple, le quartz, le feldspath ou l'épidote. Ils sont présents dans les granulats de type quartzite, porphyre, etc.

Les enrobés bitumineux colorés

Recommandations pratiques pour le choix des matériaux, la conception et la mise en œuvre – Détermination objective de leur couleur

2.2 Liants

2.2.1 Liants pigmentables

Lors de la fabrication d'un enrobé bitumineux coloré, le producteur devra le plus souvent faire usage d'un autre type de liant que d'un bitume noir «classique» pour réaliser de manière optimale la couleur visée. Dans ce cadre, il est indispensable de disposer de liants pigmentables.

Les liants pigmentables peuvent être subdivisés en trois familles différentes:

- les bitumes pigmentables;
- les liants synthétiques clairs pigmentables (éventuellement modifiés au polymère);
- les liants végétaux (bio).

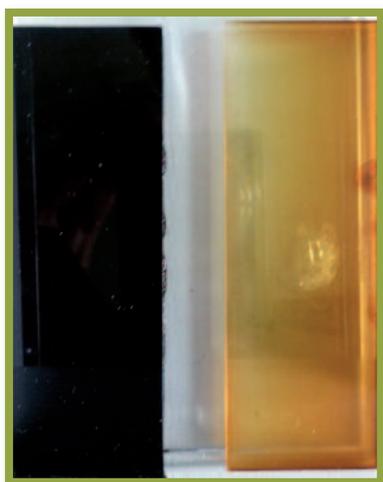


Figure 2 – Illustration d'un bitume classique (à gauche) et d'un liant pigmentable (à droite) (plaquettes mises à la disposition du CRR par Shell)

Le bitume pigmentable est un liant bitumineux pauvre en asphaltènes: environ 5 % au lieu de 15 % pour un bitume «classique». Il est produit à partir de «bitumes» spécifiques, déjà pauvres en asphaltènes, en ajoutant une étape au processus de production du bitume, appelée le désasphaltage. Les asphaltènes, qui constituent la fraction de bitume insoluble dans le n-heptane chaud, sont des composants très oxydés avec une masse moléculaire entre $\pm 1\ 000 - 10\ 000\ \text{gmol}^{-1}$. Les asphaltènes absorbent une part importante de la lumière visible, faisant apparaître la couleur «noire» du bitume. La teneur résiduelle en asphaltènes limite cependant dans la pratique le champ d'application du bitume pigmentable aux revêtements bitumineux rouge foncé, et nécessite en plus de fortes teneurs en pigment (en l'occurrence de l'oxyde de fer rouge). En effet, la couleur brune intrinsèque du bitume pigmentable (figure 2) empêche la réalisation d'un effet coloré optimal si des revêtements d'une autre couleur que rouge brun sont envisagés.

Les liants synthétiques incolores fabriqués sur base de dérivés du pétrole ne contiennent pas d'asphaltènes et se prêtent donc, grâce à divers pigments (§ 2.3 Pigments), à l'obtention d'un large éventail de revêtements colorés. Il est possible d'ajouter ou non des polymères aux liants incolores dans un enrobé bitumineux afin d'en améliorer les performances. Dans ce dernier cas, on parle d'un liant synthétique incolore modifié au polymère.

Les liants végétaux sont en grande partie obtenus à partir de sources naturelles renouvelables telles que des résines végétales transparentes et/ou des huiles végétales, par exemple, des huiles de colza ou de tournesol, du bois, de la biomasse, etc. Il convient de noter que les liants végétaux sont peu utilisés en Belgique par rapport aux bitumes pigmentables ou aux liants synthétiques incolores, en raison de leur prix ou de leurs caractéristiques intrinsèques (§ 2.2.2 Caractéristiques des liants pigmentables).

Pour réaliser des revêtements avec un effet coloré optimal (p. ex. caractérisé par une clarté élevée ou bien où la couleur naturelle des granulats se manifeste au maximum), il est recommandé d'utiliser des liants synthétiques ou végétaux incolores.

Un document disponible au CRR récapitule les producteurs/fournisseurs belges et étrangers qui commercialisent des liants pigmentables. Cette liste ne se veut pas exhaustive, elle a pour seul objectif de guider les entrepreneurs dans la sélection des liants pigmentables.

2.2.2 Caractéristiques des liants pigmentables

Les liants pigmentables sont des matériaux relativement nouveaux. L'expérience pratique en la matière est donc limitée. Aussi, il est recommandé d'être attentif aux caractéristiques et/ou performances spécifiques de ces liants. Quelques points importants sont repris ci-dessous:

- il est important d'évaluer les caractéristiques rhéologiques liées aux performances aussi bien à haute température qu'à basse température. Il s'agit, en particulier, de la détermination du module de cisaillement complexe G^* et de l'angle de phase δ des liants à différentes températures au moyen de mesures DSR selon la NBN EN 14770 et de la détermination des températures critiques au moyen de l'essai BBR selon la NBN EN 14771 où $S(60s) = 300$ MPa et $m(60s) = 0,3$. Une étude récente a démontré que des valeurs G^* très basses à 50 °C et 1,6Hz (p. ex. dans le cas de liants végétaux) pouvaient être liées au risque de déformation permanente alors que des températures critiques élevées se répercutaient dans les résultats des essais TSRST réalisés selon la NBN EN 12697-46 (sensibilité à la fissuration à basse température) [10];
- les liants végétaux sont souvent caractérisés par une viscosité plus basse par rapport au bitume routier «classique», permettant une production de l'enrobé à une température réduite (jusqu'à 50 °C en dessous de 160 °C). Par contre, un inconvénient concerne une évolution potentielle importante dans le temps (*curing time*) des propriétés du liant (p. ex. augmentation de la rigidité pendant une période de 60 jours [11]). En outre, les liants végétaux peuvent après un certain temps présenter une plus grande fragilité par rapport aux bitumes classiques, entraînant une augmentation du risque de fissuration;
- les liants pigmentables ne sont pas uniquement livrés en vrac comme le bitume conventionnel, mais aussi emballés en petits sacs avec film thermofusible ou en fûts. C'est pourquoi, il est important de toujours prendre en compte les directives du fournisseur en ce qui concerne la température de production de l'enrobé coloré. L'emballage en sacs thermofusibles réclame en effet une température de 160-180 °C pour obtenir une fusion complète du film. Par ailleurs, il est aussi important de respecter les températures de mélange maximales pour pouvoir garantir les performances du liant pigmentable et, par conséquent, la durabilité de l'enrobé bitumineux coloré;
- enfin, pour manipuler et utiliser de manière sûre les liants pigmentables, il est vivement conseillé de prendre connaissance de toutes les informations mises à disposition de l'utilisateur par le producteur/fournisseur par le biais d'une fiche technique et des fiches de données de sécurité (fiches MSDS).

Les cahiers des charges types en Flandre et en Région de Bruxelles-Capitale contiennent des prescriptions tant pour les bitumes pigmentables que pour les liants clairs (modifiés au polymère ou non) (SB250 version 2.2 et CCT2011). En Wallonie, seules sont en vigueur des spécifications pour

Les enrobés bitumineux colorés

Recommandations pratiques pour le choix des matériaux, la conception et la mise en œuvre – Détermination objective de leur couleur

les liants clairs (modifiés au polymère ou non) (en effet, les liants bitumineux pigmentables ne sont plus repris dans le CCT Qualiroutes depuis le 1^{er} octobre 2013). Au niveau européen (CEN TC336 WG1), il a été décidé en 2011, de ne pas établir de norme de produit pour les liants pigmentables pour le moment. Néanmoins, il est recommandé de faire attention non seulement aux exigences des cahiers des charges types, mais aussi au comportement performantiel à haute et à basse température (caractéristiques rhéologiques).

2.2.3 Choix des liants pigmentables pour les revêtements bitumineux

Le choix approprié du liant pigmentable utilisé en fonction du domaine d'application visé dépend fortement des propriétés rhéologiques du liant (voir aussi le chapitre 9 du Code de bonne pratique CRR R78/06) [1]. Les liants bitumineux pigmentables sont recommandés pour les revêtements de pistes cyclables, de zones piétonnes et de voiries locales peu circulées, alors que les liants synthétiques non colorés peuvent également être utilisés sur des voiries urbaines au trafic dense, mais léger. Les liants synthétiques incolores auxquels des polymères ont été ajoutés sont de surcroît aussi adaptés aux voiries urbaines au trafic lourd et peu dense. Les liants végétaux disponibles à ce jour sont souvent caractérisés par une viscosité très basse et sont dès lors appliqués sur des routes peu circulées et qui le sont par un trafic léger ou en environnement urbain comme dans des zones piétonnes.

2.3 Pigments

La nature (§ 2.3.1 *Nature de pigments et coloris*), la forme de conditionnement (§ 2.3.2 *Types de conditionnement*), le dosage (§ 2.3.3 *Dosages en pigments*) et les propriétés des pigments (§ 2.3.4 *Autres propriétés*) destinés à l'élaboration d'un revêtement bitumineux coloré, se révèlent d'une grande importance pour en assurer sa durabilité et l'évolution favorable de ses nuances dans le temps. Il existe, en effet, de nombreux pigments sur le marché mais seule une partie limitée de ces matériaux est conforme et adaptée à la fabrication d'enrobés bitumineux colorés.

2.3.1 Nature des pigments et coloris

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 [12]:

- aux températures de fabrication et de mise en œuvre des enrobés;
- 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 (§ 2.3.3 *Dosages en pigments*) 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 de revêtements bitumineux colorés [13]. Ces matériaux pigmen-

taires sont disponibles dans une large gamme de coloris (tableau 1) et ils peuvent être utilisés séparément ou en mélange pour fabriquer des revêtements bitumineux colorés de tonalités variées et durables. Ces pigments doivent être conformes à la norme NBN EN 12878. Sur base de cette norme, les producteurs de pigments contrôlent leur production en usine pour évaluer, en termes de couleur, la conformité de leur produit (§ 6. Détermination de la couleur).

