

Recyclage des agrégats d'enrobés et recours aux enrobés tièdes

Guide des bonnes pratiques

Version 15 avril 2021



Sponsors



Partenaire scientifique



Berner Fachhochschule
Haute école spécialisée bernoise

Table des matières

Groupe de travail et partenaires	6
Avant-propos	7
Synthèse	8
Présentation du projet	10
Contexte législatif et normatif	14
Schéma de la structure du guide	18
Informations et connaissances de base	19
1 Les agrégats d'enrobés	20
1.1 Qu'entend-on exactement par « agrégat d'enrobés » ?	20
1.1.1 Définition de la norme SN 670 071 [6]	20
1.1.2 Définition de la norme SN EN 13108-8 [8]	20
1.2 Composition des agrégats d'enrobés	20
1.2.1 Constituants principaux	20
1.2.2 Constituants secondaires	21
1.2.3 Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	22
1.3 Agrégats d'enrobés: du matériau récupéré à la ressource secondaire (matériau recyclé)	24
1.3.1 Phase 1 : Récupération des agrégats d'enrobés	24
1.3.2 Phase 2 : Séparation et tri des agrégats d'enrobés des autres matériaux de déconstruction (si nécessaire)	24
1.3.3 Phase 3 : Déclaration des matériaux (concerne les agrégats d'enrobés en tant que matériaux récupérés)	24
1.3.4 Phase 4: Valorisation ou élimination selon les prescriptions de l'OLED [4]	24
1.3.5 Phase 5: Contrôle de la qualité et déclaration du produit (concerne les agrégats d'enrobés en tant que matériaux recyclés)	24
1.4 Matériaux primaires et agrégats d'enrobés: différences et influences sur les caractéristiques des enrobés bitumineux	25
1.4.1 Variations et modifications concernant les granulats	26
1.4.2 Variations et modifications concernant le liant bitumineux	26
1.5 Norme SN EN 13108-8 [8]	27
1.6 Autres utilisations possibles des agrégats d'enrobés : cas des « gravillons secondaires »	31
2 Les enrobés bitumineux	33
2.1 Définitions de la norme et brèves descriptions	33
2.2 Types et sortes d'enrobés bitumineux	34
2.3 Avantages des enrobés recyclés et des enrobés tièdes	34
2.3.1 Enrobés recyclés	34
2.3.2 Enrobés tièdes	35
2.3.3 Cas de la combinaison des technologies de recyclage et de fabrication tiède	35
2.3.4 Bilan	35

2.4	Paramètres et caractéristiques spécifiques à considérer pour les enrobés recyclés et les enrobés tièdes	36
2.4.1	Enrobés recyclés	36
2.4.2	Enrobés tièdes	36
2.4.3	Bilan	37
2.5	Processus de fabrication	37
2.5.1	Fabrication des enrobés recyclés	37
2.5.2	Fabrication des enrobés tièdes	39
2.6	Mise en œuvre des enrobés	41
	Etat des lieux	43
3	Facteurs entravant le développement des enrobés recyclés et des enrobés tièdes	44
4	Références et expériences déjà réalisées avec les enrobés recyclés et les enrobés tièdes	56
4.1	La normalisation suisse	56
4.1.1	Quantités admissibles d'agrégats d'enrobés dans les enrobés bitumineux (thématique des enrobés recyclés)	56
4.1.2	Température de fabrication des enrobés bitumineux (thématique des enrobés tièdes)	57
4.2	Les bonnes pratiques: exemples et références	57
4.2.1	Références sur les enrobés recyclés	58
4.2.2	Références sur les enrobés tièdes	64
4.3	Développement de directives et initiatives locales	69
4.3.1	Exemples au niveau communal	69
4.3.2	Exemples au niveau cantonal	70
4.3.3	Exemples au niveau national	71
4.4	Projets de recherche nationaux	71
4.4.1	Projet de recherche <i>Recyclage des matériaux bitumineux de démolition dans les enrobés à chaud</i>	71
4.4.2	Projet de recherche PLANET	73
4.5	Etat des lieux et exemples provenant des pays européens	74
4.5.1	Etat des lieux en Europe et comparaison avec la situation en Suisse	74
4.5.2	Exemples représentatifs de projets menés	74
	Domaine d'application étendu et exigences y relatives – Promotion et intégration des enrobés recyclés et des enrobés tièdes dans le cadre des projets de construction routière	77
5	Domaine d'application étendu et exigences y relatives	78
5.1	Teneurs conseillées en agrégats d'enrobés dans les enrobés bitumineux	78
5.2	Recommandations pour le choix du liant bitumineux des enrobés	81
5.3	Liant: essais usuels et exigences	82
5.3.1	Estimation des propriétés du liant en cas d'utilisation d'agrégats d'enrobés dans des mélanges formulés empiriquement (ne s'applique qu'aux enrobés recyclés)	82
5.3.2	Autres cas (s'applique aux enrobés recyclés et aux enrobés tièdes)	83

5.4	Investigations complémentaires pour les liants issus des enrobés recyclés et des enrobés tièdes et exigences y relatives	87
5.4.1	Détermination du point de fragilité Fraass	87
5.4.2	Essais avancés («Advanced Tests») sur le liant	88
5.5	Exigences concernant la mise au point et la validation des formulations d'enrobés	96
5.5.1	Exigences relatives aux constituants des enrobés bitumineux	97
5.5.2	Essais conventionnels relatifs aux enrobés bitumineux	99
5.5.3	Essais complémentaires pour les enrobés recyclés et les enrobés tièdes	100
5.6	Contrôle de la fourniture et de la mise en œuvre des enrobés sur chantier	102
6	Promotion et intégration des enrobés recyclés et des enrobés tièdes dans le cadre des projets	104
6.1	Phase de conception et de planification	104
6.1.1	Réalisation d'essais préliminaires et documentation correspondante	104
6.1.2	Préparation de la déconstruction	105
6.1.3	Choix des types et sortes d'enrobés bitumineux	105
6.1.4	Dimensionnement	106
6.1.5	Aspects financiers	106
6.2	Documents pour l'appel d'offres	107
6.2.1	Conditions-cadres de la soumission et de l'appel d'offres	107
6.2.2	Description précise des produits	107
6.2.3	Autres éléments à demander dans les documents d'appel d'offres	108
6.3	Critères d'aptitude et d'adjudication	110
6.3.1	Critères d'aptitude	111
6.3.2	Critères d'adjudication	112
6.4	Phase d'exécution (fourniture et mise en œuvre des enrobés)	115
6.4.1	Fourniture de l'enrobé	115
6.4.2	Mise en œuvre des enrobés	115
6.4.3	Contrôles ultérieurs	116
6.4.4	Synthèse	116
	Annexes	117
7	Annexe 1	118
8	Annexe 2	119
9	Liste des figures	120
10	Liste des tableaux	121
11	Glossaire	123
12	Bibliographie	128

Groupe de travail et partenaires

Mandants

Plateforme «Gravier pour des générations»
(nom allemand « Kies für Generationen KFG »)

Sponsors (offices cofinçant le mandat d'étude)

Offices de l'environnement et/ou ponts et chaussées (TBA) des cantons d'Argovie / Bâle / Berne / Fribourg / Genève / Lucerne / Tessin / Vaud / Valais / Zoug / Zurich ainsi que les ponts et chaussées de la ville de Zurich (TAZ)

Commission de suivi

Président du comité de pilotage du projet

- Laurent Audergon, directeur de «Gravier pour des générations» et de l'asr Recyclage matériaux construction Suisse

Sous-groupe « Asphalte » de la plateforme KFG

- Dr. Rupert Lieb (ponts et chaussées, canton de Zurich)
- Christoph Gassmann (ponts et chaussées, canton de Zurich)
- Dominik Oetiker (office de l'environnement, canton de Zurich)
- Willi Zuberbühler (ponts et chaussées, ville de Zurich)
- Martin Horat (ponts et chaussées, ville de Zurich)
- Marti Preisig (entreprise Eberhard)
- Ueli Stalder (entreprise Walo)
- Bernhard Kunz (entreprise BHZ)

Partenaire scientifique

Haute Ecole Spécialisée Bernoise (BFH-AHB), Domaine de compétences en Infrastructures de transport, Institut du développement urbain et des infrastructures (ISI)

- Prof. Dr. Nicolas Bueche, responsable du domaine de compétences
- Amandine Ziegelmeyer, collaboratrice scientifique

Avant-propos

Les trois quarts des déchets en Suisse proviennent du secteur de la construction. La valorisation et la réutilisation de ces matériaux de construction présentent un grand potentiel écologique.

Le sujet est d'actualité. Le Conseil d'Etat zurichois envisage à cet effet d'ajouter à la constitution un nouvel article sur le thème de l' « économie circulaire », l'objectif étant de favoriser la fermeture des cycles de matériaux dans les secteurs de la construction et de l'industrie. Ce point est essentiel car les ressources sont limitées et aussi car il est de plus en plus difficile de trouver de nouveaux sites pour la mise en dépôt des matériaux. La pression locale est généralement forte – entre autres parce que les dépôts (ou décharges) ont un impact majeur sur le paysage. La protection du climat est également une question prépondérante. Une amélioration de la fermeture des cycles de matériaux permet de limiter la consommation d'énergie.

Le recyclage des agrégats d'enrobés peut donc contribuer à améliorer l'économie circulaire. De nos jours, la construction de nouveaux tronçons routiers est devenue marginale. A titre d'exemple, le contournement d'Obfelden/Ottenbach est le seul tronçon routier ayant fait l'objet d'une construction de chaussée neuve dans le canton de Zurich au cours des 20 dernières années. A l'heure actuelle, l'accent est mis principalement sur l'entretien et la rénovation du réseau routier existant. Par ailleurs, la quantité d'agrégats d'enrobés aujourd'hui disponible est beaucoup plus importante que celle qui est effectivement réutilisée dans le cadre des projets. L'objectif est donc de réutiliser davantage de matériaux recyclés sans compromettre la qualité. L'étude menée dans le guide des bonnes pratiques donne un aperçu de l'état actuel des connaissances et propose des solutions concrètes qui permettent d'augmenter le recyclage des agrégats d'enrobés dans le domaine de la construction routière, sans péjorer les standards de qualité usuels.

Conseiller d'Etat Dr. Martin Neukom
Directeur des travaux publics du canton de Zurich

Message vidéo du conseiller d'Etat Dr. Martin Neukom, Directeur des travaux publics du canton de Zurich: [lien](#).



Synthèse

Le guide des bonnes pratiques *Recyclage des agrégats d'enrobés et recours aux enrobés tièdes* est essentiellement axé sur la pratique. Il résume et complète la législation, la normalisation et la documentation technique disponibles ainsi que les expériences réalisées en Suisse sur les thèmes du recyclage des agrégats d'enrobés et des enrobés tièdes.

L'objectif principal du guide est de vous aider de manière pratique dans l'intégration et la promotion des enrobés bitumineux à forte teneur en agrégats d'enrobés ainsi que des enrobés tièdes dans les projets de construction routière, ceci sans pour autant générer de risque supplémentaire. Le guide des bonnes pratiques a été développé, en premier lieu, pour les non-spécialistes sur le thème du recyclage et des enrobés tièdes.

Il est important de mentionner que le thème principal du guide concerne les enrobés recyclés avec des teneurs élevées en agrégats d'enrobés. Le thème des enrobés tièdes est abordé en tant que thématique secondaire et complémentaire aux enrobés recyclés. Une des raisons principales de cette hiérarchie entre les thèmes traités dans le guide réside dans le fait que les avantages environnementaux et économiques inhérents à la technologie de recyclage sont actuellement plus importants que ceux inhérents à la technologie de fabrication tiède. En outre, plusieurs technologies (produits) de fabrication tiède existent à l'heure actuelle et il est encore difficile de tirer des conclusions générales (coûts, évaluation du cycle de vie) pour l'ensemble de ces technologies. Enfin, le sujet des enrobés tièdes pourrait, à l'avenir, encore être approfondi et faire l'objet d'un autre ouvrage (guide des bonnes pratiques).

Le guide des bonnes pratiques se décompose en trois parties.

La première partie traite des informations et des connaissances de base au sujet des agrégats d'enrobés et des enrobés bitumineux. En ce qui concerne les agrégats d'enrobés (chapitre 1), les éléments suivants sont notamment abordés : la composition, le processus de traitement en vue d'une réutilisation et les différences par rapport aux matériaux primaires. Les points-clé de la norme de référence pour les agrégats d'enrobés sont également présentés. En ce qui concerne les enrobés bitumineux (chapitre 2), l'accent est mis sur les enrobés recyclés et les enrobés tièdes, en tenant compte des particularités de ces produits ainsi que des aspects liés à leur fabrication et à leur mise en œuvre.

Dans la deuxième partie, un état des lieux de la situation en Suisse au sujet des enrobés recyclés et des enrobés tièdes est effectué. Les facteurs entravant le développement des deux produits ainsi que leurs origines et leurs causes sont identifiés (chapitre 3). Ceux-ci sont résumés dans le guide et leur exactitude évaluée sous la forme d'un « vrai » ou « faux ». De plus, l'expérience déjà acquise avec les enrobés recyclés et les enrobés tièdes, en Suisse et, dans une moindre mesure, à l'étranger, est également synthétisée et analysée (chapitre 4). Cela comprend notamment: le référencement d'exemples et de « bonnes pratiques », le développement et la mise en place d'initiatives et de directives locales, ainsi que les conclusions tirées de projets de recherche nationaux et internationaux.

Dans la troisième et dernière partie, un domaine d'application élargi pour les enrobés recyclés à forte teneur en agrégats d'enrobés (chapitre 5) est proposé. La révision et l'adaptation du domaine d'application actuel doit permettre, à l'avenir, de développer et de mettre en œuvre des enrobés recyclés avec une teneur optimale en agrégats d'enrobés sans pour autant générer une prise de risque supplémentaire par rapport à l'utilisation d'enrobés à chaud

fabriqués sans agrégats d'enrobés. La combinaison des technologies de recyclage et de fabrication tiède est également abordée dans le guide. Les exigences normatives relatives aux enrobés et aux liants bitumineux ainsi que d'autres éléments essentiels, issus notamment du retour d'expérience, sont aussi disponibles. Enfin, des informations et des recommandations permettant d'intégrer et de promouvoir les enrobés recyclés et les enrobés tièdes dans les projets de construction routière (chapitre 6) sont fournies.

En complément du guide des bonnes pratiques, une brochure de présentation résumant les points principaux du guide a également été développée (annexe 1).

Présentation du projet

Origines et genèse du projet

La majorité du réseau routier suisse a été construit, et d'importantes quantités d'agrégats d'enrobés sont générées lors des travaux d'entretien et de rénovation des routes existantes. De grandes quantités d'agrégats d'enrobés sont mises en dépôt et le cycle des matériaux n'est pas encore fermé. Ce problème est connu. Les agrégats d'enrobés ne sont pourtant pas des déchets issus de la déconstruction, mais plutôt une ressource secondaire de valeur contenant environ 5% de bitume et 95% de granulats. La stratégie qui consiste à mettre en dépôt ces matériaux, et qui contribue ainsi à accroître les stocks, n'est ni satisfaisante ni souhaitable.

En prenant pour exemple la situation actuelle dans le canton de Zurich, cette situation représente concrètement un excédent annuel d'agrégats d'enrobés d'environ 58 000 t (données 2019). Des études sont également en cours dans toute la Suisse pour déterminer et analyser plus précisément les flux d'agrégats d'enrobés au niveau national. L'objectif est de déterminer le taux de recyclage des agrégats d'enrobés et d'identifier les différentes voies de recyclage, d'élimination et de traitement existantes. On estime qu'à l'heure actuelle le taux de recyclage des agrégats d'enrobés se situe entre 40 et 50 %, que le recyclage se fasse sous une forme liée ou non liée. Cela signifie que, pour la grande majorité des projets routiers, il existe encore un fort potentiel d'amélioration en ce qui concerne le recyclage des agrégats d'enrobés.

Il est essentiel d'augmenter la quantité d'agrégats d'enrobés recyclés. L'utilisation des agrégats d'enrobés, et ceci à fort taux, pour la fabrication de nouveaux enrobés à chaud ou tièdes constitue l'option à privilégier. Cela permet également un recyclage des agrégats d'enrobés à un niveau de qualité élevée par rapport à une utilisation de ces agrégats pour la production d'enrobés à froid ou sous une forme non liée.

Bien que plusieurs projets de recherche ainsi que des chantiers-test aient été réalisés en Suisse et à l'étranger dans le domaine du recyclage, il n'existe à l'heure actuelle aucune synthèse des observations effectuées et des résultats obtenus, qui prendrait également en compte les prescriptions des normes VSS et les exigences légales. Un outil de ce type permettrait pourtant d'apporter un soutien technique et une aide concrète aux acteurs de la branche en vue d'optimiser, dans le cadre des projets, la teneur en agrégats d'enrobés dans les enrobés bitumineux.

Par ailleurs, un des autres objectifs de la profession, répondant également à une problématique économique et environnementale connue, est de réduire les émissions et la consommation d'énergie dans les centrales d'enrobage où sont produits les enrobés bitumineux. De ce point de vue, les enrobés tièdes peuvent constituer une alternative aux enrobés à chaud conventionnels. Malgré de premières expériences prometteuses (réalisation de deux tronçons-test dans le canton d'Uri en 2006, projet PLANET, stratégie du canton de Vaud), les enrobés tièdes sont encore peu utilisés dans la plupart des régions de Suisse. Bien que ceux-ci aient déjà montré des résultats satisfaisants et prometteurs (propriétés mécaniques, durée de vie, mise en œuvre, ...), il n'existe pas, en Suisse, de bilan de ces expériences pratiques ni de directives à destination des maîtres d'ouvrage, des entrepreneurs, des laboratoires et des bureaux d'études.

De quoi parle-t-on dans ce guide ? Qu'entend-on par « enrobé recyclé à fort taux » et « enrobé tiède » ?

Enrobés recyclés à fort taux (d'agrégats d'enrobés)

Les agrégats d'enrobés sont des matériaux bitumineux obtenus suite à la déconstruction ou au fraisage des chaussées bitumineuses. Ils sont composés de liant bitumineux, de granulats, de sable et de filler. Le filler est principalement présent sous la forme de mastic, c'est-à-dire sous la forme d'un mélange (pâte) avec le liant bitumineux.

Les agrégats d'enrobés peuvent être réutilisés dans la formulation et la fabrication de nouveaux enrobés bitumineux (en tant que constituant). Cela peut se faire par l'intermédiaire d'un ajout, à chaud ou à froid, des agrégats d'enrobés durant le processus de fabrication.

On entend par «enrobés recyclés à fort taux» des enrobés contenant un taux d'agrégats d'enrobés proche de la valeur maximale admissible d'après la norme ou dépassant cette valeur. Cela correspond par exemple à un taux minimal de 50% d'agrégats d'enrobés dans une couche de base AC T. Ces taux d'agrégats d'enrobés ne sont atteignables que dans le cas d'ajout à chaud des agrégats d'enrobés.

Enrobés tièdes

Un enrobé tiède est un enrobé bitumineux qui est produit et mis en œuvre à des températures inférieures aux températures de fabrication et de mise en œuvre usuelles pour les enrobés à chaud. Cela correspond en général à un abaissement des températures de 30°C au moins. La température de fabrication des enrobés tièdes se situe ainsi généralement entre 120 et 140°C. Une diminution de la température de fabrication, tout en maintenant une viscosité de l'enrobé suffisante, est possible grâce à des procédés de fabrication spécifiques (moussage du bitume) et/ou l'utilisation d'additifs.

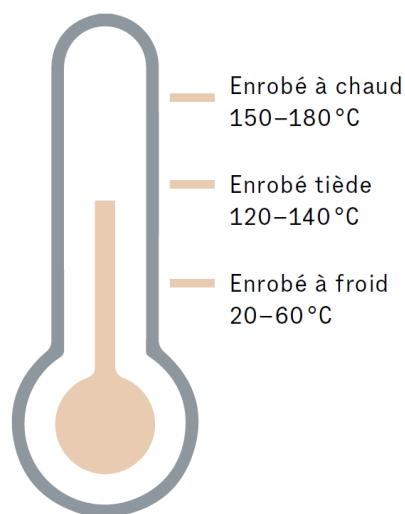


Figure 1: Les différents types d'enrobés bitumineux en fonction de la température de fabrication

Objectifs du projet

L'objectif principal du guide des bonnes pratiques est d'apporter une contribution significative au développement durable dans le domaine des revêtements bitumineux, essentiellement par le biais des enrobés recyclés et des enrobés tièdes. Ces produits peuvent en effet contribuer à améliorer les aspects suivants du développement durable :

- Fermeture des cycles de matériaux par l'intermédiaire d'une augmentation (optimisation) de la teneur en agrégats d'enrobés dans la fabrication de nouveaux enrobés bitumineux, ce qui correspond au développement d'enrobés recyclés à fort taux. Ceci permet de limiter la pénurie de ressources (matières premières) ainsi que de diminuer les problèmes liés à l'élimination et au recyclage (matériaux de déconstruction).
- La diminution des émissions et de la consommation d'énergie par l'intermédiaire de la promotion de l'emploi d'enrobés tièdes.
- L'amélioration des conditions de travail et de la santé des personnes (notamment celles des personnes travaillant dans les centrales d'enrobage et sur les chantiers).

La guide des bonnes pratiques constitue une synthèse des informations disponibles et des projets déjà réalisés sur les thématiques des enrobés recyclés et des enrobés tièdes. Le guide des bonnes pratiques est donc axé sur la pratique. Il présente des connaissances techniques, accessibles et compréhensibles par l'ensemble des acteurs de la branche, sur les enrobés recyclés et les enrobés tièdes. Il propose également des mesures concrètes, des recommandations ainsi qu'un soutien technique sur ces thématiques pouvant directement être intégrés aux pratiques actuelles.

Démarche

Pour pouvoir élaborer et développer le guide des bonnes pratiques, nous avons suivi la démarche ci-dessous :

- Etat des lieux de la situation en Suisse et dans les pays européens concernant les enrobés recyclés et les enrobés tièdes. Dans ce cadre, une étude bibliographique détaillée sur les projets de recherche déjà menés ainsi que les chantiers déjà réalisés a été effectuée. De plus, une collecte de connaissances et d'expériences auprès de divers acteurs de la profession, par l'intermédiaire d'un questionnaire et de discussions bilatérales, a également été réalisée (le questionnaire est disponible à l'annexe 2).
- Identification de thématiques permettant d'améliorer la situation des enrobés recyclés et des enrobés tièdes en Suisse.
- Développement des thèmes retenus par le groupe de travail.

Il ne s'agit donc pas d'une recherche au sens classique du terme. L'étude est fondée sur des informations et des résultats déjà existants ainsi que sur une collecte des expériences pratiques déjà réalisées.

Périmètre et conditions-cadres du projet

Les thématiques relatives aux enrobés recyclés et aux enrobés tièdes sont vastes. Le périmètre et les conditions-cadres retenus pour le développement du guide et la réalisation du projet sont les suivants :

- Seul le recyclage des agrégats d'enrobés sous forme liée dans les matériaux bitumineux est pris en compte dans cette étude. En ce qui concerne les agrégats d'enrobés, d'autres procédés de valorisation et filières de recyclage existent également, par exemple l'utilisation sous forme non liée.
- Les enrobés considérés sont les enrobés à chaud et les enrobés tièdes.
- Seul le cas de l'ajout à chaud des agrégats d'enrobés est considéré. L'ajout à chaud permet en effet d'atteindre de hautes teneurs en agrégats d'enrobés lors de la fabrication de nouveaux enrobés bitumineux et permet ainsi un recyclage d'un haut niveau qualitatif.
- Le cas de structures de chaussée fortement sollicitées, à savoir avec une classe de trafic supérieure ou égale à T3, est le domaine d'application principal. Le guide est toutefois aussi valable pour des classes de trafic inférieures à T3.
- Nous faisons l'hypothèse que les enrobés sont posés à la machine.
- L'optimisation des centrales d'enrobage ne sera pas étudiée ici (aspects concernant par exemple le processus de production ou les émissions).
- L'accent est mis sur la situation en Suisse.

Le thème principal du guide concerne le recyclage des agrégats d'enrobés dans les revêtements bitumineux. Le thème des enrobés tièdes est abordé en tant que thématique secondaire et complémentaire aux enrobés recyclés. Le sujet des enrobés tièdes pourrait, à l'avenir, encore être approfondi et faire l'objet d'un autre ouvrage (guide des bonnes pratiques). Les avantages environnementaux que proposent les enrobés recyclés sont en effet actuellement plus nombreux et plus importants que ceux proposés, pour l'instant, par les technologies de fabrication tiède. Aussi, les enrobés recyclés apportent, dans les faits, une contribution plus importante au développement durable et leur utilisation a davantage d'impacts.

Public-cible

Le guide des bonnes pratiques a été développé en premier lieu pour les maîtres d'ouvrage et les bureaux d'ingénieurs. L'objectif est ainsi d'accompagner les professionnels de la branche afin qu'ils puissent intégrer les enrobés recyclés à fort taux d'agrégats d'enrobés ainsi que les enrobés tièdes dans leurs projets, sans prise de risque supplémentaire. Par ailleurs, le guide a été développé avant tout pour les non-spécialistes sur le thème du recyclage et des enrobés tièdes.

D'autres acteurs de la profession peuvent aussi être intéressés par le guide : bureaux d'ingénieurs, producteurs d'enrobés, entreprises de construction, associations professionnelles, étudiants, etc.

Contexte législatif et normatif

Les thèmes développés dans le guide, les objectifs poursuivis ainsi que les mesures proposées sont conformes aux exigences de la législation suisse et s'orientent d'après la normalisation. Le guide rassemble les règles reconnues de la technique sur les thématiques des enrobés recyclés et tièdes. Il représente un complément aux lois et normes existantes tout en étant fortement axé sur la pratique. Aussi, le guide ne se substitue aucunement aux lois et aux normes.

Qu'impose la loi en matière de recyclage, de réduction des émissions et de consommation d'énergie ? Quels sont les principes essentiels ?

Les documents de base relatifs aux thématiques traitées dans le guide des bonnes pratiques sont les suivants :

- Loi fédérale sur les produits de construction (LPCo) [1]
- Ordonnance sur les produits de construction (OPCo) [2]
- Loi sur la protection de l'environnement (LPE) [3]
- Ordonnance sur les déchets (OLED) [4]
- Directive pour la valorisation des déchets de chantiers minéraux (OFEV) [5]

Le guide contribue au respect de plusieurs principes prescrits par la loi. Une synthèse est disponible dans le tableau ci-dessous (tableau 1).

Thème	Principes fondamentaux (légaux)	Contribution du guide
Préservation des ressources	<ul style="list-style-type: none"> Préservation durable des ressources (<i>LPCo</i>). Les déchets doivent être recyclés autant que possible (<i>LPE</i>). Les ressources naturelles doivent être utilisées de manière durable (<i>LPCo/OPCo</i>). Promotion d'un cycle fermé pour les matériaux (<i>Directive pour la valorisation des déchets de chantier minéraux</i>). 	<ul style="list-style-type: none"> Promouvoir et optimiser le recyclage des agrégats d'enrobés. Garantir la durabilité des enrobés recyclés et des enrobés tièdes. Réduire la consommation d'énergie (cas des enrobés tièdes).
Réutilisation et valorisation	<p>Recyclage hautement qualitatif (<i>Directive pour la valorisation des déchets de chantier minéraux</i>) → Cela signifie que les matériaux recyclés (y compris les agrégats d'enrobés) doivent être réutilisés et valorisés, en tenant compte de leurs propriétés. En règle générale, l'objectif est d'utiliser le matériau recyclé pour la même application (aux mêmes fins) que lors de sa première utilisation.</p>	<p>Le guide contribue à ce que:</p> <ul style="list-style-type: none"> Les agrégats d'enrobés soient préférentiellement réutilisés dans un enrobé bitumineux. Des mesures et des recommandations visant à optimiser/augmenter la teneur d'agrégats d'enrobés dans les enrobés bitumineux sont disponibles. Les agrégats d'enrobés issus des couches de roulement soient réutilisés dans de nouvelles couches de roulement (recyclage hautement qualitatif).
Emissions	<ul style="list-style-type: none"> Protection contre les effets nocifs ou gênants, y compris la fumée, la poussière, les gaz, les vapeurs, les odeurs (<i>LPE</i>). Aucun risque pour l'hygiène, la santé et la sécurité des travailleurs riverains (<i>LPCo/OPCo</i>). Pas d'impact excessif sur la qualité de l'environnement et du climat (<i>LPCo/OPCo</i>). 	<p>Les objectifs du guide visent à développer l'utilisation d'enrobés tièdes.</p>
Faisabilité technique et financière	<p>Le traitement et le recyclage doivent être techniquement et économiquement viables (<i>LPE + Directive pour la valorisation des déchets de chantier minéraux</i>).</p>	<ul style="list-style-type: none"> L'état de la technique en Suisse et la maîtrise des processus sont pris en compte et évalués dans le guide. Les mesures proposées dans le guide sont proportionnées.

Tableau 1: Contribution du guide au respect des principes prescrits par le cadre législatif

Aperçu du paysage normatif

Des éléments relatifs aux enrobés recyclés et aux enrobés tièdes sont déjà présents dans la normalisation actuelle.

La norme de base sur le recyclage SN 670 071 [6] mentionne, par exemple, que l'utilisation d'agrégats d'enrobés sous forme liée convient à la production d'enrobés bitumineux conformes aux normes. Les objectifs fixés par la normalisation en ce qui concerne les aspects liés au recyclage sont nombreux. Ils sont conformes et complètent les prescriptions légales. On peut citer notamment :

- *Les économies en ressources primaires et en capacité de mise en décharge.*
- *L'optimisation du cycle des matériaux sur les plans écologiques et économiques.*
- *La valorisation des matériaux de construction recyclés en optimisant l'emploi de leurs spécificités propres.* Cela correspond à un recyclage dit « hautement qualitatif », qui consiste à réutiliser préférentiellement les agrégats d'enrobés dans un nouvel enrobé bitumineux. Il est préférable que la technologie de fabrication utilisée permette de remobiliser le liant bitumineux issu des agrégats d'enrobés (fabrication chaud ou tiède plutôt qu'à froid).

En outre, les normes « produits » sur les enrobés bitumineux s'appliquent aux enrobés ne contenant pas d'agrégats d'enrobés et aux enrobés à chaud, de même qu'aux enrobés recyclés et aux enrobés tièdes. Il est important de noter que les exigences pour l'ensemble de ces types d'enrobés sont identiques, même lorsqu'il s'agit d'enrobés recyclés à fort taux ou d'enrobés tièdes.

Les principales normes relatives aux thématiques des enrobés recyclés et des enrobés tièdes sont énumérées dans le tableau ci-dessous (tableau 2). Il ne s'agit pas d'une liste de normes exhaustive, mais plutôt d'une base de référence.

Les normes de bases contiennent des *définitions générales, des désignations et des explications* relatives aux thèmes traités dans ces normes (par exemple « granulats » ou « bitumes et liants bitumineux »). Elles fournissent également un aperçu général et des références aux autres normes pouvant s'appliquer.

Les normes relatives aux constituants définissent les caractéristiques des constituants pouvant être utilisés dans la formulation des enrobés bitumineux. Les constituants sont décrits en fonction de leurs caractéristiques et peuvent être utilisés comme matériau de construction pour la production d'enrobés bitumineux, sous réserve de leur conformité et du respect de la normalisation en vigueur.

En ce qui concerne les « normes produits », *elles comportent des recommandations pour le choix des composants (liant, granulats, agrégats d'enrobés, additifs), des exigences générales et empiriques relatives aux enrobés bitumineux ainsi que des exigences générales et fondamentales relatives aux enrobés à module élevé AC EME*. Ces normes concernent les enrobés bitumineux pour les couches de roulement, de liaison, de base et de fondation. Ces normes produits sont également applicables aux enrobés recyclés et aux enrobés tièdes.

En ce qui concerne les recommandations et les prescriptions relatives aux aspects de conception et de mise en œuvre, les normes y relatives sont à considérer. Ces normes comportent également des exigences concernant les couches mises en œuvre.

Enfin, s'agissant de l'assurance qualité et du contrôle des enrobés (produits) fabriqués et livrés sur le chantier, ainsi que des couches mises en œuvre, les normes concernant le contrôle qualité sont à prendre en compte.

Normes de base	<ul style="list-style-type: none"> • Recyclage: SN 670 071 • Granulats: SN 670 050 • Enrobés bitumineux: SN 640 420 • Liants bitumineux: SN 670 061
Normes concernant les composants des enrobés bitumineux	<ul style="list-style-type: none"> • Agrégats d'enrobés: SN EN 13108-8 - SN 670 103b/EN 13043 • Granulats (naturels et recyclés): SN 670 103b /EN 13043 • Liants bitumineux <ul style="list-style-type: none"> • Bitumes routiers: SN EN 12 591 • Bitumes modifiés par des polymères: SN EN 14 023 • Bitumes routiers de grade pur: SN EN 13 924
Normes produits (enrobés bitumineux)	<ul style="list-style-type: none"> • Enrobés bitumineux AC: SN 640 431-1-NA/EN 13108-1 • Bétons bitumineux drainants PA: SN EN 13108-7 • Enrobés semi-denses SDA: VSS 40 436
Normes concernant les aspects liés à la conception et la mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> • AC, PA et AC EME: VSS 40 430 • SDA: VSS 40 436
Normes concernant le contrôle de la qualité	<ul style="list-style-type: none"> • Programme d'essais: VSS 40 434 • Epreuve de formulation: SN EN 13108-20 • Contrôle de la production en centrale: SN EN 13108-21

Tableau 2: Liste des normes pertinentes pour les enrobés recyclés et les enrobés tièdes

Schéma de la structure du guide

Le guide se compose de trois parties principales et de six chapitres. La première partie présente les principales informations et connaissances de base relatives aux agrégats d'enrobés, aux enrobés recyclés et aux enrobés tièdes. La deuxième partie fait l'état des lieux de la situation des enrobés recyclés et des enrobés tièdes en Suisse. La troisième et dernière partie propose un domaine d'application étendu pour les enrobés recyclés à fort taux et les enrobés tièdes, ainsi que les exigences, les points essentiels et les facteurs de réussite qui y sont associés, de même que des informations et des recommandations afin de soutenir l'intégration et la promotion de ces produits dans les projets de construction routière.

Partie 1: Informations et connaissances de base

Chapitre 1

Les agrégats d'enrobés: matériau récupéré et ressource secondaire

1.1 - 1.2: Définition et composition des agrégats d'enrobés.

1.3 - 1.4: Processus d'obtention et différences avec les matériaux primaires.

1.5: Norme SN EN 13 108-8.

Chapitre 2

Les enrobés

2.1 - 2.2: Brève description des différents enrobés bitumineux.

2.3 - 2.4: Avantages et spécificités des enrobés recyclés et des enrobés tièdes.

2.5 - 2.6: Aspects concernant la fabrication et mise en œuvre.

Partie 2: Etat des connaissances

Chapitre 3

Facteurs entravant le développement des enrobés recyclés et des enrobés tièdes

Aspects techniques, économiques, Institutionnels et normatifs.

Perception et état des connaissances.

Chapitre 4

Expériences avec les enrobés recyclés et les enrobés tièdes

4.1 : Normalisation suisse.

4.2-4.3 : Bonnes pratiques en Suisse, directives et initiatives locales.

4.4 : Projets de recherche nationaux.

4.5 : Etat des connaissances et exemples provenant de l'étranger.

Partie 3 : Domaine d'application étendu et exigences y relatives – Promotion et intégration dans les projets d'infrastructures routières

Chapitre 5

Domaine d'application étendu et exigences y relatives

5.1 : Teneur en agrégats d'enrobés recommandée dans les enrobés.

5.2 : Choix du liant.

5.3-5.6 : Exigences relatives aux liants et aux enrobés.

Chapitre 6

Promotion et intégration des enrobés recyclés et des enrobés tièdes dans le cadre des projets routiers

6.1 - 6.4: Informations et recommandations pour les différentes phases de projet.

Partie 1

Informations et connaissances de base

1 Les agrégats d'enrobés

1.1 Qu'entend-on exactement par « agrégat d'enrobés » ?

Plusieurs définitions concernant le terme d'agrégat d'enrobés sont disponibles dans la normalisation. Vous trouverez deux exemples ci-dessous. Toutefois, nous recommandons de considérer comme référence la définition de la norme SN EN 13 108-8 [8]. Il s'agit en effet de la version la plus récente de la définition.

1.1.1 Définition de la norme SN 670 071 [6]

L'agrégat d'enrobés est le matériau issu du fraisage ou du défonçage (resp. déconstruction) des couches en enrobés bitumineux.

1.1.2 Définition de la norme SN EN 13108-8 [8]

Les agrégats d'enrobés (Reclaimed Asphalt RA) sont définis comme enrobés bitumineux provenant du fraisage de couches d'enrobés, du concassage de plaques extraites de chaussées en enrobés, de morceaux de plaques d'enrobé, de déchets d'enrobé ou de surplus des productions d'enrobés.

Les termes anglais RA (reclaimed asphalt) ou RAP (reclaimed asphalt pavement), qui est plus fréquemment utilisé, sont souvent utilisés pour caractériser les agrégats d'enrobés.

Après diverses étapes, comme notamment le tri, l'analyse et le traitement, l'agrégat d'enrobés peut être réutilisé en tant que ressource secondaire (matériau recyclé) pour la fabrication de matériaux de construction. Une des applications possibles est l'utilisation des agrégats d'enrobés sous forme liée en tant que constituant pour la fabrication de nouveaux enrobés bitumineux. Dans le guide des bonnes pratiques, nous nous concentrerons sur cette variante d'utilisation.

Il est important de différencier les agrégats d'enrobés en tant que matériau récupéré et les agrégats d'enrobés en tant que matériau recyclé. Les agrégats d'enrobés en tant que matériau récupéré représentent l'état du matériau « agrégat d'enrobés » immédiatement après avoir été récupéré suite à la déconstruction d'une chaussée bitumineuse en place. Les agrégats d'enrobés en tant que matériau recyclé représente l'état du matériau « agrégat d'enrobés » après les phases de traitement et de contrôle lui permettant d'être réutilisé dans la fabrication de nouveau matériau.

1.2 Composition des agrégats d'enrobés

1.2.1 Constituants principaux

Les constituants principaux des agrégats d'enrobés sont :

- granulats de différentes granulométries (sable y compris)
- filler
- liant bitumineux

L'ensemble de ces composants provient de l'enrobé bitumineux déconstruit et récupéré.

Il est important de souligner que, lorsqu'il s'agit d'agrégats d'enrobés, ces constituants sont présents sous une forme liée. Il ne s'agit pas de trois éléments séparés. A titre d'exemple, le filler dans l'agrégat d'enrobés se trouve généralement sous la forme de mastic, c'est-à-dire mélangé au liant et formant ainsi une « pâte ».

1.2.2 Constituants secondaires

Les agrégats d'enrobés sont des ressources secondaires issues du recyclage. Il se peut donc qu'ils contiennent une certaine quantité de matériaux étrangers.

Selon la norme SN EN 13 108-8 [8], un matériau étranger est un matériau qui n'est pas issu des enrobés bitumineux. Les matériaux étrangers que peuvent contenir les agrégats d'enrobés sont mentionnés dans le tableau 3. Ils sont, d'après la norme SN EN 13 108-8 [8], répartis en deux groupes.

Pour une réutilisation des agrégats d'enrobés dans le cadre de la fabrication de nouveaux enrobés bitumineux, la teneur en matériaux étrangers admissible dans les agrégats d'enrobés est limitée selon la norme SN EN 13 108-8 [8]. Plus de détails sont disponibles dans le tableau 3 ci-dessous.

Description	Matériaux étrangers	Utilisation admissible pour	
		couches de roulement et de liaison	couches de base et de fondation
Groupe 1	<ul style="list-style-type: none"> • Béton, produits en béton et mortier de ciment • Briques et tuiles • Matériaux de couches de fondation, à l'exception des granulats naturels • Métaux 	< 1%	< 5%
Groupe 2	<ul style="list-style-type: none"> • Matériaux synthétiques • Bois • Plastiques 	< 0.1%	< 0.1%

Tableau 3: Genre et réparation des matériaux étrangers, y compris teneur maximale admissible (source: SN EN 13108-8 [8])

D'après la norme SN 13 108-8 [8], la présence, la teneur et le genre de tous les matériaux étrangers doivent également être déclarés et documentés.

Vous trouverez plus d'informations à ce sujet dans le paragraphe E.8 de la norme SN 13108-8 [8].

Remarque: Selon la directive pour la valorisation des déchets de chantiers minéraux [5] (page 18), le granulat bitumineux ne doit contenir aucun corps étranger, s'il est destiné à être utilisé à chaud. Cela ne correspond pas aux valeurs indiquées dans la norme SN EN 13108-8 [8] (voir aussi tableau 3). Nous recommandons toutefois de prendre en compte les prescriptions de la norme SN EN 13108-8 [8] et du tableau 3 ci-dessus, la version actuelle de la norme SN EN 13 108-8 [8] datant 2019 et étant ainsi postérieure à la directive OFEV [5] datant de 2006.

1.2.3 Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

Le terme HAP est l'acronyme d'hydrocarbures aromatiques polycycliques. A des concentrations élevées, ces substances sont nocives pour l'environnement et la santé.

Le procédé de production du bitume à partir du pétrole, et respectivement du goudron à partir du charbon, génère la présence de HAP dans les deux types de produits obtenus (bitume et goudron). La teneur en HAP diffère toutefois considérablement entre le bitume et le goudron. La teneur en HAP est en effet beaucoup plus élevée dans le goudron que dans le bitume. Le goudron présente une teneur en HAP 1'000 à 10'000 fois plus élevée que le bitume. Le risque environnemental et sanitaire lié à la présence de HAP est ainsi bien moindre dans le bitume que dans le goudron.

Dans le domaine de la construction routière, le goudron a été utilisé comme liant pour les matériaux jusque dans les années 1980. En raison notamment de sa nocivité, son utilisation a ensuite été interdite et remplacée, pour des raisons de sécurité, par l'utilisation de bitume.

Les chaussées construites par le passé avec des produits contenant du goudron ne présentent, tant qu'elles sont en place, pas de danger pour l'environnement et la santé. Le risque le plus important intervient lors d'une exposition à des émissions concentrées en HAP, ce qui peut être le cas lorsque des agrégats d'enrobés à forte teneur en HAP sont réutilisés comme constituants pour la fabrication d'enrobés à chaud ou d'enrobés tièdes dans les centrales d'enrobage.

C'est pourquoi il est primordial, avant la déconstruction d'une chaussée en place, d'identifier les matériaux en place avec des teneurs en HAP élevées et de déterminer leur concentration en HAP.

La présence de HAP peut, d'une part, être détectée par l'odeur caractéristique de ce type de substance. D'autre part, plusieurs méthodes existent pour détecter in situ la présence de HAP dans un enrobé ainsi que la teneur approximative. A titre d'exemple, nous pouvons citer le test rapide au spray PAK-MARKER. Afin de déterminer précisément la teneur en HAP ainsi que la composition chimique des substances présentes, une analyse chimique en laboratoire (chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse GC-MS) est nécessaire. Vous trouverez plus d'informations au sujet des HAP dans la fiche d'information de l'OFSP [22].

La teneur en HAP des agrégats d'enrobés est un paramètre essentiel afin de déterminer leur filière de traitement. Les prescriptions de l'ordonnance sur les déchets (OLED) [4] font foi en la matière.

L'OLED remplace l'ordonnance sur le traitement des déchets (OTD) depuis le 1er janvier 2016. Les références à l'OTD – comme par exemple celles dans la directive pour la valorisation des déchets de chantiers minéraux de l'OFEV [5] – ne sont plus en vigueur.

Toutefois les exigences de l'OTD sont, en pratique, encore souvent utilisées. En considérant une teneur en liant bitumineux de 5 % dans les agrégats d'enrobés, ce qui représente la teneur moyenne en liant dans un enrobé, les valeurs seuils de l'OLED [4], calculées par rapport à la quantité totale d'agrégats d'enrobés, et celles de l'OTD, calculées par rapport à la quantité de liant dans les agrégats d'enrobés, concordent. Dans le cadre du guide des bonnes pratiques, nous considérons uniquement les exigences de l'OLED [4].

Selon l'article 20 de l'OLED [4], les matériaux bitumineux de démolition (i.e. agrégats d'enrobés) dont la teneur en HAP ne dépasse pas 250 mg par kg doivent, autant que possible, être valorisés

comme matières premières pour la fabrication de matériaux de construction. A contrario, il est interdit de valoriser les matériaux bitumineux de démolition dont la teneur en HAP dépasse 250 mg par kg.

Une période transitoire s'applique jusqu'au 31 décembre 2025 (article 52 de l'OLED [4]). Les matériaux bitumineux de démolition dont la teneur en HAP dépasse 250 mg par kg peuvent en effet encore être valorisés dans le cadre de travaux de construction jusqu'au 31 décembre 2025, si :

- les matériaux bitumineux contiennent au maximum 1000 mg de HAP par kg et sont mélangés à d'autres matériaux dans des installations appropriées de manière à ce qu'ils contiennent au plus 250 mg de HAP par kg dans les matériaux valorisés, ou
- si les matériaux bitumineux sont utilisés avec l'accord de l'autorité cantonale de façon à empêcher les émissions de HAP. L'autorité cantonale saisit la teneur exacte en HAP dans les matériaux bitumineux de démolition ainsi que les coordonnées du site de valorisation; elle conserve ces informations pendant au moins 25 ans.

Après cette date (c'est à dire à partir du 1^{er} janvier 2026), les matériaux bitumineux de démolition dont la teneur en HAP dépasse 250 mg par kg ne pourront plus être valorisés ou mis en dépôt. Ces revêtements contenant du goudron devront alors subir un traitement thermique (ou un procédé analogue) permettant d'éliminer les HAP. Les matériaux granulaires résiduels pourront à nouveau être utilisés en tant que granulats recyclés, dans la mesure où ces granulats respectent les exigences relatives aux granulats. Le tableau 4 présente une synthèse de la réglementation d'après l'OLED [4].

Teneur en HAP dans l'agrégat d'enrobé (rapporté à la quantité totale de matériaux bitumineux)	Filière de traitement
≤ 250 mg HAP/kg	Réutilisation (sans condition) dans la fabrication de nouveaux enrobés bitumineux. Cela concerne notamment la fabrication d'enrobés recyclés et d'enrobés tièdes. (Alternative : mise en dépôt dans un site de type B)
> 250 mg HAP/kg	Uniquement autorisé jusqu'à fin 2025*: Réutilisation sous conditions ou mise en dépôt dans un site de type E (voir art. 52 OLED). *A partir de 2026, les revêtements avec une teneur en HAP > 250 mg PAK/kg ne pourront plus directement être réutilisés ou mis en dépôt. Ils devront faire l'objet d'un traitement (par exemple thermique) préalable.

Tableau 4: Filières de traitement pour les agrégats d'enrobés selon leur teneur en HAP (selon OLED)

1.3 Agrégats d'enrobés: du matériau récupéré à la ressource secondaire (matériau recyclé)

Afin que les agrégats d'enrobés puissent être utilisés comme constituant dans la fabrication de nouveaux enrobés bitumineux, ceux-ci doivent tout d'abord passer par plusieurs étapes de traitement en vue d'obtenir une ressource secondaire (c'est-à-dire un matériau recyclé) pouvant être réutilisée.

1.3.1 Phase 1 : Récupération des agrégats d'enrobés

Les agrégats d'enrobés sont obtenus par fraisage des couches de chaussées bitumineuses, par concassage de plaques extraites du même type de chaussées, de mottes d'enrobés ou encore du surplus des productions d'enrobés.

Il est important de souligner que la déconstruction des chaussées doit être réfléchie, organisée et réalisée de manière méthodique afin que la séparation des matériaux (phase 2) puisse se faire de manière sûre et efficace. Un fraisage « couche par couche » peut, entre autres, y contribuer.

1.3.2 Phase 2 : Séparation et tri des agrégats d'enrobés des autres matériaux de déconstruction (si nécessaire)

Dans le cas d'agrégats d'enrobés obtenus par fraisage, la séparation d'avec les autres matériaux de déconstruction est déjà effectuée lors de la phase de récupération (phase 1). Dans les autres cas, une phase de séparation et de tri doit être effectuée.

1.3.3 Phase 3 : Déclaration des matériaux (concerne les agrégats d'enrobés en tant que matériaux récupérés)

Les informations suivantes doivent être documentées:

- Description du chantier dans le cadre duquel les agrégats d'enrobés ont été récupérés;
- Type et quantité de matériau;
- Coordonnées du preneur (dépôt, décharge, etc.).

1.3.4 Phase 4: Valorisation ou élimination selon les prescriptions de l'OLED [4]

Voir tableau 4

1.3.5 Phase 5: Contrôle de la qualité et déclaration du produit (concerne les agrégats d'enrobés en tant que matériaux recyclés)

Après validation de cette étape, les agrégats d'enrobés peuvent être réutilisés comme constituants pour la fabrication d'un nouvel enrobé. Cela signifie notamment qu'ils répondent aux exigences pour ce type d'application et qu'ils sont prêts à être réutilisés. De plus amples informations sont fournies dans le chapitre 1.5.

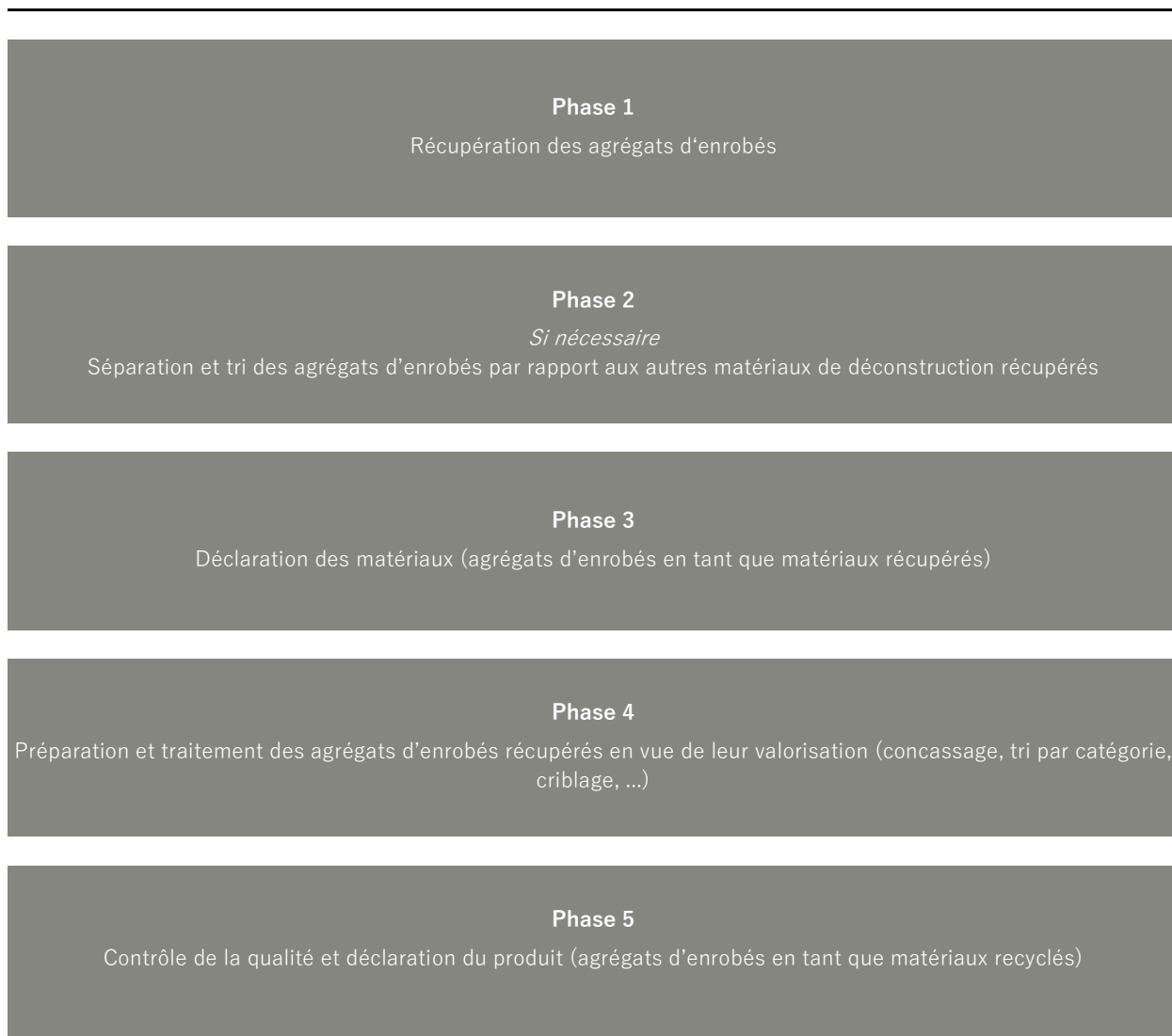


Figure 2: Les différentes étapes de traitement/transformation des agrégats d'enrobés en vue d'obtenir une ressource secondaire à partir d'un matériau récupéré.

Vous trouverez de plus amples informations sur ce processus dans la directive pour la valorisation des déchets de chantiers minéraux de l'OFEV [5] (voir notamment pages 13 à 19).

1.4 Matériaux primaires et agrégats d'enrobés: différences et influences sur les caractéristiques des enrobés bitumineux

Le terme « matériaux primaires » désigne les granulats naturels ainsi que les liants bitumineux dans leur état d'origine (c'est-à-dire avant une première utilisation). Un agrégat d'enrobés, quant à lui, est un matériau de construction recyclé et doit donc être considéré comme une ressource secondaire.

Au cours de sa vie, l'agrégat d'enrobés est déjà passé par au moins un processus de fabrication d'enrobés et a ainsi été soumis à de hautes températures et des sollicitations mécaniques élevées. Il a aussi très probablement été un élément constitutif d'une couche de chaussée pendant plusieurs années et a donc été exposé aux sollicitations du trafic et du climat. Enfin, afin d'obtenir un matériau recyclé à partir du matériau récupéré, l'agrégat d'enrobés est également passé par plusieurs phases de traitement et de transformation. Cela a entraîné une modification des

propriétés initiales des constituants de l'agrégat d'enrobés récupéré (granulats, liants) et explique les différences qui peuvent exister entre les propriétés des constituants issus d'un agrégat d'enrobés et les matériaux primaires.

1.4.1 Variations et modifications concernant les granulats

- Propriétés intrinsèques

Les propriétés intrinsèques des granulats issus des agrégats d'enrobés, par exemple la résistance à la fragmentation (essai Los Angeles) ou le coefficient de polissage (Polished Stone Value PSV), dépendent de la pétrographie et de l'origine géologique des granulats.

L'utilisation d'agrégats d'enrobés pour la fabrication d'un enrobé bitumineux (par rapport à une fabrication où 100% des granulats sont des matériaux primaires) ne modifie pas les propriétés physiques du squelette granulaire de l'enrobé. Les propriétés intrinsèques des granulats n'ont en effet pas été modifiées depuis leur utilisation initiale.

Cependant, le fait de mélanger des agrégats d'enrobés issus de différentes couches de chaussée (par exemple, des agrégats d'enrobés issus de couches de base et de couches de roulement) peut limiter le recyclage à fort taux (recyclage hautement qualitatif) des agrégats d'enrobés dans les matériaux bitumineux. En effet, dans ce cas, les agrégats d'enrobés issus de la couche de roulement, qui contiennent généralement des granulats aux performances élevées avec notamment une bonne résistance vis-à-vis de la fragmentation et du polissage, sont mélangés avec des agrégats d'enrobés issus des couches de base qui contiennent des granulats avec des résistances et des performances moindres. Le fait de mélanger les différentes qualités d'agrégats d'enrobés entre elles peut ainsi réduire la qualité d'origine des granulats issus des couches de roulement. Les caractéristiques et performances d'un lot d'agrégats d'enrobés, issus d'un mélange de différentes qualités d'agrégats d'enrobés, peuvent ensuite être insuffisantes pour que ce lot d'agrégats d'enrobés puissent être réutilisés dans la fabrication d'une nouvelle couche de roulement.

- Caractéristiques géométriques

Comme déjà mentionné, les granulats issus des agrégats d'enrobés ont déjà subi de nombreuses sollicitations au cours de leur vie (mécanique, climatique, thermique), ce qui a eu pour conséquence de modifier les propriétés géométriques d'origine des granulats.

La granulométrie des agrégats d'enrobés présente, entre autres, une proportion plus élevée d'éléments fins (c'est-à-dire d'éléments compris entre 0,063 et 2 mm) par rapport à celle de l'enrobé initial. La forme des grains ainsi que les propriétés de surface des agrégats d'enrobés (par exemple, la proportion de surfaces concassées) peuvent également varier. Une analyse du coefficient d'écoulement (en particulier concernant les sables) peut aussi fournir des informations utiles concernant les propriétés des granulats issus des agrégats d'enrobés.

1.4.2 Variations et modifications concernant le liant bitumineux

Le liant bitumineux issu des agrégats d'enrobés est dans un état altéré et « vieilli » en comparaison à son état initial au moment de la fabrication de l'enrobé bitumineux. Le liant a en effet subi un vieillissement physico-chimique avec le temps. Les causes de ce vieillissement sont multiples, par exemple la phase de fabrication initiale de l'enrobé (chauffage des constituants à forte température, liant y compris) ainsi que les effets induits par le trafic, le rayonnement UV ou encore les conditions météorologiques. Cela a un effet sur la composition chimique du liant

(oxydation) notamment entraînant ainsi son durcissement et une augmentation de sa rigidité. La pénétrabilité d'un liant récupéré issu d'agrégats d'enrobés est donc généralement inférieure à celle du liant à l'état initial.

Ces propriétés modifiées du liant bitumineux ont un impact lorsqu'un fort taux d'agrégats d'enrobés (recyclage) est utilisé dans la fabrication de nouveaux enrobés. Il est toutefois possible de compenser et/ou de corriger cet impact au moyen d'un liant d'apport et/ou d'additifs. Si les propriétés du liant récupéré ne peuvent être compensées, alors le taux d'agrégats d'enrobés dans le nouvel enrobés devra être limité (voir également exemple du chapitre 1.5). L'utilisation d'un liant récupéré dont l'état est trop altéré (vieilli) et/ou trop rigide peut en effet entraîner des problèmes de mise en œuvre, de fissuration prématurée, de sensibilité à basse température ou encore une durabilité réduite des enrobés recyclés.

1.5 Norme SN EN 13108-8 [8]

La norme SN EN 13108-8 [8] *comporte des exigences sur les agrégats d'enrobés, sur les propriétés du liant, des granulats et des matériaux étrangers s'appliquant à toutes les utilisations de ces agrégats d'enrobés. Cette norme indique quelles sont les propriétés des agrégats d'enrobés et de leurs constituants qui doivent être déclarées et documentées.* En Suisse la norme européenne SN EN 13 108-8 [8] est complétée par une annexe nationale *qui contient des informations pour la description et l'investigation d'agrégats d'enrobés.*

Le tableau 5 ci-dessous résume les principales exigences de la norme s'appliquant aux agrégats d'enrobés.

Eléments à considérer (selon SN EN 13108-8)		Etat	Autres commentaires
Matériaux étrangers	Proportion maximale dans les agrégats d'enrobés	Déclaration Exigences	L'utilisation d'agrégats d'enrobés comme constituant d'un nouvel enrobé (selon la teneur en matériaux étrangers) est aussi définie. Infos supplémentaires disponibles au chap. 1.2.2
Liant bitumineux	Type de liant	Déclaration	S'agit-il d'un bitume routier, d'un PmB ou d'un bitume dur ?
	Caractéristiques du liant → Point de ramollissement, (méthode bille-anneau)	Déclaration	Si la valeur du point de ramollissement est de 70°C au plus et que les valeurs individuelles sont de 77°C au plus, l'agrégat d'enrobé peut être considéré comme adapté à une utilisation comme constituant d'un nouvel enrobé (valable principalement pour le bitume routier). Dans les autres cas ; des investigations complémentaires doivent être entreprises.
	Teneur en liant	Indication	
Granulats	Dimension des granulats d/D	Indication	En ce qui concerne les agrégats d'enrobés (RAP) disponibles en Suisse : • Les RAP 0/16 et 0/22 sont les plus couramment produits en Suisse aujourd'hui. • Les RAP 0/11 et 11/22 sont plus rares.
	Granulométrie (courbe granulométrique)	Déclaration	
	Surface concassée des granulats ≥ 4 mm	Exigences	Des exigences réduites s'appliquent ici par rapport aux exigences de la norme sur les granulats (EN 13 043). L'objectif est de pouvoir augmenter la teneur en matériaux recyclés dans les enrobés.
	Forme des gravillons	Déclaration	
Agrégats d'enrobés	Dimension maximale des morceaux	Indication	Il peut s'agir de plaques d'enrobés ou d'éléments plus fins. Cette information est importante en ce qui concerne le processus de traitement de l'agrégat d'enrobés récupéré en vue d'obtenir une ressource secondaire.
	Evaluation de l'homogénéité sur la base : • Pourcentage de gravillons et de sable • Teneur en fines • Teneur en liant • Point de ramollissement	Déclaration	Paramètre important pour pouvoir augmenter le taux de recyclage dans les enrobés. Voir également l'exemple ci-dessous.

Tableau 5: Principales exigences de la norme SN EN 13108-8 s'appliquant aux agrégats d'enrobés.

L'homogénéité des agrégats d'enrobés, ainsi que les informations sur les caractéristiques de leur liant et de leurs granulats, sont essentielles pour le développement d'une formulation (recette) d'enrobés bitumineux répondant aux exigences des normes en termes de caractéristiques, de performances et de durabilité. Aussi, les caractéristiques des agrégats d'enrobés et leur homogénéité définissent la teneur maximale d'agrégats d'enrobés dans un enrobé recyclé donné. Il est donc nécessaire de contrôler régulièrement la qualité et l'homogénéité des stocks d'agrégats d'enrobés.

A titre d'illustration, deux exemples de l'influence des caractéristiques et de l'homogénéité des agrégats d'enrobés (et de leurs constituants) sur la teneur maximale admissible d'agrégats d'enrobés dans la composition d'un enrobé recyclé sont présentés ci-après.

Calcul du point de ramollissement du liant d'un mélange en cas d'utilisation d'agrégats d'enrobés

(Annexe A de la norme SN 640 431-1-NA / EN 13 108-1 [11])

$$T_{R\&Bmix} = a \times T_{R\&B1} + b \times T_{R\&B2}$$

où

- $T_{R\&Bmix}$ est la valeur calculée du point de ramollissement du liant d'un mélange contenant des agrégats d'enrobés;
- $T_{R\&B1}$ est le point de ramollissement du liant récupéré à partir des agrégats d'enrobés;
- $T_{R\&B2}$ est le point de ramollissement du liant ajouté.
- a et b sont les proportions en masse du liant issus des agrégats d'enrobés (a) et du liant ajouté (b) dans le mélange. Ainsi: $a + b = 1$.

Selon le type d'enrobé bitumineux visé, les caractéristiques du liant final du mélange doivent répondre aux exigences de la norme pour ce type de produit, notamment concernant le point de ramollissement. La formule de calcul ci-dessus permet d'illustrer dans quelles mesures les propriétés du liant récupéré (issu de l'agrégat d'enrobé) $T_{R\&B1}$ peuvent influencer celles du liant final de l'enrobé recyclé $T_{R\&Bmix}$.

Comme déjà mentionné dans ce guide, les liants récupérés à partir des agrégats d'enrobés sont généralement durs et rigides. Cela signifie que la valeur du point de ramollissement de ces liants est relativement élevée. Par conséquent, pour une teneur élevée d'agrégats d'enrobés dans l'enrobé recyclé, le liant d'apport (plus mou) utilisé doit permettre de compenser la dureté et la rigidité du liant récupéré issu des agrégats d'enrobés. Dans le cas contraire, la teneur en agrégats d'enrobés doit être limitée. L'utilisation d'additifs (comme des plastifiants ou des réjuvenateurs) est un autre moyen d'augmenter la teneur en agrégats d'enrobés dans les enrobés recyclés car cela permet de corriger/compenser les propriétés du liant récupéré.

1.5.1. Homogénéité (exemple issu de la méthode allemande)

Un avis technique pour la réutilisation d'agrégats d'enrobés [23] est illustré par des nomogrammes permettant de déterminer, en fonction du type d'enrobé, la quantité maximale d'agrégats d'enrobés pouvant être incorporée lors de la fabrication de cet enrobé. La quantité maximale, pour chaque type d'enrobé, est fonction de l'homogénéité (ou de la variabilité) des cinq paramètres suivants : point de ramollissement (méthode bille-anneau) du liant récupéré, teneur en liant des agrégats d'enrobés, teneur en fines ($< 0,063$ mm), en gravillons de 0,063 à 2 mm et en gravillons > 2 mm des agrégats d'enrobés.

Vous trouverez ci-dessous un exemple d'application (figure 3) dans le cas d'une couche de base. Cinq échantillons prélevés sur un lot d'agrégats d'enrobés ont été testés. La moyenne et les variations des caractéristiques à prendre en compte pour l'exploitation du nomogramme ont été calculées. Les résultats reportés sur le nomogramme conduisent, par lecture graphique, à un ajout maximal d'agrégats d'enrobé dans la nouvelle couche de base de 40 %.

Cet exemple illustre bien que la maîtrise et la garantie de l'homogénéité des agrégats d'enrobés est un paramètre clé et constitue un levier pour augmenter la teneur en agrégats d'enrobés dans les enrobés recyclés. En effet, si l'homogénéité est maîtrisée et garantie, la teneur maximale d'agrégats d'enrobés autorisée indiquée par le nomogramme augmente.

Caractéristiques	Point de ramollissement bille-anneau [°C]	Teneur en liant [M.-%]	Fraction granul. < 0,063 mm [M.-%]	Fraction granul. 0,063 à 2 mm [M.-%]	Fraction granul. > 2 mm [M.-%]
Échantil. n° 1	67,0	5,0	9,9	37,7	52,4
Échantil. n° 2	62,0	5,8	11,3	35,2	53,5
Échantil. n° 3	64,0	4,9	9,3	29,8	60,9
Échantil. n° 4	68,0	5,9	6,7	31,5	61,8
Échantil. n° 5	66,0	5,1	12,1	33,8	54,1
Valeur moyen.	65,5	5,3	9,9	33,6	56,5
Étendue (var.)	6,0	1,0	5,4	7,9	9,4

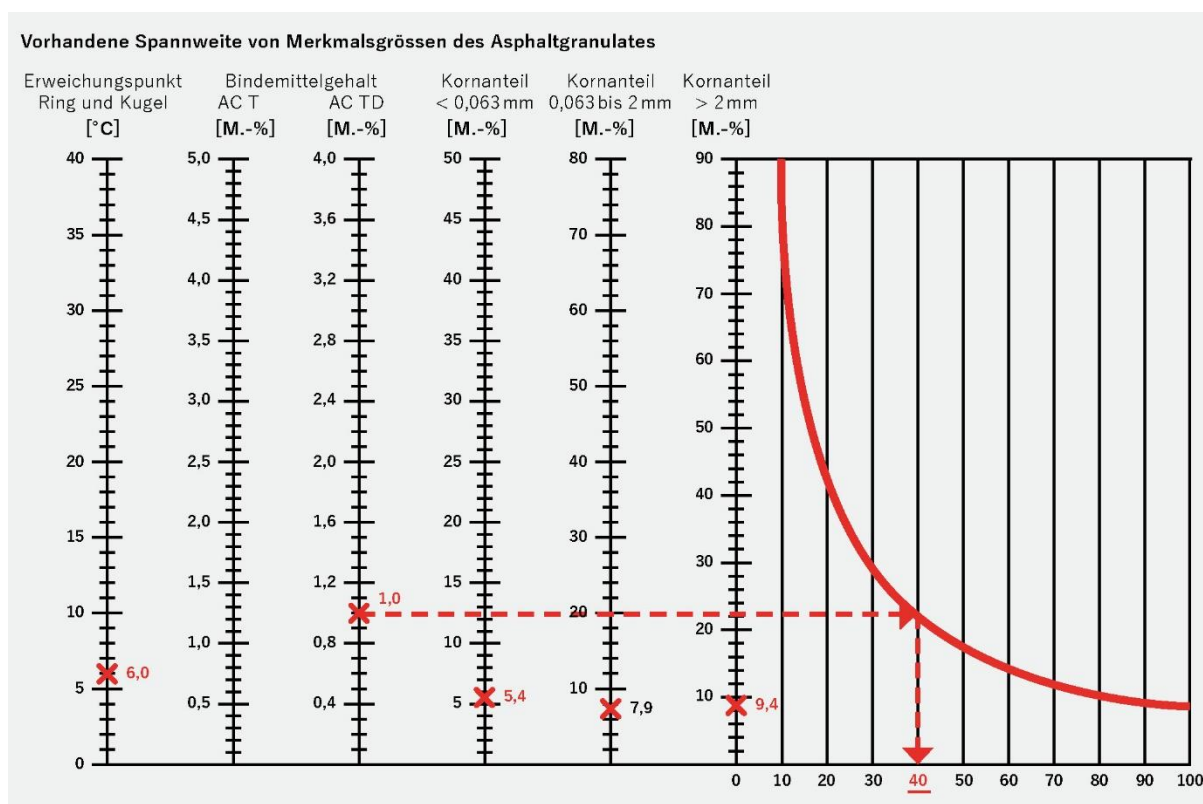


Figure 3: Exemple permettant de déterminer la quantité maximale d'agrégats d'enrobés à incorporer dans un enrobé recyclé en fonction de l'homogénéité des caractéristiques des agrégats d'enrobés – Exemple pour une couche de base (source [23])

Relevons finalement que la norme SN EN 13 108-8 [8] contient également des informations sur l'échantillonnage et le nombre d'échantillons à considérer, ainsi que sur l'identification des agrégats d'enrobés (chapitre G de la norme SN EN 13 108-8 [8]).