Couleur	Formule chimique	Dénomination	Terme d'usage courant
Rouge	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Hématite	Oxyde de fer rouge
Brun ⁵	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Maghémite	Oxyde de fer brun
Jaune	$\alpha\text{-FeOOH}$	Goethite	Oxyde de fer jaune
Noir	Fe_3O_4	Magnétite	Oxyde de fer noir
Blanc	TiO_2	Oxyde de titane type anatase Oxyde de titane type rutile	Dioxyde de titane
Bleu	$\text{CoO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	Aluminate de cobalt	Bleu de cobalt
Vert	$\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$	Oxyde de chrome	Vert d'oxyde de chrome

Tableau 1 – Couleurs disponibles⁶ des pigments minéraux [14]

Le tableau 1 résume les sept coloris de pigments minéraux principalement utilisés pour la fabrication d'enrobés bitumineux colorés (figure 3):

- les pigments rouge, jaune, brun et noir à base d'oxydes de fer;
- les pigments blancs de type dioxyde de titane: ils sont utilisés pour stabiliser la couleur des mélanges bitumineux [15, 16] ou l'éclaircir ou pour réaliser des revêtements de couleur beige, grise ou blanche. Le dioxyde de titane existe sous deux formes cristallines principales [17], produites à l'échelle industrielle, il s'agit de l'anatase et du rutile⁷. Pour la fabrication de revêtements bitumineux colorés:



Figure 3 – Exemples de pigments minéraux (sous forme de poudre) utilisables pour la fabrication d'enrobés bitumineux colorés

- il est conseillé d'utiliser la forme cristalline rutile⁸ car elle se révèle plus stable et plus résistante aux intempéries et elle présente un meilleur pouvoir colorant et couvrant;

⁵ Il existe également des pigments «bruns» qui sont en fait un mélange de $\alpha\text{-FeOOH}$ et/ou $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ avec Fe_3O_4 .

⁶ Il existe également des mélanges de pigments, ceux-ci peuvent être par exemple de couleur beige, grise, etc.

⁷ La forme rutile est obtenue en chauffant la forme anatase (dans des conditions normales) au-delà des 700 °C.

⁸ Au niveau visuel, le rutile peut s'avérer plus jaunâtre que l'anatase.

Les enrobés bitumineux colorés

Recommandations pratiques pour le choix des matériaux, la conception et la mise en œuvre – Détermination objective de leur couleur

- il est déconseillé d'utiliser la forme cristalline anatase. En effet, par ses propriétés photocatalytiques, elle pourrait catalyser la dégradation du liant sous l'action de la lumière (rayonnement ultraviolet);
- le pigment bleu: ce coloris est un des plus chers du marché et le revêtement coloré fabriqué à l'aide de ce pigment nécessite une patine de trois mois en moyenne pour atteindre la couleur finale désirée (au début il est très foncé, à la limite du noir, et il s'éclaircira progressivement);
- le pigment vert: une des spécificités du vert est qu'il se perçoit très distinctement mais il s'agit d'une couleur qui coûte relativement cher.

2.3.2 Types de conditionnement

A l'heure actuelle, les pigments sont commercialisés et conditionnés sous la forme:

- **de poudre en vrac.** Ce conditionnement est très peu utilisé pour une question de santé et de sécurité des utilisateurs (l'insertion manuelle de pigment directement dans le malaxeur produit beaucoup de poussières pulvérulentes);
- **de poudre dans des sacs thermofusibles.** Ces sacs sont généralement en polyéthylène (température de fusion autour de 130-140 °C). Ceux-ci sont introduits tels quels dans le malaxeur. Comparativement aux poudres en vrac, le dosage est plus précis et plus aisé et le dégagement de poussière est relativement faible mais l'entrepreneur devra s'assurer que la température requise pour la fusion des sacs est compatible avec la température de fabrication de l'enrobé bitumineux coloré;
- **de pâtes pigmentaires.** Le pigment est dispersé dans un milieu compatible avec le liant et le mélange obtenu est ensuite inséré dans un sac thermofusible. Ce mode de conditionnement ne semble pas être utilisé en Belgique;
- **de granules enrobées de polymère** (p.ex. copolymère éthylène-acétate de vinyle - EVA) (figure 4). Elles peuvent être conditionnées en vrac ou en sacs thermofusibles. Ces granules présentent des avantages pratiques tels un dosage plus précis, une réduction du taux de pigment à incorporer (le pouvoir colorant des granules étant supérieur à celui des poudres - § 2.3.4.2 *Pouvoir colorant relatif*) et un moindre nettoyage ultérieur du malaxeur. Toutefois, ce conditionnement est actuellement plus coûteux que les pigments en poudre (conditionnés ou non en sacs thermofusibles) et il requiert une température minimale de malaxage pour que la dispersion au sein du mélange soit optimale. L'utilisation de ces granules nécessite donc certaines adaptations lors de la fabrication d'enrobés bitumineux colorés (§ 4. *Fabrication en centrale*).



Figure 4 – Exemples de pigments minéraux (sous forme de granules enrobées de polymère) utilisables pour la fabrication d'enrobés bitumineux colorés

Au moment de la rédaction de ce dossier, les pigments sous forme de poudre dans des sacs thermofusibles sont les plus couramment employés en Belgique.

2.3.3 Dosages en pigments

Les dosages en pigments sont choisis en fonction de la couleur souhaitée, de la teinte des granulats (§ 2.1.1 *Couleur*), de la nature des liants utilisés (§ 2.2 *Liants*) et du type de conditionnement de ces matériaux pigmentaires (§ 2.3.2 *Types de conditionnement*). Les pourcentages annoncés ci-dessous, sont, dès lors, donnés à titre indicatif.

- Dans le cas des pigments conditionnés sous forme de poudre dans des sacs thermofusibles, leur teneur est généralement fonction du type de liant utilisé.
 - Lors de l'utilisation d'un **bitume noir classique ou d'un bitume pigmentable**, seul un enrobé de couleur rouge est envisageable. Il est généralement recommandé d'utiliser 3 à 4 % de pigments d'oxyde de fer rouge.
 - Lors de l'utilisation de **liants clairs**:
 - le taux de pigment nécessaire se situe généralement entre 1 et 2 %. Si l'on souhaite éclaircir la couleur du revêtement, une quantité minimale de dioxyde de titane (pigment blanc de type rutile) de 0,5 % est ajoutée au pigment de couleur;
 - pour la fabrication des enrobés colorés «bruts de pierre», c'est-à-dire des enrobés dont la teinte est celle de ses matériaux granulaires, il est généralement conseillé d'ajouter 1 % de dioxyde de titane (pigment blanc de type rutile), pour mettre en valeur la couleur naturelle du granulats.
- Dans le cas des pigments conditionnés sous forme de granules enrobées de polymère, leur plus haut pouvoir colorant permet d'en réduire le taux d'incorporation dans un enrobé bitumineux coloré.

Le type et la quantité de pigment utilisé dans l'enrobé bitumineux coloré ont également un impact sur le pouvoir rigidifiant du mastic (§ 3.2 *Etude de formulation*).

2.3.4 Autres propriétés

Les propriétés des pigments utilisés sont d'une importance capitale pour la qualité du produit fini. Elles doivent être en conformité avec les cahiers des charges régionaux et par conséquent, conformes aux spécifications décrites dans la NBN EN 12878. Certaines de ces caractéristiques sont particulièrement cruciales et conditionnent les propriétés finales des revêtements bitumineux colorés. Il s'agit de la granulométrie, du pouvoir colorant relatif et de la thermostabilité du pigment.

Les enrobés bitumineux colorés

Recommandations pratiques pour le choix des matériaux, la conception et la mise en œuvre – Détermination objective de leur couleur

2.3.4.1 Granulométrie

La teinte finale d'un revêtement coloré dépend de la qualité de la dispersion du pigment dans le mélange bitumineux. La coloration est d'autant plus réussie, du point de vue de son intensité et de sa régularité, que la distribution du pigment dans le mélange est homogène. Cette aptitude à la dispersion sera principalement fonction de la finesse de broyage des pigments et par conséquent de sa granulométrie. Celle-ci peut être analysée via la méthode décrite dans la norme ISO 787-7.

- Pour les oxydes de fer (rouge, jaune, brun et noir), trois grades sont spécifiés (tableau 2) dans la norme NBN EN ISO 1248 selon le refus sur tamis obtenu à l'analyse.

Caractéristique	Grade 1	Grade 2	Grade 3
Refus sur tamis (45 µm), % en masse	<i>Rouge, jaune, brun, noir</i>		
	≤ 0,01	> 0,01 et ≤ 0,1	> 0,1 et ≤ 1

Tableau 2 – Grades des pigments à base d'oxydes de fer (rouge, jaune, brun et noir)

- Pour les oxydes de titane, selon la NBN EN ISO 591-1, le résidu sur tamis est de maximum 0,1 % pour les différentes classes des deux formes cristallines.

2.3.4.2 Pouvoir colorant relatif

Le pouvoir colorant relatif des pigments peut être analysé via la méthode décrite dans la norme NBN EN 12878. A l'œil nu, il est difficile de distinguer un pigment à fort ou faible pouvoir colorant relatif mais une différence peut exister et impliquer des variations de couleur lors de la fabrication des enrobés colorés. Cette propriété - fonction principalement de la nature et de la granulométrie des pigments - est très importante car elle conditionnera d'une part l'intensité/la tenue de la coloration et d'autre part, le taux en pigment du revêtement bitumineux coloré à formuler. En effet, plus la taille des particules de pigments est fine, plus grande est leur surface spécifique. On peut dès lors en additionner une quantité moindre pour obtenir la couleur désirée.

2.3.4.3 Thermostabilité

La thermostabilité du pigment est une autre caractéristique importante à ne pas négliger lors de la fabrication et de la mise en œuvre des revêtements colorés, en particulier dans le cas des teintes nécessitant l'utilisation de pigments jaune ou noir typiquement utilisés pour des revêtements colorés beiges, ocres ou gris.

En effet, la stabilité des pigments de type oxydes de fer jaune et noir n'est plus garantie à partir de 180°C car ils se transforment d'une façon irréversible en oxydes de fer rouge [18]. Cela entraînera des changements de couleur au niveau de l'enrobé. Il convient dès lors, d'être très attentif lorsque la température de fabrication s'approche de 180 °C, voire la dépasse, ou lorsque des

contacts directs ont lieu entre le pigment et des granulats chauffés à des températures supérieures à 180 °C pendant la production. Il existe des pigments jaunes à base de chrome, de cadmium ou de benzidine qui peuvent tenir à ces températures élevées, mais les deux premiers contiennent des éléments dangereux pour la santé et le troisième est considéré comme cancérigène.

De plus, certains pigments tels que l'oxyde de fer jaune présentent également un changement de couleur réversible aux températures élevées. Il est donc recommandé de n'évaluer le résultat final d'un enrobé coloré qu'après refroidissement complet du revêtement à température ambiante (p. ex. le jour suivant la pose).

Les autres pigments, tels l'oxyde de fer rouge, l'oxyde de chrome vert et les pigments à phase mixte (ferrite de manganèse ou ferrite de zinc) font quant à eux preuve d'une excellente stabilité à la chaleur pour des températures de production supérieures à 180 °C.

Un document disponible au CRR récapitule les producteurs et fournisseurs belges et étrangers qui commercialisent des pigments destinés à la fabrication des enrobés bitumineux colorés. Cette liste ne se veut pas exhaustive. Elle a pour seul objectif de pouvoir aider/guider les entrepreneurs dans la sélection des pigments.

Les enrobés bitumineux colorés

Recommandations pratiques pour le choix des matériaux, la conception et la mise en œuvre – Détermination objective de leur couleur

► 3. Formulation de l'enrobé

3.1 Choix du type d'enrobé et exigences

Les mêmes recommandations s'appliquent aux couches de roulement colorées et aux couches de roulement non colorées (CRR R78/06) [1], à la seule nuance près que les caractéristiques esthétiques et l'ouvrabilité pèsent plus lourd dans le processus de choix.

Ce sont les enrobés qui présentent une texture fine en surface qui donnent le plus beau résultat. C'est le cas des enrobés fermés à squelette sableux dont le calibre maximal est peu élevé, habituellement 6,3 mm et au maximum 10 mm. Le calibre limite en outre l'épaisseur de la couche, ce qui, vu le prix de revient relativement élevé des enrobés colorés, est également un facteur de décision important. Un enrobé facile à mettre en œuvre montre, par ailleurs, un aspect plus uni dans des zones où l'on est obligé de passer d'une mise en œuvre mécanique à une mise en œuvre manuelle. Dans le cas des enrobés colorés, une bonne maniabilité est extrêmement importante, sans quoi ces changements de mode de mise en œuvre sont davantage perceptibles visuellement.

Pour les raisons susmentionnées, la plupart des couches de roulement colorées en Belgique destinées à des routes avec peu de trafic et du trafic léger sont réalisées en béton bitumineux (AC). Ces mélanges offrent l'avantage d'être faciles à mettre en œuvre et à compacter et ont en outre une texture de surface uniforme, qui met en valeur la couleur.

Pour les routes soumises à un trafic plus lourd, on recourt parfois en Wallonie au béton bitumineux très mince (BBTM). Le cahier des charges type Qualiroutes spécifie deux familles qui se distinguent au niveau de la teneur en mastic et de la nature du bitume: la première est riche en mastic et utilise du bitume routier (BBTM6A1 et BBTM10C1); l'autre est plutôt pauvre en mastic et contient obligatoirement du bitume polymère (BBTM6B2 et BBTM10D2). Les bétons bitumineux grenus à forte teneur en mastic (SMA) ne sont que peu, voire pas, appliqués dans la pratique comme couche de roulement colorée. Lors du choix pour le BBTM ou le SMA comme couche de roulement colorée, il convient de prendre en compte les considérations suivantes:

- ces enrobés sont caractérisés par un squelette pierreux et ne sont dès lors pas recommandés pour des applications exigeant une mise en œuvre manuelle;
- la couleur est, dans une large mesure, déterminée par la couleur des granulats, surtout après l'usure du film de mastic, ce qui laisse moins de liberté pour le choix de la couleur;
- le prix de revient sera relativement élevé en raison de la teneur plus élevée en liant combinée au prix de revient élevé des liants et au dosage plus élevé des pigments. Vu que la couleur du mastic est déterminante pour la couleur de l'enrobé, il faut, en effet, adapter la quantité de pigment proportionnellement à la quantité de filler dans le mastic pour atteindre une intensité de couleur similaire.

Une étude préliminaire, sur base des essais performantiels énumérés ci-après, permet de vérifier si un enrobé satisfait aux exigences posées dans les cahiers des charges types:

- l'essai de compactage giratoire (NBN EN 12697-32) permet d'évaluer le pourcentage de vides de l'enrobé. Celui-ci doit satisfaire aux exigences imposées. Pour les enrobés colorés, on penchera plutôt pour un enrobé facile à compacter avec un pourcentage de vides proche de la limite inférieure des exigences;
- l'essai de sensibilité à l'eau (NBN EN 12697-12) mesure la résistance en traction indirecte de carottes conditionnées dans l'eau et de carottes non conditionnées. Les exigences pour la sensibilité à l'eau sont basées sur le rapport de ces deux résistances. Pour des couches de roulement, on impose une exigence stricte de 80 % au minimum, quelle que soit la catégorie de route, à quelques exceptions près:
 - pour le AB-4 (C, D) et le AB-5 (D) selon le SB250, version 2.2: minimum 70 %;
 - pour le BBTM selon le CCT Qualiroutes, version 2012: minimum 75 %;
- un essai d'orniérage (NBN EN 12697-22) n'est exigé que pour des routes à trafic lourd (B1-B5 en Flandre et à Bruxelles, Réseaux I et II en Wallonie). Le tableau 3 présente un récapitulatif des exigences en fonction de la catégorie de route et montre les types d'enrobé qui entrent en ligne de compte comme couche de roulement colorée.

Catégorie de route	Cahier des charges type	Profondeur d'orniérage maximale PLD (%) après 30 000 cycles à 50 °C	Enrobés pour couches de roulement colorées
B1-B2	SB250, v2.2; CCT2011	5,0 %	SMA
Réseau I (T>6000)	CCT Qualiroutes, v2012	5,0% 7,5 %	SMA, BBTM10 BBTM6,3
B3	SB250, v2.2; CCT2011	7,5 %	SMA
Réseau I (2000 ≤ T ≤ 6000)	CCT Qualiroutes, v2012	7,5 %	SMA, BBTM
B4-B5	SB250, v2.2; CCT2011	10,0 %	AB-4, SMA
Réseau I (T<2000) et II	CCT Qualiroutes, v2012	10,0 %	AC-surf4, SMA, BBTM
B6-B7 et autres	SB250, v2.2; CCT2011	Pas d'exigences	AB-4, AB-5
Réseau III	CCT Qualiroutes, v2012	Pas d'exigences	AC-surf4, SMA, BBTM

Tableau 3 – Récapitulatif des exigences en matière d'orniérage en Belgique et des choix possibles pour les couches de roulement colorées

Les enrobés bitumineux colorés

Recommandations pratiques pour le choix des matériaux, la conception et la mise en œuvre – Détermination objective de leur couleur

Vu qu'une couche de roulement colorée doit résister aux mêmes conditions de charge qu'une couche de roulement non colorée pour une même catégorie de route, il va de soi que les conditions de l'essai d'orniérage doivent être identiques. Les jours chauds d'été, les températures dans une couche de roulement de couleur claire monteront cependant moins haut que dans une couche de roulement noire. Des mesures in situ sur le ring de Paris ont démontré que cette différence pouvait atteindre environ 5 °C, en fonction de la couleur [19]. Par conséquent, on peut considérer les résultats d'essai pour les enrobés bitumineux colorés comme conservatifs quand on maintient la température d'essai de 50 °C.

En plus de la sensibilité à l'eau et à l'orniérage, d'autres caractéristiques sont importantes pour la durabilité d'une couche de roulement colorée:

- résistance au plumage: on applique souvent des couches de roulement colorées aux carrefours dans le but de clarifier la situation. Celles-ci sont dès lors exposées à des forces de cisaillement importantes en raison de freinages, accélérations et virages des véhicules. Ces forces augmentent le risque de plumage;
- résistance à la fissuration à basse température: les couches de roulement sont celles qui sont soumises aux températures les plus basses pendant les hivers rudes. En combinaison avec un liant au comportement cassant à basse température, des fissures apparaissent dans l'enrobé;
- résistance à l'indentation statique: sur les places et parkings, on retrouve souvent des charges ponctuelles statiques. Celles-ci peuvent donner lieu à une indentation en période chaude. Bien que l'amplitude de l'indentation soit limitée, l'impact sur le plan esthétique est souvent très important.

Il n'existe pas encore d'essais normalisés pour ces caractéristiques à l'heure actuelle. L'organisation et la validation d'essais performantiels et la recherche d'exigences adaptées est l'une des tâches principales du CRR dans le cadre du projet subventionné par le NBN.

3.2 Etude de formulation

L'approche la plus utilisée pour la formulation des enrobés est de partir d'une formulation connue d'une couche de roulement non colorée, dans laquelle on remplace le liant par un liant pigmentable ou incolore et, le cas échéant, les granulats par des granulats de couleur. Comme filler d'apport (vu son influence sur la couleur du revêtement), on choisit de préférence un filler de couleur claire, comme du filler calcaire blanc; ce qui met davantage en valeur les pigments colorés. L'ajout de filler de récupération est à déconseiller vu son impact sur la couleur suite à la formation possible de suie noire dans le cas de l'utilisation d'un brûleur au fuel lors de la production. Une partie du filler d'apport est remplacée par du pigment qui, parce qu'il est sous forme de poudre fine, est, à la première approche, considéré comme un filler. Pour un bon dosage du pigment, référez-vous au § 2.3.3 *Dosages en pigments*.

Il importe toutefois de souligner qu'un pigment n'est pas un filler. Les caractéristiques physiques des pigments colorés sont à ce point différentes de celles d'un filler d'apport classique, que le remplacement d'une partie du filler d'apport par un pigment coloré a des implications sur la composition volumétrique et sur la rigidité du mastic de l'enrobé.

Si l'on connaît les caractéristiques du pigment (densité, granularité et vides selon Rigden) et le cas échéant aussi celles des granulats de couleur, il est possible d'en calculer l'impact à l'aide du logiciel PradoWin développé au CRR pour l'étude de la formulation théorique des mélanges bitumineux (code de bonne pratique CRR R69/97) [20]. PradoWin n'est pas conçu pour l'encodage de plus d'un filler d'apport. Pour un enrobé avec pigment, on résout cela en appliquant la méthode suivante: on détermine les caractéristiques d'un filler composé du filler d'apport et des pigments dans les bonnes proportions et on encode ces caractéristiques comme caractéristiques d'un «filler recomposé».

Le tableau 4 montre comme exemple la composition d'un béton bitumineux (type de mélange AC-6,3Surf4-x) avec 6,5 % de filler calcaire (en % m par rapport à la masse du mélange sec). La colonne de droite montre la composition d'un enrobé coloré obtenue par remplacement du filler calcaire par une masse totale identique de pigment jaune, pigment blanc et filler calcaire blanc. Pour encoder cet enrobé coloré dans PradoWin, on utilise les caractéristiques théoriques d'un filler comprenant le filler calcaire blanc, le pigment jaune et le pigment blanc, et ce, dans le rapport des masses 4,0/0,5/2,0. Le tableau 5 (p. 22) présente la granularité, la densité et le pourcentage de vides du «filler recomposé».

L'impact du remplacement du filler d'apport par des pigments en masses identiques sur la composition volumétrique est illustré à l'aide de l'exemple ci-dessus. Le tableau 6 (p. 22) montre les granularités déterminées à l'aide de PradoWin. En masse, il n'y a que peu de différence avec l'enrobé de référence. Il n'y a qu'une légère augmentation du passant à 63 µm, vu que les pigments présentent 100 % de passant à ce tamis. En volume, le passant diminue clairement sur les tamis les plus fins, suite à la densité plus élevée des pigments comparativement à celle du filler calcaire.