1.6 Autres utilisations possibles des agrégats d'enrobés : cas des « gravillons secondaires »

Gravillon secondaire = « Sekundärsplitt » en allemand.

Outre le traitement et la transformation des agrégats d'enrobés en vue d'obtenir une ressource secondaire pouvant être directement ajoutée dans la fabrication d'un nouvel enrobé bitumineux, il existe d'autres utilisations possibles des agrégats d'enrobés récupérés en vue également d'une utilisation pour la fabrication de nouveaux enrobés.

Bien que ce ne soit pas l'objet de ce guide, nous avons trouvé pertinent d'évoquer ici la question de l'obtention de gravillons secondaires à partir des agrégats d'enrobés récupérés.

En effet, les gravillons secondaires peuvent également être utilisés comme constituants lors de la fabrication de nouveaux enrobés bitumineux. Il est toutefois important de mentionner que ce projet a un caractère expérimental et qu'il est encore en cours de développement au niveau régional (canton de Zurich).

Le processus permettant d'obtenir de gravillons secondaires à partir d'agrégats d'enrobés récupérés consiste à séparer les granulats et le liant qui sont présents sous une forme liée dans les agrégats d'enrobés récupérés. Comme l'illustre la figure 4 ci-dessous, les gravillons secondaires sont produits en poursuivant le processus usuel de traitement des agrégats d'enrobés en vue d'obtenir une ressource secondaire.

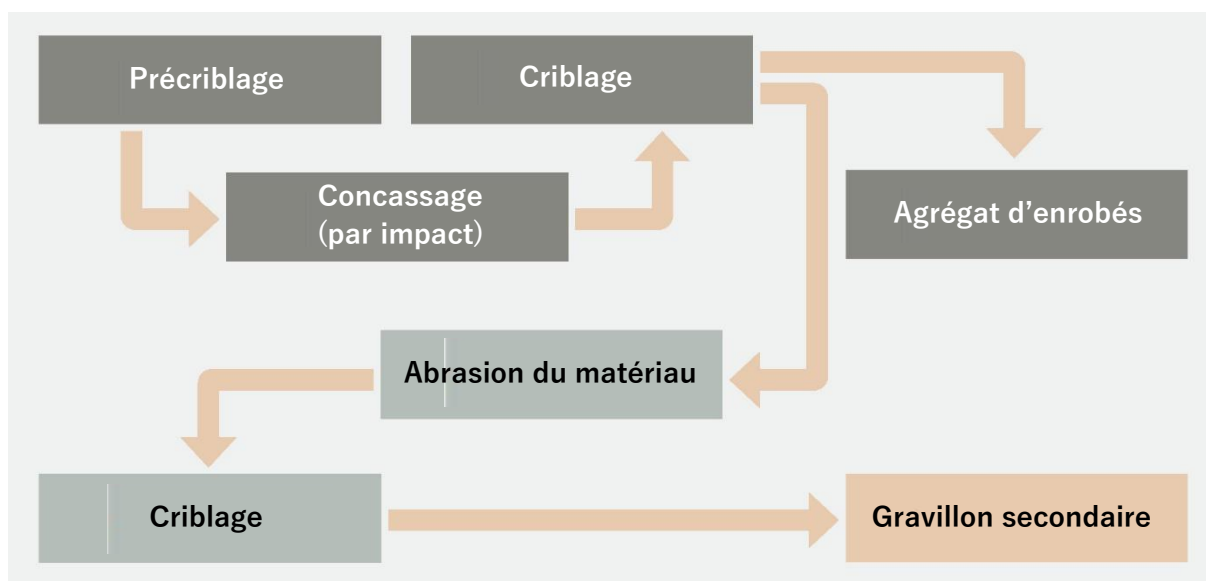


Figure 4: Processus d'obtention des gravillons secondaires (source BHZ Baustoff Holding Zürich AG)

Pour que le processus de concassage des agrégats d'enrobés endommage le moins possible les fractions granulaires > 8 mm et qu'il ne produise pas un surplus de fines, le matériau doit être concassé avec précaution. Les granulats des fractions granulaires 8/11, 11/16 et 16/22 mm peuvent ainsi être séparés du liant et récupérés. Le processus consiste à désagréger le film de liant autour des granulats par frottement des granulats entre eux. La teneur résiduelle en liant dans le mélange de granulats obtenu en fin de processus doit être inférieure à 1 %. Ceci est nécessaire pour garantir la qualité et le respect des exigences des enrobés recyclés fabriqués avec des gravillons secondaires.

La figure 5 ci-dessous indique les proportions des différents produits obtenus à partir des agrégats d'enrobés récupérés selon le processus pour l'obtention de gravillons secondaires.

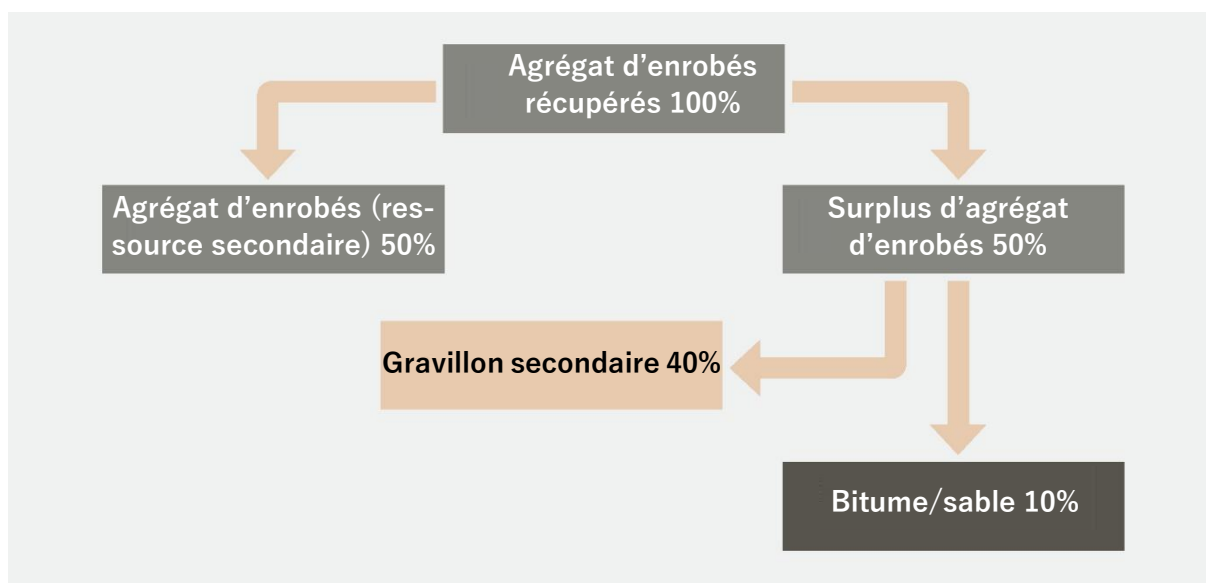


Figure 5: matériaux issus des agrégats d'enrobés récupérés selon le processus d'obtention des gravillons secondaires (source BHZ Baustoff Holding Zürich AG)

Les gravillons ainsi obtenus répondent aux exigences relatives aux granulats primaires en ce qui concerne les propriétés intrinsèques (y compris les valeurs PSV). En effet, le processus de traitement ne modifie pas les propriétés intrinsèques initiales des granulats.

L'utilisation de gravillons secondaires a un potentiel notable pour permettre d'aboutir à une économie en circuit fermé dans le domaine du recyclage. Cette technique permet en effet d'augmenter l'utilisation de matériaux de construction recyclés, issus de matériaux bitumineux, dans la fabrication de nouveaux enrobés. L'objectif principal étant d'assurer un flux équilibré de matériaux entrants (agrégats d'enrobés récupérés) et sortants (agrégats d'enrobés et gravillons secondaires en tant que constituant des enrobés recyclés).

2 Les enrobés bitumineux

2.1 Définitions de la norme et brèves descriptions

Ce paragraphe précise les termes *enrobés bitumineux* (enrobé), *enrobé de recyclage* (enrobé recyclé), *enrobé bitumineux chaud* (enrobé à chaud) tout comme *enrobés bitumineux tiède* (enrobé tiède). Les définitions proposées sont issues de la norme SN 640 420 [10].

Enrobés bitumineux

Les enrobés bitumineux *sont composés de granulats, de bitume ou de liants bitumineux et d'éventuels additifs*. Concernant les additifs, il peut par exemple s'agir de fibres ou d'additifs chimiques (cires, réjuvenateurs).

Le terme *enrobé* seul est aussi souvent utilisé pour désigner un *enrobé bitumineux*.

Enrobés de recyclage

Les enrobés de recyclage *sont des enrobés bitumineux contenant un certain pourcentage d'agrégats d'enrobés*.

Le terme *enrobé recyclé* est aussi souvent utilisé pour désigner un *enrobé de recyclage*. Dans ce guide, nous privilégions d'ailleurs le terme d'*enrobé recyclé*.

Enrobés bitumineux chauds et enrobés bitumineux tièdes

Les températures de fabrication et de mise en œuvre distinguent les enrobés bitumineux chauds (également appelés enrobés à chaud) des enrobés bitumineux tièdes (également appelés enrobés tièdes).

La température de fabrication usuelle d'un enrobé bitumineux chaud est de 160°C voire plus. Afin d'assurer un enrobage optimal des granulats, le liant bitumineux doit avoir une viscosité suffisante au cours de la fabrication. La viscosité d'un liant bitumineux dépend de la température et c'est donc la viscosité du liant qui définit la température de fabrication des enrobés. La température à laquelle la viscosité optimale d'un liant est atteinte dépend du type de liant. La température des enrobés joue également un rôle primordial en ce qui concerne leur mise en œuvre sur le chantier (aptitude au compactage, maniabilité). Certains procédés de fabrication ou l'utilisation d'additifs chimiques permettent de réduire la viscosité du liant sans avoir à augmenter la température. Il est ainsi possible d'obtenir un enrobage optimal des granulats tout en limitant la température de fabrication. Les enrobés produits de cette manière sont appelés *enrobés bitumineux tièdes*. La température de fabrication est généralement réduite de 30°C environ en comparaison à la température de fabrication des enrobés à chaud traditionnels.

2.2 Types et sortes d'enrobés bitumineux

Dans ce paragraphe, vous ne trouverez qu'un bref résumé des informations essentielles sur le sujet. De plus amples informations sont disponibles, entre autres, dans l'ouvrage Voies de circulation (TGC vol.25) [24].

Il est important de mentionner ici qu'il existe un grand nombre d'enrobés bitumineux différents.

Voici les principaux critères de différenciation des différents types d'enrobés bitumineux:

- la taille du plus gros grain (par exemple 8, 11 ou 16) et la courbe granulométrique (par exemple courbe continue ou discontinue) ;
- les caractéristiques des granulats, notamment physiques (intrinsèques) et géométriques ;
- la teneur en liant ;
- le type de liant (bitume routier, bitume modifié aux polymères (PmB), bitume dur) ;
- la présence éventuelle d'additif(s).

Ces paramètres ont une influence notable sur la rigidité, la résistance à l'orniérage et à la fatigue, la sensibilité à l'eau, l'aptitude au compactage ainsi que sur les caractéristiques de surface des enrobés bitumineux. Par ailleurs, c'est sur ces paramètres que l'on travaille lorsque l'on cherche à formuler des enrobés bitumineux avec des propriétés ou des performances spécifiques (par exemple, les enrobés drainants et phono-absorbants présentent une courbe granulométrique discontinue).

Les enrobés à mettre en œuvre sont à définir en fonction de la couche de chaussée à laquelle ils sont destinés (par exemple, couche de liaison AC B ou couche de base AC T) ainsi que des conditions de sollicitations, telles que le trafic et le climat (par exemple, type N ou S). Des informations complémentaires sont disponibles dans la norme SN 640 420 [10] au niveau des paragraphes 6 (groupes d'enrobés), 7 (sortes d'enrobés) et 8 (types d'enrobés).

La composition d'un enrobé donné est indiquée sur la déclaration ou l'épreuve de formulation du produit. La teneur en agrégats d'enrobés (cas des enrobés recyclés) et la température de compactage (enrobés à chaud et tiède), nécessaire pour atteindre les valeurs Marshall théoriques, sont également indiquées dans ces documents. Voir également les chapitres 5.5 et 6.2.

2.3 Avantages des enrobés recyclés et des enrobés tièdes

L'utilisation d'enrobés recyclés et d'enrobés tièdes présente plusieurs avantages. Ceux-ci sont discutés ci-dessous.

2.3.1 Enrobés recyclés

L'utilisation d'agrégats d'enrobés pour la fabrication de nouveaux enrobés bitumineux permet d'optimiser le cycle des matériaux, d'un point de vue économique et également environnemental. Le fait de réutiliser les agrégats d'enrobés permet aussi d'économiser le recours aux ressources naturelles (granulats et pétrole) et de réduire l'emprise des zones de dépôts de matériaux. La réutilisation des agrégats d'enrobés permet également une diminution des coûts relatifs à l'achat de matières premières, notamment en ce qui concerne le liant. Le coût pour la fourniture en liant représente en effet une part importante du coût global d'un enrobé. La diminution des coûts relatifs à l'approvisionnement en granulats est, quant à elle, « compensée » par les coûts d'approvisionnement en agrégats d'enrobés (stockage, transport, traitement, contrôle qualité).

2.3.2 Enrobés tièdes

Le recours aux enrobés tièdes permet de réaliser des économies d'énergie et de réduire les émissions de CO_{2,eq}. Par rapport aux enrobés à chaud, une économie de la consommation d'énergie d'au moins 25 % peut être réalisée grâce à l'utilisation d'une technologie de fabrication tiède. Cette dernière permet également de réduire les fumées et les odeurs pendant la fabrication des enrobés mais aussi au moment de leur mise en œuvre. Cela permet d'améliorer les conditions de travail dans les centrales de production ainsi que sur le chantier. L'impact sur les riverains, notamment ceux vivant à proximité des centrales d'enrobage, est aussi réduit. L'utilisation d'une technologie de fabrication tiède permet également de compacter l'enrobé à des températures inférieures à celles relatives au compactage d'un enrobé à chaud. Dans une grande partie des cas, cela permet aussi de rouvrir plus rapidement la chaussée au trafic après la fin des travaux. Grâce à une diminution des températures de fabrication et de pose des enrobés, le vieillissement du bitume durant ces étapes est réduit en comparaison au vieillissement du liant des enrobés à chaud. Ceci, combiné à une optimisation de la formulation, permet d'améliorer la durabilité des revêtements fabriqués avec une technologie tiède.

Vous trouverez de plus amples informations sur les avantages des enrobés tièdes ainsi que leur domaine d'application dans le rapport de recherche suivant : enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques [25].

2.3.3 Cas de la combinaison des technologies de recyclage et de fabrication tiède

A l'heure actuelle, il est tout à fait possible de combiner les deux technologies (enrobés recyclés et enrobés tièdes). Cela permet de réduire encore davantage la consommation énergétique ainsi que les impacts écologiques. Dans certains cas, cela conduit également à une amélioration du comportement de l'enrobé (propriétés mécaniques, sensibilité à l'eau).

2.3.4 Bilan

	Enrobés recyclés	Enrobés tièdes
Avantages	<ul style="list-style-type: none">• Optimisation du cycle des matériaux, au niveau des aspects économiques et environnementaux.• Economie des ressources naturelles, telles que les granulats ou le pétrole.• Diminution de l'encombrement des dépôts de matériaux/des décharges.• Diminution des coûts d'approvisionnement en liant.	<ul style="list-style-type: none">• Economie d'énergie, au minimum -25% en comparaison aux enrobés fabriqués à chaud.• Diminution des émissions de CO_{2,eq}.• Diminution des fumées et des odeurs lors de la fabrication et de la mise en œuvre.• Amélioration des conditions de travail dans centrale d'enrobage et sur chantier.• Réduction des impacts auprès des riverains des centrales d'enrobage.• Limitation de l'altération (vieillissement) du liant, en comparaison au cas des enrobés à chaud, grâce à une diminution des températures de fabrication et de mis en œuvre.

Tableau 6: Principaux avantages présentés par les enrobés recyclés et les enrobés tièdes

Il est finalement important de mentionner que, à l'heure actuelle, les avantages environnementaux et économiques inhérents à la technologie de recyclage sont plus élevés que ceux inhérents à la technologie de fabrication tiède. Si un compromis entre les deux technologies doit être trouvé, il est important de favoriser la technologie de recyclage. Par ailleurs, plusieurs technologies (produits) permettant de fabriquer des enrobés tièdes coexistent (cf. chapitre 2.5). A ce stade, il est difficile de tirer des conclusions générales (coûts, analyse du cycle de vie) pour cette technique.

2.4 Paramètres et caractéristiques spécifiques à considérer pour les enrobés recyclés et les enrobés tièdes

Sur le principe, les enrobés recyclés et les enrobés tièdes doivent présenter les mêmes performances et la même durabilité que les enrobés à chaud conventionnels ne contenant pas d'agrégat d'enrobés recyclés.

2.4.1 Enrobés recyclés

En ce qui concerne les enrobés recyclés, il est important de déterminer et de garantir l'homogénéité des agrégats d'enrobés. Il faut également tenir compte des propriétés géométriques des agrégats d'enrobés, du degré de vieillissement (altération) du liant résiduel ainsi que de son degré de mélange avec le bitume d'apport (cf. chapitre 1.4). Enfin, à l'heure actuelle, certaines limites techniques persistent encore concernant les enrobés recyclés à fort taux à destination des couches de roulement ainsi que les enrobés recyclés à fort taux nécessitant l'utilisation d'un bitume dur (cas des AC EME). Ce dernier point sera abordé plus en détail dans les prochains chapitres (cf. chapitre 5.1 notamment).

2.4.2 Enrobés tièdes

Dans le cas des enrobés tièdes, il est essentiel de garantir une viscosité optimale du liant et une maniabilité suffisante de l'enrobe bitumineux durant l'ensemble du processus, c'est-à-dire de la fabrication du mélange jusqu'à la remise en service de la chaussée qui suit la mise en œuvre. Selon le procédé de fabrication choisi (voir chapitre 2.5), il faut également tenir compte de la modification éventuelle des propriétés du bitume (engendrées notamment par l'ajout d'additifs) afin de ne pas péjorer les performances ni la durabilité du produit final.

2.4.3 Bilan

	Enrobés recyclés	Enrobés tièdes
Paramètres et caractéristiques spécifiques à considérer	<p>Homogénéité des agrégats d'enrobés à déterminer (et à garantir).</p> <p>Prise en compte des modifications des caractéristiques géométriques des granulats et du vieillissement du liant résiduel.</p> <p>Quid du mélange entre le liant issu des agrégats d'enrobés et le liant d'apport ?</p> <p>Limites techniques concernant la fabrication d'enrobés recyclés à fort taux à destination des couches de roulement et pour les AC EME.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Maîtrise de la viscosité du liant. • Garantie d'une viscosité optimale du liant, maniabilité suffisante de l'enrobé durant l'ensemble du processus. • Plusieurs types de produits (différents). • Prise en compte de la modification des propriétés du liant (dans le cas de l'utilisation d'additifs).

Tableau 7: Paramètres et caractéristiques spécifiques à considérer pour les enrobés recyclés et les enrobés tièdes

2.5 Processus de fabrication

Il est important de mentionner que la majorité des centrales d'enrobage en service en Suisse présentent un bon niveau de performance en termes de recyclage et de capacité à fabriquer des enrobés tièdes en comparaison aux autres pays européens. De plus, la Suisse dispose d'un bon réseau (maillage) de centrales d'enrobage sur l'ensemble du territoire. Il est ainsi possible de fournir sur presque tous les chantiers en Suisse des enrobés recyclés à fort taux et des enrobés tièdes.

2.5.1 Fabrication des enrobés recyclés

Les centrales d'enrobages doivent être équipées de façon adéquate pour permettre la fabrication d'enrobés recyclés. Les constituants doivent pouvoir être chauffés suffisamment pour atteindre la température de fabrication souhaitée sans toutefois endommager les liants (liant d'apport et liant résiduel issu des agrégats d'enrobés). Il est important d'atteindre et de garantir une température optimale lors de la fabrication des enrobés recyclés car cela permet une réactivation du liant résiduel issu des agrégats d'enrobés, une dissolution des conglomerats (clusters) d'agrégats d'enrobés ainsi qu'un enrobage optimal de tous les granulats et des agrégats par le liant.

A l'heure actuelle, plusieurs types de centrales d'enrobage sont en service en Suisse.

La proportion de centrales en service ne permettant pas de recycler les agrégats d'enrobés (c'est-à-dire fonctionnant uniquement avec des gravillons primaires) est très faible. Ces installations sont à la limite de la rentabilité économique. Il s'agit la plupart du temps de centrales avec de faibles quantités de production annuelle ainsi qu'une production horaire basse.

Il est plus courant de rencontrer des centrales d'enrobage construites initialement avec un seul tambour sécheur pour les matériaux minéraux (sables et gravillons) ayant été équipées, dans un second temps, d'un système permettant l'ajout à froid d'agrégats d'enrobés directement dans le

malaxeur. Ce type d'installation nécessite d'augmenter la température des matériaux minéraux primaires pendant le séchage afin d'atteindre dans le malaxeur, après ajout des agrégats d'enrobés froids non chauffés, la température de fabrication souhaitée. Ces installations ont donc un bilan plutôt défavorable en ce qui concerne la consommation d'énergie et elles entraînent également des émissions élevées de CO₂. Cette augmentation de la température conduit également à une altération potentielle du liant d'apport. Enfin, les agrégats d'enrobés étant encore humides au moment de l'ajout dans le malaxeur, cela peut entraîner la formation de vapeurs dans le malaxeur, ce qui a aussi un effet défavorable sur le bilan des émissions de la centrale d'enrobage.

Les centrales d'enrobage équipées d'un tambour parallèle sont des installations que l'on rencontre souvent en Suisse. Avec ce type de centrale, les matériaux minéraux sont chauffés à environ 200°C dans un premier tambour et les agrégats d'enrobés sont chauffés en parallèle (c'est-à-dire simultanément) à environ 120°C dans un second tambour. Cette procédure conduit à une température de fabrication optimale de 150°C environ au niveau du malaxeur (cas des couches de base avec une teneur en agrégats d'enrobés de 50%). Les deux tambours fonctionnent avec un procédé sous vide, de sorte que les fines puissent être récupérées par un filtre. La disposition des brûleurs est telle que les matériaux minéraux dans le tambour sont dirigés vers la flamme du brûleur, tandis que les agrégats d'enrobés sont incorporés immédiatement après le brûleur et s'éloignent de la flamme. Ce type d'installation avec tambour parallèle répond aux exigences actuelles en matière d'émissions.

La toute dernière génération de centrales d'enrobage est basée sur le même concept que les centrales à tambour parallèle classiques. L'amélioration du procédé entre les deux types de centrale réside dans le fait que le tambour pour les agrégats d'enrobés fonctionne dans ce cas selon le principe du contre-courant. Les agrégats d'enrobés sont guidés vers la flamme dans le tambour, mais sont éjectés du tambour environ 5 m avant celle-ci. La flamme génère une chaleur d'environ 800°C dans le "générateur d'air chaud" et les agrégats d'enrobés dans le tambour sont soumis à cet air très chaud. Ce procédé de chauffage doux (en comparaison à une exposition directe à la flamme) permet de chauffer les agrégats d'enrobés à une température de 150°C sans endommager le liant résiduel. Le principal avantage de cette technologie est qu'il n'est pas nécessaire de faire fonctionner les deux tambours simultanément. Il est donc théoriquement possible de produire des enrobés avec une teneur de 100 % d'agrégats d'enrobés. Les valeurs d'émissions pour ce type d'installation sont inférieures aux limites actuelles.

A l'avenir, les installations qui seront développées devront présenter des valeurs d'émissions plus faibles. Un autre développement nécessaire est de permettre l'ajout de quantités plus importantes (ou du moins des ajouts plus efficaces) de matériaux recyclés. La disposition verticale des installations est déjà conçue de telle sorte que le flux de matériaux recyclés circule en « chute libre », sans rencontrer de perturbation, depuis le tambour sécheur vers le malaxeur.

Type de centrale	Description	Teneur théorique en AE
Centrale non équipée pour l'ajout d'agrégats d'enrobés	<ul style="list-style-type: none"> Faible proportion du parc existant en Suisse. A la limite de la viabilité économique. 	0%
Centrale avec un seul tambour sécheur, mais équipée pour l'ajout d'agrégats d'enrobés à froid	<ul style="list-style-type: none"> Encore largement utilisée. Nécessite un important chauffage des granulats pendant le séchage. Endommagement/Vieillessement potentiel du bitume en raison de la température élevée des granulats. Désavantageuse d'un point de vue énergétique et émissions de CO₂. Possible formation de vapeur dans le malaxeur (ajout d'agrégats d'enrobés humides). Emissions élevées. 	15 - 25%
Tambour parallèle classique (ajout d'agrégats d'enrobés à chaud)	<ul style="list-style-type: none"> Largement utilisée en Suisse. Les granulats (env. 200 ° C) et les agrégats d'enrobés (120 ° C) sont chauffés séparément. Répond aux exigences actuelles en matière d'émissions (filtration particules fines). 	30 - 60%
Centrale de « nouvelle génération » (ajout d'agrégats d'enrobés à chaud)	<ul style="list-style-type: none"> Nouvelle génération. Principe similaire au tambour parallèle classique, avec une adaptation en ce qui concerne le tambour de recyclage (principe contre-courant). Chauffage indirect (moins agressif) des agrégats d'enrobés à haute température (150 ° C). Les deux tambours (granulats d'apport et agrégats d'enrobés) ne doivent pas nécessairement fonctionner simultanément. Valeurs d'émissions généralement inférieures aux limites actuelles. 	60 - 100%

Tableau 8: Description des différents types de centrales d'enrobage et taux de recyclage correspondant (situation en Suisse)

Seuls les deux derniers types de centrales (tambour parallèle classique et centrale de nouvelle génération avec tambour à contre-courant) permettent de fabriquer des enrobés recyclés à forte teneur en agrégats d'enrobés.

Les installations décrites ici sont les installations les plus couramment rencontrées en Suisse. Il existe évidemment d'autres procédés de fabrication permettant de fabriquer des enrobés recyclés. Il s'agit généralement de processus internes aux entreprises.

Lors de la fabrication d'enrobés recyclés avec une forte teneur en agrégats d'enrobés, il est possible d'utiliser des additifs chimiques (des réjuvenateurs par exemple). L'objectif étant notamment de réactiver le liant résiduel des agrégats d'enrobés et de restaurer ses propriétés d'origine. Cependant, ce type d'additifs est encore peu utilisé en Suisse. Il n'existe pas de normes à ce sujet et la gamme de produits disponibles sur le marché suisse est encore relativement réduite.

2.5.2 Fabrication des enrobés tièdes

La fabrication d'enrobés tièdes nécessite une adaptation ou une modification du processus de fabrication usuel par rapport aux enrobés à chaud.

Comme précédemment mentionné dans le guide, le principe des enrobés tièdes est de diminuer la température de fabrication et de pose et d'améliorer ainsi le bilan écologique du produit (émissions, consommation d'énergie). Toutefois, une diminution de la température de fabrication a des impacts, sur la viscosité du liant notamment. Le maintien d'une viscosité optimale du liant, en particulier pendant le malaxage, la mise en œuvre et le compactage de l'enrobé, est une des conditions essentielles pour assurer un bon enrobage ainsi qu'une maniabilité et une aptitude au compactage suffisante de l'enrobé.

En Suisse, pour la fabrication des enrobés tièdes, on utilise notamment deux types de procédés qui permettent de diminuer la température de fabrication des enrobés tout en limitant l'impact sur la viscosité du liant. Il s'agit de l'ajout d'additifs dans la recette ou de l'emploi de bitume mousse.

- Enrobés tièdes fabriqué avec un ajout d'additifs

Il existe différents types d'additifs : des additifs liquides (par exemple les additifs chimiques) et des additifs solides (notamment les cires).

Les additifs ont un effet sur la tension superficielle et à l'interface entre le liant et les granulats (diminution de la tension), ce qui a pour effet d'améliorer la maniabilité et/ou la viscosité du liant.

Le dosage des additifs est généralement compris entre 0,2% et 0,5% de la masse du liant en ce qui concerne les additifs liquides et entre 1% et 2% de la masse du liant en ce qui concerne les additifs solides. Toutefois, le dosage peut fortement varier en fonction du type d'additif utilisé.

L'utilisation d'additifs pour la fabrication d'enrobés tièdes ne nécessite pas (peu) d'équipement spécifique ni d'adaptation de la centrale d'enrobage. Les additifs sont généralement incorporés directement au niveau du malaxeur (additifs liquides et solides). Des lignes spécifiques peuvent également être utilisées au niveau de la centrale d'enrobage, notamment pour l'ajout d'additifs liquides. Dans certains cas, les additifs peuvent être mélangés au liant en amont et sont livrés à la centrale d'enrobage déjà incorporés au liant. L'ajout d'additifs présente l'avantage de permettre la fabrication de gâchées individuelles (ponctuelles) d'enrobés tièdes.

D'un point de vue économique, les enrobés tièdes fabriqués avec des additifs ont un coût plus élevé en comparaison aux enrobés standards, en raison notamment du coût de l'approvisionnement en additifs (fourniture). Cependant, ceux-ci sont généralement compensés par les gains résultant des économies d'énergie réalisées. Concernant les aspects environnementaux, l'utilisation de certains additifs peut péjorer le bilan écologique global des enrobés tièdes, car les avantages environnementaux présentés par les enrobés tièdes, en particulier la diminution de la consommation d'énergie, sont contrebalancés par l'utilisation de matières premières supplémentaires (additifs).

Il est également important de mentionner que l'utilisation d'additifs modifie les propriétés du liant. Cet aspect est à considérer, notamment en ce qui concerne l'influence d'une modification des propriétés du liant sur le comportement et les propriétés mécaniques du produit final (enrobé). Un ajout d'additif ne doit pas impacter (négativement) les performances ni la durabilité du produit final.

- Enrobés tièdes fabriqués avec du bitume mousse

Le moussage du bitume est obtenu par l'intermédiaire d'un ajout d'eau, avec ou sans additifs. L'ajout d'eau entraîne en effet une diminution de la viscosité du liant. Lorsque l'eau entre en contact avec le liant chaud, une mousse se forme, provoquant ainsi une augmentation du volume du bitume (sous forme de mousse). La répartition du bitume, ainsi que son adhérence aux granulats, est ainsi davantage homogène.

Le recours au bitume mousse pour la fabrication des enrobés bitumineux nécessite l'installation d'un équipement spécifique au niveau du poste de d'enrobage (générateur de mousse). L'utilisation (l'activation) du générateur de mousse durant le processus de fabrication nécessite de

modifier l'ensemble de la ligne production. Ce procédé est donc plus adapté à la fabrication de grandes quantités d'enrobés tièdes et n'est pas (peu) compétitif en ce qui concerne la fabrication de petites quantités de manière ponctuelle.

L'avantage de cette approche réside dans le fait que les propriétés du bitume ne sont pas modifiées. Le bilan écologique global est également un peu meilleur que celui d'un enrobé à chaud classique. Enfin, hormis les frais liés à l'achat ponctuel de l'équipement nécessaire, les coûts sont comparables à ceux des produits standards.

	Enrobés tièdes (procédés principaux)	
	Ajout d'additifs	Bitume mousse
Principe	Ajout de différents types d'additifs (liquides, solides) qui modifient les caractéristiques du liant.	Moussage du bitume par l'intermédiaire d'un ajout d'eau.
Effets	Diminution de la viscosité du liant et/ou amélioration de la maniabilité.	Diminution de la viscosité du liant et/ou amélioration de la maniabilité.
Équipement requis au niveau de la centrale	Pas d'équipement spécifique (éventuellement une ligne d'approvisionnement supplémentaire).	Équipement spécifique (générateur de mousse).
Fonctionnement de la centrale/Flexibilité	Fabrications ponctuelles possibles.	Plutôt adapté pour des tonnages importants (réorganisation de l'ensemble de la production).
Aspects économiques	Coûts d'acquisition des additifs à prévoir (coûts supplémentaires).	Coûts d'investissement initial pour l'équipement.
	Coûts similaires aux enrobés à chaud (fourniture).	
Aspects écologiques (bilan environnemental global)	Economie d'énergie.	
	A moduler en fonction du type d'additifs utilisé.	Meilleur que celui d'un enrobé à chaud.

Tableau 9: Tableau comparatif des deux procédés principaux existant en Suisse pour la fabrication d'enrobés tièdes

Dans ce chapitre, les procédés principaux de fabrication des enrobés tièdes ont été décrits de manière générale. De la même manière que pour les enrobés recyclés, il existe également d'autres procédés de production pour la fabrication des enrobés tièdes. Toutefois, il s'agit généralement de procédés internes aux entreprises.

2.6 Mise en œuvre des enrobés

Après fabrication, l'enrobé est généralement livré sur le chantier. Le transport est effectué par des camions. Afin de limiter la diminution de la température de l'enrobé pendant le transport, les camions sont équipés de bâches étanches ou de bennes thermos.