Composant	Densité (g/cm ³)	Composition de mélange sec en pourcentage de masse (% m)	
		Enrobé de référence	Enrobé coloré
Porphyre 2/6,3	2,67	60,0	60,0
Porphyre 0/2	2,66	20,1	20,1
Sable fin 0/1	2,63	13,4	13,4
Filler calcaire	2,73	6,5	/
Filler calcaire blanc	2,74	/	4,0
Pigment jaune	4,09	/	0,5
Pigment blanc	4,30	/	2,0

Tableau 4 – Enrobé de référence type AC-6,3Surf4-x et enrobé coloré dérivé

Les enrobés bitumineux colorés

Recommandations pratiques pour le choix des matériaux, la conception et la mise en œuvre – Détermination objective de leur couleur

	Filler calcaire blanc	Pigment blanc	Pigment jaune	«Filler recomposé»
% m dans l'enrobé	4,0%	2,0%	0,5%	
% m dans le filler composé	61,5%	30,8%	7,7%	
Passant (en % m)	2 mm	100	100	100
	0,125 mm	100	100	100
	0,063 mm	93	100	95,7
Densité (g/cm ³)	2,74	4,30	4,09	3,18
Vides Rigden (%)	35	52	78	43,5*

Tableau 5 – Caractéristiques du «filler recomposé»

* La teneur en vides du «filler recomposé» est calculée comme la moyenne pondérée, ce qui n'est théoriquement pas correct, mais donne tout de même une estimation raisonnable.

Ouverture des mailles (mm)	Passant au tamis (% en masse)		Passant au tamis (% en volume)	
	Enrobé de référence	Enrobé coloré	Enrobé de référence	Enrobé coloré
10	100	100	100	100
6,3	98	98	98	98
4	72,5	72,5	72,5	72,3
2	43,3	43,3	43,4	42,9
0,5	27,7	27,6	27,6	26,9
0,25	23	23	22,9	22,2
0,063	7,3	7,5	7,1	6,5

Tableau 6 – Granularités théoriques (calculées à l'aide du logiciel PradoWin)

Les pigments ont non seulement un impact sur la granularité, mais également sur la rigidité du mastic. Ceci est illustré par le tableau 7 où, pour un certain nombre de pigments colorés, la valeur mesurée de «delta Anneau & Bille» est donnée. L'augmentation de la température de ramollissement Anneau & Bille est la conséquence de l'ajout d'un filler à un bitume et elle est utilisée comme mesure du pouvoir rigidifiant du filler. Pour ces mesures, il a fallu s'écarter de la procédure d'essai standard (NBN 13179-1). Le rapport filler/liant (f/l), comme prescrit dans la norme, n'a pas pu être respecté en raison du pouvoir rigidifiant extrêmement élevé. Une deuxième déviation concerne l'utilisation d'un liant synthétique incolore pour les essais à la place d'un bitume routier standard. Les résultats montrent pourtant clairement qu'un ajout très faible de pigment, dans le rapport de volume 10/90, a un effet rigidifiant du même ordre que l'ajout d'un filler calcaire dans le rapport de volume 35/65. Le filler calcaire blanc montre, dans cette étude, des caractéristiques équivalentes au filler calcaire ordinaire. Notez aussi dans ce tableau que, pour les pigments colorés, le «delta A&B» mesuré montre un lien avec la teneur en vides, par analogie avec les fillers classiques.

	Rapport de volume filler/liant (f/l)	Vides selon Rigden (%)	Delta A&B (°C)
Pigment jaune	0,11	78	13,8
Pigment blanc	0,11	52	8,2
Pigment rouge	0,11	62	10,1
Filler calcaire	0,54	35	12,2
Filler calcaire blanc	0,54	35	13,6

Tableau 7 – Pouvoir rigidifiant des pigments colorés, en comparaison avec le filler calcaire

On peut donc conclure que le remplacement en masse du filler d'apport ordinaire par du pigment donne lieu, d'une part, à une diminution des particules fines en volume dans le mélange sec et, d'autre part, à une augmentation du pouvoir rigidifiant des particules fines dans le mélange en raison du pouvoir rigidifiant puissant du pigment. Ces deux changements ont un effet opposé sur la rigidité du mastic. Elles vont donc se compenser partiellement, et l'on peut donc supposer que l'impact sur la rigidité du mastic restera plus ou moins limité. Le remplacement en masse de filler d'apport par du pigment est donc un bon point de départ pour la formulation qui peut par la suite encore être optimisée.

Si l'enrobé contient des granulats de couleur, on peut aussi partir d'une formulation connue d'un enrobé non coloré. Les pourcentages de masse de différentes fractions de granulats seront alors adaptés de telle sorte que la granularité en volume reste la même.

Les enrobés bitumineux colorés

Recommandations pratiques pour le choix des matériaux, la conception et la mise en œuvre – Détermination objective de leur couleur

3.3 Essais performantiels

Les essais performantiels permettent de confronter les performances aux exigences des cahiers des charges types. Pour les couches de roulement colorées, le liant, ainsi que le pigment et les granulats de couleur, ont un impact important sur les performances, comme le démontrent différents essais réalisés au CRR.

La sensibilité à l'eau, telle que déterminée selon la méthode d'essai décrite dans la NBN EN 12697-12, est en grande mesure influencée par le choix du liant. Le tableau 8 présente les résultats de l'essai de sensibilité à l'eau pour cinq enrobés, dont quatre colorés. Il s'agit des enrobés dont la composition des granulats est donnée au tableau 4. La teneur en liant est la même pour tous les enrobés (5,9 %). Les liants sont sélectionnés parmi différentes familles: un bitume pigmentable, un liant végétal, un liant synthétique et un liant synthétique modifié au polymère. Ces liants n'appartiennent pas nécessairement à la même classe de pénétrabilité. Le tableau 8 présente les résultats pour les liants choisis. L'influence du liant semble grande et certains liants engendrent une plus grande sensibilité à l'eau de l'enrobé: les deux derniers enrobés satisfont tout juste à l'exigence en Flandre pour ce type de mélange (> 70 %), mais ne satisfont par contre plus à l'exigence plus sévère imposée en Wallonie et à Bruxelles (> 80 %).

	Type de liant	Carottes non conditionnées		Carottes conditionnées		Rapport ITS*** (%)
		ITS** (MPa)	Vides (%)	ITS** (MPa)	Vides (%)	
Référence (noir)	B50/70	1,55	7,7	1,56	7,6	101
Coloré	Synthétique 70/100	1,39	7,3	1,31	7,1	94
Coloré	Synthétique modifié 50/70	1,30	7,7	1,28	7,6	98
Coloré	Pigmentable 50/70	1,98	8,7	1,38	8,5	70
Coloré	Végétal 100/150*	2,10	7,5	1,57	7,3	74

Tableau 8 – Impact du liant sur la sensibilité à l'eau

* gamme annoncée sur la fiche technique

** ITS: Indirect Tensile Strength (résistance à la traction indirecte)

*** Rapport ITS: $\frac{ITS \text{ (carottes conditionnées dans l'eau)}}{ITS \text{ (carottes non conditionnées)}}$

Selon certaines études, la présence de pigment aurait une influence sur l'adhésivité liant/granat et donc aussi sur la sensibilité à l'eau de l'enrobé. Certains granulats de couleur présentent aussi une moins bonne adhésivité vis-à-vis de certains liants. Lorsque l'adhésivité entre granulats et liant semble problématique, l'utilisation de dopes d'adhésivité est une solution envisageable.

En raison de ces différents facteurs d'influence et de l'impact important de la sensibilité à l'eau sur la durabilité, quelle que soit la catégorie de route, il est fortement recommandé de toujours réaliser un essai de sensibilité à l'eau.

L'essai d'orniérage (NBN EN 12697-22) est uniquement exigé pour des routes soumises à un trafic lourd. Comme illustré par les résultats de mesure à la figure 5, la susceptibilité à l'orniérage est aussi déterminée dans une large mesure par le liant. Le graphique montre les résultats de l'essai d'orniérage à 50 °C pour les cinq enrobés précités, dont quatre colorés. Le liant végétal utilisé présente peu de résistance à l'orniérage. Ce résultat peut s'expliquer partiellement par la période de maturation plus lente généralement observée pour ce type de liant et également par la température de ramollissement du liant relativement faible (42 °C). En effet, les résultats d'orniérage dépendent aussi de la classe du liant étudié. Le bitume pigmentable de classe 50/70 réalise de moins bonnes performances que l'enrobé de référence noir, ce qui s'explique par une teneur plus basse en asphaltènes. Le liant synthétique modifié au polymère étudié (classe 50/70) offre quant à lui une bonne solution dans le cas d'un trafic plus lourd.

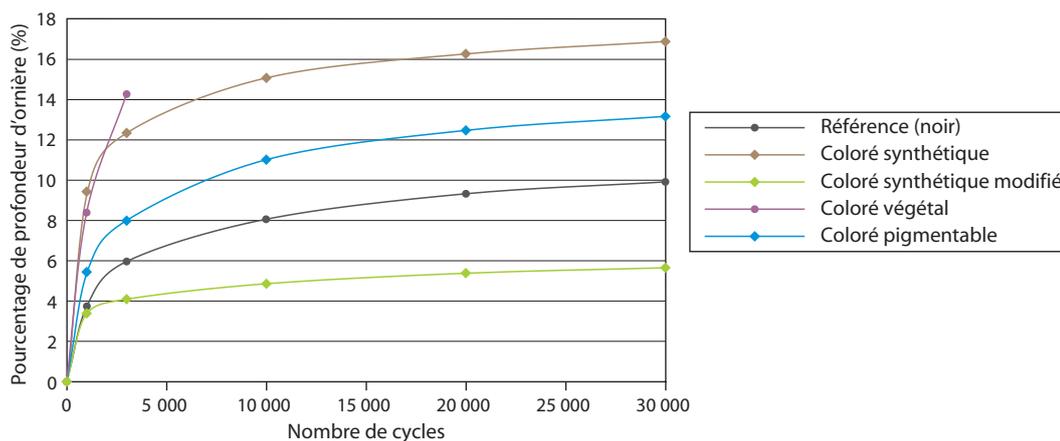


Figure 5 – Impact du liant sur la profondeur d'ornière dans l'essai d'orniérage (à 50 °C)

Les pigments influencent aussi la résistance à l'orniérage, via leur impact sur la rigidité du mastic. L'utilisation de granulats de couleur peut également influencer la susceptibilité à l'orniérage en raison de l'angularité des granulats ou de différences dans la granularité du mélange. On peut donc à nouveau conclure que plusieurs facteurs sont susceptibles d'influencer le résultat de l'essai d'orniérage.