Sur chantier, l'enrobé est mis en place à l'aide d'un finisseur (pose à la machine). Dans certains cas, une pose à la main est nécessaire (petite surface, obstacles, forme spécifique, début ou fin de pose, joints). Une pose à la main n'est pas recommandée dans le cas des enrobés tièdes, en raison notamment de la température de pose qui est plus basse que pour un enrobés à chaud. Cela peut en effet conduire à des enrobés avec une rigidité apparente plus élevée, en comparaison aux enrobés conventionnels, rendant ainsi la pose à la main plus difficile et pouvant alors réduire la qualité des produits mis en œuvre.

Un aspect essentiel de la mise en œuvre des enrobés est leur compactage. Le compactage d'un enrobé est en grande partie réalisé par le finisseur. Cependant, un compactage complémentaire par l'intermédiaire de compacteurs (train de compactage) est nécessaire. Il est primordial d'effectuer un compactage optimal de l'enrobé bitumineux car la teneur en vides de l'enrobé en dépend et, par conséquent, aussi le comportement mécanique, la durabilité ainsi que d'autres propriétés spécifiques (capacité à évacuer les eaux de pluie en surface, propriétés acoustiques, etc.).

L'expérience acquise jusqu'ici avec les enrobés recyclés et les enrobés tièdes a également montré que l'aptitude au compactage de ces produits peut différer de celle des enrobés à chaud sans agrégat d'enrobés. Un enrobé recyclé est généralement plus facile à compacter (effet lubrifiant du bitume résiduel, présence de granulats « ronds »). Un enrobé tiède peut quant à lui nécessiter une énergie de compactage plus élevée.

Les enrobés tièdes peuvent, selon les technologies de fabrication utilisées, être compactés jusqu'à une température d'environ 90°C (borne inférieure) pour laquelle le liant présente encore une viscosité suffisante. Par ailleurs, le comportement à la mise en œuvre de l'enrobé tiède peut différer de celui des enrobés traditionnels. Pour les équipes de pose, cela signifie que, lorsqu'elles travaillent avec des enrobés tièdes, elles ne peuvent pas se référer à l'expérience et aux habitudes qu'elles ont développées avec les enrobés à chaud. La pose d'enrobés tièdes nécessite donc une compétence particulière et des équipes de pose expérimentées.

Partie 2

Etat des lieux

3 Facteurs entravant le développement des enrobés recyclés et des enrobés tièdes

L'objectif de ce chapitre est de présenter les facteurs qui, à ce jour, limitent le développement et le recours aux enrobés recyclés et aux enrobés tièdes dans le cadre des projets.

Ces facteurs limitants ont pu être identifiés par l'intermédiaire :


- de réponses à un questionnaire diffusé largement auprès de différents membres représentatifs de la profession (offices fédéraux, cantonaux et communaux ainsi que maîtres d'ouvrages privés, bureaux d'ingénieurs, associations professionnelles, entreprises de construction et producteurs d'enrobés). 32 questionnaires ont été envoyés, 21 remplis et retournés. Le document qui a été diffusé est disponible en annexe (annexe 2) ;
- de discussions bilatérales menées avec des acteurs de la profession (entreprises de construction, producteurs d'enrobés, maîtres d'ouvrage) ;
- d'échanges ayant eu lieu lors des points d'étape et des présentations intermédiaires organisés en cours de projet.




Les facteurs identifiés sont de nature diverse, en particulier de nature technique, économique, logistique, institutionnelle ou encore normative.



Les origines et les causes de ces facteurs limitants sont multiples. Elles sont résumées dans ce qui suit.

Dans certains cas, il peut s'agir de préjugés ou d'idées reçues à l'égard des enrobés recyclés ou des enrobés tièdes, souvent dus à un manque de connaissance, qui limitent leur développement et leur emploi dans le cadre de projets. Un manque de coopération et de transparence entre les différents acteurs de la profession au sujet des enrobés recyclés et des enrobés tièdes a aussi été identifié. Parfois, le facteur limitant provient aussi d'un problème de méthodologie et de difficultés de mise en application lorsque ces produits sont sélectionnés dans le cadre de projets. Les aspects économiques (coûts similaires aux produits standards, voire plus élevés) qui peuvent primer sur les aspects écologiques, vis-à-vis desquels les enrobés recyclés et les enrobés tièdes présentent des avantages, sont aussi des facteurs limitants. Enfin, pour conclure, peu de facteurs limitants problématiques, c'est-à-dire des facteurs liés à des aspects techniques ou légaux/normatifs, ont été identifiés.

Les facteurs limitants identifiés ainsi que les témoignages et déclarations recueillis à propos des enrobés recyclés et des enrobés tièdes sont résumés ci-dessous et leur exactitude/véracité évaluée, sous la forme d'une analyse du type « vrai » ou « faux ». Le cas « partiellement correct » signifie que les témoignages et déclarations nécessitent d'être complétées ou clarifiées, car ils ne sont pas valables dans tous les cas ou parce qu'il est nécessaire de les resituer dans leur contexte. Dans le cadre des analyses réalisées, vous trouverez également des notes, des informations et des références à d'autres chapitres du guide – l'objectif étant d'éliminer ou de réduire les facteurs limitants identifiés.

Déclaration/témoignage	Analyse (vrai/faux) et complément d'information
<p>«La qualité des agrégats d'enrobés est insuffisante.»</p> <p>Concerne les enrobés recyclés.</p> <p>Relève du domaine technique et logistique.</p>	<p> (partiellement correct)</p> <p>La qualité des agrégats d'enrobés est garantie, notamment grâce au processus de préparation et de traitement des agrégats d'enrobés en vue de leur réutilisation en tant que ressource secondaire ainsi que par la réalisation de contrôles réguliers. (voir les chapitres 1.3 et 1.5).</p> <p>Il existe toutefois encore un potentiel d'optimisation en ce qui concerne la qualité des agrégats d'enrobés, notamment pour atteindre un niveau de recyclage hautement qualitatif.</p> <p>Dans cette optique, il est essentiel de pouvoir garantir l'homogénéité des agrégats d'enrobés. L'optimisation ou l'amélioration de la méthode de récupération des agrégats d'enrobés in situ, par fraisage ou déconstruction des couches bitumineuses en place, ainsi que la gestion ultérieure des agrégats d'enrobés, notamment concernant le stockage avant leur réutilisation, permettraient d'y contribuer. Parmi les optimisations et les améliorations potentielles, on peut citer :</p> <ul style="list-style-type: none"> • réalisation d'essais préalables sur site (carottages, sondages, analyse HAP) pendant la phase de planification et élaboration d'une documentation relative à la structure de chaussée en place (plans, prescriptions) (1) • préparation d'une méthodologie relative à la déconstruction, par exemple avec la prescription d'un fraisage couche par couche (2) • le stockage différencié des agrégats d'enrobés en fonction de leurs caractéristiques / provenance (3) • la production de fractions intermédiaires supplémentaires d'agrégats d'enrobés (par exemple, 0/11 et 11/22) (4) • l'optimisation (l'adaptation) de la composition des enrobés recyclés en fonction des caractéristiques des agrégats d'enrobés à disposition. Cela nécessite une caractérisation adéquate et une bonne connaissance des agrégats d'enrobés, ainsi que des essais de laboratoire pertinents et adaptés. (5) <p>De plus amples informations sur les points (1) et (2) sont disponibles au niveau du chapitre 6.1. Les points (3) et (4) concernent davantage les centrales d'enrobage. Le point (5) est traité en partie dans le chapitre 5.</p>

Déclaration/témoignage	Analyse (vrai/faux) et complément d'information
<p>«Des contraintes techniques subsistent encore, ce qui limite la teneur en agrégats d'enrobés et empêche d'atteindre un fort taux de recyclage.»</p> <p>Concerne les enrobés recyclés.</p> <p>Relève du domaine technique.</p>	<p> (Faux) en ce qui concerne les couches de liaison (AC B), les couches de base (AC T) et les couches de fondation (AC F).</p> <p> (Vrai) en ce qui concerne les couches de roulement et les AC EME.</p> <p>De plus amples informations à ce sujet sont disponibles au niveau du chapitre 5.</p>
<p>«Les centrales d'enrobage en Suisse :</p> <ul style="list-style-type: none"> - sont obsolètes; - ont des performances limitées; - sont insuffisamment équipées et peu flexibles. <p>Il y a trop peu d'innovation et de possibilités d'investissement de la part des entreprises et des producteurs d'enrobés (notamment en ce qui concerne les petites installations).»</p> <p>Concerne les enrobés recyclés et les enrobés tièdes.</p> <p>Relève du domaine technique et économique.</p>	<p> (partiellement correct)</p> <p>Cette déclaration peut s'appliquer aux petites entreprises et aux centrales d'enrobage produisant de faibles volumes (quantités). Une généralisation à l'ensemble des installations en Suisse n'est pas recevable.</p> <p>A ce jour, les enrobés tièdes peuvent être produits dans la plupart des centrales d'enrobage en Suisse. Le procédé de fabrication « par ajout d'additifs » ne nécessite aucun équipement spécifique, tandis que le procédé de fabrication à partir de « bitume mousse » nécessite l'installation d'un équipement approprié (générateur de mousse).</p> <p>Concernant les enrobés recyclés, l'ensemble des centrales d'enrobage n'est effectivement pas encore équipé pour produire des enrobés recyclés à forte teneur en agrégats d'enrobés. Toutefois, les installations ne pouvant fabriquer et fournir ce type de produits ont généralement une production annuelle limitée et des ressources (d'investissement) réduites. De plus, bien que les coûts initiaux soient élevés, les centrales s'équipent progressivement avec des équipements permettant d'atteindre de fort taux de recyclage (tambour parallèle ou tambour à contre-courant).</p> <p>Il est important de noter, qu'en principe, l'ensemble des chantiers en Suisse peut être approvisionnés avec des enrobés recyclés à fort taux et des enrobés tièdes.</p> <p>Pour plus d'informations à ce sujet, voir le chapitre 2.5.</p>

Déclaration/témoignage	Analyse (vrai/faux) et complément d'information
<p>«En ce qui concerne la mise en œuvre des enrobés tièdes :</p> <p>- la mise en œuvre par temps froid peut s'avérer problématique;</p> <p>- le délai entre la fabrication et la mise en œuvre est court/réduit.»</p> <p>Concerne les enrobés tièdes.</p> <p>Relève du domaine technique et économique.</p>	<p> (partiellement correct)</p> <p>Comme mentionné au chapitre 2, le comportement d'un enrobé tiède dépend du procédé de fabrication employé (bitume mousse ou additifs) et aussi, le cas échéant, du type d'additif.</p> <p>Grâce à une diminution de la viscosité par l'intermédiaire de l'ajout d'additifs et/ou l'emploi de bitume mousse, les enrobés tièdes présentent généralement des propriétés similaires à celles des enrobés à chaud. Cela concerne en particulier les aspects relatifs à l'enrobage, à la maniabilité et à l'aptitude au compactage.</p> <p>Enfin, certains types d'enrobés tièdes peuvent présenter des avantages par rapport aux enrobés à chaud, comme par exemple:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Une mise en œuvre par temps « froid » possible; • Une augmentation du délai de maniabilité sur chantier.
<p>«Le retour d'expérience fait défaut, en particulier concernant le retour d'expérience à long terme.»</p> <p>Concerne les enrobés recyclés et les enrobés tièdes.</p> <p>Relève du domaine technique et logistique.</p>	<p> (partiellement correct, en ce qui concerne le retour d'expérience sur le long terme).</p> <p>Des enrobés recyclés contenant un fort taux d'agrégats d'enrobés ainsi que des enrobés tièdes ont déjà été mis en œuvre dans le cadre de projets de construction routière. Une liste avec quelques références est d'ailleurs disponible au chapitre 4.2. Ce ne sont donc pas, à proprement parler, les expériences avec ce type de produits qui manquent.</p> <p>Cependant, il s'agit souvent de constructions récentes ou de chantiers dans le cadre desquels aucun contrôle ni suivi exhaustif n'ont été effectués. Il y a donc effectivement un manque de retours d'expérience sur le long terme. Pour pallier ce manque, un suivi à long terme des tronçons déjà réalisés peut être organisé. Il est important de souligner ici que, s'agissant des enrobés recyclés et des enrobés tièdes, dans certains cantons, comme par exemple le canton de Vaud, un retour d'expérience qui remonte sur une dizaine d'années environ est disponible et les feedbacks relatifs à ces expériences sont positifs.</p>

Déclaration/témoignage	Analyse (vrai/faux) et complément d'information
<p>«Des points en suspens subsistent encore concernant la combinaison entre les technologies de recyclage à fort taux et de fabrication tiède.»</p> <p>Concerne les enrobés recyclés et les enrobés tièdes.</p> <p>Relève du domaine technique.</p>	<p> (vrai)</p> <p>La combinaison entre les technologies de recyclage à fort taux et de fabrication tiède appartient aujourd'hui encore au domaine de l'innovation. Plusieurs projets pilotes combinant ces deux technologies ont déjà été réalisés. Une liste avec quelques références est disponible au niveau chapitre 4.2. Dans le cadre de ces projets, le comportement mécanique ainsi que les propriétés des enrobés recyclés à fort taux et fabriqués avec une température réduite ont notamment été étudiés.</p> <p>Sous réserve que les producteurs d'enrobés aient déjà une expérience avec ce type de produits, les quantités admissibles concernant l'incorporation d'agrégats d'enrobés (ajout à chaud) présentées dans la norme SN 640 431-1-NA / EN 13108-1 [11] tabl. 3 sont adaptées lorsque le recyclage est combiné à une technique de fabrication tiède.</p>
<p>«Des incertitudes persistent concernant le recyclage multiple et l'incorporation d'agrégats d'enrobés dans des revêtements avec des liants modifiés (PmB).»</p> <p>Concerne les enrobés recyclés.</p> <p>Relève du domaine technique et logistique.</p>	<p> (vrai)</p> <p>Le thème du recyclage multiple doit effectivement faire l'objet de recherches plus approfondies. Des projets de recherche au niveau D-A-CH et dans le cadre du paquet de recherche national <i>sur le recyclage des matériaux bitumineux de démolition des routes dans des enrobés à chaud</i> (EP2) ont déjà été réalisés ou sont en cours.</p> <p>Les recherches concernant la thématique des bitumes modifiés par des polymères PmB doivent également être approfondies. Il y a notamment deux aspects encore à étudier. Tout d'abord, la présence de forte teneur en PmB dans les agrégats d'enrobés qui peut entraîner des problèmes lors de la fabrication des enrobés recyclés (fort pouvoir adhérent du PmB). De plus, si l'objectif visé est d'obtenir un enrobé recyclé dont le liant présente les propriétés d'un PmB, une adaptation de la formulation est nécessaire (proportion d'agrégats d'enrobés, liant d'apport, additifs éventuels) afin que les propriétés du liant final visées puissent être atteintes. Pour plus d'informations, voir les chapitres 5.3 à 5.5.</p>

Déclaration/témoignage	Analyse (vrai/faux) et complément d'information
<p>«L'incorporation d'agrégats d'enrobés dans les enrobés conduit seulement à une diminution limitée des coûts de fabrication et de fourniture des enrobés recyclés par rapport aux produits standards.»</p> <p>Concerne les enrobés recyclés.</p> <p>Relève du domaine économique.</p>	<p> (faux)</p> <p>Les coûts relatifs à la fabrication et à la fourniture d'un enrobé recyclé sont réduits de 10% environ par rapport à un enrobé fabriqué sans agrégat d'enrobés. La réutilisation d'agrégats d'enrobés permet donc de réaliser des économies, bien que le coût de l'investissement initial relatif à l'équipement de la centrale d'enrobage soit conséquent. Toutefois, les acteurs de la profession s'attendent à un gain financier plus important s'agissant des enrobés recyclés à fort taux, produit nouvellement arrivé sur le marché et présentant des performances similaires aux produits usuels déjà disponibles. C'est pourquoi, il est important de souligner ici que les avantages présentés par les enrobés recyclés se situent davantage sur le plan écologique qu'économique, l'aspect écologique devant primer.</p>
<p>«Malgré les économies d'énergie réalisées, le coût de production des enrobés tièdes peut s'avérer plus élevé.»</p> <p>Concerne les enrobés tièdes.</p> <p>Relève du domaine économique.</p>	<p> (partiellement correct)</p> <p>Comme déjà mentionné au chapitre 2, il n'existe pas un mais plusieurs types d'enrobés tièdes différents.</p> <p>Qu'il s'agisse des coûts d'approvisionnement en additifs (enrobés tièdes fabriqués à partir d'un ajout d'additifs) ou des coûts d'acquisition pour l'équipement de la centrale d'enrobage avec un générateur de mousse (enrobés tièdes fabriqués à partir de bitume mousse), la fabrication d'enrobés tièdes génère, dans une grande majorité des cas, des coûts supplémentaires par rapport à la fabrication d'un enrobé à chaud. Toutefois, dans la plupart des cas, ces coûts supplémentaires sont compensés par les économies d'énergie réalisées.</p> <p>Il est important de souligner que le prix de la fourniture d'un enrobé tiède est comparable à celui d'un enrobé à chaud.</p>


Déclaration/témoignage	Analyse (vrai/faux) et complément d'information
<p>«La coexistence de deux types de production (tiède et à chaud) dans une même centrale d'enrobage est difficilement viable d'un point de vue technique et économique.»</p> <p>Concerne les enrobés tièdes.</p> <p>Relève du domaine technique et économique.</p>	<p> (partiellement correct)</p> <p>Comme déjà mentionné au chapitre 2, il n'existe pas un mais plusieurs types d'enrobés tièdes différents.</p> <p>Concernant la fabrication d'enrobés tièdes par l'intermédiaire d'un ajout d'additifs, la production de gâchées individuelles/ponctuelles est possible et économiquement viable.</p> <p>Concernant la fabrication d'enrobés tièdes par l'emploi de bitume mousse, une modification/adaptation de l'ensemble de la ligne de fabrication est nécessaire. Ce procédé est donc plutôt adapté à la production de grandes quantités d'enrobés tièdes.</p>
<p>«Il est nécessaire de développer des essais de laboratoires adaptés aux enrobés recyclés et aux enrobés tièdes.»</p> <p>Concerne les enrobés recyclés et les enrobés tièdes.</p> <p>Relève du domaine technique et normatif.</p>	<p> (vrai)</p> <p>Afin de bien maîtriser les propriétés et le comportement des enrobés recyclés et des enrobés tièdes, le recours à de nouvelles méthodes, plus pertinentes et mieux adaptées à ces produits, sont nécessaires. Cela concerne notamment les essais sur le liant avec notamment le recours à des essais rhéologiques.</p> <p>Dans le cas des enrobés recyclés et des enrobés tièdes, il est nécessaire d'adapter le programme d'essais pour les enrobés. Concernant les enrobés recyclés, il est pertinent d'étudier, entre autres, le comportement à froid et la sensibilité aux déformations permanentes de ces enrobés. Concernant les enrobés tièdes, il est nécessaire de déterminer, entre autres, la maniabilité et également d'adapter les conditions d'essai (températures de référence notamment).</p> <p>Parallèlement à cela, il est nécessaire de réviser et compléter la normalisation actuelle.</p> <p>Plus de détails à ce sujet ainsi que propositions concernant l'adaptation du programme d'essais pour les enrobés recyclés et les enrobés tièdes sont disponibles au niveau des chapitres 5.3 à 5.5.</p>

Déclaration/témoignage	Analyse (vrai/faux) et complément d'information
<p>«Les normes suisses actuelles sont trop sévères et limitent l'innovation. La limitation par la norme de la teneur maximale en agrégats d'enrobés est problématique, tout comme les exigences concernant les températures de fabrication et de mise en œuvre.»</p> <p>Concerne les enrobés recyclés et les enrobés tièdes.</p> <p>Relève du domaine normatif et institutionnel.</p>	<p> (partiellement correct)</p> <p>Comme déjà mentionné, il est nécessaire de réviser la normalisation actuelle et, au besoin, de la compléter afin notamment que le programme et les conditions d'essais sur les enrobés tiennent compte, à l'avenir, des caractéristiques et du comportement spécifiques des enrobés recyclés et des enrobés tièdes. Un moyen qui permettrait aussi de mieux appréhender les enrobés recyclés et les enrobés tièdes dans la normalisation serait de faire évoluer les normes suisses, en modifiant les normes empiriques actuelles, afin d'aboutir à des normes orientées sur les performances.</p> <p>Les normes orientées sur les performances sont des normes faisant, avant tout, référence aux performances des produits et proposant une approche fondamentale concernant les spécifications y relatives. Selon la norme SN 640 431-1-NA/EN 13 108-1 [11], une approche fondamentale spécifie les enrobés bitumineux en termes d'exigences fondées sur des performances. Celles-ci sont complétées par des prescriptions limitées concernant la composition et les constituants. Ce type d'approche offre aux producteurs d'enrobés et aux entreprises de construction un plus grand degré de liberté dans le développement et l'optimisation des produits par rapport à une approche empirique, notamment concernant la composition du mélange (y compris la teneur en agrégats d'enrobés) le processus de fabrication et de mise en œuvre (y compris en ce qui concerne les températures). L'approche empirique est également définie dans la norme SN 640 431-1-NA/EN 13 108-1 [11] comme spécifiant les enrobés bitumineux en termes de recettes (composition) et d'exigences pour les constituants, complétées avec des exigences additionnelles fondées sur des essais en relation avec les performances. A l'heure actuelle, la normalisation suisse repose en majorité sur des approches (ou spécifications) empiriques.</p> <p>La normalisation suisse dépend du système de normalisation européen. Aussi, il est nécessaire de tenir compte du contexte normatif européen existant avant toute adaptation ou modification de la normalisation suisse. C'est une des raisons pour laquelle le développement de normes propres au niveau local peut s'avérer complexe. Le développement de nouvelles exigences au niveau des annexes nationales, qui complètent et précisent les normes européennes, est aussi envisageable. L'élaboration de normes orientées sur les performances représente toutefois un travail de grande ampleur.</p> <p>Il est important de souligner que la normalisation actuelle autorise déjà une certaine liberté (flexibilité), qui est loin d'être totalement exploitée concernant les enrobés recyclés à fort taux et les enrobés tièdes. Ainsi, les entreprises de construction mentionnent qu'il est rare que les maîtres d'ouvrages intègrent dans leurs appels d'offres des enrobés recyclés à fort taux et/ou tièdes. Par ailleurs, une grande majorité des enrobés produits actuellement présentent des teneurs en agrégats d'enrobés inférieures aux valeurs maximales admissibles autorisées par la norme.</p>

	<p>Il est finalement important de rappeler que les ingénieurs et les maîtres d'ouvrage disposent d'une certaine marge de manœuvre ainsi que d'une certaine liberté dans la conception et le développement des projets. Cela concerne, en particulier, le choix des enrobés bitumineux. Ils peuvent ainsi autoriser, voire exiger, le recours à des produits aux impacts écologiques et énergétiques limités, voire des produits innovants, même si les exigences des normes ne sont pas respectées (par exemple en ce qui concerne la teneur en agrégats d'enrobés).</p> <p>Enfin, afin de compléter les normes actuelles, il est aussi possible d'intégrer des spécifications supplémentaires relatives aux enrobés recyclés et aux enrobés tièdes, dans les documents d'appel d'offres.</p>
Déclaration/témoignage	Analyse (vrai/faux) et complément d'information
<p>«Il y a un manque de connaissances et de personnel qualifié au sein de la profession concernant ces thématiques. Une sensibilisation des professionnels de la branche semble nécessaire.»</p> <p>Concerne les enrobés recyclés et les enrobés tièdes.</p> <p>Relève du domaine institutionnel.</p>	<p> vrai</p> <p>De nombreux acteurs de la profession souhaiteraient avoir davantage de possibilités de formation et de sensibilisation en ce qui concerne les thématiques des enrobés recyclés et des enrobés tièdes. Le manque de connaissances et d'expertise sur ces thèmes, ainsi que la persistance d'idées reçues et de préjugés, sont à l'origine du scepticisme et de la réserve dont font preuve certains ingénieurs et maîtres d'ouvrage quant à l'utilisation de ces produits dans les projets de construction routière.</p> <p>Le guide des bonnes pratiques ainsi que la brochure de présentation y relative ont pour objectif de contribuer à améliorer la situation actuelle.</p>
<p>«Les maîtres d'ouvrage devraient faire plus confiance aux entreprises. Il y a un manque de soutien de la part des maîtres d'ouvrage en matière d'innovation.»</p> <p>Concerne les enrobés recyclés et les enrobés tièdes.</p> <p>Relève du domaine institutionnel.</p>	<p> partiellement correct</p> <p>Cette affirmation est liée au constat fait dans le point précédent. En effet, il est difficile pour un maître d'ouvrage de promouvoir les enrobés recyclés et les enrobés tièdes dans le cadre de ses projets s'il ne dispose pas des connaissances techniques de base et s'il n'a pas été sensibilisé à ces thématiques.</p> <p>La promotion des enrobés recyclés et des enrobés tièdes par les maîtres d'ouvrage est bien évidemment une des conditions pour le développement d'une demande et d'un marché pour ces produits. La promotion de ces produits par les maîtres d'ouvrage constituerait également un signal positif fort auprès des producteurs d'enrobés et des entreprises de construction. Il est cependant important de souligner ici que plusieurs maîtres d'ouvrage publics encouragent déjà activement ce type de produits en Suisse (par exemple : l'OFROU, l'office des ponts et chaussées du canton de Zurich, le canton d'Argovie ou encore le canton de Vaud).</p>

Déclaration/témoignage	Analyse (vrai/faux) et complément d'information
<p>«Il existe une certaine réticence de la part des producteurs d'enrobés et des entreprises de construction à proposer des enrobés recyclés à fort taux et des enrobés tièdes, de même qu'un manque de garantie vis-à-vis de ces produits».</p> <p>Concerne les enrobés recyclés et les enrobés tièdes.</p> <p>Relève du domaine technique et institutionnel.</p>	<p> vrai</p> <p>Certains producteurs d'enrobés et/ou entreprises de construction refusent de fournir la garantie usuelle lorsqu'un maître d'ouvrage exige des enrobés recyclés à fort taux et/ou des enrobés tièdes dans le cadre de projets (exigences du dossier d'appels d'offres). De telles situations ne sont pas acceptables.</p> <p>Les enrobés tièdes et les enrobés recyclés avec une forte teneur en agrégats d'enrobés, tels que définis au chapitre 5 (domaine d'application), peuvent aujourd'hui être considérés comme étant des produits standards. Un produit standard est un produit qui, selon l'état des connaissances et de la technique, peut être fabriqué, transporté et mis en œuvre sur un chantier sans présenter une prise de risque supplémentaire par rapport aux enrobés bitumineux conventionnels. Il ne s'agit alors plus d'innovation et le fait que les maîtres d'ouvrage aient un risque supplémentaire à assumer, c'est-à-dire qu'ils aient à accepter des travaux sans garantie ou avec une garantie limitée, n'est pas justifié.</p> <p>Pour les cas où il s'agit réellement d'innovation (par exemple : combinaison d'une technologie de recyclage à fort taux et d'une fabrication tiède, incorporation d'agrégats d'enrobés dans un revêtement phono-absorbant ou encore taux de recyclage proche de 100%), la mise en place d'une charte d'innovation serait une solution pertinente afin notamment que les maîtres d'ouvrage et les entreprises de construction puissent continuer d'innover tout en partageant le risque. Des exemples de ce type existent déjà dans d'autres pays et ils permettent de promouvoir des projets d'innovation ainsi que des partenariats entre les maîtres d'ouvrage et les entreprises de construction.</p>

Déclaration/témoignage	Analyse (vrai/faux) et complément d'information
<p>«L'aspect économique prédomine encore par rapport à l'aspect environnemental. Les enrobés recyclés et les enrobés tièdes ne sont souvent considérés qu'en tant que « nice to have » dans le cadre des projets de construction».</p> <p>Concerne les enrobés recyclés et les enrobés tièdes.</p> <p>Relève du domaine économique et institutionnel.</p>	<p> partiellement correct</p> <p>Dans le cadre de l'évaluation des offres déposées, la pondération du prix prédomine généralement dans le calcul de la note globale (>50% de la note globale). En revanche, la pondération attribuée aux aspects environnementaux (entre autres les aspects liés au recyclage et aux enrobés tièdes) représente au maximum 15% de la note globale.</p> <p>Le message ainsi envoyé par les maîtres d'ouvrage concernant leur volonté de soutenir et de mettre en œuvre des enrobés recyclés et des enrobés tièdes dans le cadre de projets n'est pas encore assez fort, ce qui rend difficile la mise en place et le développement d'un marché pour ces produits.</p> <p>Pourtant, selon les prescriptions de la réglementation en vigueur, les maîtres d'ouvrage sont incités à promouvoir davantage des produits respectueux de l'environnement et économes en ressources dans le cadre de projets financés avec des fonds publics. Cela signifie notamment d'accorder plus de poids aux aspects relatifs au développement durable dans l'évaluation et la notation des appels d'offres. Vous trouverez plus de détails concernant ce sujet au chapitre 6.3.</p>
<p>«Une interdiction de mise en décharge pourrait encourager le recyclage des agrégats d'enrobés.»</p> <p>Concerne les enrobés recyclés.</p> <p>Relève du domaine technique et institutionnel.</p>	<p> vrai, à court terme</p> <p> faux, à long terme</p> <p>Il est nécessaire de considérer les décharges en tant que "dépôts de matières premières pour un usage futur". Le terme "dépôt" est préférable au terme "décharge". En effet, le terme dépôt inclut une notion de valeur (par exemple : dépôt bancaire). L'état de la technique va continuer à se développer dans les années à venir et, à l'avenir, il sera certainement possible de valoriser, mieux ou différemment, les agrégats d'enrobés (y compris ceux avec une teneur élevée en HAP) qui ne sont pas réutilisés à ce jour. A ce titre, le développement des "mono-décharges" s'avère être une solution intéressante.</p>

Déclaration/témoignage	Analyse (vrai/faux) et complément d'information
<p>«La mise en place d'une méthodologie uniformisée pour l'évaluation du bilan écologique des enrobés permettrait de favoriser le recours aux enrobés recyclés et aux enrobés tièdes.»</p> <p>Concerne les enrobés recyclés et les enrobés tièdes.</p> <p>Relève du domaine technique et institutionnel.</p>	<p> vrai</p> <p>Plusieurs ingénieurs et maîtres d'ouvrage ont fait part de leur intérêt quant au développement d'une méthodologie, voire d'un outil, qui permettrait d'évaluer et d'analyser le cycle de vie des variantes proposées par les entrepreneurs dans les offres. Cela permettrait, entre autres, d'élaborer de nouveaux critères d'évaluation et d'adjudication, objectifs et équitables, et aussi de tenir compte et de valoriser les avantages que présentent les enrobés recyclés et les enrobés tièdes. Plusieurs exemples de méthodes et d'outils déjà développés à l'étranger sont disponibles.</p>

4 Références et expériences déjà réalisées avec les enrobés recyclés et les enrobés tièdes

4.1 La normalisation suisse

4.1.1 Quantités admissibles d'agrégats d'enrobés dans les enrobés bitumineux (thématique des enrobés recyclés)

Le tableau 10 ci-dessous présente les quantités admissibles d'agrégats d'enrobés (préconisées par la norme) dans les enrobés bitumineux en fonction des couches, des sortes et des types d'enrobés. Ce tableau est issu de la norme SN 640 431-1-NA [11].

Seules les quantités admissibles relatives à l'ajout à chaud des agrégats d'enrobés sont considérées dans ce chapitre. La norme tient également compte du cas d'un ajout à froid des agrégats d'enrobés. Cependant un ajout à froid ne permet pas d'atteindre de fort taux de recyclage dans les enrobés.

Quantités d'agrégats d'enrobés [% massique]	
Enrobés bitumineux pour couches de roulement AC S, AC H et AC MR	0%
Enrobés bitumineux pour couches de roulement AC N et AC L	≤ 30%
Enrobés bitumineux pour couches de liaison AC B	≤ 30%
Enrobés bitumineux à module élevé AC EME	≤ 30%
Enrobés bitumineux pour couches de base AC T	≤ 60%
Enrobés bitumineux pour couches de fondation AC F	≤ 70%

Tableau 10: Enrobés bitumineux, quantités admissibles selon la normalisation suisse (ajout à chaud)

Comme déjà évoqué au chapitre 1, les agrégats d'enrobés réutilisés dans la fabrication de nouveaux enrobés doivent répondre aux exigences de la norme SN EN 13 108-8 [8]. Cela vaut également pour les autres constituants des enrobés bitumineux, qui doivent respecter les normes en vigueur. Il s'agit des granulats, des liants, etc. En cas d'utilisation d'agrégats d'enrobés, le liant d'apport doit être sélectionné afin que les caractéristiques du liant final, mélange du liant récupéré et du liant d'apport, satisfassent les exigences de la norme. Ainsi, le respect des quantités d'agrégats d'enrobés indiquées dans la norme, et résumées dans le tableau ci-dessus, ne constitue pas le seul critère à respecter lors de la fabrication d'enrobés recyclés pour garantir la qualité du produit.

Les propriétés, les performances et la durabilité des enrobés recyclés doivent être équivalentes à celles des enrobés standards produits exclusivement à partir de ressources primaires. Dans le cas des enrobés recyclés, les exigences de la norme SN 640 431-1-NA/EN 13108-1 [11] doivent également être respectées. L'utilisation de matériaux recyclés (agrégats d'enrobés) ne constitue pas un motif valable pour déroger aux exigences de la norme [11] ou les adapter.

Enfin, il est important de noter que la norme SN 640 431-1-NA [11] autorise l'utilisation de quantités plus élevées d'agrégats d'enrobés que celles indiquées dans le tableau 10. Aussi, pour autant qu'un accord soit conclu entre le maître d'ouvrage et l'entreprise de construction, il est possible de dépasser les limites préconisées par la norme.

4.1.2 Température de fabrication des enrobés bitumineux (thématique des enrobés tièdes)

Le tableau 11 ci-dessous présente les plages de température admissibles (selon la norme SN 640 431-1-NA [11]) pour l'ensemble des phases de production d'un enrobé bitumineux. Ces plages de température dépendent du type de liant utilisé. Les valeurs indiquées dans la norme ne concernent que les enrobés dont le liant final est un bitume routier.

Asphaltbeton, Bereiche der zulässigen Mischguttemperaturen in allen Phasen der Aufbereitung <i>Enrobés bitumineux, plages des températures d'enrobés admissibles pour toutes les phases de production</i>	
<i>Penetration des Bitumens</i> <i>Pénétration du bitume</i> [1/10 mm]	<i>Bereiche der zulässigen Mischguttemperaturen</i> <i>Plages des températures d'enrobés admissibles</i> [°C]
30/50	150...190
50/70	140...180
70/100	140...180
100/150	130...170
160/220	130...170

Tableau 11: plages de température d'enrobés admissibles pour toutes les phases de production (source normes VSS : SN 640 431-1-NA [11])

Concernant l'utilisation de bitume polymère (PmB) ou de bitume dur, d'autres plages de température peuvent s'appliquer. Celles-ci sont généralement spécifiées par les fournisseurs de liant.