La discussion qui précède démontre l'importance des essais en laboratoire pour déterminer les caractéristiques et les performances de l'enrobé dans la phase de la formulation. Il est, dans ce cadre, essentiel de confectionner les enrobés avec les constituants réels. La modification d'un ou plusieurs constituants (y compris la classe du liant) peut, en effet, avoir un impact significatif sur les résultats.

Les enrobés bitumineux colorés

Recommandations pratiques pour le choix des matériaux, la conception et la mise en œuvre – Détermination objective de leur couleur

La formulation des enrobés d'un point de vue pratique

- **Détermination des caractéristiques des constituants nécessaires pour la formulation théorique** (voir CRR R69/97) [20].
Pour les pigments, on déterminera la densité, les vides selon Rigden et la granularité, soit via les fiches techniques, soit via des essais (§ 2. Constituants).
- **L'étude de formulation théorique** (p. ex. à l'aide de PradoWin).
Si possible, on part d'une formulation connue, dans laquelle une partie du filler d'apport est remplacée par du pigment en masse identique et, le cas échéant, les granulats par des granulats de couleur. Le remplacement par du pigment en masse identique engendre une modification de la granularité volumétrique et une diminution du rapport filler/liant en volume, mais l'impact sur la rigidité du mastic est en partie compensé par l'effet rigidifiant puissant du pigment coloré. Si nécessaire, la composition est rectifiée en vue d'obtenir les performances souhaitées.
- **Détermination et optimisation de la teneur en vides à l'aide de l'essai giratoire.**
Vu l'importance d'une texture de surface uniforme et d'une bonne ouvrabilité, on tendra simplement vers une faible teneur en vides, conformément, bien entendu, aux spécifications des cahiers des charges. Il est possible d'y parvenir en augmentant la teneur en liant, en augmentant la part de sables ronds, en ajustant la granularité ou en combinant plusieurs adaptations.
- **Réalisation d'essais performantiels.**
En raison de la problématique d'adhésivité possible avec certains granulats de couleur et de l'impact que peuvent avoir la nature du liant et du pigment sur ce point, il est recommandé de procéder à un essai de sensibilité à l'eau pour toutes les applications, quelle que soit la charge de trafic. Pour des routes soumises à un trafic plus lourd, l'essai d'orniérage est essentiel, comme prescrit dans les cahiers des charges.

Notez que procéder de la sorte permettra d'assurer au mieux les performances mécaniques de l'enrobé bitumineux coloré mais ne garantira pas, par exemple, une bonne tenue de la couleur dans le temps.

► 4. Fabrication en centrale

Pour fabriquer des enrobés de la couleur souhaitée, des adaptations au niveau de la centrale sont souhaitables tout comme un nettoyage minutieux de toutes les parties communes à la fabrication des enrobés bitumineux noirs.

Ainsi, la centrale devrait être équipée de cuves à liant propres au liant clair et d'un circuit d'alimentation distinct de celui du bitume traditionnel noir, pour éviter toute pollution du liant clair par des résidus du bitume noir et empêcher dès lors que ce bitume noir ne ternisse la couleur de l'enrobé. Si cela n'est pas possible, il est recommandé d'approvisionner le malaxeur en liant clair à partir d'un camion d'approvisionnement.

Le malaxeur servant également à la fabrication d'enrobés bitumineux classiques devra également être nettoyé tout comme le silo de stockage destiné à l'enrobé coloré. Ainsi, il y aura lieu de malaxer plusieurs gâchées de granulats secs (sans liant) et très chauds. Cela servira d'une part à nettoyer le malaxeur et d'autre part à nettoyer le silo de stockage et les lignes entre le malaxeur et celui-ci. Une autre possibilité est de fabriquer une première gâchée en enrobé coloré qui ne sera pas utilisée pour le revêtement de surface coloré. Lors de la fabrication des bruts de pierres et des enrobés de couleur claire pour lesquels on utilise un filler blanc, il est très important de nettoyer la ligne d'approvisionnement en filler sans quoi la couleur de l'enrobé sera ternie.

En outre, le silo de stockage utilisé sera préférentiellement dédié à un type de couleur d'enrobés colorés. Toutefois cela étant rarement possible, il est recommandé soit de le vider gâchée par gâchée, soit de ne le remplir au maximum qu'aux deux tiers car la partie supérieure d'un silo est difficilement nettoyable et du liant noir des précédents mélanges risque alors de contaminer l'enrobé coloré stocké.

De préférence, la centrale sera exclusivement réservée pour le chantier sur toute la durée de celui-ci. Si ce n'est pas le cas, la phase de nettoyage sera renouvelée avant tout redémarrage de la fabrication des enrobés colorés.

Une attention toute particulière doit également être portée:

- à la température de fabrication de l'enrobé. Celle-ci doit être choisie afin de:
 - dépasser la **température minimale imposée par le conditionnement du liant**, afin d'assurer par exemple, la fonte des sacs thermofusibles;
 - respecter la **température maximale d'utilisation du liant** choisi sous peine de dégradation de celui-ci;
 - dépasser la **température minimale imposée par le conditionnement du pigment** dans le but d'assurer la fonte complète des sacs thermofusibles dans le cas de pigments en poudre conditionnés en sacs ou de permettre la dispersion des pigments conditionnés sous forme de granules enrobées de polymère au sein du mélange;
 - rester sous la **température maximale recommandée pour les pigments thermosensibles** (§ 2.3.4.3 *Thermostabilité*) sous peine de modification de la couleur;

Les enrobés bitumineux colorés

Recommandations pratiques pour le choix des matériaux, la conception et la mise en œuvre – Détermination objective de leur couleur

- au respect de **l'ordre d'introduction des différents composants** et aux adaptations du **temps de malaxage** en fonction de la forme sous laquelle est introduit le pigment (nous vous invitons à suivre les recommandations du fournisseur). Par rapport à un enrobé classique noir⁹, le temps de mélange est généralement augmenté de 5 à 10 secondes lorsque l'on utilise des pigments en poudres conditionnés en sacs thermofusibles. Dans le cas de l'utilisation de pigments conditionnés sous forme de granules enrobées de polymère, le temps de malaxage doit généralement être prolongé de 10 à 40 secondes pour permettre la fusion complète et homogène des granules. Cela correspond à un temps de malaxage compris entre 30 et 60 secondes à fixer selon la performance des équipements;
- à la **propreté des camions** qui emporteront l'enrobé sur chantier. Si un nettoyage est nécessaire, il sera réalisé à l'aide de biosolvant.

Notez également que l'utilisation de pigments conditionnés sous forme de granules demande des dispositifs de dosage automatiques permettant une introduction précise, fiable et traçable de ces pigments dans le malaxeur.

⁹ Temps de malaxage considéré: 20 secondes

► 5. Mise en œuvre sur chantier

La qualité de la mise en œuvre influence non seulement l'aspect initial de l'enrobé mais également son évolution future et sa durabilité. Il est dès lors primordial de mener une réflexion préalable sur ces différents aspects:

- le plan et la méthodologie de pose;
- la préparation du support et le choix de la couche de collage;
- la propreté du matériel et les règles de circulation sur le chantier;
- l'approvisionnement du chantier;
- le compactage;
- le traitement des joints;
- la mise en circulation.

Dans cette partie, nous détaillerons uniquement les points spécifiques et importants pour obtenir un rendu esthétique de l'enrobé coloré. Les recommandations valables pour les enrobés classiques restent également d'application sauf mention contraire.

5.1 Plan et méthodologie de pose

En fonction de la forme des surfaces à revêtir et des obstacles présents, une réflexion doit être menée afin de limiter:

- le nombre et la longueur totale des joints. Il est dès lors recommandé d'utiliser un finisseur de largeur optimale;
- le nombre et la surface des zones mises en œuvre à la main en ayant à disposition un finisseur de faible largeur.

Si la forme des surfaces à réaliser le justifie, la préparation d'un plan de pose prévoyant l'implantation des joints et la chronologie de la mise en œuvre pourrait s'avérer utile afin d'assurer un résultat de qualité technique et esthétique optimale.

En cas d'insertion de bandes colorées dans un revêtement existant, la méthodologie d'exécution devrait également être étudiée (quel enrobé poser d'abord, faut-il poser sur une longueur plus grande puis effectuer des découpes, etc.).

5.2 Préparation du support et choix de la couche de collage

Comme pour les enrobés bitumineux classiques, il est primordial que le **support soit propre et sec**.

La couche de collage peut être réalisée à l'aide d'une émulsion bitumineuse cationique puisqu'elle sera recouverte ultérieurement par l'enrobé coloré. Il est néanmoins recommandé d'utiliser **une émulsion anti-adhérente** car cela permet de réduire le risque de salissures de l'enrobé coloré. Pour éviter tout arrachement de la couche de collage (avec pour conséquence des défauts de collage) et pour éviter toute pollution de l'enrobé coloré, il est recommandé:

Les enrobés bitumineux colorés

Recommandations pratiques pour le choix des matériaux, la conception et la mise en œuvre – Détermination objective de leur couleur

- d'attendre un temps suffisant pour que l'émulsion puisse rompre et mûrir, préalablement à la circulation d'engins de chantier et à la pose de la couche d'enrobé coloré;
- de vérifier que la température du revêtement recouvert par la couche de collage est inférieure à la température de ramollissement du liant résiduel (indiquée sur la fiche technique de l'émulsion) avant tout passage d'engins de chantier;
- de limiter autant que possible le nombre de passages d'engins de chantier sur la couche de collage.



Figure 6 – Salissures de la couche de collage par un engin de chantier

Malgré ces précautions, éviter complètement les salissures reste toutefois difficile. Une solution pourrait être l'utilisation d'émulsions à base de liant clair mais celles-ci sont, à ce jour, peu disponibles, très onéreuses et nécessitent de disposer d'une répandeuse qui leur soit entièrement dédiée, raisons pour lesquelles elles sont très rarement utilisées en Belgique.

5.3 Propreté du matériel et règles de circulation sur le chantier

Afin d'éviter toute tache sur le revêtement coloré, il est indispensable de:

- s'assurer de la propreté du matériel d'application (finisseur, compacteur, brouette, raclette, balai, etc.);
- s'assurer de la propreté des chaussures des ouvriers (il existe des produits dégraissants permettant de nettoyer les semelles) (figure 7). L'utilisation de semelles sans profil est à recommander;



Figure 7 – Nettoyage des chaussures à semelles sans profil



Figure 8 – Utilisation de plaques en bois lors de la circulation sur chantier



Figure 9 – Protection des zones à ne pas revêtir

- placer préalablement une plaque en bois sur l'enrobé s'il est nécessaire de marcher sur l'enrobé non refroidi (figure 8);
- protéger les couvercles des chambres de visites, etc. avec un support dédié (éviter de mettre du gasoil et de marcher sur ces plaques car des traces d'empreintes de chaussures seront présentes sur l'enrobé clair!) (figure 9).

5.4 Approvisionnement du chantier

Les camions d'approvisionnement seront bâchés; les bâches utilisées seront soit neuves, soit débarrassées de toutes traces de bitume. De même, l'intérieur de la benne du camion devra être propre. Le nettoyage peut être réalisé en utilisant un biosolvant.

5.5 Compactage

L'épaisseur des couches d'enrobé coloré étant généralement faible, il faut éviter d'utiliser un compacteur à pneus. Si un compacteur à pneus est malgré tout nécessaire, on prendra soin de ne le faire passer qu'après le compacteur vibrant.

Les compacteurs doivent être nettoyés. Notamment toute trace de rouille doit être enlevée des rouleaux des compacteurs vibrants. L'utilisation du diesel pour le nettoyage est à proscrire.

Lors du compactage, il est important de respecter les points suivants:

- éviter de rouler préalablement au compactage sur un sol souillé ou poussiéreux;
- vérifier et respecter scrupuleusement les températures de compactage.

5.6 Traitement des joints



Figure 10 – Utilisation d'une rampe de réchauffage pour réchauffer les bords de l'enrobé

Pour une meilleure homogénéité du revêtement coloré, il est vivement recommandé de poser l'enrobé «chaud contre chaud» là où cela est possible à l'aide de finisseurs travaillant en parallèle. Une alternative est l'utilisation de la rampe de réchauffage (figure 10). On veillera alors à bien maîtriser la température de chauffe pour éviter de dégrader ou de brûler le liant de l'enrobé réchauffé.

Si la pose «chaud contre chaud» n'est pas envisageable, il est très important de traiter les joints afin de les rendre étanches. Cela contribuera à la durabilité du revêtement en empêchant les infiltrations d'eau.

Afin de diminuer au maximum l'impact visuel des joints, leur teinte doit être la plus proche possible de celle de l'enrobé. Dès lors, il est recommandé de faire un test préalable. Une possibilité est d'utiliser une émulsion à base de liant clair et de répandre du sable 0/2 de couleur appropriée. Il y a lieu cependant de tenir compte du fait que la couleur du revêtement coloré évolue dans le temps.

Les enrobés bitumineux colorés

Recommandations pratiques pour le choix des matériaux, la conception et la mise en œuvre – Détermination objective de leur couleur

L'utilisation de joints bitumineux préformés n'est, a priori, pas envisageable vu la teinte noire de ceux-ci et la faible épaisseur de la couche de roulement.

Rappelons qu'il est indispensable de limiter au maximum le nombre et la longueur totale des joints. Pour cela, la méthodologie de mise en œuvre mérite également d'être étudiée préalablement (§ 5.1 Plan et méthodologie de pose).

5.7 Mise en circulation

Le plus souvent, le délai de mise en circulation est proche de celui des enrobés classiques sauf dans le cas de certains enrobés bitumineux à base de liant végétal qui demandent une période de maturation de quelques jours avant de les remettre en circulation. Ceci est aussi fonction du type de circulation (piétonne ou automobile).

Avant la mise en circulation, il est important d'attendre le refroidissement complet des enrobés (variable suivant la température extérieure et la vitesse du vent) pour éviter le collage, sur l'enrobé, de la gomme de pneus ou des poussières qui s'y trouvent. Cela aurait en effet pour conséquence de ternir la coloration.

Notons que la teinte de l'enrobé peut évoluer quelque peu pendant qu'il refroidit (figure 11).



Figure 11 – Changement de teinte de l'enrobé durant son refroidissement (à gauche: 50°C; à droite: 35°C)

► 6. Détermination de la couleur

6.1 Perception de la couleur

La perception de la couleur dépend notamment des différents facteurs ci-dessous.

- L'observateur

La perception de la couleur est une interprétation subjective de certains stimuli et varie donc d'une personne à l'autre. Un revêtement bitumineux coloré peut sembler brun pour une personne et bordeaux pour une autre.

- L'état de l'objet

Un revêtement humide n'a pas la même couleur qu'un revêtement sec (figure 12), un revêtement sale peut être plus clair ou plus foncé que lorsqu'il est propre, etc.

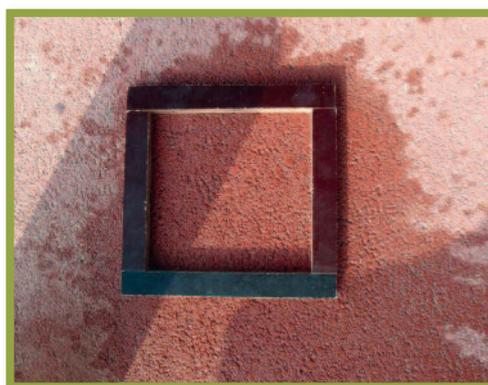


Figure 12 – Influence de l'état du revêtement sur la perception de la couleur

- La source lumineuse

La couleur d'un revêtement dépend fortement des conditions météorologiques. Ainsi, un revêtement peut paraître rouge au soleil et brun foncé à l'ombre (figure 13a). La figure 13b présente deux photos d'un même revêtement: en plein soleil, il a l'air beige (à gauche), tandis qu'à l'ombre, il paraît gris (à droite).

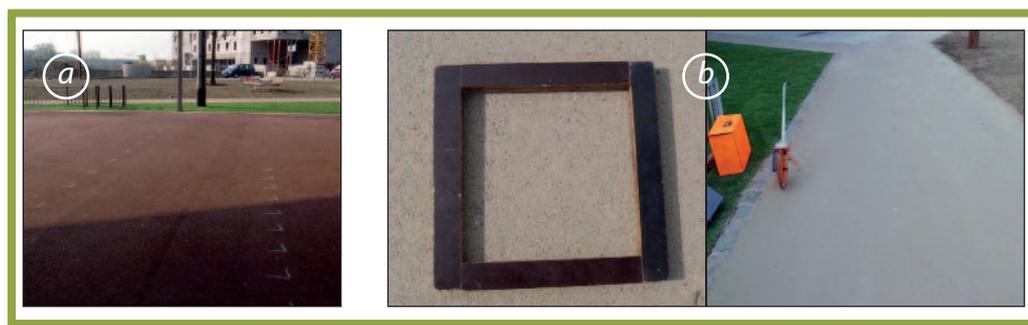


Figure 13 – Influence de la source lumineuse sur la perception de la couleur

- Position de l'observateur

La distance entre l'objet et l'observateur, ainsi que l'angle d'observation, peuvent influencer la perception de la couleur. De ce fait, il est important que ces paramètres restent constants.

Les enrobés bitumineux colorés

Recommandations pratiques pour le choix des matériaux, la conception et la mise en œuvre – Détermination objective de leur couleur

De plus, il n'est pas évident de communiquer sur la couleur. Ainsi, il est par exemple difficile de décrire avec des mots ce que l'on entend par un revêtement bordeaux. On peut déclarer qu'il s'agit d'un revêtement rouge foncé, mais il est bien difficile de décrire cette couleur avec précision. C'est pourquoi, des codes RAL ont été introduits dans les cahiers des charges pour la construction routière, afin de définir la couleur des revêtements bitumineux colorés. Les codes RAL ont néanmoins été développés pour établir la couleur de surfaces homogènes comme les coatings et les peintures. Dans le cas des revêtements bitumineux, cela prête souvent à discussion, à cause de leur surface hétérogène par nature et texturée. Pour toutes ces raisons, il est à la fois difficile pour le client d'indiquer quelle couleur il souhaite réellement pour son revêtement bitumineux et pour l'entrepreneur de saisir précisément quelle couleur est souhaitée.

Afin de proposer une solution à cette problématique, nous présentons dans les lignes qui suivent une méthode plus objective pour mesurer la couleur. Celle-ci est basée sur l'utilisation d'un spectrophotomètre capable d'exprimer la couleur sur base des coordonnées colorimétriques L^* , a^* et b^* .

6.2 Espace colorimétrique $L^*a^*b^*$

L'espace colorimétrique $L^*a^*b^*$ est représenté à la figure 14. L^* , a^* et b^* sont des grandeurs sans dimension et sont appelées les coordonnées colorimétriques. La clarté de la couleur est exprimée par L^* et varie entre 0 (sombre) et 100 (clair). La chromaticité ou la couleur est déterminée par a^* et b^* qui indiquent la direction des couleurs: $+a^*$ va vers le rouge et $-a^*$ vers le vert, $+b^*$ vers le jaune et $-b^*$ vers le bleu. Aucune limite n'est fixée pour les valeurs de a^* et b^* , mais de manière globale, on peut supposer qu'elles varient entre -100 et +100. Le centre de la sphère représentée à la figure 14 est incolore. La saturation de la couleur augmente à mesure que la valeur absolue de a^* et b^* augmente.

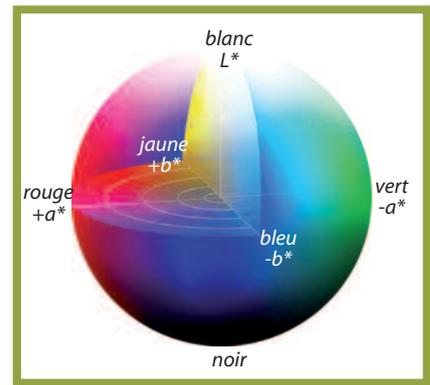


Figure 14 – Espace colorimétrique $L^*a^*b^*$

La figure 15 présente deux carottes avec leurs coordonnées colorimétriques respectives. Visuellement, on constate que la carotte de gauche est plus claire et plus jaune que celle de droite, ce qui se reflète également dans les coordonnées colorimétriques: les valeurs L^* et b^* de la carotte beige sont plus importantes que celles de la carotte rouge. De même, le fait que la carotte de droite est plus rouge à l'oeil nu est confirmé par la valeur a^* plus élevée.