La norme SN 640 431-1-NA/EN 13108-1 [11] mentionne qu'il est possible d'utiliser des températures de fabrication plus basses que celles préconisées, par l'intermédiaire d'additifs ou d'autres procédés spécifiques. Cette remarque s'applique notamment aux enrobés tièdes. Toutefois, l'aptitude des enrobés ainsi produits doit être démontrée, en particulier les propriétés (p.ex. la maniabilité et l'aptitude au compactage), les performances et la durabilité. Les caractéristiques présentées par les enrobés tièdes doivent être semblables à celles des enrobés à chaud.

Rappel: on parle d'enrobé tiède lorsque la température de fabrication est réduite d'environ 30°C par rapport à la température de fabrication de l'enrobé à chaud correspondant.

4.2 Les bonnes pratiques: exemples et références

En Suisse, des enrobés recyclés et des enrobés tièdes ont déjà été utilisés et mis en œuvre dans le cadre de projets de construction routière. La technologie de fabrication tiède est toutefois moins connue que celle du recyclage des agrégats d'enrobés, notamment auprès des maîtres d'ouvrage. Il existe également des projets dans le cadre desquels les technologies de fabrication tiède et de recyclage ont été combinées. A l'heure actuelle, des références relatives aux enrobés recyclés et aux enrobés tièdes sont disponibles à tous les niveaux (communal, cantonal et national) ainsi que pour toutes les couches de chaussée (de la couche de fondation à la couche de roulement).

Dans ce qui suit, vous trouverez une synthèse de quelques projets de référence en matière d'enrobés recyclés et d'enrobés tièdes. Si les références avec des enrobés recyclés et des enrobés tièdes en Suisse ne manquent pas, la difficulté réside dans le fait de trouver des références bien documentées et dans le cadre desquelles un suivi à long terme a été effectué.

4.2.1 Références sur les enrobés recyclés

Des enrobés recyclés avec une forte teneur en agrégats d'enrobés ont déjà été testés dans l'ensemble des couches de chaussées, c'est-à-dire même dans les couches de roulement. Les enrobés recyclés ont également été utilisés à destination de toutes les catégories de routes, c'est-à-dire sur des routes communales mais aussi des routes cantonales et nationales. Les enrobés recyclés ont également été mis en œuvre sur des chaussées dont les classes de trafic vont de T1 à T6. Ces enrobés à forte teneur en matériau recyclé (agrégats d'enrobés) ne conviennent donc pas qu'aux chemins piétonniers, pistes cyclables ou chaussées à faible trafic. Les enrobés recyclés peuvent également être mis en œuvre sur des chaussées plus fortement sollicitées (à fort trafic). Cependant, dans ces cas-là, des réserves subsistent en ce qui concerne la pose à la main (rigidité et maniabilité du produit) d'une part, et la mise en œuvre sur des chantiers en altitude (comportement à basse température, fissuration thermique) d'autre part.

Pour la majorité des références d'enrobés recyclés présentées dans ce chapitre, une épreuve de formulation (fiche technique) relative au produit mis en œuvre a été demandée et les essais usuels ont été réalisés in situ. Dans certains cas, une planche d'essai a également été réalisée avant les travaux. Des essais complémentaires à ceux effectués habituellement ont également été réalisés en laboratoire pour étudier les caractéristiques spécifiques relatives aux enrobés recyclés. Il s'agit notamment d'essais réalisés sur les agrégats d'enrobés, en tant que constituant de l'enrobé recyclé mis en œuvre. Les aspects qui ont été étudiés sont les caractéristiques des granulats provenant des agrégats d'enrobés, l'homogénéité des agrégats d'enrobés en termes de granulométrie, teneur en liant et caractéristiques du liant récupéré. Le comportement à basse température des enrobés recyclés a également été examiné, soit au moyen d'un essai sur le liant (point de fragilité Fraass), soit au moyen d'un essai sur l'enrobé (essai de retrait empêché d'une éprouvette sous contrainte thermique TSRST). Ce dernier, c'est-à-dire l'essai sur l'enrobé, est davantage représentatif du comportement à basse température, mais nécessite plus de moyens. Des essais rhéologiques ont également été réalisés sur le liant. Ces essais ont été effectués avec un rhéomètre à cisaillement dynamique DSR selon la méthode T-Sweep (domaine des basses températures) et la méthode de caractérisation rapide du liant BTSV (domaine de températures élevées). L'étude du liant au moyen de méthodes rhéologiques permet d'obtenir des informations plus représentatives et pertinentes sur le liant final (c'est-à-dire le mélange entre le liant récupéré issu des agrégats d'enrobés et le liant d'apport) en comparaison aux résultats obtenus avec des essais plus traditionnels sur le liant (pénétrabilité à l'aiguille, point de ramollissement bille-anneau). Ces essais complémentaires réalisés permettent d'optimiser la teneur en agrégats d'enrobés dans les enrobés recyclés. Enfin, le compactage des couches en place réalisées avec des enrobés recyclés a également été contrôlé, notamment par l'intermédiaire d'un suivi (monitoring) durant la mise en œuvre (point important concernant la maniabilité et l'aptitude au compactage des enrobés recyclés).

Vous trouverez une description détaillée des essais évoqués ci-dessus dans les chap. 5.3 à 5.5.

La normalisation suisse ne fait que peu référence aux essais permettant de déterminer le comportement à basse température des liants/enrobés (point de fragilité Fraass ou TSRST) ainsi qu'aux essais rhéologiques sur les liants. Ces aspects n'ont d'ailleurs guère été étudiés jusqu'à présent. L'utilisation de ces essais est plus développée dans d'autres pays, p.ex. en Allemagne,

où la FGSV (Association pour la recherche dans le domaine de la route et des transports) a publié plusieurs directives relatives à ces essais.

Dans le cadre de l'analyse des différents projets présentés en tant que références dans ce chapitre, des différences entre les enrobés recyclés et les enrobés standards ont été constatées. Dans l'un des exemples analysés, les enrobés recyclés (AC T et AC F) présentent une plus grande rigidité que ces mêmes enrobés fabriqués sans agrégat d'enrobés. Cela s'explique par le fait que le liant récupéré issu des agrégats d'enrobés est plus rigide/dur en raison du vieillissement qu'il a subi. Il est toutefois possible de corriger les caractéristiques d'un liant résiduel vieilli en ajoutant un liant mou (bitume d'apport) et/ou des additifs (par exemple, des réjuvenateurs). Un enrobé recyclé trop rigide peut conduire à l'apparition de dégradations prématurées, notamment de la fissuration thermique vis-à-vis des basses températures. Par ailleurs, un des mélanges recyclés étudiés (AC F) dans le cadre des références ci-dessous présente une sensibilité plus élevée aux déformations permanentes par rapport à un produit standard. Cela peut s'expliquer, d'une part, par l'effet lubrifiant du liant résiduel issu des agrégats d'enrobés qui engendre un post-compaction et également par la forme des gravillons et du sable issus des agrégats d'enrobés qui est plus « ronde ». Il faut toutefois considérer ces résultats avec prudence. Ils ne sont en effet pas généralisables à l'ensemble des enrobés recyclés étudiés. Enfin, d'autres exemples ont également montré que le comportement à basse température des enrobés recyclés est comparable au comportement à basse température des produits standards (c'est-à-dire sans agrégats d'enrobés) et la résistance aux déformations permanentes s'avère dans certains cas être meilleure avec des enrobés recyclés.

Le recours à des enrobés recyclés permet d'obtenir des produits et des variantes de projet compétitifs sur le plan économique. Des coûts supplémentaires (par exemple ceux liés aux contrôles réalisés en laboratoire et in situ ou encore aux ressources nécessaires à la planification du projet et au suivi des travaux) sont, encore aujourd'hui, à prendre en compte lorsque des enrobés recyclés sont mis en œuvre dans le cadre d'un projet. Ceux-ci peuvent toutefois être compensés par les économies réalisées lors de la fabrication (fourniture du produit). La mise en œuvre d'enrobés recyclés permet également de réduire les quantités d'agrégats d'enrobés dans les décharges. Le bilan environnemental (cycle de vie) des enrobés recyclés avec une forte teneur en agrégats d'enrobés est également favorable. L'utilisation d'enrobés recyclés permet de favoriser le recyclage et le développement durable dans le cadre des projets de construction, deux aspects au cœur des préoccupations politiques des administrations et des autorités publiques.

Enfin, aucun problème significatif n'a été constaté durant la mise en œuvre des enrobés recyclés ou ultérieurement. Les facteurs principaux auxquels il faut porter une attention particulière lors de la mise en œuvre des enrobés recyclés, à savoir la pose, la maniabilité et le compactage, sont les mêmes que pour des enrobés standards. Bien que certaines différences par rapport aux enrobés fabriqués sans ou avec une faible teneur en agrégats d'enrobés aient été observées, les enrobés recyclés respectent les exigences des normes. En outre, selon les retours d'expérience, aucun problème de durabilité n'a été observé.

Dans les deux tableaux ci-dessous, vous trouverez une liste de quelques références pertinentes et représentatives recueillies au cours de l'élaboration du guide des bonnes pratiques. Le premier tableau (tableau 12) présente deux références au niveau cantonal et une référence au niveau communal. Celles-ci sont bien documentées. Le deuxième tableau (tableau 13) contient des références pour lesquelles la totalité des informations (documentation) n'était pas disponible, mais qu'il est tout de même intéressant et pertinent de présenter dans le cadre de ce guide.

	Canton de Vaud RC 639 Mollie-Margot/Forel Juillet 2015	Canton d'Argovie Route cantonale Würenlos – Oetwil 2018 – 2019	Ville de Küsnacht Route cantonale Été 2019
Domaine d'applications	Route cantonale TJM env. 750 Classe de trafic T1	Projet d'aménagement cyclable et d'assainissement des revêtements RP, TJM env. 7'500 Classe de trafic T4	Route communale TJM env. 1'400 Classe de trafic T3
Produits mis en œuvre	AC T 22 S 60% RAP AC F 22 70% RAP	<u>Piste cyclable:</u> AC T 22 N B50/70 RAP>80% AC 8 N B70/100 20-30% RAP <u>Chaussée:</u> AC T 22 S PmB 45/80-65 60% RAP AC B 22 S PmB 45/80-65 60% RAP AC 8 H PmB 45/80-65 20-30% RAP	AC 8 S sans RAP / AC 8 S 50% RAP AC T 22 S 60% RAP
Essais de laboratoire ou in situ spécifiques	Laboratoire : <ul style="list-style-type: none"> Essais sur les agrégats d'enrobés, y compris indice de forme, coefficient d'écoulement, résistance à la fragmentation (Los Angeles), % de surfaces concassées. Détermination du point de fragilité Fraass : comportement du liant à basse température. Essai TSRST (Thermal Stress Restrained Specimen Test): comportement à basse température des enrobés. In situ: <ul style="list-style-type: none"> Suivi de la mise en œuvre avec un nucléodensimètre (Troxler): degré de compactage et teneur en vides des couches mises en œuvre. 	<ul style="list-style-type: none"> Aucune mesure complémentaire (par rapport aux cas standards) n'est nécessaire. Les enrobés recyclés mis en œuvre doivent répondre aux mêmes exigences que les enrobés fabriqués uniquement avec des matériaux primaires. Essais usuels, c'est-à-dire épreuve de formulation, planche d'essai et essais in situ. 	Laboratoire : <ul style="list-style-type: none"> Essais sur les agrégats d'enrobés, y compris indice de forme, coefficient d'écoulement, résistance à la fragmentation (Los Angeles), % de surfaces concassées, homogénéité, essais rhéologiques (avec le rhéomètre à cisaillement dynamique DSR). Les liants d'apport (type et dosage) ont été définis par l'intermédiaire d'essais rhéologiques : méthode de caractérisation rapide du liant BTSV (domaine des températures élevées) et méthode température-sweep (domaine de températures basses). Essais sur enrobés : essai TSRST (comportement à basse température), essai de fluage dynamique (résistance aux déformations), essai de traction dynamique (résistance à la fatigue). In situ: <ul style="list-style-type: none"> Contrôles conventionnels relatifs à la composition des enrobés. Contrôles avancés sur le liant récupéré des enrobés recyclés posés par l'intermédiaire d'essais rhéologiques.
Problèmes ou limites observés	<ul style="list-style-type: none"> AC F et AC T: rigidité plus élevée en comparaison d'enrobés fabriqués avec une teneur en agrégats d'enrobés plus faibles. Cela peut conduire à des problèmes de fissuration. AC F: Sensibilité accrue aux déformations permanentes (fluage élevé des éprouvettes lors de l'essai Marshall). 		
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> Le recours à des enrobés recyclés permet de promouvoir le recyclage et le développement durable dans le cadre de projets de construction. Il s'agit d'un engagement politique pris par le canton de Vaud. Les variantes de projet avec les enrobés recyclés sont compétitives (prix env. 10% plus bas). Le recyclage permet de réduire les stocks d'agrégats d'enrobés dans les décharges. 		<ul style="list-style-type: none"> Bilan écologique positif des enrobés recyclés. La mise en œuvre d'enrobés recyclés avec une forte teneur en agrégats d'enrobés présente un avantage environnemental sur l'ensemble de la durée de vie de la chaussée (par rapport à l'utilisation d'enrobés sans ou avec de plus faibles teneurs en agrégats d'enrobés). L'économie réalisée correspond à 4 trajets en avion entre Zurich et New-York soit 73 943 km de trajets en voiture.

	Canton de Vaud RC 639 Mollie-Margot/Forel Juillet 2015	Canton d'Argovie Route cantonale Würenlos – Oetwil 2018 – 2019	Ville de Küssnacht Route cantonale Eté 2019
Feedback	<ul style="list-style-type: none"> • Aucun problème significatif durant la mise en œuvre ou ultérieurement. • Concernant les propriétés/performances, quelques différences ont été observées par rapport aux revêtements avec de plus faibles teneurs en agrégats d'enrobés. Les exigences des normes sont toutefois respectées (sauf pour les résultats de l'essai Marshall sur l'AC F). • Une inspection 3 ans après la mise en œuvre a montré un bon état général. Aucune fissure ou déformation n'a été observée. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aspects liés à la qualité : les exigences des normes ont été respectées (aussi bien dans le cadre des essais d'aptitude que lors des essais réalisés durant ou après la mise en œuvre). • Aspects liés à la maniabilité: pas de différences significatives par rapport aux enrobés contenant une teneur en matériaux recyclés plus faible. • Aspects économiques : coûts supplémentaires pour les essais initiaux et la planche d'essai, sinon compétitifs. • Aspects liés à la durabilité : visuellement aucune différence n'a été constatée par rapport à des chantiers réalisés sans matériau recyclé. La mise en œuvre des chaussées est toutefois encore trop récente pour pouvoir se prononcer sur leur durabilité (long terme). 	<ul style="list-style-type: none"> • Couche de roulement AC 8 (sans et avec 50% RAP): l'atelier de compactage ainsi que les réglages des finisseurs furent identiques que ceux généralement utilisés et l'équipe de pose n'a pas noté de différence. • Les enrobés recyclés respectent les exigences des normes. • Concernant le comportement à basse température et la résistance à la fatigue, les enrobés recyclés présentent des performances similaires aux enrobés sans ou avec de plus faibles teneurs en agrégats d'enrobés. • Concernant la résistance aux déformations, les enrobés recyclés à forte teneur en agrégats d'enrobés ont des performances légèrement supérieures aux enrobés sans ou avec de plus faibles teneurs en agrégats d'enrobés.

Tableau 12: références réalisées avec des enrobés recyclés à forte teneur en agrégats d'enrobés

Références supplémentaires :

	Canton de Berne 2014	Ville d'Uster (ZH) 2019 et 2020	Ville de Berne 2019 et 2020	Canton de Zurich 2018	Canton de Zurich 2020
Domaine d'applications		Routes collectrices principales sur le territoire communal	Routes de quartier	RGD Bülach-Kloten Classe de trafic T6	Limmattalbahn lots 4 et 5 Classe de trafic T4
Produits mis en œuvre	Couches de roulement (projets pilotes) avec une teneur en agrégats d'enrobés jusqu'à 50%.	Objectif: fabrication et mise en œuvre de revêtement avec une teneur en agrégats d'enrobés allant jusqu'à 100% dans les couches de base AC T. En pratique: utilisation de 60% d'agrégats d'enrobés et 30% de gravillons secondaires dans les couches de base AC T (facteur limitant la teneur en agrégats d'enrobés: exigences concernant la courbe granulométrique).	AC F (teneur en agrégats d'enrobés jusqu'à 80-90%) AC T (teneur en agrégats d'enrobés jusqu'à 70-80%). La technologie du recyclage dans les enrobés a été combinée avec un ajout de fibres ainsi qu'une température de fabrication tiède (température de fabrication : 110-120°C).	Couche de fondation AC F 22 B 50/70 avec 90 % d'agrégats d'enrobés. → Une teneur élevée en agrégats d'enrobés (90%) a pu être atteinte par l'intermédiaire de l'ajout d'un réjuvenateur/additif (Rejuvenator Sylva-road).	Couche de liaison AC B 22 H (liant d'apport: Grisolast E85 HM), 50% RAP et env. 15% de gravillons secondaires. Couche de base AC T 22 S (liant d'apport: bitume spécial VJ330) 65% RAP et env. 15% de gravillons secondaires.
Essais de laboratoire ou in situ spécifiques		La ville d'Uster a bénéficié de l'appui d'un laboratoire privé pour les essais en laboratoire et in situ.	<ul style="list-style-type: none"> Aucun essai spécifique en laboratoire ou in situ n'ont été effectués. Les tronçons mis en œuvre sont considérés comme des planches d'essai « grandeur nature ». Le suivi (monitoring) des tronçons est en cours. 	Les produits mis en œuvre doivent répondre aux mêmes exigences que les revêtements fabriqués uniquement à partir de matériaux primaires. Les essais standards, c'est-à-dire ceux relatifs à l'épreuve de formulation, à la planche d'essai et aux contrôles in situ, ont été réalisés.	Des essais DSR (rhéologie sur le liant) ont été réalisés dans le cadre de ce projet.
Problèmes ou limites observés					
Avantages		La variante avec enrobés recyclés était 20 à 30 % moins chère qu'une variante conventionnelle (fourniture + mise en œuvre), mais des coûts un peu plus élevés sont à prévoir pour le suivi de chantier et les essais de laboratoire. En faisant le bilan de l'ensemble des coûts, la variante reste compétitive (prix comparables).	La variante avec enrobés recyclés est compétitive sur le plan financier.		
Feedback	Les observations visuelles faites in situ indiquent qu'on peut s'attendre à des résultats semblables que ceux obtenus avec des revêtements standards.			<ul style="list-style-type: none"> Un retour d'expérience sur le long terme fait encore défaut. D'autres études sont encore en cours dans le cadre du projet HighRAP. 	D'autres études sont encore en cours dans le cadre du projet HighRAP de l'EMPA.

Tableau 13: références supplémentaires réalisées avec des enrobés recyclés à forte teneur en agrégats d'enrobés

[Lien vers le site internet du projet HighRAP.](#)



Projet Bülach-Kloten (canton de Zurich):
phase de mise en œuvre.

4.2.2 Références sur les enrobés tièdes

A l'heure actuelle, il est encore difficile de trouver des références concernant la technologie de fabrication tiède. En effet, cette technologie est encore peu connue en Suisse et donc encore peu utilisée. La majorité des références disponibles en Suisse ont été réalisées dans le cadre du projet de recherche PLANET ainsi que dans le canton de Vaud.

Les enrobés tièdes ont déjà été utilisés à destination des couches de base, des couches de liaison et de roulement. Les enrobés tièdes ont également été mis en œuvre sur des routes communales, cantonales et nationales et même sur des pistes d'aéroport. Les références disponibles concernent aussi bien le procédé de fabrication tiède utilisant un ajout d'additifs que celui utilisant du bitume mousse.

La maniabilité et l'aptitude au compactage sont des paramètres essentiels lorsqu'il s'agit d'enrobés tièdes. Ces deux caractéristiques ont été étudiées dans les cadres des références recueillies et présentées dans ce chapitre. L'obtention d'une maniabilité et d'une aptitude au compactage adéquates est essentielle à la bonne mise en œuvre des enrobés tièdes. Comme déjà mentionné, ces deux paramètres dépendent de la température de l'enrobé et de la viscosité de son liant. Il est donc important de mesurer et de suivre la température d'un enrobé tiède ainsi que l'évolution de sa viscosité durant l'ensemble du processus, de la fabrication à la mise en œuvre. Quelques problèmes relatifs à la maniabilité et au compactage des enrobés tièdes ont été observés dans le cadre des références présentées ci-dessous. Toutefois, il s'agissait-là de problèmes ponctuels et isolés, ne pouvant pas être généralisés à l'ensemble des projets. Concernant les autres références, les exigences des normes ont été respectées.

Pour ce qui des avantages présentés par les enrobés tièdes, outre les points déjà mentionnés au chapitre 2.3, le projet d'assainissement des pistes de l'aéroport de Zurich en est une bonne illustration. Dans le cadre de ce projet, le recours aux enrobés tièdes a permis une réouverture rapide de la piste au trafic aérien. Une approche similaire a été adoptée par la ville de Zurich pour les travaux réalisés au cours d'un week-end (opération « coup de poing »).

Dans la majorité des exemples référencés, des agrégats d'enrobés ont été incorporés aux enrobés tièdes. Pour ce qui est des exemples réalisés dans le canton de Vaud, par la ville de Zurich et l'aéroport de Zurich, il s'agit de teneurs en agrégats d'enrobés usuelles. Il ne s'agit pas de ce qu'on qualifie dans ce guide de « fort taux ». La teneur maximale en agrégats d'enrobés incorporée aux enrobés tièdes est en effet de 40% pour les couches de base et de 30% pour les couches de liaison et de roulement.

Au contraire, concernant la référence réalisée par l'OFROU, il s'agit bien d'une combinaison des technologies de fabrication tiède et de recyclage à fort taux (40% pour un AC EME C2 et 50% pour un AC EME C1). La fabrication et la mise en œuvre de ce genre de produits sont techniquement réalisables. Par ailleurs, il est aussi techniquement possible que ces produits répondent aux exigences des normes. Toutefois, la combinaison d'une technologie de fabrication tiède avec un recyclage à fort taux nécessite une bonne maîtrise des procédés de fabrication et de mise en œuvre ainsi qu'un savoir-faire technique précis, c'est pourquoi les produits ainsi fabriqués et mis en œuvre appartiennent encore au domaine de l'innovation. Dans le cadre de ce projet OFROU, les ressources à disposition ont également permis de réaliser l'ensemble des essais nécessaires pour contrôler la qualité des enrobés mis en œuvre au cours du projet.

Certains producteurs d'enrobés proposent également des produits d'entreprise qui combinent la technologie de fabrication tiède avec une forte teneur en agrégats d'enrobés. Dans certains cas, la teneur en agrégats d'enrobés atteint théoriquement 99 %. Les produits suivants peuvent être

mentionnés ici : VALORCOL T® de l'entreprise Colas, MONOPHALT® de l'entreprise Weibel et les revêtements Oeko de BHZ. Ces produits sont destinés à un marché de niche. Les principaux avantages qu'ils présentent sont un bilan écologique avantageux ainsi qu'un prix compétitif. Les clients sont généralement satisfaits de ces produits et les feedbacks sont positifs.

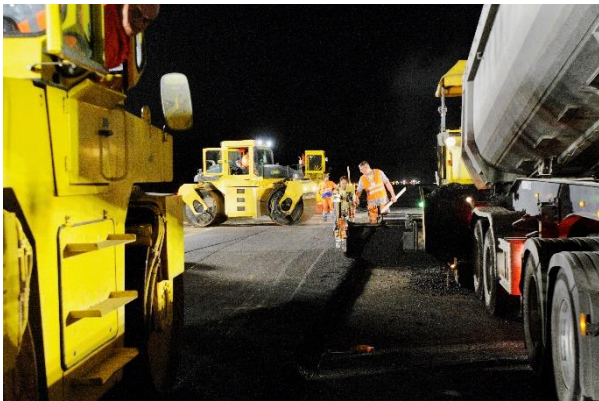
Une plateforme d'information sur le thème des enrobés tièdes a également été mise au point par asphaltsuisse. Vous trouverez ici le [lien](#) vers cette plateforme.

Dans le tableau ci-dessous (tableau 14), vous trouverez une liste de quelques références de projets représentatifs réalisés en Suisse avec des enrobés tièdes ainsi que de projets réalisés avec des produits combinant la fabrication tiède et le recyclage des agrégats d'enrobés.

	Canton de Vaud RC 429d Vuarrens-Pailly Septembre 2011	Canton de Vaud RC 436 Tremblet-Fey Juin 2012	Aéroport de Zurich 2008-2014	OFROU N01 UPlaN Rheinech - St. Marg- rethen (RheMa) 2017	Ville de Zurich Luggwegstrasse 2012
Domaine d'applications	Route cantonale TJM env. 850 Altitude : 675 m Classe de trafic T1/T2	Route cantonale TJM env. 850 Altitude : 630 m Classe de trafic T2	Assainissement des pistes de l'aéroport	Route nationale N01 UPlaN Rheinech - St. Marg- rethen (RheMa)	Route intercommunale TIM env. 31'1000 Classe de trafic T5
Produits mis en œuvre	EBT AC 16 N B70/100 avec 30% d'agrégats d'enrobés (bitume mousse) → température de fabri- cation : 110°C (tronçon test) AC 16 N B 70/100 avec 30% d'agrégats d'enrobés → tempé- rature de fabrication : 160°C (tronçon de référence)	EBT AC T 16 N B70/100 avec 40% d'agrégats d'enrobés (bitume mousse) EBT AC 11 N B 70/100 sans agrégat d'enrobés (bitume mousse)	EBT AC T 32 H PmB 25/55-65 (CH-E) (max. 30% d'agrégats d'enrobés) EBT AC B 22 H PmB 25/55-65 (CH-E) (max. 30% d'agrégats d'enrobés) EBT SMA 11 PmB 25/55-65 (CH-E) Technologie tiède utili- sée : ajout d'additifs permettant de dimi- nuer la viscosité	EBT AC EME C2 40% RAP EBT AC EME C1 50% RAP • Température de fa- brication : 115°- 120°C (env. -40°C en comparaison à une variante à chaud) • Température de compactage : 105 °C - 115 °C • Technologie tiède : bitume mousse	EBT AC T 22 H PmB 25/55-65 CH-E, 40% RAP EBT AC B 22 H PmB 25/55-65 CH-E, 30 % RAP Technologie tiède : ajout d'additifs per- mettant de diminuer la viscosité
Essais de laboratoire ou in situ spécifiques	Les contrôles de mise en œuvre habituels ont été réalisés: • Contrôle des températures de fabrication et de compactage. • Suivi de l'évolution de la tem- pérature de l'enrobé après la mise en œuvre. • Contrôle de la mise en œuvre avec le nucléodensimètre : contrôle du degré de compac- tage et de la teneur en vides des couches mises en œuvre.	Les contrôles de mise en œuvre habituels ont été réalisés.	Plan de contrôles avec les essais suivants: es- sais sur enrobés et liants, essais sur ca- rottes prélevées et me- sures des caractéris- tiques de surface.	Laboratoire: • Adaptation de la température de compactage pour la confection des éprouvettes Marshall (135°C au lieu des 175°C préconisées par la norme). • Détermination du point de fragilité se- lon Fraass: compor- tement à basse tem- pérature. • Essais rhéologiques (avec le rhéomètre à cisaillement dyna- mique DSR). 2 mé- thodes ont été utili- sées : • Température- Sweep: rigidité et sensibilité à la tem- pérature du liant • MSCR (Multiple Stress Creep Reco- very): sensibilité aux déformations perma- nentes • TSRST (Thermal Stress Restrained Specimen Test): comportement à basse température • In situ: suivi de la mise en œuvre avec un nu- cléodensimètre (Troxler).	• Programme d'essais • Essais sur liants et enrobés • Essais sur carottes prélevées

	Canton de Vaud RC 429d Vuarrens-Pailly Septembre 2011	Canton de Vaud RC 436 Tremblet-Fey Juin 2012	Aéroport de Zurich 2008-2014	OFROU N01 UPIaNS Rheinech - St. Marg- rethen (RheMa) 2017	Ville de Zurich Luggwegstrasse 2012
Problèmes ou limites observés	Bien que les températures cibles aient été respectées, la maniabilité de l'enrobé tiède sur chantier est moins bonne que celle de l'enrobé à chaud. Il s'agit d'un problème lié à la viscosité de l'enrobé.	En ce qui concerne la couche de base EBT AC T 16N B70/100, la teneur en bitume est trop élevée. En ce qui concerne la couche de roulement EBT AC 11 N B70/100, le degré de compactage est trop faible en certains points.		<ul style="list-style-type: none"> Dans le cas d'un EBT AC EME une mise en œuvre à la main n'est pas envisageable. Dans le cas d'un enrobé tiède, il n'y a pas d'information dans les normes VSS concernant la température de l'enrobé lors de la confection (compactage) des éprouvettes Marshall. Cela peut s'avérer problématique pour déterminer le degré de compactage lors de la mise en œuvre. Sensibilité du comportement à basse température des enrobés tièdes. 	Une bonne planification des travaux est nécessaire, de même qu'une bonne coopération entre les différents acteurs.
Avantages			A permis une réouverture rapide au trafic (des avions).	Avec une technologie de fabrication tiède, le liant est moins vieilli/oxydé (observable par l'intermédiaire du point de ramollissement bille-anneau).	Fermeture au trafic limitée grâce à la technologie de fabrication tiède (travaux organisés sur un week-end).
Feedback	Des fissures localisées ont été observées six ans après la mise en œuvre.	Après trois ans, un léger orniérage a été observé localement au niveau des voies de circulation.	Neuf ans après les travaux, des carottes ont été prélevées sur la piste. Les résultats et la qualité sont satisfaisants.	Les exigences des normes relatives aux propriétés et aux performances ont été respectées (liants et enrobés).	Aucune particularité observée.

Tableau 14: références réalisées avec des enrobés tièdes.



En haut : assainissement de la piste de l'aéroport de Zurich (source : Ralph Basenberg)

Au milieu, à gauche : assainissement de la piste de l'aéroport de Zurich (source : Comet Photoshopping)

Au milieu, à droite : compactage de l'enrobé tiède (projet Vuarrens-Pailly, canton de Vaud)

En bas : contrôle de la température de l'enrobé tiède durant la pose (projet Vuarrens-Pailly, canton de Vaud)

4.3 Développement de directives et initiatives locales

Certains maîtres d'ouvrage, proactifs dans le domaine du recyclage, ont élaboré et publié leurs propres directives. Celles-ci permettent aux entreprises de construction, sous certaines conditions, de dépasser les quantités admissibles fixées par la norme SN 640 431-1-NA [11].

Ces directives ne s'appliquent pas seulement aux chaussées à faible trafic. Des couches, comme les AC (de type S), les AC B et les AC EME, sont également concernées. Celles-ci sont mises en œuvre sur des chaussées dimensionnées pour des classes de trafic supérieures ou égales à T3.

Il est important de noter que dans ces cas-là, aucun compromis n'est fait concernant les performances ou la durabilité des enrobés. L'ensemble des produits mis en œuvre doivent répondre aux exigences des normes et également aux standards de qualité et aux garanties usuelles.

Vous trouverez ci-dessous quelques exemples. Pour rappel, seuls les ajouts d'agrégats d'enrobés à chaud sont considérés ici.

4.3.1 Exemples au niveau communal

Quantité d'agrégats d'enrobés [% massique] – exemple au niveau communal		
	Ville de Berne [26]	SN 640 431-1-NA [11]
Enrobés bitumineux pour couches de roulement AC H, AC MR, PA, SDA	0%	0%
Enrobés bitumineux pour couches de roulement AC S	≤ 30%	0%
Enrobés bitumineux pour couches de roulement AC N, AC L	≤ 50%	≤ 30%
Enrobés bitumineux pour couches de liaison AC B	≤ 70%	≤ 30%
Enrobés bitumineux à module élevé AC EME	C1: ≤ 40% C2: ≤ 50%	≤ 30%
Enrobés bitumineux pour couches de base AC T	≤ 70%	≤ 60%
Enrobés bitumineux pour couches de fondation AC F	≤ 90%	≤ 70%

Tableau 15: Quantité d'agrégats d'enrobés admissibles dans le cadre de projets réalisés pour la ville de Berne

Ville de Zurich [27]

Les quantités maximales d'agrégats d'enrobés utilisées dans les enrobés recyclés doivent être conformes à la norme. Toutefois, il existe une exception pour les AC T 16 L et N à destination des trottoirs et des pistes cyclables. Dans ces cas-là, en tant que complément à la norme, une quantité d'agrégats d'enrobés allant jusqu'à 80 % est autorisée (ajout à chaud).

4.3.2 Exemples au niveau cantonal

Quantité d'agrégats d'enrobés [% massique] – exemples au niveau cantonal			
	Canton d'Argovie [28]	Canton de Berne [30]	SN 640 431-1-NA [11]
Enrobés bitumineux pour couches de roulement AC MR, PA, SDA	0%	0%	0%
Enrobés bitumineux pour couches de roulement AC H	0%	≤ 20%	0%
Enrobés bitumineux pour couches de roulement AC S	≤ 20%	≤ 20%	0%
Enrobés bitumineux pour couches de roulement AC N, AC L	≤ 30%	≤ 50%	≤ 30%
Enrobés bitumineux pour couches de liaison AC B	≤ 60%	≤ 50%	≤ 30%
Enrobés bitumineux pour enrobés à module élevé AC EME	Pas d'exigence	≤ 50%	≤ 30%
Enrobés bitumineux pour couches de base AC T S, AC T H	≤ 60%	≤ 80%	≤ 60%
Enrobés bitumineux pour couches de base AC T N	≤ 80%		
Enrobés bitumineux pour couches de fondation AC F	≤ 80%	≤ 90%	≤ 70%

Tableau 16: Quantité d'agrégats d'enrobés admissibles dans le cadre de projets réalisés pour le canton d'Argovie et le canton de Berne

Canton d'Argovie [29] (voir également tableau 16 ci-dessus)

Dans le cas des chemins piétonniers et des pistes cyclables, de même que pour les chaussées à faible trafic et les chemins de mobilité douce, il convient d'atteindre la teneur maximale en agrégats d'enrobés pour la fabrication des enrobés utilisés. Cela correspond à une teneur en agrégats d'enrobés de 80 % massique pour l'AC T 22 N et de 30 % massique pour l'AC 8 N. Une teneur maximale d'agrégats d'enrobés de 20 % massique peut être utilisée pour la fabrication des enrobés AC 11 S et AC 8 S, à condition que les performances et la qualité requise puissent être garanties par le fournisseur. En outre, cela ne doit pas modifier le délai de garantie à respecter par l'entreprise de construction.