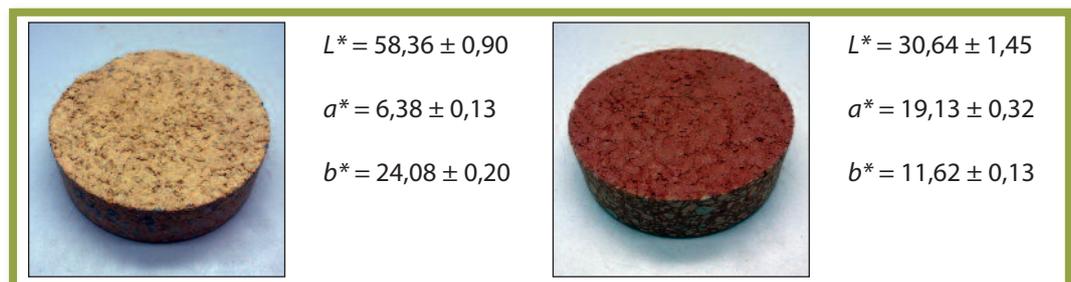


Figure 15 – Deux carottes bitumineuses et leurs coordonnées colorimétriques respectives

Une grandeur qui est couramment utilisée pour exprimer des différences de couleurs est le ΔE , qui se définit comme suit:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

ΔE indique la distance entre deux points dans l'espace colorimétrique $L^*a^*b^*$. Le gros inconvénient de cette formule est qu'un même ΔE n'implique pas toujours une même différence de couleur d'un point de vue visuel. C'est pourquoi au CRR, les différences de couleur sont exprimées séparément pour chaque coordonnée (ΔL^* , Δa^* et Δb^*).

6.3 Spectrophotomètres

Il existe différents appareils sur le marché destinés à mesurer la couleur. De manière générale, ils peuvent être répartis en deux groupes: les colorimètres et les spectrophotomètres (figure 16) est recommandée, en raison de leur meilleure précision et de leur panel d'options plus important que celui des colorimètres.



Figure 16 – Spectrophotomètre

Le principe de fonctionnement d'un spectrophotomètre est simple:

- l'appareil est placé sur un objet;
- par simple pression sur un bouton, l'objet est éclairé par une source lumineuse intégrée;
- le rayonnement réfléchi est analysé par l'appareil;
- les coordonnées colorimétriques L^* , a^* , b^* s'affichent sur l'écran de l'appareil.

Un spectrophotomètre peut être réglé de différentes façons: il est possible de choisir le type d'illuminant ainsi que le champ visuel. On a opté pour l'illuminant D65 car celui-ci correspond à la lumière du jour en Europe. La courbe spectrale de cet illuminant est représentée à la figure 17.

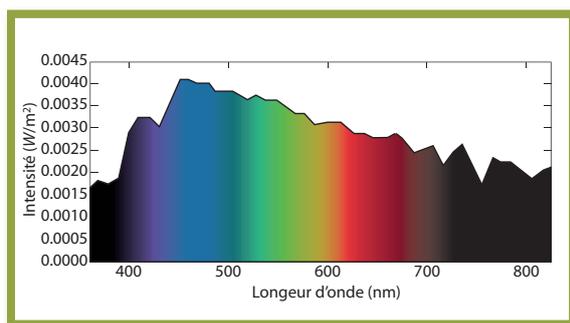


Figure 17 – Répartition spectrale de l'illuminant D65

En outre, le spectrophotomètre offre la possibilité de spécifier le champ visuel ou angle de vue (*viewing angle*) de l'observateur. Pour cela, il existe deux options: un angle de 2° et un de 10° (figure 18 - p. 36). Etant donné que l'angle de 10° donne une meilleure corrélation avec l'observation visuelle, c'est ce champ visuel plus large qui a été choisi.

Les enrobés bitumineux colorés

Recommandations pratiques pour le choix des matériaux, la conception et la mise en œuvre – Détermination objective de leur couleur

Il existe deux types de spectrophotomètres portables: d'une part, celui avec une géométrie $45^{\circ}/0^{\circ}$ et, d'autre part, celui avec une géométrie $d/8^{\circ}$ ou sphère. Les deux types ont été utilisés et comparés. Le diamètre de l'ouverture de la fenêtre de mesure des appareils utilisés au CRR est de 11 mm.

6.3.1 Spectrophotomètre de type $45^{\circ}/0^{\circ}$

Le premier angle, 45° , est l'angle sous lequel la lumière atteint l'objet. Le deuxième angle, 0° , est l'angle sous lequel le rayonnement réfléchi est analysé. Les deux angles sont vus par rapport à la normale de la surface. Le spectrophotomètre $45^{\circ}/0^{\circ}$ utilisé dans la présente étude dispose d'un éclairage circulaire. Cela signifie que l'éclairage de l'objet est indépendant de la direction de l'objet. Le fonctionnement de ce spectrophotomètre est présenté à la figure 19.

Les spectrophotomètres de type $45^{\circ}/0^{\circ}$ voient la couleur de la même manière que l'oeil humain. Etant donné que l'objet est éclairé sous un angle de 45° , la texture de la surface aura un impact sur la mesure de la couleur. La couleur de deux éprouvettes de même pigmentation et de texture différente est considérée comme différente par ce spectrophotomètre, ce qui est également le cas pour l'oeil humain.

6.3.2 Spectrophotomètre de type $d/8^{\circ}$

Ce spectrophotomètre va éclairer l'objet de manière diffuse. Le rayonnement réfléchi par l'objet est analysé sous un angle de 8° par rapport à la normale de la surface. Pour obtenir un éclairage diffus, on utilise une cavité creuse (sphere d'Ulbricht) dont l'intérieur est recouvert d'un coating blanc et qui renvoie la lumière entrante dans toutes les directions (figure 20). Grâce à l'éclairage diffus de la surface, l'impact de la texture sur la mesure sera négligeable. Les effets d'ombre ne joueront aucun rôle avec cette géométrie. Deux éprouvettes de même pigmentation et de texture différente seront perçues par l'appareil comme identiques.

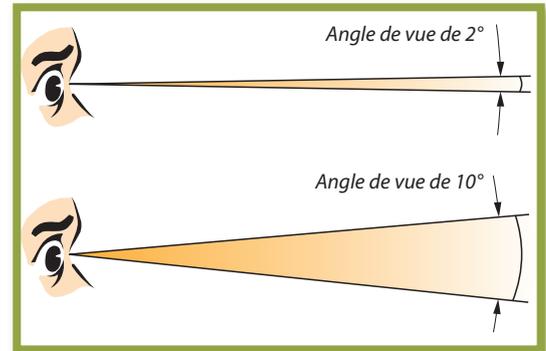


Figure 18 – Angle de vue de 2° et de 10°

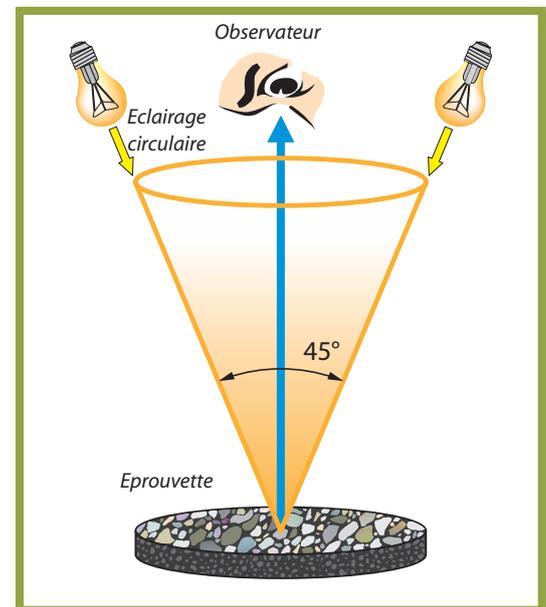


Figure 19 – Géométrie $45^{\circ}/0^{\circ}$

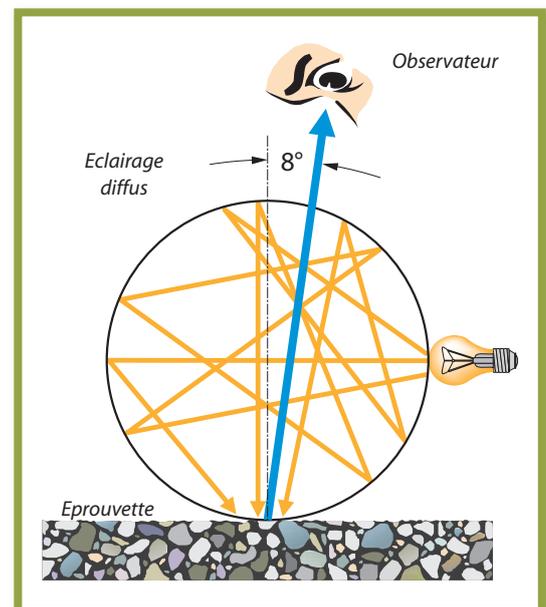


Figure 20 – Géométrie $d/8^{\circ}$

6.3.3 Comparaison

Dans une première phase, des mesures de couleur ont été réalisées sur des carottes et sur chantier, avec les deux types de spectrophotomètres ($45^{\circ}/0^{\circ}$ et $d/8^{\circ}$). En raison de la texture hétérogène et grossière de l'enrobé, et du diamètre restreint de la fenêtre de mesure (11 mm), les mesures réalisées avec les deux types de spectrophotomètres n'ont généralement pas pu être distinguées les unes des autres dans les limites de précision de l'essai. Le CRR a opté finalement pour le spectrophotomètre de géométrie $45^{\circ}/0^{\circ}$ [21].

6.4 Méthodes de mesure

Les différentes méthodes de mesure décrites ci-après ne sont pas des essais contractuels. Il s'agit de méthodes qui ont été développées par le CRR dans le cadre d'un projet NBN sur les enrobés colorés qui se terminera fin 2014. La validation des différentes méthodes de mesure est en cours et celles-ci peuvent encore être sujettes à modification.

6.4.1 Méthode de mesure pour les carottes

Avant de réaliser une mesure sur une carotte, il faut d'abord la nettoyer à l'aide d'une brosse dure. La carotte est ensuite divisée en quatre quarts et une mesure est réalisée sur chaque quart. Les valeurs moyennes L^* , a^* et b^* de ces quatre mesures sont considérées comme étant les coordonnées colorimétriques de la carotte [21].

6.4.2 Méthode de mesure pour les chantiers

Pour mesurer la couleur d'un revêtement bitumineux, il est important que sa surface soit sèche et propre. La plupart du temps, un nettoyage à la brosse dure de la zone de mesure sera suffisant, mais dans le cas de saletés plus importantes, il faudra procéder à un nettoyage humide. La mesure doit être réalisée sur une surface sèche.

6.4.2.1 Méthode de mesure pour les routes, les pistes cyclables et les trottoirs

Une distinction est faite entre les petits chantiers (longueur < 50 m) et les plus grands (longueur ≥ 50 m):

- pour les routes, pistes cyclables et trottoirs de petite taille (longueur < 50 m), on mesure la longueur de la section (L). On mesure cinq surfaces carrées de 20 cm sur 20 cm, réparties sur toute la largeur à différents points dans le sens de la longueur, comme représenté à la figure 21 (p. 38);
- pour les routes, pistes cyclables et trottoirs de grande taille (longueur ≥ 50 m), on mesure tous les 10 m une surface carrée de 20 cm sur 20 cm, comme représenté à la figure 22 (p. 38).

Sur chaque carré, quatre mesures de couleur sont réalisées: une dans chaque coin du carré. Un cadre en bois de 20 cm sur 20 cm peut s'avérer particulièrement utile (figure 23 - p. 38). Une mesure est définie comme étant la moyenne de ces quatre points de mesure. Les coordonnées colorimétriques de l'ensemble du chantier sont obtenues en calculant la moyenne de toutes les mesures [21].

Les enrobés bitumineux colorés

Recommandations pratiques pour le choix des matériaux, la conception et la mise en œuvre – Détermination objective de leur couleur

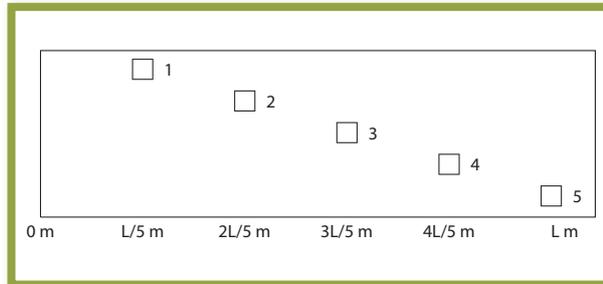


Figure 21 – Schéma pour les routes, pistes cyclables et trottoirs de petite taille



Figure 23 – Surface carrée de 20 cm sur 20 cm

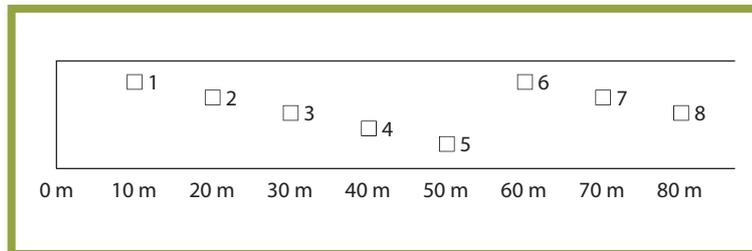


Figure 22 – Schéma pour les routes, pistes cyclables et trottoirs de grande taille

6.4.2.2 Méthode de mesure pour les places

Une distinction est faite entre les places de petite taille (surface < 2 500 m²) et de grande taille (surface ≥ 2 500 m²):

- pour les places de petite taille (surface < 2 500 m²), on mesure cinq surfaces carrées de 20 cm sur 20 cm, réparties sur la place conformément au schéma représenté à la figure 24;
- pour les places de grande taille (surface ≥ 2 500 m²), on détermine la surface totale de la place, S, et on la divise par 2 500 m². La valeur obtenue, x, est ensuite arrondie jusqu'à un nombre naturel, n, qui indique en combien de parties la place doit être subdivisée. Ces parties ont toutes une superficie fortement similaire. Sur chaque partie, on mesure cinq surfaces carrées de 20 cm sur 20 cm, réparties selon le schéma représenté à la figure 24.

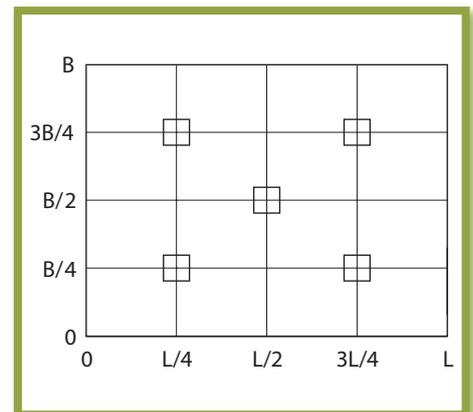


Figure 24 – Schéma de la méthode d'essai appliquée sur les places

Sur chaque carré, quatre mesures de couleur sont réalisées de la même manière que décrit au § 6.4.2.1 Méthode de mesure pour les routes, les pistes cyclables et les trottoirs.

► Perspectives

A travers ce dossier, nous avons dressé un état de l'art pour les enrobés bitumineux colorés et apporté des recommandations concrètes pour le choix des matériaux, la formulation et la réalisation d'un revêtement en enrobé bitumineux coloré durable et performant en abordant essentiellement les aspects liés aux performances mécaniques. Des aspects tels que l'évaluation de la durabilité de la couleur et l'établissement de classes de couleur n'ont pas été abordés. Dans le cadre d'un projet NBN (convention CC-CCN PN/NBN-707-757-907), le CRR y travaille.

Par ailleurs, un nouveau groupe de travail BAC6 «Revêtements colorés» a vu récemment le jour au CRR. Son objectif principal est l'établissement d'une procédure objective pour la détermination de la couleur des revêtements bitumineux colorés et de sa durabilité. A l'avenir, nous ne manquons pas de vous faire part des avancées sur le sujet.

► Documents normatifs

- NBN EN 12697-11** Mélanges bitumineux – Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie 11: Détermination de l'affinité granulats-bitume.
- NBN EN 12697-12** Mélanges bitumineux – Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie 12: Détermination de la sensibilité à l'eau des éprouvettes bitumineuses.
- NBN EN 12697-22** Mélanges bitumineux – Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie 22: Essai d'orniérage.
- NBN EN 12697-32** Mélanges bitumineux – Méthodes d'essais pour enrobés à chaud – Partie 32: Compactage en laboratoire de mélanges bitumineux par compacteur vibratoire.
- NBN EN 12697-46** Mélanges bitumineux – Essais pour enrobés à chaud – Partie 46: Fissuration et propriétés à basse température par des essais de traction uniaxiale.
- NBN EN 1287** Pigments de coloration des matériaux de construction à base de ciment et/ou de chaux – Spécifications et méthodes d'essai (+ AC:2006), 2e éd., août 2005.
- NBN EN 1304** Granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels utilisés dans la construction des chaussées, aérodromes et d'autres zones de circulation.
- NBN EN 13179-1** Essais sur les fillers utilisés dans les mélanges bitumineux – Partie 1: Essai bille-anneau.
- NBN EN 14770** Bitumes et liants bitumineux – Détermination du module complexe en cisaillement et d'angle de phase: rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR).
- NBN EN 14771** Bitumes et liants bitumineux – Détermination du module de rigidité en flexion: rhéomètre à flexion du barreau (BBR).
- NBN EN ISO 591-1** Pigments de dioxyde de titane pour peintures – Partie 1: Spécifications et méthodes d'essai (ISO 591-1:2000), 1e éd., janvier 2001.
- NBN EN ISO 787-7** Méthodes générales d'essai des pigments et matières de charge – Partie 7: Détermination du refus sur tamis – Méthode à l'eau – Méthode manuelle.
- NBN EN ISO 1248** Pigments à base d'oxydes de fer – Spécifications et méthodes d'essai (ISO 1248:2006 Corrigendum technique 1:2007 inclus) (+ AC:2009).

Les enrobés bitumineux colorés

Recommandations pratiques pour le choix des matériaux, la conception et la mise en œuvre – Détermination objective de leur couleur

► Références

- [1] *Code de bonne pratique pour le choix du revêtement bitumineux lors de la conception ou de l'entretien des chaussées – R78/06*
Centre de recherches routières, 2006.
- [2] *Les produits colorés à base de bitume ou de résines pour revêtements de voirie urbaine*
Revue générale des routes et des aérodromes, n° 730, page 42, 1995.
- [3] *Enrobés spéciaux à usages divers*
Revue générale des routes et des aérodromes, supplément au n° 581, pp 6-8, 1981.
- [4] Y. Brosseaud, M. Saint-Jacques
Les revêtements bitumineux colorés en France – Bilan d'utilisation
Revue générale des routes et des aérodromes, n° 809, pp 66-73, 2002.
- [5] Pierres et marbres de Wallonie, <http://www.pierresetmarbres.be>
- [6] Fédération de l'industrie extractive et transformatrice de roches non combustibles, <http://www.fediex.be>
- [7] *Prescriptions techniques «PTV 844»*: Classification des roches, Version 1.0 du 2005-09-08.
- [8] Cahier des charges type Qualiroutes, Chapitre C: *Matériaux et produits de construction*
- [9] D. Sicard, F. Bonvalot, G. Bonnet
Le choix des revêtements colorés à base de bitume ou de résine pour la voirie urbaine – Recommandations
Laboratoire régional de l'Ouest Parisien, Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques, 2007.
- [10] N. Piérard, K. Denolf, A. Destrée, J. De Visscher, S. Vansteenkiste, A. Vanelstraete
Développement des essais de performance pour les revêtements bitumineux colorés et détermination de leurs performances,
Rapport annuel pour la période du 1^{er} octobre 2011 au 30 septembre 2012, Convention CC CCN/PN/NBN-757, Décembre 2012.
- [11] M. Ballié, Th. Delcroix
Liant innovant d'origine végétale pour enrobés routiers et revêtements de voiries
Routes-Roads 2008 – n° 336/337, pp.178-191.
- [12] *Coloration des enrobés à chaud – Notice technique*
Bayer Inc., Division Produits Minéraux, Oxydes de fer, France, 1994.
- [13] A-M. Serres, H. Legillon, B. Faure
Couleur et clarté des surfaces routières
Revue générale des routes et des aérodromes, n° 709, p. 27-28, 1993.
- [14] Manuel Technologie du béton, Chapitre II.5.2 *Les pigments*
Groupement belge du béton, Edition 2006.
- [15] C. Pane, M. Lecomte
Les liants clairs et leur rôle dans la construction routière
Publication Shell bitumen, septembre 2008.
- [16] C. Ployeart, P. Van Audenhove
Vers une composition optimale des bétons routiers
FEBELCEM, 2010.
- [17] R. Azouani
Elaboration de nouveaux nanomatériaux photocatalytiques actifs sous rayonnements ultraviolets
Thèse de doctorat de l'université de Paris 13, 2009.
- [18] G. Buxbaum, G. Pfaff
Industrial inorganic pigments
Third completely revised and extended edition, Wiley-VCH, 2005.
- [19] M. Saint-Jacques, Y. Brosseaud
Coloured Bituminous Wearing Courses in France – Overview of Uses
10th International Conference on Asphalt Pavements, August 12 to 17, 2006, Québec City, Canada 2006.
Vol 3, 233-42.
- [20] *Code de bonne pratique pour la formulation des enrobés bitumineux – R69/97*
Centre de recherches routières, 1997.
- [21] K. Denolf, N. Piérard, A. Vanelstaete
Ontwikkeling van een proefmethode om op een objectieve manier de kleur van gekleurde bitumineuze verhardingen te bepalen
Congrès belge de la route, 11-13 septembre 2013, Liège.