Canton de Berne [30] (voir également tableau ci-dessus)

Les teneurs maximales admissibles d'agrégats d'enrobés spécifiées dans la norme SN 640 431-1-NA (section 10, tableau 3) peuvent être augmentées de 20% (cas de l'ajout à chaud). L'entrepreneur doit toutefois pouvoir garantir les performances et la qualité requise et respecter le délai de garantie habituel.

Canton de Bâle-Ville [31]

Il est attendu des producteurs d'enrobés qu'ils s'appuient sur leurs connaissances des caractéristiques des agrégats d'enrobés disponibles (connaissances obtenues dans le cadre d'analyses sur le matériau) pour produire des enrobés recyclés de qualité satisfaisante qui répondent aux exigences. La qualité et la conformité sont évaluées sur le produit final livré sur le chantier. L'entrepreneur a la possibilité d'augmenter, au-delà des valeurs préconisées par la norme, la teneur en agrégats d'enrobés pour les enrobés à destination des couches de base et de liaison, pour autant que les résultats de l'épreuve de formulation soient disponibles et que les valeurs-cibles relatives aux caractéristiques et performances du revêtement et du liant soient respectées.

4.3.3 Exemples au niveau national

Quantité d'agrégats d'enrobés [% massique] – exemple au niveau national		
	OFROU [32]	SN 640 431-1-NA [11]
Enrobés bitumineux pour couches de roulement AC MR, PA, SDA	0%	0%
Enrobés bitumineux pour couches de liaison AC B	≤ 60%	≤ 30%
Enrobés bitumineux pour enrobés à module élevé AC EME	C1: ≤ 40% C2: ≤ 50%	≤ 30%
Enrobés bitumineux pour couches de base AC T H	≤ 60%	≤ 60%
Enrobés bitumineux pour couches de fondation AC F	≤ 90%	≤ 70%

Tableau 17: Quantité d'agrégats d'enrobés admissibles dans le cadre de projets réalisés pour l'OFROU

Concernant les couches AC B, AC EME, AC T et AC F, l'OFROU mentionne qu'une teneur en agrégats d'enrobés plus élevée est autorisée, sous réserve qu'un accord soit conclu entre l'entrepreneur et le maître d'ouvrage.

4.4 Projets de recherche nationaux

Plusieurs projets de recherche ont déjà été menés sur les thèmes du recyclage et des enrobés tièdes. Ici l'accent est mis essentiellement sur deux projets de recherche réalisés en Suisse et financés par l'OFROU. Il s'agit du projet PLANET sur le thème des enrobés tièdes et du projet *Recyclage des matériaux bitumineux de démolition dans les enrobés à chaud*. Dans ce qui suit, vous trouverez un résumé des éléments principaux et des conclusions de ces deux projets de recherche. Vous trouverez de plus amples informations concernant ces projets dans les rapports publiés lors de la réalisation de ces projets. Voir en particulier [33] et [34].

4.4.1 Projet de recherche *Recyclage des matériaux bitumineux de démolition dans les enrobés à chaud*

Le rapport final de ce projet de recherche a été publié en 2017 [33]. Ce projet de recherche comprend plusieurs études distinctes. Les thèmes suivants ont notamment été étudiés: la

teneur en agrégats d'enrobés, le recyclage multiple, l'étude des flux de matériaux et les aspects liés au développement durable, la durabilité et l'optimisation des formulations d'enrobés recyclés.

Dans le cadre de ce projet de recherche, le constat suivant a été effectué : l'ajout d'une forte teneur en agrégats d'enrobés ne péjore pas la qualité des enrobés recyclés ainsi fabriqués. Cependant, le respect des recettes et de la composition est essentiel, entre autres en ce qui concerne la courbe granulométrique. Aussi, cela nécessite de contrôler l'homogénéité des agrégats d'enrobés ainsi que les propriétés du liant récupéré. Le rapport recommande par ailleurs l'élaboration et la mise à disposition de nouvelles fractions (granulaires) d'agrégats d'enrobés ainsi que le stockage différencié des diverses qualités d'agrégats d'enrobés.

Pour des enrobés avec de faibles teneurs en agrégats d'enrobés, c'est-à-dire moins de 20% massique, les agrégats d'enrobés ont peu d'influence sur les propriétés et les performances des enrobés recyclés. Dans le cas de teneurs plus élevées en agrégats d'enrobés, les paramètres suivants ont une forte influence sur les propriétés et les performances des enrobés recyclés :

- l'homogénéité des agrégats d'enrobés
- la qualité des agrégats d'enrobés
- les propriétés du liant récupéré (issu des agrégats d'enrobés)
- la qualité et le degré de mélange entre le liant récupéré et le liant d'apport
- le choix du liant d'apport

Une teneur élevée d'agrégats d'enrobés dans les enrobés est possible, également lorsqu'il s'agit d'enrobés à destination des couches de roulement, avec toutefois une réserve pour certaines sortes d'enrobés, notamment pour les couches à courbe granulométrique discontinue et/ou devant respecter des exigences élevées. Cela correspond entre autres aux enrobés SMA, PA, AC MR et SDA ou à des couches de roulement avec un niveau d'exigences élevé en matière d'adhérence ou encore formulées avec des liants spécifiques. Les couches de fondation (AC F) et les couches de base (AC T) restent cependant les couches présentant le plus grand potentiel pour l'utilisation d'enrobés recyclés à forte teneur en agrégats d'enrobés. Les couches de fondation et de base peuvent ainsi grandement contribuer au recyclage des agrégats d'enrobés. Les couches de fondation et de base sont en effet plus épaisses que les couches de roulement et de liaison et les exigences y relatives sont souvent moins élevées, notamment concernant les caractéristiques de surface. L'exposition aux sollicitations climatiques est aussi moindre pour ces couches. Lorsque de grandes quantités d'agrégats d'enrobés sont ajoutées aux enrobés recyclés, il est important de vérifier le comportement à basse température ainsi que la durabilité des enrobés recyclés. Il s'agit en particulier du comportement en fatigue ainsi que du suivi de la formation et du développement des fissures (fissuration thermique). Les essais mécaniques réalisés dans le cadre du programme de recherche ont montré que l'ajout d'agrégats d'enrobés n'a pas d'impact négatif sur le comportement à long terme et la durabilité des enrobés. Les exigences des normes ont également été respectées.

Les études menées dans le cadre de ce paquet de recherche ont également montré que les essais traditionnels sur le liant, à savoir l'essai de pénétrabilité à l'aiguille et le point de ramollissement selon la méthode bille-anneau, ne fournissent que des informations partielles concernant le liant, en particulier dans le cas d'un liant issu du mélange entre un liant récupéré et un liant d'apport. Les informations obtenues par l'intermédiaire de ces essais ne permettent pas de caractériser exhaustivement le liant. Il est donc nécessaire d'utiliser des essais plus pertinents et représentatifs de la réalité physique de ces liants. Les essais rhéologiques peuvent être envisagés dans ce cas.

4.4.2 Projet de recherche PLANET

Le rapport final du projet de recherche PLANET a également été publié en 2017 [34] et comprend aussi plusieurs études distinctes. Les thèmes suivants ont notamment été étudiés : l'incidence de la fabrication d'enrobés tièdes sur les centrales d'enrobage, l'analyse du cycle de vie, l'optimisation des performances par le biais de la formulation, la durée de vie (de service) et le vieillissement des enrobés tièdes.

Trois différentes technologies de fabrication à température tiède ont été considérées dans l'étude : technologie utilisant des additifs permettant de réduire la viscosité (additif liquide avec polymères et tensioactifs, cire synthétique), technologie utilisant de la zéolite synthétique et technologie relative au bitume mousse. Concernant les aspects écologiques, une économie d'énergie d'environ 30 % a pu être observée dans le cas des fabrications à température tiède en comparaison aux fabrications à chaud. Toutefois, l'avantage écologique obtenu par l'intermédiaire des économies d'énergie réalisées est péjoré par le bilan écologique des additifs utilisés. Ceux-ci constituent en effet un inconvénient écologique. Selon l'analyse du cycle de vie réalisée et en fonction du type de procédé de fabrication tiède utilisé, les enrobés tièdes ne semblent pas présenter systématiquement un meilleur bilan environnemental que les enrobés à chaud classiques. En effet, d'un point de vue environnemental, seul l'enrobé tiède fabriqué avec du bitume mousse présente un meilleur bilan que l'enrobé à chaud. Toutefois, pour l'ensemble des produits étudiés, l'ajout d'agrégats d'enrobés dans les enrobés tièdes (combinaison des deux technologies) permet d'améliorer le bilan environnemental des enrobés tièdes.

Dans le cadre de ce projet de recherche, il a également été observé que la fabrication des enrobés tièdes entraîne, dans certains cas, des émissions supplémentaires. Étant donné que le rendement du brûleur est réduit en raison de la baisse de la température de production, le processus général de combustion n'est plus optimal (détérioration du processus) et la concentration en polluants dans les émissions peut s'en trouver ainsi augmentée. Un potentiel d'optimisation dans les centrales d'enrobage a été clairement identifié à ce sujet (émissions au cours de la fabrication des enrobés tièdes).

Les études ont également montré que les coûts relatifs à la fourniture des enrobés tièdes sont comparables à ceux pour les enrobés à chaud.

Concernant les propriétés et les performances des enrobés tièdes, ceux-ci ont généralement une sensibilité à l'eau plus élevée que les enrobés à chaud (à recette identique). Cependant, la sensibilité à l'eau dépend fortement des propriétés du liant et de son état de vieillissement (d'altération). Les recommandations effectuées dans le paquet de recherche consistent également à évaluer la viscosité du liant et son homogénéité, ainsi que la maniabilité des enrobés tièdes. Pour le reste, les propriétés et les performances des enrobés tièdes sont comparables à celles des enrobés à chaud. De plus, les enrobés tièdes respectent les exigences des normes. En ce qui concerne le vieillissement et la durabilité des enrobés, la résistance à la fatigue des enrobés tièdes est généralement meilleure que celle des enrobés à chaud. En revanche, la résistance à l'orniérage est généralement plus faible du côté des enrobés tièdes. L'ajout d'agrégats d'enrobés dans les enrobés tièdes permet dans certains cas d'améliorer la résistance à l'orniérage et le comportement en fatigue. Cela peut aussi entraîner une diminution de la sensibilité à l'eau. Enfin, le procédé de fabrication des enrobés tièdes présentent également l'avantage de limiter le vieillissement du liant.

4.5 Etat des lieux et exemples provenant des pays européens

4.5.1 Etat des lieux en Europe et comparaison avec la situation en Suisse

Au niveau européen, il est également difficile de récolter des données précises concernant la production d'enrobés bitumineux. Ce constat concerne plus particulièrement le recyclage des agrégats d'enrobés, les enrobés recyclés ainsi que les enrobés tièdes.

Toutefois, sur la base des données disponibles (par exemple sur le site de l'European Asphalt Pavement Association EAPA [Asphalt in Figures - EAPA](#)), le constat suivant a pu être effectué : la Suisse fait partie des « bons élèves » en Europe en ce qui concerne le recyclage des agrégats d'enrobés et le recours aux enrobés tièdes.

Tout comme en Suisse, les thématiques concernant les enrobés recyclés et les enrobés tièdes sont également d'actualité au sein des différents pays de l'UE. La nécessité de promouvoir ces produits dans les projets de construction routière est également présente, notamment pour des raisons économiques et environnementales. Il existe aussi un besoin en matière de sensibilisation des acteurs de la profession sur ces questions, dans le but notamment de les rassurer quant à l'utilisation et la mise en œuvre de ces produits. L'EAPA soutient et encourage le recyclage hautement qualitatif des agrégats d'enrobés, c'est-à-dire dans le cadre de la fabrication de nouveaux enrobés bitumineux y compris les couches de roulement, ainsi que le recours à des procédés de fabrication tiède. Cela passe, entre autres, par des publications (position papers). De nombreuses informations sur les enrobés bitumineux, y compris les enrobés recyclés et les enrobés tièdes, sont disponibles sur le site internet de l'EAPA.

4.5.2 Exemples représentatifs de projets menés

A titre d'exemple, deux projets de recherche menés en Europe sur la thématique des enrobés recyclés et des enrobés tièdes sont présentés ci-dessous.

- Projet Re-Road

Le projet Re-Road est un projet financé par la Commission européenne. C'est un projet de coopération auquel plusieurs instituts de recherche européens, actifs dans le domaine de la construction routière, ont participé au cours de la période 2007-2013. L'objectif principal du projet était d'optimiser le procédé de recyclage dans les enrobés bitumineux afin d'atteindre un recyclage hautement qualitatif. L'accent a notamment été mis sur le recyclage dans les couches de roulement.

Dans le cadre du projet, une analyse du cycle de vie relative à chaque forme de recyclage des agrégats d'enrobés a été réalisée, ce qui a permis de montrer que, d'un point de vue écologique, l'utilisation des agrégats d'enrobés sous une forme liée est plus avantageuse que sous une forme non liée. Il existe par ailleurs des avantages écologiques supplémentaires dans le cas où les agrégats d'enrobés issus d'une couche de roulement (présentant une qualité supérieure) sont réutilisés dans la fabrication d'une nouvelle couche de roulement. Enfin, les études menées ont également montré qu'au-delà de 15% d'agrégats d'enrobés dans un enrobé recyclé, les avantages environnementaux présentés par l'enrobé recyclé sont supérieurs à ceux présentés par un enrobé tiède.

Concernant les performances et la durabilité des enrobés recyclés étudiés, les performances à moyen et long terme (c'est-à-dire entre 6 et 10 ans) d'une couche de roulement avec une teneur

en agrégats d'enrobés comprise entre 23 et 30% sont comparables à celles d'une couche de roulement ne contenant pas de matériau recyclé. Des enrobés recyclés à destination des couches de roulement avec une teneur en agrégats d'enrobés allant jusqu'à 40% ont également été étudiés. Dans ce cas, les performances à court terme (c'est-à-dire après 3 ans) sont comparables à celles d'une couche de roulement sans matériau recyclé. Les performances à moyen et long terme n'ont pas encore pu être déterminées (étude encore en cours). En outre, la présence de PmB dans les agrégats d'enrobés et/ou l'ajout d'un liant d'apport PmB lors de la fabrication des enrobés recyclés n'entraînent pas de problème notable au cours du processus (fabrication, mise en œuvre, phase de service).

Des investigations concernant le recyclage multiple des agrégats d'enrobés ont également été menées. Dans ce cadre, le recyclage multiple n'a pas montré d'influence négative sur les performances d'un enrobé recyclé. Cependant, le choix d'un liant d'apport adéquat est essentiel pour corriger les propriétés altérées (vieillies) du liant récupéré issu des agrégats d'enrobés.

Vous trouverez plus d'informations sur ce projet sur le site internet [Re-Road \(fehrl.org\)](http://Re-Road.fehrl.org).

- **Projet MURE**

Le projet de recherche MURE a débuté en France au mois de mars 2014 et a duré 4 ans. Il s'agit d'un projet de coopération impliquant plusieurs acteurs de la profession : des maîtres d'ouvrage, des bureaux d'ingénieurs, des associations professionnelles, des entreprises de construction ainsi que des laboratoires de recherche. Plusieurs chantiers expérimentaux ont été réalisés dans le cadre de ce projet. Les principaux thèmes étudiés sont : la combinaison du recyclage des agrégats d'enrobés avec une technologie de fabrication tiède et le recyclage multiple des chaussées bitumineuses. Le projet est né du constat que les technologies de recyclage et de fabrication tiède étaient rarement combinées. L'objectif du projet était ainsi de rassurer les acteurs de la profession, en particulier les maîtres d'ouvrage et les bureaux d'ingénieurs, concernant l'utilisation et la mise en œuvre d'enrobés recyclés et d'enrobés tièdes. Un partenariat entre différents acteurs de la profession a ainsi été mis en place. Dans le cadre de cette collaboration, les aspects techniques, sociétaux et économiques des deux thématiques ont été approfondis. L'objectif était de trouver des solutions acceptées et approuvées par l'ensemble des acteurs de la profession et pouvant être mise en œuvre dans la pratique.

Certaines conclusions de ce projet sont résumées ci-dessous.

Afin de développer une formulation (recette) adaptée aux enrobés recyclés, il est nécessaire de bien caractériser les agrégats d'enrobés. L'homogénéité des agrégats d'enrobés est également un facteur clé pour s'assurer de la conformité et de la qualité des enrobés recyclés.

L'influence d'un ajout d'agrégats d'enrobés sur la maniabilité des enrobés a aussi été étudiée. Les observations ont montré que : plus la teneur en agrégats d'enrobés est élevée, plus le délai de maniabilité est court. Par conséquent, une teneur élevée en agrégats d'enrobés peut générer des difficultés en cas de pose des enrobés recyclés à la main.

La question du mélange entre le liant récupéré issu des agrégats d'enrobés et le liant d'apport est cruciale. En théorie, le mélange entre les deux liants doit être complet et parfait. Pour une teneur en agrégats d'enrobés de 40%, les études menées montrent que le mélange est homogène, qu'il s'agisse d'un enrobé à chaud ou tiède. Le procédé de fabrication (à chaud ou tiède) n'a donc pas d'influence sur ce paramètre, pour autant que les producteurs d'enrobés et les entreprises de construction maîtrisent ces deux procédés de fabrication. Pour une teneur en agrégats d'enrobés de 70%, le mélange entre les deux liants est davantage hétérogène.

Enfin, il est important de respecter les règles de l'art relatives aux enrobés bitumineux, d'autant plus lorsqu'il est question d'enrobés recyclés. Le respect de ces règles au cours de la fabrication et de la mise en œuvre des enrobés recyclés est primordial pour garantir la qualité et les performances des produits. La fabrication et la mise en œuvre d'enrobés recyclés ne requiert toutefois pas de spécifications supplémentaires mais, plus la teneur en agrégats d'enrobés est élevée, plus le respect de ces règles de l'art est nécessaire. La gestion du stockage des agrégats d'enrobés ainsi que de l'homogénéité et de l'humidité de ce matériau recyclé sont des facteurs importants dont il faut tenir compte dans le cadre de la technologie de recyclage.

Vous trouverez plus d'informations sur ce projet sur le site internet www.pnmure.fr.

- Synthèse

En Europe, le potentiel des enrobés tièdes et du recyclage des agrégats d'enrobés est également reconnu pour réduire les impacts environnementaux dans le domaine la construction routière. Les acteurs de la profession ont également besoin d'être sensibilisés sur ces questions, afin d'augmenter l'acceptation de ces produits et aussi de faciliter leur intégration et leur mise en œuvre dans le cadre des projets. Les associations professionnelles œuvrent dans ce sens et des projets de recherche ont ainsi été initiés. Il est important de mentionner que pour la plupart des projets, une approche collaborative entre plusieurs acteurs de la profession a été mise en place. Cela permet notamment de proposer et de développer des mesures techniquement, économiquement et écologiquement viables avec une bonne acceptabilité auprès des maîtres d'ouvrage. L'objectif final étant d'utiliser plus largement les enrobés recyclés et les enrobés tièdes dans la pratique. Une approche collaborative garantit également un échange transparent entre les différents acteurs, notamment concernant les expériences menées et les résultats obtenus.

Il convient également de noter que les thématiques étudiées dans le cadre de ces projets sont relativement "ambitieuses". Par exemple, les thèmes relatifs à des teneurs élevées en agrégats d'enrobés dans les couches de roulement, au recyclage multiple ou encore à la combinaison entre le recyclage à fort taux (40% au minimum) et une technologie de fabrication tiède sont encore considérés comme des "innovations" en Suisse.

Enfin, dans le cadre des deux projets présentés ci-dessus, les paramètres essentiels permettant de garantir les propriétés, les performances, la qualité et la durabilité des enrobés recyclés et des enrobés tièdes ont été identifiés. Il s'agit notamment de l'homogénéité et de la qualité des agrégats d'enrobés, de la maîtrise et du contrôle régulier de l'ensemble du processus par les producteurs d'enrobés et les entreprises de construction (par exemple : contrôle des propriétés du liant final, de la maniabilité des enrobés et du respect des conditions de règles de mise en œuvre). Ce constat a déjà été fait précédemment dans ce guide, notamment dans le cadre de l'analyse d'autres références (projets pilotes, projets de recherche).

Partie 3

Domaine d'application étendu et exigences y relatives – Promotion et intégration des enrobés recyclés et des enrobés tièdes dans le cadre des projets de construction routière

5 Domaine d'application étendu et exigences y relatives

Les enrobés recyclés et les enrobés tièdes appartenant au domaine d'application défini dans ce chapitre peuvent être utilisés et mis en œuvre dans le cadre de projets routiers, sans prise de risque supplémentaire par rapport à l'utilisation d'enrobés à chaud sans agrégats d'enrobés.

Dans ce chapitre, vous trouverez aussi une liste d'essais qu'il peut être particulièrement pertinents de réaliser sur les enrobés tièdes et les enrobés recyclés. L'objectif étant de garantir les propriétés et les performances des enrobés recyclés et des enrobés tièdes. Les exigences vis-à-vis des résultats de ces essais sont également proposées.

5.1 Teneurs conseillées en agrégats d'enrobés dans les enrobés bitumineux

L'analyse des expériences déjà réalisées en Suisse et à l'étranger (références et bonnes pratiques, initiatives locales, projets de recherche) a montré qu'il était possible d'adapter les quantités admissibles d'agrégats d'enrobés recommandées par la norme pour la fabrication de nouveaux enrobés. C'est pourquoi, le guide des bonnes pratiques propose une révision et une mise à jour des teneurs en agrégats d'enrobés préconisées dans la norme suisse (SN 640 431-1-NA [11]). Les teneurs en agrégats d'enrobés recommandées par le guide sont disponibles dans les tableaux ci-dessous (tableaux 18 et 19). Celles-ci correspondent à des enrobés recyclés fabriqués à chaud, contenant des agrégats d'enrobés ajoutés à chaud. Dans le cas où les technologies de recyclage et de fabrication tiède sont combinées, les teneurs d'agrégats d'enrobés proposées actuellement dans la norme SN 640 431-1-NA [11] conviennent et sont bien adaptées à la situation. Dans ce cas, nous recommandons donc de tenir compte des valeurs de la norme.

Il convient de noter que la teneur optimale d'agrégats d'enrobés dans un enrobé recyclé ne correspond pas nécessairement à la teneur maximale techniquement atteignable. Cela dépend aussi du type et de la sorte de l'enrobé, des conditions locales, du type de chantier et des conditions de mise en œuvre, ainsi que des constituants disponibles.

Le premier tableau (tableau 18) concerne les couches de fondation (AC F), les couches de base (AC T) et les couches de liaison (AC B). Il est à l'heure actuelle possible de mettre en œuvre des enrobés recyclés avec des teneurs élevées en agrégats d'enrobés dans ces couches de chaussées, sans engendrer une prise de risque supplémentaire par rapport aux enrobés fabriqués sans ou avec de faibles teneurs en agrégats d'enrobés. En effet :

- Les exigences concernant les courbes granulométriques, la taille des gravillons et du plus gros grain (pour ces couches il s'agit généralement d'un 0/16 ou d'un 0/22) ainsi que les propriétés physiques et géométriques des granulats sont généralement « facilement » atteintes et respectées et ce même avec de fortes teneurs en agrégats d'enrobés.
- Les propriétés du liant récupéré à partir des agrégats d'enrobés (liant résiduel) peuvent être « corrigées », si nécessaire, en utilisant un liant d'apport et/ou des additifs afin que les propriétés requises pour le liant final (liant de l'enrobé recyclé) soient respectées.

Le second tableau (tableau 19) concerne les couches de roulement (AC) ainsi que l'AC EME, qui est soit destiné aux couches de liaison (AC EME C1) soit aux couches de base (AC EME C2). Des teneurs élevées d'agrégats d'enrobés dans un AC EME ou dans la couche de roulement peuvent encore aujourd'hui constituer un défi technique. Cela requiert en effet l'utilisation de constituants répondant à des exigences élevées ou spécifiques ainsi qu'une certaine homogénéité concernant leur qualité et leurs propriétés. Cette remarque s'applique également aux agrégats d'enrobés utilisés (en tant que constituant des enrobés recyclés) ainsi qu'aux granulats et aux liants récupérés issus de ces agrégats d'enrobés. Pour chacun des deux produits (AC EME et couche de roulement), des contrôles réguliers, tout au long du processus de fabrication et de mise en œuvre sont nécessaires. Pour la couche de roulement, la disponibilité d'une fraction d'agrégats d'enrobés plus fine (0/8 ou 0/11) est également requise.

Les tableaux 18 et 19 présentent également, au niveau de la dernière colonne, des recommandations quant aux pourcentages d'agrégats d'enrobés qui pourraient être intégrés dans la prochaine révision de la norme SN 640 431-1-NA [11].

La teneur minimale d'agrégats d'enrobés spécifiée par le guide des bonnes pratiques correspond à ce que les maîtres d'ouvrage sont en droit d'attendre de la part des producteurs d'enrobés et des entreprises de construction en matière d'enrobés recyclés. Les enrobés proposés avec ces teneurs (minimales) d'agrégats d'enrobés doivent présenter les mêmes performances que les enrobés standards et également avoir le même délai de garantie. La teneur maximale d'agrégats d'enrobés indiquée dans le guide des bonnes pratiques correspond à la teneur maximale qu'il est à l'heure actuelle possible d'atteindre d'un point de vue technique. Toutefois, cela suppose que le producteur d'enrobés et l'entreprise de construction maîtrisent l'ensemble du processus. Les teneurs maximales en agrégats d'enrobés recommandées par le guide sont supérieures à celles que l'on trouve dans la normalisation actuelle. L'objectif étant de laisser la porte ouverte aux innovations et aux produits d'entreprise.

Il est primordial que les enrobés recyclés répondent à des exigences normatives identiques à celles existant pour les enrobés à chauds standards ainsi qu'aux mêmes spécifications du maître d'ouvrage. Cette remarque s'applique aux exigences et spécifications relatives au liant final et à l'enrobé. Elle est aussi valable dans le cas où une forte teneur en agrégats d'enrobés est ajoutée lors de la fabrication. Le recyclage des agrégats d'enrobés dans les nouveaux enrobés ne doit en aucun cas conduire à un compromis ou à une adaptation des exigences. Le respect des exigences est une condition nécessaire pour garantir la qualité et la durabilité des produits fabriqués et mis en œuvre.

Type d'enrobé	Teneurs en agrégats d'enrobés conseillées par le guide		Quantités admissibles selon norme (SN 640 431-1-NA)	Quantités admissibles conseillées, à intégrer lors de la révision de la norme
AC F	min. 60%	max. 100%	max. 70%	max. 100%
AC T	min. 50%	max. 90%	max. 60%	max. 80%
AC B	min. 20%	max. 60%	max. 30%	max. 50%

Tableau 18: teneurs recommandées en agrégats d'enrobés pour les couches AC F (fondation), AC T (base) et AC B (liaison)

Il est important de noter que de faibles teneurs en agrégats d'enrobés (<20%) n'ont quasiment pas d'influence sur les propriétés des enrobés recyclés. L'influence des agrégats d'enrobés ne devient notable qu'à partir d'une teneur de 40% environ.

- Remarques concernant la couche de liaison (AC B)

Dans de nombreux cas, les enrobés à destination des couches AC T et AC B sont quasi identiques ; ils ont des compositions (formulations) similaires. Toutefois, dans le tableau 18, les teneurs minimales et maximales d'agrégats d'enrobés recommandées pour ces deux produits diffèrent. Une des raisons principales réside dans le fait que les couches de liaison, de par leur position et leur fonction dans la structure de chaussée, sont soumises à des contraintes plus importantes et sont ainsi plus « sensibles » que les couches de base. Dans le cadre des chaussées fortement sollicitées, l'utilisation de bitume modifié aux polymères (PmB) peut également être requise pour les enrobés à destination des couches de liaison, ce qui peut alors également limiter la teneur en agrégats d'enrobés.

Type d'enrobé		Teneurs en agrégats d'enrobés conseillées par le guide		Quantités admissibles selon norme (SN 640 431-1-NA)	Quantités admissibles conseillées, à intégrer lors de la révision de la norme
AC EME		min. 10%	max. 50%	max. 30%	max. 50%
couche de roulement	N	min. 0%	max. 50%	max. 30%	max. 40%
	S/H	min. 0%	max. 30%	max. 0%	max. 30%

Tableau 19: teneurs recommandées en agrégats d'enrobés pour les couches en AC EME et les couches de roulement

- Remarques concernant les enrobés AC MR, SDA et PA

En règle générale, il est recommandé de ne pas utiliser d'agrégats d'enrobés pour la fabrication des couches AC MR, SDA et PA. Il s'agit en effet de produits spécifiques et relativement sensibles. Lorsque des agrégats d'enrobés sont intégrés dans la composition de ces produits, il s'agit encore d'innovation à l'heure actuelle. Ce type de produits (AC MR, SDA ou PA recyclé) peut être proposé dans le cadre d'une variante d'entreprise.

- Remarques concernant les couches de roulement AC

Les propriétés des enrobés à destination des couches de roulement ainsi que les propriétés de leurs constituants influent notablement sur les caractéristiques de surface de la chaussée, et plus particulièrement les aspects liés à la sécurité (par exemple adhérence). Il est primordial que les caractéristiques de surface des chaussées soient garanties. Cette remarque s'applique tout particulièrement aux couches de roulement de type S et H (chaussées fortement sollicitées).

Afin de garantir les propriétés de surface des chaussées construites avec des enrobés recyclés, le canton de Vaud impose, dans ses documents d'appels d'offres, des exigences supplémentaires relatives aux granulats issus des agrégats d'enrobés. Ces exigences concernent les paramètres « pourcentage de surface concassée des granulats » (le critère initial $C_{50/10}$ de la norme SN EN 13108-8 [8] est remplacé par le critère $C_{70/10}$ de la norme SN 670 103b / EN 13043 [9]) et « résistance au polissage » (le critère PSV_{50} de la norme SN 670 103b / EN 13043 [9] a été intégré).

	Pourcentage de surface concassée des granulats	Résistance au polissage
Nouveau critère (selon SN 670 103 b / EN 13043 [9])	$C_{70/10}$	PSV_{50}
Critère initial (sel. SN EN 13108-8 [8])	$C_{50/10}$	Aucune exigence

Tableau 20: ex. cant. Vaud - exigences complémentaires pour AC S et AC H relatives aux granulats issus des agrégats d'enrobés

- Remarques concernant les chaussées fortement sollicitées (trafic)

Comme déjà mentionné au sujet des couches de liaison, l'utilisation d'un bitume modifié par des polymères (PmB) peut aussi s'avérer nécessaire pour la fabrication des enrobés à destination des couches de roulement des chaussées fortement sollicitées (charge de trafic élevée). Le respect des exigences relatives au liant PmB peut conduire à limiter la teneur en agrégats d'enrobés dans les enrobés recyclés à destination de ces couches. En effet, les caractéristiques du liant final (PmB) doivent, dans le cas des enrobés recyclés, être obtenues à partir du mélange du liant issu des agrégats d'enrobés (vieilli/altéré) et d'un liant d'apport qui doit permettre de corriger les propriétés altérées du liant récupéré issu des agrégats d'enrobés.

5.2 Recommandations pour le choix du liant bitumineux des enrobés

D'après la norme EN 13108-1 [11] (point 4.2.1), le liant utilisé pour la fabrication des enrobés, qu'ils soient formulés de façon empirique ou fondamentale, doit être un bitume routier, un bitume modifié (PmB) ou un bitume dur. Des recommandations concernant le choix du liant en fonction du type de couche ainsi que du type et de la sorte d'enrobés sont disponibles dans les tableaux 1 et 2 de l'annexe nationale de cette norme [11] (voir ci-dessous). Ces recommandations s'appliquent également aux enrobés recyclés et aux enrobés tièdes.

Asphaltbeton, Empfehlungen zur Wahl der Bindemittel in Abhängigkeit der Schichten, Mischgutsorten und Mischguttypen <i>Enrobés bitumineux, recommandations pour le choix des liants en fonction des couches, des sortes et des types d'enrobés</i>													
	Mischgutsorten <i>Sortes d'enrobés</i>												
	AC			AC B			AC T			AC MR	AC F	AC RAIL	
Bindemittel und Bindemittelsorten <i>Liants et sortes de liants</i>	Mischguttypen <i>Types d'enrobés</i>												
	L	N	S	H	S	H	L	N	S	H	Ohne Typen <i>Sans types</i>		
Strassenbaubitumen <i>Bitumes routiers</i>													
35/50			○	○					+	+			
50/70		+	+	+	○			+	+	+		+	
70/100	+	+	○		○		+	+	○			+	
100/150	+	+					+	○				○	
160/220	○						○						+
Polymerbitumen <i>Bitumes-polymères</i>													
PmB 25/55-55 (CH-C)			○	○	○	+			○	+			
PmB 45/80-50 (CH-C)			○	○	+	+				○	○		
PmB 65/105-45 (CH-C)			○	○							○		
PmB 25/55-65 (CH-E)			○	○	○	+					○		
PmB 45/80-65 (CH-E)			+	+								+	
PmB 65/105-60 (CH-E)			○	○								+	

- + Sorten, die in der Regel zu verwenden sind
- Sorten, die je nach Beanspruchung durch Verkehr und Klima zu verwenden sind

- + Sortes généralement employées
- Sortes qui doivent être employées suivant les sollicitations du trafic et du climat

Anstelle der PmB-Sorten Typ CH-C kann der Hersteller auch die entsprechende PmB-Sorte Typ CH-E verwenden.

Au lieu des sortes de PmB type CH-C le producteur peut utiliser aussi la sorte correspondente de PmB type CH-E.

Tableau 21: enrobés bitumineux, recommandations pour le choix des liants en fonction des couches, des sortes et des types d'enrobés (source: SN 640 431-1-NA / EN 13108-1 [11])

Hochmodul-Asphaltbeton AC EME, Empfehlungen zur Wahl der Bindemittel in Abhängigkeit der Klasse und der angestrebten Eigenschaften <i>Enrobés bitumineux à module élevé AC EME, recommandations pour le choix des liants en fonction de la classe et des propriétés désirées</i>		
Klasse <i>Classe</i>	Angestrebte Eigenschaften <i>Propriétés désirées</i>	Sortenbezeichnung gemäss <i>Désignation des sortes selon</i> SN EN 13924 [10]
AC EME 22 C1	Beständigkeit gegen bleibende Verformung <i>Résistance aux déformations permanentes</i>	Bitumen 15/25 (CH) <i>Bitumes</i>
AC EME 22 C2	Beständigkeit gegen Ermüdung <i>Résistance à la fatigue</i>	Bitumen 10/20 (CH) <i>Bitumes</i>

Tableau 22: enrobés bitumineux à module élevé AC EME, recommandations pour le choix des liants en fonction de la classe et des propriétés visées (source : SN 640 431-1-NA / EN 13108-1 [11])

5.3 Liant: essais usuels et exigences

Le respect des exigences relatives au liant final des enrobés recyclés et des enrobés tièdes est une condition nécessaire pour garantir la performance, la qualité et la durabilité des enrobés produits. Les propriétés du liant influent en effet fortement sur celles de l'enrobé pour la fabrication duquel il est utilisé.

Une partie des essais mentionnés dans ce chapitre peuvent être à la fois utilisés en tant qu'essais de formulation, afin d'optimiser ou d'adapter une recette par exemple, et aussi en tant qu'essais de contrôle, notamment concernant les caractéristiques des constituants (liant d'apport original) et des enrobés produits (liant récupéré). D'autres essais ne sont utilisés quasi exclusivement que dans la phase de développement des enrobés (mise au point de la formulation), notamment en raison de leur coût élevé et de la durée de l'essai.

Les exigences mentionnées dans ce chapitre s'appliquent aux enrobés recyclés ainsi qu'aux enrobés tièdes.

5.3.1 Estimation des propriétés du liant en cas d'utilisation d'agrégats d'enrobés dans des mélanges formulés empiriquement (ne s'applique qu'aux enrobés recyclés)

Le choix du liant ainsi que la détermination de son dosage peuvent être effectués de façon empirique d'après la norme SN 640 431-1-NA / EN 13108-1 [11] (Annexe A). Toutefois, cette méthode ne s'applique qu'aux enrobés recyclés fabriqués à partir d'agrégats d'enrobés contenant du bitume pur et pour lesquels le liant d'apport est également un bitume pur.

Concernant les couches de roulement, lorsque la teneur en agrégats d'enrobés est supérieure à 10%, la relation d'équivalence ci-dessous doit être satisfaite. Concernant les couches de liaison et les couches de base, la relation d'équivalence doit être satisfaite pour une teneur en agrégats d'enrobés supérieure à 20%.

$$T_{R\&Bmix} = a \times T_{R\&B1} + b \times T_{R\&B2}$$

où

- $T_{R\&Bmix}$ est la valeur calculée du point de ramollissement du liant d'un mélange contenant des agrégats d'enrobés;
- $T_{R\&B1}$ est le point de ramollissement du liant récupéré à partir des agrégats d'enrobés;
- $T_{R\&B2}$ est le point de ramollissement du liant ajouté.
- a et b sont les proportions en masse du liant issus des agrégats d'enrobés (a) et du liant ajouté (b) dans le mélange. Ainsi : $a + b = 1$.

Sur la base de cette relation d'équivalence, en connaissant les caractéristiques du liant issu des agrégats d'enrobés ($T_{R\&B1}$), celles des liants d'apport à disposition ($T_{R\&B2}$) et celles visées pour le liant final ($T_{R\&Bmix}$), il est possible de d'estimer le type de liant d'apport ($T_{R\&B2}$), son dosage (b) ainsi que la teneur maximale possible en agrégats d'enrobés (a).

Comme déjà évoqué, cette méthode n'est valable que pour les bitumes purs. Elle n'est pas valable, ou en tout cas moins adaptée, pour les PmB.

5.3.2 Autres cas (s'applique aux enrobés recyclés et aux enrobés tièdes)

Les propriétés du liant final des enrobés bitumineux doivent être éprouvées par l'intermédiaire d'essais sur le liant et un certain nombre d'exigences doivent être respectées. Ces exigences concernent les caractéristiques suivantes : pénétrabilité à l'aiguille (SN 670 511/EN 1426 [37]), point de ramollissement – méthode bille et anneau (SN 670 512/EN 1427 [38]) et retour élastique (SN EN 13 398 [29]) en cas de PmB. Ces essais sont dans la plupart des cas effectués en tant que contrôles de production (prélèvements à la centrale d'enrobage) et de fourniture (prélèvements sur le chantier). Ils sont considérés comme des essais standards sur le liant.

A l'heure actuelle, il existe plusieurs références disponibles en matière d'exigences relatives aux caractéristiques du liant. Des exigences existent à la fois vis-à-vis du liant original utilisé pour la fabrication des enrobés et aussi vis-à-vis du liant récupéré issu d'enrobés recyclés ou d'enrobés tièdes. Le liant récupéré est généralement extrait d'un prélèvement d'enrobés foisonnés (à la centrale ou sur chantier) ou de carottes prélevées in situ.

Les principales références disponibles à l'heure actuelle en Suisse en matière d'exigences sur les liants sont :

- Exigences issues des normes VSS

Ces exigences s'appliquent aux liants originaux ainsi qu'à ceux vieillissés en laboratoire selon la méthode RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test). La méthode RTFOT correspond à une simulation en laboratoire du vieillissement du liant pendant la phase de fabrication de l'enrobé à la centrale d'enrobage.

Les exigences sont établies en fonction de la sorte de liant. Les normes VSS à considérer sont :

- SN 670 202-NA/EN 12591 [18] (bitumes routiers)
- SN 670 210b-NA/EN 14023 [19] (bitumes modifiés par des polymères Pmb)
- SN 670 204-1-NA/EN 13924-1 [20] (bitumes routiers de grade dur : 5/15, 10/20 et 15/25)

Dans ces normes, les propriétés du liant récupéré vieilli selon la méthode RTFOT sont désignées comme "résistance au durcissement à 163°C".

- Exigences définies par l'OFROU (Office fédéral des routes) [40]

Ces exigences sont valables pour les liants récupérés (issus des enrobés), par exemple dans le cadre de contrôles de production. Elles ont été définies par l'OFROU.

- Exigences définies par la Direction des travaux du canton de Zurich [41]

Ces exigences sont valables pour les liants récupérés (issus des enrobés).

Il est important de mentionner que l'office des ponts et chaussées de la ville de Zurich a intégré dans ses documents d'appels d'offres des exigences similaires [42] à celles du canton de Zurich. Cependant, dans le cas de la ville de Zurich, il n'y a pas de différence faite entre les exigences relatives au liant récupéré issu d'une couche de roulement et celles relatives au liant récupéré issu des autres couches. Concernant les exigences édictées par la ville de Zurich, l'ensemble des liants récupérés (quelle que soit la couche de chaussée de laquelle ils proviennent) doivent répondre aux mêmes exigences. Celles-ci correspondent à celles définies par le canton de Zurich pour les liants issus des couches de roulement. L'office des ponts et chaussées de la ville de Zurich autorise toutefois une adaptation des exigences (moins strictes) lorsque le liant récupéré est issu d'un enrobé recyclé. Cela signifie que le liant récupéré issu d'un enrobé recyclé peut être légèrement plus rigide. Cela se caractérise par des valeurs de pénétrabilité à l'aiguille et de retour élastique plus faibles et des valeurs relatives au point de ramollissement bille-anneau plus élevées.

Dans ce qui suit, seules les exigences de la direction des travaux du canton de Zurich sont prises en compte.

Les exigences relatives aux liants issues des références énumérées ci-dessus sont synthétisées dans le tableau 21.

			B50/70	B70/100	PmB 10/40-70 (CH-E)	PmB 25/55-65 (CH-E)	PmB 45/80-65 (CH-E)	PmB 65/105- 60 (CH-E)	B10/20	B15/25	
Normes VSS	Pénétrabilité (EN 1426)	Original	50...70	70...100	10...40	25...55	45...80	65...105	10...20	15...25	
		Vieillessement RTFOT <i>Calculée selon les indications de la norme concernant la pénétrabilité résiduelle</i>	≥ 50% 25...70	≥ 46% 32...100	≥ 60% 6...40	≥ 60% 15...55	≥ 60% 27...80	≥ 60% 39...105	≥ 55% 6...20	≥ 55% 8...25	
	Point de ramollissement bille-anneau (EN 1427)	Original	46...54	43...51	≥ 70	≥ 65	≥ 65	≥ 60	58...78	55...71	
		Vieillessement RTFOT <i>Calculée selon les indications de la norme concernant l'augmentation et la diminution admissibles du point de ramollissement</i>	≤ 9°C (augmentation) 46...63	≤ 9°C (augmentation) 43...60	≤ 8°C (augmentation) ≤ 5°C (diminution) 65...78	8°C (augmentation) ≤ 5°C (diminution) 60...73	8°C (augmentation) ≤ 5°C (diminution) 60...73	8°C (augmentation) ≤ 5°C (diminution) 55...68	≤ 10°C (augmentation) ≤ 2°C (diminution) 56...88	≤ 10°C (augmentation) ≤ 2°C (diminution) 53...81	
	Retour élastique 25°C (EN 13398)	Original			≥ 80	≥ 80	≥ 80	≥ 80			
		Vieillessement RTFOT			≥ 60	≥ 60	≥ 60	≥ 60			
OFROU	Pénétrabilité (EN1426)	Original	30...55	40...75	10...35	15...50	30...70	40...90	6...16	8...21	
	Point de ramollissement bille-anneau (EN 1427)	Récupéré	48...65	45...62	≥ 65	≥ 60	≥ 60	≥ 55	≥ 60	≥ 57	
	Retour élastique 25°C (EN 13398)										
Canton de Zurich	Pénétrabilité (EN1426)	Récupéré	AC	30...55	40...75						
			AC B AC T AC F	25...55	35...75	15...35	20...50	35...70	45...90	6...16	15...35
	Point de ramollissement bille-anneau (EN 1427)	Récupéré	AC	48...65	45...62						
			AC B AC T AC F	50...55	47...62	65...87	60...80	60...80	55...75	60...85	65...80
Retour élastique 25°C (EN 13398)	Récupéré	AC				≥ 60	≥ 60	≥ 60			
		AC B AC T AC F			≥ 50	≥ 50	≥ 50	≥ 50			

Tableau 23: tableau de synthèse relatif aux exigences disponibles pour les liants

Afin de faciliter la compréhension et la lecture du tableau 23, vous trouverez ci-dessous quelques informations complémentaires.

- Les différentes sortes de liant

Les bitumes 50/70 et 70/100 sont des bitumes routiers (norme SN 670 202-NA /EN 12591 [18]). Ces bitumes sont fréquemment utilisés en Suisse.

Les PmB 10/40-70, 25/55-65, 45/80-65 et 65/105-60 sont des bitumes modifiés par des polymères (norme SN 670 202-NA/ EN 14023 [19]). Les PmB les plus utilisés en Suisse sont les PmB 25/55-65 et 45/80-65 généralement bien adaptés aux couches fortement sollicitées (trafic, climat).

Les bitumes 10/20 et 15/25 sont des bitumes routiers durs (norme SN 670 204-1-NA / EN 13924-1 [20]). Ils sont généralement utilisés pour la fabrication d'AC EME (bitume 10/20 pour un AC EME C2 et bitume 15/25 pour un AC EME C1).

- Le «retour élastique»

Le retour élastique d'un liant n'est à considérer que lorsqu'il s'agit d'un liant PmB modifié avec des élastomères. Ce paramètre permet de caractériser les propriétés élastiques d'un liant modifié par des polymères. Ainsi, lorsque l'utilisation d'un liant PmB est requise ou si les propriétés du liant final doivent correspondre à celles d'un PmB, il faut tenir compte du retour élastique du liant récupéré. Les exigences correspondantes sont définies par le canton de Zurich et la VSS. Il n'y a pas d'exigence concernant ce paramètre auprès de l'OFROU (idem en ce qui concerne les PmB en général). Il est important de mentionner ici que les exigences relatives aux PmB en matière de retour élastique sont généralement difficiles à atteindre pour les liants issus d'enrobés recyclés à forte teneur en agrégats d'enrobés.

- Le «point de ramollissement bille-anneau»

En ce qui concerne les exigences relatives au point de ramollissement bille-anneau, une valeur minimale doit généralement être respectée par le liant. Cette exigence permet de garantir que le liant n'est pas trop mou, ce qui pourrait entraîner des déformations permanentes (orniérage) à la surface de la chaussée. Cependant, il est également important de considérer une valeur maximale pour ce paramètre, notamment pour le cas des enrobés recyclés. L'utilisation d'agrégats d'enrobés peut en effet entraîner un durcissement du liant (sauf dans le cas des AC EME). Il est donc important de veiller à ce que le liant final ne soit pas trop rigide. Cela pourrait, par exemple, entraîner des problèmes de fissuration de la chaussée. Les exigences du canton de Zurich sont pertinentes à cet égard, car elles représentent une valeur minimale et une valeur maximale pour chaque type de liant.

- Les différences entre la couche de roulement et les autres couches

En ce qui concerne les exigences de la Direction des travaux du canton de Zurich, il existe une différence entre les exigences relatives aux couches de roulement et celles relatives aux autres couches (AC B, AC T, AC F). Le liant (final) de l'AC B, de l'AC T, de l'AC F peut effectivement être un peu plus dur ou plus rigide que le liant d'une couche de roulement, notamment parce que les risques de dégradations prématurées liés à l'utilisation d'un liant trop rigide sont moindres pour les couches inférieures. Celles-ci ne se situent en effet pas à la surface de la chaussée et sont donc moins exposées aux contraintes mécaniques (trafic) et climatiques (par exemple, les rayons UV). Cette différence entre les exigences relatives aux différentes couches est particulièrement intéressante lorsqu'il s'agit d'enrobés recyclés. L'utilisation d'agrégats d'enrobés peut, comme déjà évoqué, entraîner un durcissement du mélange et, dans ce cas, il est possible de favoriser l'emploi d'enrobés recyclés dans les couches de liaison, de base et de fondation.

Concernant les thématiques traitées dans le guide des bonnes pratiques, nous recommandons d'appliquer les exigences de la Direction des travaux du canton de Zurich. Celles-ci sont complètes et conviennent bien aux cas des enrobés recyclés et des enrobés tièdes.

5.4 Investigations complémentaires pour les liants issus des enrobés recyclés et des enrobés tièdes et exigences y relatives

Dans le chapitre 5.3, il était question des essais usuels sur le liant. Dans ce chapitre, l'accent est mis sur des essais complémentaires, particulièrement pertinents et représentatifs dans le cas des enrobés recyclés et des enrobés tièdes.

5.4.1 Détermination du point de fragilité Fraass

Pour des raisons qui ont déjà été mentionnées à plusieurs reprises dans le guide, il est pertinent d'étudier le comportement à basse température des enrobés. Ce comportement peut être évalué par l'intermédiaire d'essais de laboratoire sur le liant (par exemple : essais avec le rhéomètre à flexion du barreau BBR ou essais avec le rhéomètre à cisaillement dynamique DSR) ou sur l'enrobé lui-même (par exemple : essais de résistance à la traction indirecte ou essais de traction uniaxiale). Certains de ces essais sont présentés plus en détail dans les chapitres qui suivent (5.4.2 et 5.5.2).

Dans ce chapitre il est question de la détermination du point de fragilité Fraass du liant. Cet essai sur le liant permet d'obtenir des informations pertinentes sur le comportement à basse température de l'enrobé. Il existe, en effet, une corrélation entre les propriétés du liant constitutif de l'enrobé et le comportement à basse température de cet enrobé.

Cet essai n'est pour l'instant que peu utilisé en Suisse. Pourtant cet essai pourrait, de manière relativement simple, être développé et utilisé à plus grande échelle, également dans le cadre des contrôles usuels (fabrication, fourniture) sur les liants originaux et les liants récupérés. L'essai Fraass est décrit dans la norme SN 670 507/EN 12593 [43] et différents laboratoires en Suisse possèdent l'équipement nécessaire pour le réaliser. L'objectif est de déterminer la température à laquelle une éprouvette constituée d'une fine couche de liant se brise ou se fissure sous l'effet d'un refroidissement et d'une contrainte de flexion donnés.

Les exigences relatives à cet essai (exigences pour le liant) sont disponibles dans les normes suivantes : SN 670 202-NA/EN 12591 [18], SN 670 210b-NA/EN 14023 [19] et SN 670 204-1-NA/EN 13924-1 [20]. Elles sont également résumées dans le tableau 24 ci-dessous.

	B50/70	B70/100	PmB 10/40-70 (CH-E)	PmB 25/55-65 (CH-E)	PmB 45/80-65 (CH-E)	PmB 65/105-60 (CH-E)	B10/20	B15/25
Point de fragilité selon Fraass [°C]	-8	-10	≤-5	≤-10	≤-15	≤-18	≤0	≤0

Tableau 24: Détermination du point de fragilité selon Fraass - Exigences relatives aux différents types de liant

Dans le tableau ci-dessus, il est logique d'observer que les bitumes routiers durs (B10/20 et B15/25) sont les plus sensibles (fragiles) à basse température. On peut également constater que l'utilisation du PmB réduit la sensibilité à basse température par rapport aux bitumes routiers ayant une rigidité similaire. Le PmB a principalement été développé pour ces raisons (diminution de la sensibilité du liant vis-à-vis des températures de service « extrêmes »).

5.4.2 Essais avancés («Advanced Tests») sur le liant

Les méthodes d'investigation ainsi que les essais usuels sur le liant (pénétrabilité à l'aiguille et point de ramollissement bille-anneau) ont montré leurs limites, surtout lorsque le liant testé est issu d'enrobés recyclés ou d'enrobés tièdes. En raison de leur complexité, les liants issus de ces enrobés ne peuvent pas être totalement caractérisés par les méthodes et les essais usuels. Ceux-ci ont été développés pour des bitumes routiers et sont aujourd'hui moins adaptés aux nouveaux liants disponibles sur le marché (PmB) ainsi que dans le cadre d'un recours aux technologies de recyclage et/ou de fabrication tiède.

Les « essais avancés » mentionnés dans ce chapitre sont adaptés à la problématique des enrobés recyclés et des enrobés tièdes, notamment en ce qui concerne les propriétés du liant final. Ces essais sont déjà utilisés aux États-Unis (Strategic Highway Research Program SHRP et SUPERPAVE Asphalt Mix Design Method) et dans certains pays européens (intégrés au programme d'essais sur les liants). En Suisse, les équipements nécessaires à la réalisation de ces essais sont disponibles mais l'expérience fait encore défaut à l'heure actuelle. C'est pourquoi ces essais sont encore relativement peu utilisés.

Dans ce qui suit, vous trouverez une présentation de ces « essais avancés » ainsi qu'un descriptif du principe sur lequel reposent ces essais. Les exigences associées à certains de ces essais sont également disponibles. Toutefois, comme évoqué plus haut, l'expérience relative à ce type d'essais est encore limitée en Suisse et une mise à niveau s'impose. L'acquisition et le développement d'une plus grande expérience dans ce domaine permettra, entre autres, de développer des bases de données à partir desquelles des exigences plus précises et plus pertinentes pourront être établies, par exemple selon le type de liant ou en fonction du type de conditionnement préalable de l'éprouvette (température, vieillissement).

Paramètre étudié	Essai	Plage de température
Sensibilité à la fissuration (comportement à basse température)	Détermination du module de rigidité en flexion (rhéomètre à flexion du barreau /Bending Beam Rheometer BBR) ou Comportement à la déformation avec le DSR (rhéomètre à cisaillement dynamique)	Températures de service basses env. -30°C - 0°C
Sensibilité à la fatigue (fissures de fatigue)	Comportement à la déformation avec le DSR (rhéomètre à cisaillement dynamique)	Températures de service normales env. 5°C – 30°C
Sensibilité aux déformations permanentes	Comportement à la déformation avec le DSR (rhéomètre à cisaillement dynamique)	Températures de service élevées env. 40°C – 60°C
Température optimale pour la fabrication et de la mise en œuvre	Détermination de la viscosité dynamique (Brookfield)	Plage de températures élevées, adaptée au bon enrobage et au compactage satisfaisant des enrobés. Il ne s'agit pas ici de températures de service. env. 100°C – 180°C

Tableau 25: essais avancés intégrables au programme d'essai sur le liant (cas des enrobés recyclés et des enrobés tièdes).

Vous trouverez ci-dessous de plus amples informations concernant les essais sur le liant présentés dans le tableau 25. L'objectif est de vous donner un aperçu de ce en quoi consistent ces essais. Le sujet ne sera toutefois pas traité de manière exhaustive.

Il est important de souligner que les essais avancés sont, à l'heure actuelle, encore plutôt destinés au développement et à la validation de la composition (formulation) d'un enrobé (dans le cadre d'une épreuve de formulation par exemple) ou à des cas d'expertise. Ils sont moins adaptés pour la réalisation d'essais de contrôle usuels, effectués par exemple dans le cadre d'un suivi de chantier, notamment en raison du coût de ces essais et aussi de leur durée. Toutefois, il est tout à fait envisageable de réaliser ces essais avancés également de façon ponctuelle dans le cadre d'essais de contrôle.

- Détermination du module de rigidité en flexion des liants (rhéomètre à flexion de barreau / Bending Beam Rheometer BBR)

La méthode d'essai est décrite dans la norme SN 670 560/EN 14771 [44]. Cet essai est utilisé pour déterminer la rigidité en flexion d'une éprouvette de liants bitumineux à l'aide du rhéomètre à flexion de barreau BBR. Cette méthode d'essai peut être utilisée pour déterminer le comportement à basse température des liants bitumineux.

L'essai est généralement effectué sur un liant « vieilli » par l'intermédiaire du procédé PAV (Pressure Ageing Vessel). Le procédé PAV est un procédé de conditionnement qui permet de simuler en laboratoire le vieillissement à long terme d'un liant. La réalisation de l'essai sur une éprouvette de liant vieilli par le procédé PAV correspond au scénario le plus défavorable (résultats sécuritaires). Les liants bitumineux vieillis sont en effet davantage sensibles aux basses températures (et présentent donc une sensibilité accrue à la fissuration thermique) par rapport aux liants originaux.

Dans la méthode américaine (méthode Superpave), une valeur maximale de rigidité en flexion de 300 MPa est recommandée.

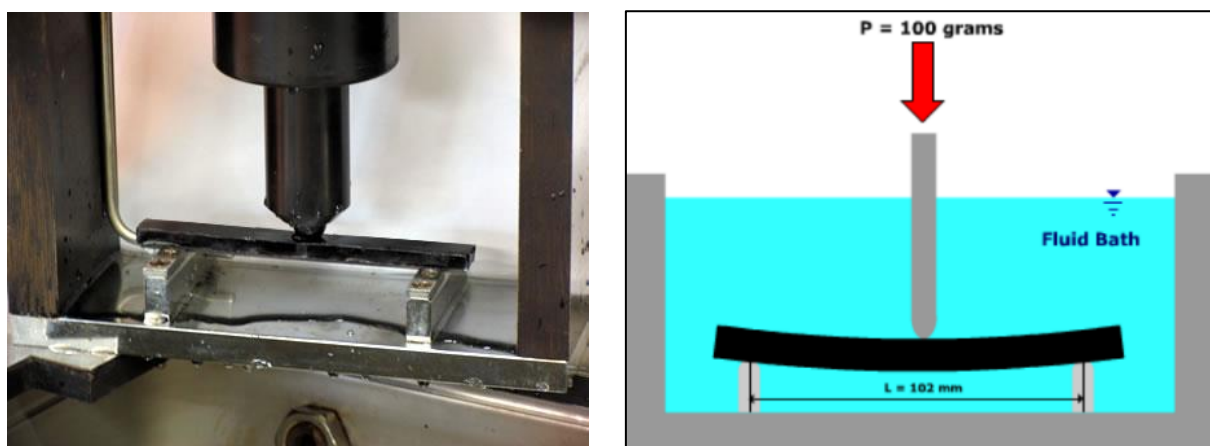


Figure 6: Principe d'un essai BBR (sources: pavementinteractive.org et bitumequebec.eu)

- Détermination de la viscosité dynamique des liants (Brookfield)

La méthode d'essai relative à la détermination de la viscosité dynamique (ou viscosité Brookfield) des liants bitumineux est décrite dans la norme SN EN 13302 [45].

Cet essai permet de déterminer la température optimale du mélange lors de la fabrication (au niveau du malaxeur) ainsi que la température optimale de l'enrobé au moment du compactage. Ces températures sont déterminées pour un type de liant donné, dans un état ou pour un type de conditionnement donné. Les températures optimales déterminées pour la fabrication et le compactage correspondent chacune à une viscosité spécifique du liant.

D'après la norme SN EN 12697-35 [46] (paragraphe 6.1), la température optimale pour la fabrication des enrobés en laboratoire correspond généralement à la température à laquelle le liant présente une viscosité dynamique de 0,17 Pa.s. Afin d'obtenir un enrobage satisfaisant des granulats par le liant, la viscosité dynamique doit rester inférieure à 0,3 Pa.s [24]. Dans la méthode américaine, la température optimale pour réaliser un bon compactage correspond à la température à laquelle le liant a une viscosité dynamique de 0,7 Pa.s. D'autres sources [24] recommandent plutôt une viscosité dynamique du liant comprise entre 1 Pa.s (début de la pose) et 5 Pa.s (fin du compactage) durant la mise en œuvre des enrobés.

	Fabrication (malaxage)	Mise en œuvre (compactage)
Viscosité dynamique du liant	0,17 - 0,3 Pa.s	Début de la pose : 0,7 - 1 Pa.s Fin du compactage : < 5 Pa.s

Tableau 26: Viscosité optimale du liant lors des phases de malaxage et de compactage des enrobés (servant à la détermination de la température optimale pour chacune des phases)

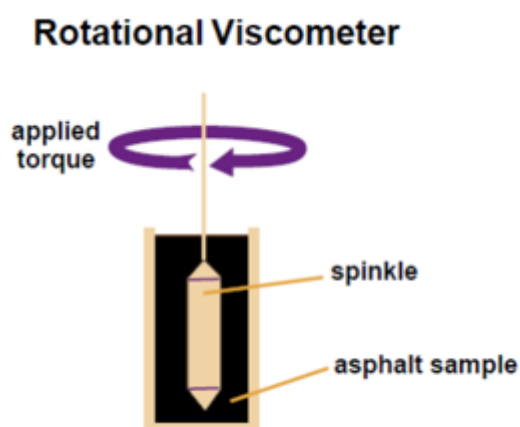


Figure 7: Principe de l'essai pour la détermination de la viscosité dynamique des liants (sources: BFH et bitumequebec.eu)

- Etude du comportement à la déformation des liants avec le rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR)

L'étude du comportement à la déformation d'un liant avec un rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR) appartient au domaine de la rhéologie. La rhéologie correspond à l'étude des propriétés d'écoulement et de déformation d'un matériau sous certaines contraintes. La rhéologie est bien adaptée à l'étude d'un matériau viscoélastique (par exemple, un liant bitumineux). Les propriétés rhéologiques d'un liant correspondent à ses propriétés d'écoulement et de déformation et permettent également de prévoir le comportement de l'enrobé.

- Comportement viscoélastique d'un liant bitumineux et corrélation avec le comportement de l'enrobé (informations générales)

Les liants bitumineux ont des propriétés viscoélastiques. Cela signifie que le liant a un comportement en partie élastique (corps élastique) et partie visqueux (fluide visqueux).

Les matériaux élastiques se déforment sous l'effet d'une charge et reviennent rapidement à leur état initial lorsque cette charge est supprimée. Les matériaux visqueux présentent quant à eux une résistance au cisaillement. Leur déformation augmente linéairement avec le temps lorsqu'une contrainte leur est appliquée. L'élasticité d'un matériau correspond à sa capacité à absorber de l'énergie et à la restituer après déformation, et la viscosité d'un matériau correspond à sa capacité à dissiper de l'énergie.

Il existe une relation entre le comportement du liant et celui de l'enrobé. Le niveau de rigidité du liant affecte également la rigidité de l'enrobé. Les enrobés bitumineux qui se déforment et s'écoulent trop rapidement peuvent être sujets à l'orniérage (sensibilité accrue aux déformations permanentes). Les mélanges trop rigides peuvent quant à eux entraîner des problèmes de fatigue et de fissuration prématurée.

Le comportement d'un liant viscoélastique dépend également de la vitesse/de la fréquence d'application du chargement (par exemple, le trafic) et de la température. Plus la vitesse est faible et/ou la température sont élevées, plus la rigidité « apparente » du liant et de l'enrobé sont faibles. C'est pourquoi, on observe fréquemment de l'orniérage au niveau des arrêts de bus (faible vitesse de sollicitation) ainsi que sur des surfaces exposées à un fort ensoleillement (forte température). Dans ce cas, le comportement de l'enrobé est plutôt visqueux et le matériau tend à se déformer de façon permanente. Sur des tronçons moins ensoleillés ou sur des tronçons où la vitesse du trafic est plus élevée, le comportement de l'enrobé est plutôt élastique et, généralement, aucune déformation permanente n'est visible suite au passage de la charge.

Les propriétés rhéologiques d'un liant dépendent fortement de sa composition chimique et permettent d'obtenir des informations sur ses caractéristiques (par exemple, le degré de vieillissement, les modifications éventuelles avec des polymères) ainsi que sur l'homogénéité du liant final (mélange de plusieurs liants ou d'un liant avec additifs).

Les essais rhéologiques doivent être effectués sur une large gamme de températures. Celle-ci correspond à la combinaison des gammes de températures basses, normales et élevées auxquelles peut être soumise une chaussée durant la durée de service. De la même façon, des essais peuvent être réalisés pour différentes fréquences de chargement, correspondant aux différentes vitesses de trafic sur la chaussée.

Pour en savoir plus à ce sujet, voir les références [47] et [48].

- Déroulement des essais rhéologiques avec le rhéomètre à cisaillement dynamique DSR

Les propriétés rhéologiques des liants sont dans la majorité des cas déterminées avec un appareil d'essai oscillant (rhéomètre à cisaillement dynamique, ou DSR). Le DSR permet de déterminer les propriétés élastiques, viscoélastiques et visqueuses des liants sur une large gamme de températures et de fréquences.



Figure 8: Aperçu d'un DSR (source: TA)

Au cours d'un essai réalisé avec le DSR, un mince échantillon de liant est placé entre deux plaques circulaires. La plaque inférieure est maintenue fixe. La plaque supérieure oscille quant à elle dans le plan à la surface de l'échantillon à une fréquence donnée, ce qui permet de générer une contrainte de cisaillement à la surface de l'échantillon.

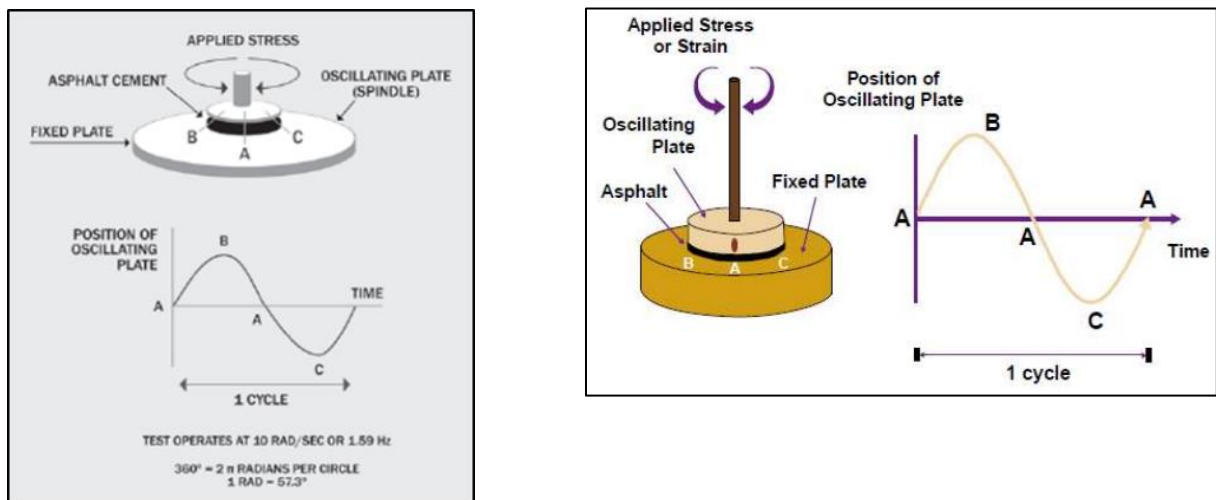


Figure 9: Principe d'un essai DSR (source: CTAA, Carter 2018)

Un essai DSR sur le liant permet de déterminer le module de cisaillement complexe G^* et l'angle de phase δ du liant sur une gamme de fréquences et de températures donnée.

Le module de cisaillement complexe G^* est le rapport entre la contrainte maximale τ et de la déformation maximale γ générée par une charge sinusoïdale. Le module G^* représente la résistance à la déformation sous cisaillement répété de l'échantillon de liant.

L'angle de phase δ correspond au déphasage entre la contrainte et la déformation pendant l'essai. Plus l'angle de phase (δ) est grand, plus le matériau est visqueux. Le cas $\delta = 0$ degré correspond à un matériau purement élastique. Le cas $\delta = 90$ degrés correspond à un matériau purement visqueux.

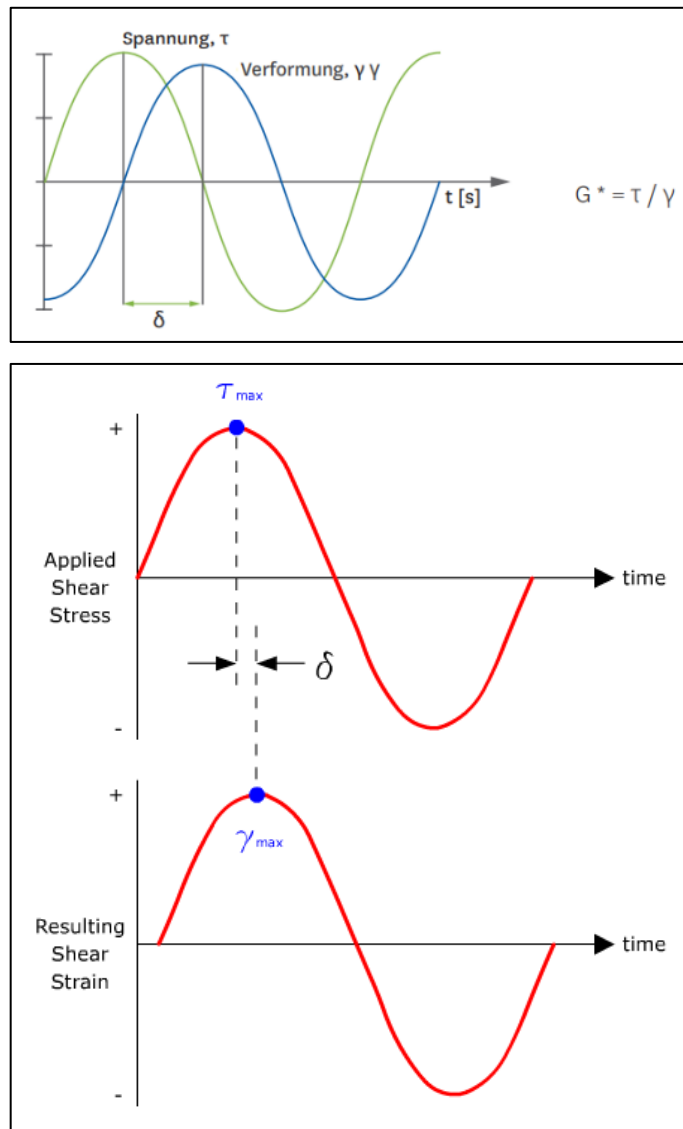


Figure 10: Représentation de la contrainte (Spannung), de la déformation (Verformung) et de l'angle de phase enregistrés lors d'un essai DSR sur liant (sources: Eurobitume et pavementinteractive.org)

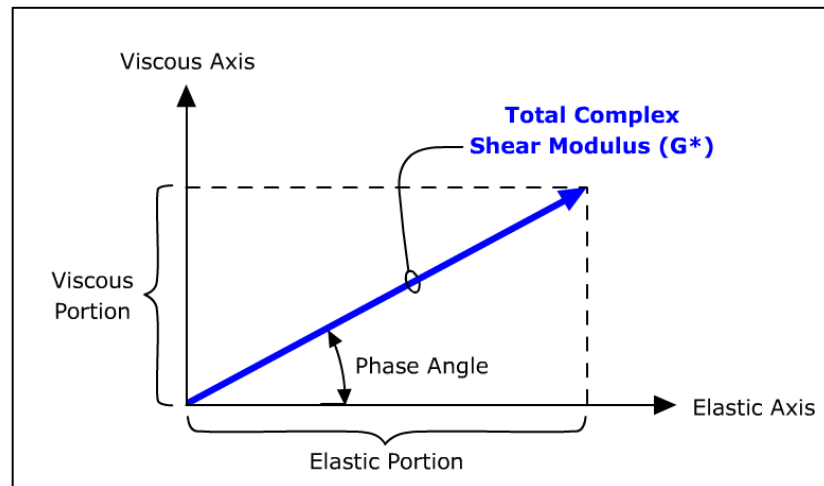


Figure 11: Représentation du module de cisaillement complexe G^* , avec sa composante réelle (élastique) et sa composante imaginaire (visqueuse) ainsi que l'angle de phase δ (source : pavementinteractive.org)

- Méthodes d'essai et exigences y relatives

La norme relative aux méthodes d'essai avec le DSR est la norme SN 670 559/EN 14770 [49].

Les essais rhéologiques sur le liant sont encore peu utilisés en Suisse. Ces essais ont toutefois déjà été réalisés dans le cadre de certains projets et les résultats correspondants sont disponibles (voir notamment les références de l'OFROU, de la ville d'Uster et du canton de Zurich présentées au chapitre 4.2).

Dans le cadre du programme d'essais sur les liants utilisé en Allemagne, les essais rhéologiques avec le DSR ont une place importante. Des consignes relatives aux différentes méthodes d'essai ayant recours au DSR ont été élaborées. Vous trouverez ci-dessous une liste de certaines de ces méthodes :

- Méthode d'essai basée sur une procédure de balayage en température (méthode Temperaturesweep ou T- sweep) [50].
- Méthode de caractérisation rapide du liant (Méthode BTSV Bitumen-Typisierung-Schnell-Verfahrens) [51].
- Méthode d'essai avec un taux de cisaillement constant [52].
- Méthode MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test) [53].

Les méthodes les plus fréquemment utilisées sont la procédure balayage en température et la méthode BTSV.

Le principe général sur lequel repose ces méthodes d'essai est présenté ci-dessous.

Le module de cisaillement complexe G^* et l'angle de phase δ du liant sont utilisés comme indicateurs de la sensibilité à l'orniérage (aux déformations permanentes) et à la fissuration par fatigue de l'enrobé. Les ordres de grandeur généralement rencontrés pour le module de cisaillement complexe et l'angle de phase sont indiqués dans le tableau ci-dessous.

Module de cisaillement complexe G^*	Angle de phase δ
500 à 6000 MPa	50 à 90°

Tableau 27: ordres de grandeur du module de cisaillement complexe et de l'angle de phase des liants bitumineux

En général, les PmB ont un module de cisaillement complexe G^* plus élevé et un angle de phase δ plus faible par rapport à ceux des bitumes purs. Cela s'explique par le fait que les PmB sont plus rigides et plus élastiques en comparaison aux liants non modifiés (par exemple, un bitume routier).

Par ailleurs, afin de limiter la sensibilité à la fatigue et aux déformations permanentes des enrobés, certaines exigences concernant les liants doivent être respectées. Elles sont présentées ci-dessous.

Une sensibilité accrue à la fatigue des enrobés est souvent liée à la présence d'un liant aux propriétés vieilles/altérés. Pour étudier la sensibilité à la fatigue, les essais rhéologiques sont donc réalisés sur un échantillon de liant conditionné selon la méthode PAV (simulation du vieillissement à long terme du liant). Les essais sont donc réalisés pour le cas le plus préjudiciable (scénario « worst-case »). Afin de limiter la sensibilité à la fatigue de l'enrobé, le liant doit conserver au cours du temps une élasticité suffisante.

La sensibilité aux déformations permanentes concerne quant à elle généralement les liants au jeune âge. Pour étudier la sensibilité aux déformations permanentes, les essais rhéologiques sont donc réalisés sur un échantillon de liant conditionné selon la méthode RTFOT (simulation du vieillissement à court terme, généré lors de la fabrication des enrobés). Dans ce cas également, l'essai est mené dans le cas le plus préjudiciable (scénario « worst-case »). Afin de limiter la sensibilité aux déformations permanentes des enrobés, le liant doit présenter une rigidité et une élasticité élevées. Cela signifie que la valeur du ratio $G^*/\sin \delta$ doit être aussi élevée que possible.

Domaine d'application/paramètre étudié	Conditionnement (préparation) du liant	Exigences
Sensibilité à la fatigue (fissures de fatigue)	PAV	$G^* \times \sin \delta \leq 5 \text{ MPa}$
	Aucune	$G^*/\sin \delta \geq 1.0 \text{ kPa}$
Sensibilité aux déformations permanentes	RTFOT	$G^*/\sin \delta \geq 2.2 \text{ kPa}$

Tableau 28: Exigences relatives aux essais rhéologiques sur le liant selon le type de paramètre étudié

Les exigences du tableau 28 sont issues de la méthodologie américaine (Superpave Mix Design System, MP 1 Performance-Graded Asphalt Binder) [54].

Dans la méthodologie allemande, des exigences sont également formulées. Elles permettent de caractériser le type de liant testé (voir tableau ci-dessous).

Tabelle 1: Verformungseigenschaften von Straßenbaubitumen

Merkmal oder Eigenschaft	Einheit	Prüfmethode	Sorten			
			30/45	50/70	70/100	160/220
Aquisteifigkeitstemperatur T (G* = 15 kPa) bei 1,59 Hz	°C	in Anlehnung an AL DSR-Prüfung (T-Sweep <u>oder</u> BTSV)	52 bis 58	47 bis 53	42 bis 48	35 bis 41
Phasenwinkel δ (G* = 15 kPa) bei 1,59 Hz	°		≥ 75	≥ 75	≥ 75	≥ 75

Tabelle 2: Verformungseigenschaften von Elastomermodifizierten Bitumen

Merkmal oder Eigenschaft	Einheit	Prüfmethode	Sorten		
			25/55-55 A	10/40-65 A	40/100-65 A
Aquisteifigkeitstemperatur T (G* = 15 kPa) bei 1,59 Hz	°C	in Anlehnung an AL DSR-Prüfung (T-Sweep <u>oder</u> BTSV)	48 bis 62	56 bis 68	48 bis 58
Phasenwinkel δ (G* = 15 kPa) bei 1,59 Hz	°		≤ 75	≤ 75	≤ 75
Phasenwinkel δ (G* = 1 kPa) bei 1,59 Hz	°		≤ 85	≤ 85	≤ 85

Figure 12: Exigences relatives aux essais rhéologiques sur le liant en fonction du type de liant (source : asphalt.de).

5.5 Exigences concernant la mise au point et la validation des formulations d'enrobés

L'évaluation et la vérification des performances des enrobés bitumineux (pour une recette donnée) sont effectuées dans le cadre d'une épreuve de formulation. La procédure relative à l'épreuve de formulation pour les enrobés bitumineux est décrite dans norme SN EN 13108-20 [16]. Cette procédure s'applique également aux enrobés recyclés et aux enrobés tièdes.

Pour chaque produit (enrobé) proposé au catalogue d'une centrale d'enrobage, un rapport d'épreuve de formulation doit être disponible. Celui-ci n'est valable que pour un produit donné (c'est-à-dire une formulation/recette donnée). Il garantit la conformité du produit (enrobé) et de ses constituants.

Les principaux éléments que l'on peut trouver dans un rapport d'épreuve de formulation sont:

- La garantie que l'ensemble des constituants utilisés pour fabriquer le produit répondent aux exigences qui leur sont imposées (voir chapitre 5.5.1 et tableau 29) ;
- L'identification de la centrale d'enrobage et du type d'enrobé ;
- La composition théorique de l'enrobé (liste des constituants utilisés et dosages correspondants) ;
- La température utilisée pour la préparation (compactage) des éprouvettes ;
- Les résultats des essais réalisés dans le cadre de l'épreuve de formulation. Les essais à réaliser sont résumés dans le tableau 30.

Ces éléments sont essentiels et permettent de garantir les propriétés, la qualité et la durabilité d'un produit tout au long de sa durée de service.

Les formules d'enrobés, sous réserve qu'elles n'aient pas été modifiées dans l'intervalle, sont valables pour une durée de 5 ans. Une épreuve de formulation pour un produit donné doit donc être effectuée tous les 5 ans. Toutefois, dans les cas suivants, une nouvelle étude de formulation doit être effectuée avant la fin de la période de validité (5 ans) :

- Changements dans les granulats.
- Changement du bitume : changement de classe ou du type de bitume.
- Changement dans les agrégats d'enrobés. Un nouveau rapport d'épreuve de formulation est requis si des changements dans les propriétés des agrégats d'enrobés conduisent à un changement au niveau des performances de l'enrobé recyclé. Ce peut être le résultat de variations observées dans les stocks d'agrégats d'enrobés par rapport à ceux initialement considérés.
- Changement dans les additifs.

En parallèle, des contrôles réguliers de la production et de la qualité sont également effectués lors de la fabrication des enrobés afin de vérifier leur conformité ainsi que celles de leurs constituants. Dans le cadre de ces contrôles, il n'est pas envisageable de réaliser l'ensemble du programme d'essais de l'épreuve de formulation (coûts, délais). C'est pourquoi, pour ce genre de contrôles, le programme d'essais réalisé sur l'enrobé (composition, y compris granulométrie et teneur en liant) et les constituants (en particulier propriétés du liant récupéré) est réduit. Les résultats obtenus dans le cadre de ces contrôles sont comparés à ceux de l'épreuve de formulation, ce qui permet de garantir le respect des exigences ainsi qu'un comportement satisfaisant des enrobés en phase de service. Les résultats des contrôles sont protocolés dans un document appelé « déclaration ». Vous trouverez ici un exemple de déclaration. De plus amples informations sont également disponibles dans la norme SN EN 13108-21 [21]. Cette norme spécifie les exigences relatives au contrôle de la qualité et au contrôle de la production s'appliquant à la fabrication d'enrobés bitumineux dans les centrales d'enrobés.

5.5.1 Exigences relatives aux constituants des enrobés bitumineux

Il est essentiel de s'assurer de la conformité des constituants utilisés pour la fabrication d'un enrobé, afin de garantir les propriétés et les performances de ce dernier.

Une synthèse des éléments à contrôler pour chacun des constituants ainsi que les exigences associées sont disponibles dans le tableau 29.

En ce qui concerne les enrobés recyclés, les données relatives au liant (liant d'apport) et aux agrégats d'enrobés sont essentielles. En ce qui concerne les enrobés tièdes, ce sont les informations relatives au liant et aux additifs qui sont particulièrement importantes.

Constituants	Normes correspondantes	Caractéristiques à prendre en compte pour l'évaluation de la conformité	Références aux exigences
Granulats et filler	SN 670 103b/EN 13043	Granulométrie	SN 670 103b/EN 13043 Tab. 1, 2 et 3
		Teneur en fines	SN 670 103b/EN 13043 Tab. 3
		Qualité des fines lorsque la teneur en fines est > 10 % massique	
		Forme des gravillons Coefficient d'aplatissement FI	
		Pourcentage de surfaces concassées dans les gravillons	SN 670 103b/EN 13043 Tab. 4
		Résistance à la fragmentation des gravillons	SN 670 103b/EN 13043 Tab. 5
		Résistance au polissage (uniquement pour couche de roulement)	
		Masse volumique réelle et absorption d'eau	À déclarer
		Affinité des gravillons avec les liants hydrocarbonés	
		Teneur en polluants organiques légers de grosses dimensions	SN 670 103b/EN 13043 Tab. 5
		Caractéristiques supplémentaires spécifiques au filler	Voir chapitres G à K de la norme SN 670 103b/EN 13043
Liant	Bitume routier SN 670 202-NA/EN 12591	SN 670 202-NA/EN 12591 Tab. 11	
	PmB SN 670 210b-NA/EN 14023	SN 670 210b-NA/EN 14023 Tab. 1 et 2	
	Bitume dur SN 670 204-1-NA/EN13924-1	SN 670 204-1-NA/EN13924-1 Tab. 1	
Additifs	Il est courant (dans le domaine des enrobés bitumineux au niveau européen) d'utiliser des additifs tels que des fibres synthétiques ou organiques, des colorants, des cires, etc. dans la fabrication des enrobés. Ces additifs ne font pas l'objet d'une norme européenne ou d'agrément technique européen. La norme EN 13108-1 autorise toutefois l'utilisation de ce type de matériau.		Sorte
Agrégats d'enrobés	SN EN 13108-8	Voir le tableau 5 du chapitre 1.5. du guide	

Tableau 29: Paramètres relatifs aux constituants devant être testés et validés dans le cadre d'une épreuve de formulation.

5.5.2 Essais conventionnels relatifs aux enrobés bitumineux

Des essais doivent également être réalisés sur les enrobés bitumineux. Ceux-ci doivent correspondre aux exigences de la norme produit applicable. Seule la norme produit SN 640 431-1-NA/EN 13108-1 [11] est considérée dans ce qui suit. Les essais devant être effectués sur les enrobés bitumineux dans le cadre d'une épreuve de formulations sont listés dans le tableau 30.

Paramètres	Lien avec la norme produit SN 640 431-1-NA/ EN 13108-1	Éléments importants à considérer lorsqu'il s'agit d'...		Autres commentaires
		enrobés recyclés	enrobés tièdes	
Teneur en bitume	Point 15 / Tableau 8	X <i>Liée à l'homogénéité des agrégats d'enrobés</i>		
Module de richesse	Point 16 / Tableau 9			Ne concerne que les AC EME
Granulométrie	Point 14/ Tableau 7	X <i>Liée à l'homogénéité des agrégats d'enrobés</i>		
Teneur en vides	Point 11/ Tableau 4	X <i>Liée à l'aptitude au compactage</i>	X	
Degré de remplissage des vides par le bitume	Point 18/ Tableau 11			Ne concerne que les enrobés de type L et N
Sensibilité à l'eau	Point 12/ Tableau 5	X <i>Les études menées jusqu'ici ont montré qu'il peut y avoir une sensibilité accrue à l'eau pour les enrobés recyclés et les enrobés tièdes.</i>	X	
Résistance aux déformations permanentes	Point 19/ Tableau 12	X <i>Les études menées jusqu'ici ont montré qu'il peut y avoir une sensibilité accrue aux déformations permanentes pour les enrobés recyclés et les enrobés tièdes.</i>	X	Ne concerne que les enrobés de type S et H, ainsi que les AC MR et les AC EME
Valeurs Marshall (stabilité S et fluage F)	Point 17/ Tableau 10	X <i>Les études menées jusqu'ici ont montré qu'il peut y avoir une sensibilité accrue aux déformations permanentes pour les enrobés recyclés et les enrobés tièdes.</i>	X	<ul style="list-style-type: none"> • Ne concerne que les enrobés de type L et N et les AC F. • Caractérise la résistance aux déformations permanentes.
Rigidité	Point 20/ Tableau 13			Ne concerne que les AC EME
Fatigue	Point 20/ Tableau 13			Ne concerne que les AC EME

Tableau 30: Paramètres relatifs aux enrobés bitumineux devant être testés et validés dans le cadre d'une épreuve de formulation.

5.5.3 Essais complémentaires pour les enrobés recyclés et les enrobés tièdes

Dans le cas des enrobés recyclés et des enrobés tièdes, la liste des essais présentés dans le Tableau 31 peut être complétée par des investigations complémentaires, permettant de prendre en compte les caractéristiques particulières identifiées pour ces deux produits. Ces essais supplémentaires proposés sont indiqués dans le tableau 31 ci-dessous.

	Enrobé recyclé	Enrobé tiède
Teneur en vides sur éprouvettes compactées à la PCG <i>SN EN 12697-10 (méthode B)</i> [55]	x	x
Maniabilité (cohésion) <i>SN EN 12697-53</i> [56]		x
Fissuration et comportement à basse température (sur enrobé) <i>SN EN 12697-46 (méthode TSRST)</i> [57]	x	

Tableau 31: Essais complémentaires pour les enrobés recyclés et les enrobés tièdes

Le compactage de l'enrobé en laboratoire avec une PCG (presse à cisaillement giratoire) est davantage représentatif du compactage effectivement réalisé in situ qu'un compactage en laboratoire avec une dame Marshall. L'utilisation d'une PCG pour le compactage en laboratoire permet également de suivre l'évolution du degré de compactage en fonction du nombre de girations. Cette information est importante, non seulement pour déterminer l'aptitude au compactage d'un enrobé, mais aussi pour optimiser sa formulation. L'utilisation de la PCG peut aussi, selon le type d'essai (essai autre que la détermination de l'aptitude au compactage), se substituer à la dame Marshall pour la confection d'éprouvettes en laboratoire.

La détermination du délai de maniabilité d'un enrobé par le biais d'un maniabilimètre permet, entre autres, de déterminer la durée disponible entre la fabrication de l'enrobé en centrale et son compactage sur le chantier. Cet essai peut être utilisé pour déterminer les caractéristiques de maniabilité d'un enrobé, mais aussi en vue d'optimiser sa formulation. Le principe de l'essai avec un maniabilimètre consiste à mesurer la résistance au cisaillement généré par le mouvement d'un piston dans un moule rempli avec l'enrobé à tester. La maniabilité de l'enrobé bitumineux diminue lorsque la force de cisaillement augmente. Les valeurs limites relative à la maniabilité d'un enrobé tiède restent encore à définir pour cet essai. En première approche, une force maximale de 80 N pourrait constituer le seuil au-dessus duquel la maniabilité d'un enrobé tiède n'est plus suffisante pour garantir une mise en œuvre correcte. La réalisation d'essais (contrôles) avec le maniabilimètre est également possible in situ (sur chantier).

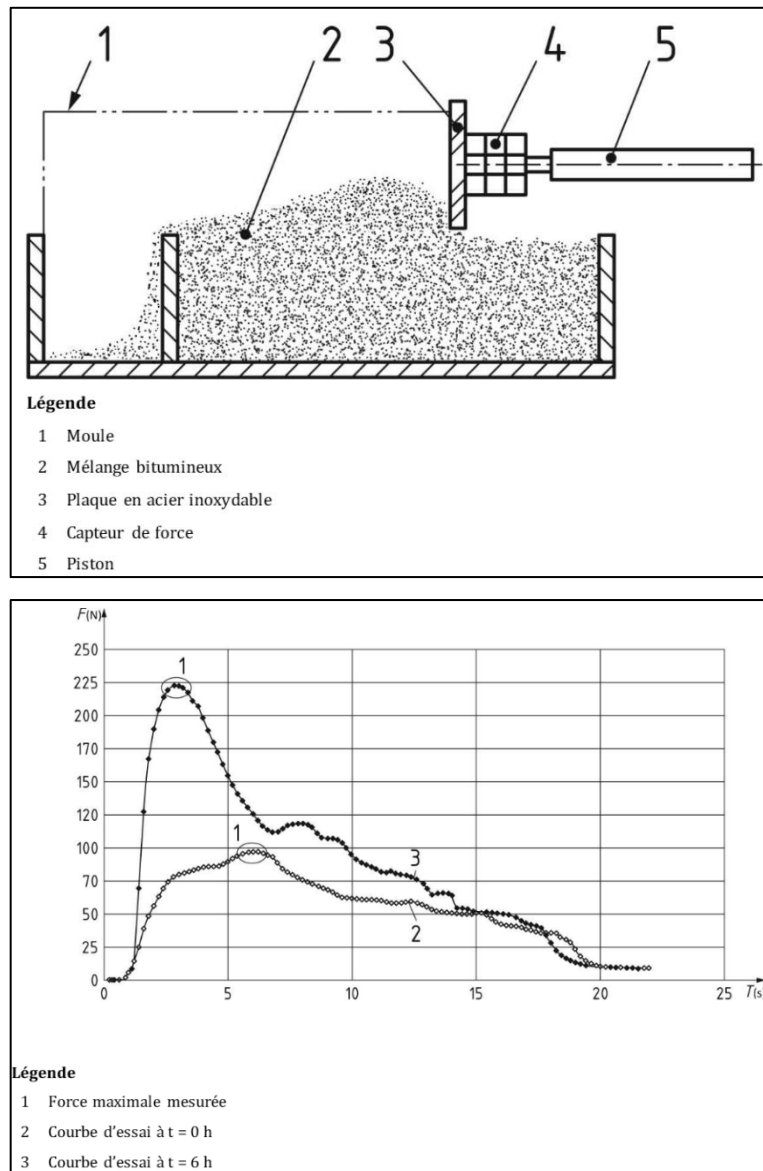


Figure 13: Principe de mesure de la maniabilité et exemple de données mesurées (source : SN EN 12697-53)

La norme SN EN 12697-46 [56] mentionne que des essais de traction uniaxiale peuvent être réalisés pour déterminer la résistance d'un enrobé bitumineux vis-à-vis de la fissuration (thermique) à basse température. Pour ce faire, nous proposons d'utiliser l'essai TSRST (Thermal Stress Restrained Specimen Test). Cet essai permet de déterminer la température minimale (limite) à laquelle peut être exposée une éprouvette d'enrobé bitumineux sans rompre ou fissurer. Des valeurs seuils, basées sur l'expérience de la Direction des travaux du canton de Zurich, sont disponibles ci-dessous. Celles-ci sont définies selon le type de liant utilisé pour la fabrication de l'enrobé.

		B50/70	B70/100	PmB 10/40-70 (CH-E)	PmB 25/55-65 (CH-E)	PmB 45/80-65 (CH-E)	PmB 65/105-60 (CH-E)	B10/20	B15/25
Comportement à basse température et résistance à la fissuration thermique (TSRST)	AC				≤ -22°C	≤ -25°C	≤ -25°C		
	AC B								
	AC T	≤ -20°C	≤ -22°C	≤ -18°C	≤ -20°C	≤ -22°C	≤ -22°C	≤ -18°C	≤ -18°C
	AC F								

Tableau 32: Valeurs seuils déterminées selon l'expérience du canton de Zurich concernant le comportement à basse température et la résistance à la fissuration thermique des enrobés bitumineux (TSRST)

La réalisation de cet essai TSRST est recommandée dans le cadre de l'épreuve de formulation ou en cas d'expertise.

En ce qui concerne les enrobés tièdes, il serait également pertinent d'adapter les températures des éprouvettes lors de la réalisation des essais en laboratoire ainsi que les températures appliquées durant la phase de confection et conditionnement des éprouvettes (avant essai). En effet, les conditions d'essai (notamment les températures) ont été définies pour les enrobés à chaud, qui sont toujours encore considérés dans les normes comme les produits de référence. Il est toutefois possible de déterminer, à l'aide d'un essai de viscosité, les températures adaptées à la fabrication, à la mise en œuvre et au compactage des enrobés tièdes, et par conséquent aussi d'adapter les températures mentionnées dans les procédures d'essai. Cet aspect relatif à la viscosité a déjà été évoqué au chapitre 5.4. Pour les enrobés recyclés, les conditions d'essai (températures) doivent être sélectionnées d'après les propriétés du liant final. Voir également à ce sujet le point 6.1 de la norme SN EN 12697-35 [46].

5.6 Contrôle de la fourniture et de la mise en œuvre des enrobés sur chantier

Les contrôles et les essais mentionnés au chapitre 5.5 permettent d'optimiser la formulation des enrobés et de s'assurer que les enrobés possèdent bien les propriétés et performances attendues.

Afin de garantir les exigences, la qualité et la durabilité d'un enrobé bitumineux, il est important de tenir compte des conditions de fabrication et de livraison, mais aussi des conditions de mise en œuvre. Les conditions de mises en œuvre seront évoquées dans ce chapitre.

Un programme d'essais relatif à la mise en œuvre des enrobés bitumineux est disponible dans la norme VSS 40 434 [15]. La réalisation des essais est répartie entre l'entreprise de construction et le maître d'ouvrage. Chaque acteur finance les essais dont il est responsable. (cf. tableau 2 de la norme VSS 40 434 [15]). Ce tableau recommande également un certain nombre d'essais par couches. Rappelons ici que les essais doivent être effectués par un laboratoire accrédité.

Les essais et les contrôles à effectuer d'après la norme sont listés dans le tableau 33 ci-dessous.

Par ailleurs, il est aussi important de tenir compte des facteurs-clés suivants :

- Une pose à la machine est nécessaire pour les enrobés tièdes ;
- La mise en œuvre d'enrobés tièdes exige une certaine expérience et un savoir-faire de la part de l'entreprise de construction ;
- La température et la viscosité, qui sont les garants d'une maniabilité et d'une aptitude au compactage satisfaisantes de l'enrobé, sont des aspects essentiels dans le cadre de la mise en œuvre d'enrobés recyclés et d'enrobés tièdes.

	Essais	Exigences
Enrobé (non compacté)	Teneur en vides (éprouvettes Marshall)	SN 640 431-1-NA/EN 13108-1 Tab. 4 /Point 11
	Granulométrie	SN 640 431-1-NA/EN 13108-1 Tab. 7 /Point 14
	Teneur en liant	SN 640 431-1-NA/EN 13108-1 Tab. 8 / Point 15
Liant (récupéré)	Point de ramollissement (bille-anneau)	Voir chapitre 5.3 et 5.4 du guide
	Pénétrabilité	
	Retour élastique (PmB)	
	Fraass	
	DSR (cas particuliers)	
Carottes	Epaisseur des couches	VSS 40 430 Tab. 1
	Teneur en vides	VSS 40 430 Tab. 6
	Degré de compactage	VSS 40 430 Tab. 5
	Liaison entre les couches (Leutner)	VSS 40 430 point 45
PV de mise en œuvre	Les informations à mentionner dans le protocole de pose sont données dans la norme VSS 40 430, point 39. En ce qui concerne les enrobés recyclés et les enrobés tièdes, les conditions météorologiques ainsi que la température de l'enrobé avant compactage sont essentielles. Selon la norme VSS 40 434, cette tâche doit être effectuée par l'entreprise de construction. Toutefois, il est recommandé que la direction des travaux rédige également son propre PV.	
Durant la mise en œuvre	Dans le cas des enrobés recyclés et des enrobés tièdes, il peut s'avérer utile de procéder au suivi du compactage pendant la pose des enrobés, à l'aide d'un nucléodensimètre par exemple. Cela permet, en complément des résultats obtenus à partir des carottes prélevées, de déterminer le degré de compactage et la teneur en vides des couches mises en place.	

Tableau 33: liste des essais de contrôle de mise en œuvre

Dans le cadre de grands projets et pour des routes à grand débit ou fortement sollicitées, la mesure de la planéité et de l'adhérence est à intégrer au programme d'essais.

Des informations complémentaires sont disponibles au chapitre 6.4.

Enfin, à titre d'exemple, vous trouverez [ici](#) un lien vers le protocole de mise en œuvre utilisé par la Direction des travaux du canton de Zurich.

6 Promotion et intégration des enrobés recyclés et des enrobés tièdes dans le cadre des projets

L'objectif de ce chapitre est de fournir des informations et des recommandations afin de faciliter l'intégration et la promotion des enrobés recyclés et des enrobés tièdes dans le cadre des projets de construction routière. Différentes phases de projet sont abordées dans ce chapitre.

6.1 Phase de conception et de planification

6.1.1 Réalisation d'essais préliminaires et documentation correspondante

Comme déjà évoqué à plusieurs reprises dans ce guide, l'homogénéité des agrégats d'enrobés est un des aspects essentiels lorsqu'il s'agit d'enrobés recyclés. Une bonne homogénéité des agrégats d'enrobés permet notamment d'augmenter la teneur en agrégats d'enrobés dans les enrobés recyclés et aussi de recycler les agrégats d'enrobés de manière hautement qualitative.

La réalisation d'essais préliminaires avant travaux sur chaussée peut contribuer à améliorer l'homogénéité des agrégats d'enrobés qui seront récupérés en phase de déconstruction, notamment grâce à une meilleure connaissance (caractérisation) de la structure et des matériaux en place.

Au stade de conception/planification, les essais préliminaires consistent en la réalisation de carottages et de sondages. Ceux-ci permettent d'identifier les matériaux en place ainsi que leur qualité, leur état et leur épaisseur. L'analyse de l'état de l'interface (collée/décollée) entre les couches est également importante. Dans un second temps, des essais supplémentaires peuvent également être effectués, en laboratoire, sur les matériaux prélevés in situ. Il s'agit alors de déterminer, entre autres, la teneur précise en HAP des matériaux bitumineux en place au moyen de méthodes d'analyse plus poussées (voir à ce sujet également le chapitre 1.2.3).

Le recours à d'autres investigations, par exemple un relevé visuel de l'état de la chaussée ou des mesures de portance, peut également s'avérer pertinent. Ces investigations permettent, entre autres, d'identifier les zones dont l'état et le comportement sont homogènes et d'optimiser le type de travaux à réaliser sur la base de calculs de dimensionnement. Il est aussi important de rappeler que l'exploitation du potentiel structurel résiduel d'une chaussée en place permet de réduire l'impact environnemental lié aux travaux et a également un impact favorable sur les coûts et le calendrier des travaux. Cela conduit, en effet, à limiter (optimiser) les quantités de matériaux générés lors de la déconstruction et également les quantités des nouveaux matériaux à mettre en œuvre.

Suite à la réalisation d'essais préliminaires, il est recommandé de documenter de manière appropriée les informations et les données recueillies. Cette documentation peut comprendre différents types de documents - plans, fiches techniques et descriptions, photographies, rapports d'essai, etc. – et servira pour la phase de préparation du projet. Elle pourra également être mise à disposition de l'entreprise de construction et des autres intervenants qui travailleront sur le chantier.

6.1.2 Préparation de la déconstruction

Les essais préliminaires réalisés permettent également de mieux préparer les travaux de déconstruction.

Une bonne connaissance de la structure et des matériaux en place permet, entre autres, une meilleure estimation des quantités de matériaux de déconstruction qui seront générés dans le cadre du projet. Cela permet également de déterminer plus précisément les filières d'élimination, de traitement et de recyclage des matériaux, en particulier pour ce qui est des agrégats d'enrobés selon leur teneur en HAP. Par ailleurs, cela permet également de prévoir un espace suffisant dans l'emprise de chantier pour la séparation et le tri des différents matériaux issus de la déconstruction.

Dans la mesure du possible, une méthode de déconstruction, optimisée et appropriée au site, doit également être définie. Celle-ci pourra ensuite être prescrite dans les conditions de l'appel d'offres. L'objectif principal de la définition d'une méthode de déconstruction est de pouvoir séparer, au moment de la déconstruction, les différents types et qualités d'agrégats d'enrobés identifiés dans le cadre des essais préliminaires afin de pouvoir les recycler et les valoriser séparément. Un fraisage couche par couche et/ou en fonction du type de structure en place est une solution qui permet un recyclage hautement qualitatif des agrégats d'enrobés. Il faut cependant garder à l'esprit que cette méthode de déconstruction nécessite une bonne organisation sur le chantier ainsi que pour l'évacuation des matériaux. Cela peut également générer des coûts plus élevés et des délais de déconstruction plus longs. Les gains environnementaux qui en découlent sont toutefois importants. Les chantiers autoroutiers ainsi que ceux sur certaines routes cantonales se prêtent bien à l'application d'une telle démarche. La mise en œuvre d'une telle démarche peut être plus difficile dans le cadre de chantiers en milieu urbain, notamment à cause d'une plus grande hétérogénéité dans les structures en place et également de la taille limitée de la majorité des chantiers.

6.1.3 Choix des types et sortes d'enrobés bitumineux

C'est au cours de la phase de planification, que les produits qui seront mis en œuvre dans le cadre du projet sont définis, en particulier les enrobés recyclés et les enrobés tièdes. C'est donc à ce stade qu'il faut se poser la question de la possibilité d'utiliser des enrobés recyclés et/ou des enrobés tièdes. L'emploi d'enrobés recyclés est à privilégier partout où cela est possible. Il faut également tenir compte de ces aspects au moment de l'établissement des documents d'appel d'offres.

Il convient de privilégier l'utilisation d'enrobés recyclés à celle d'enrobés à chaud sans agrégats d'enrobés. L'utilisation d'enrobés recyclés permet en effet de contribuer de façon notable au développement durable. Par ailleurs, nous avons déjà mentionné à plusieurs reprises dans le guide que les enrobés recyclés peuvent être utilisés pour un large domaine d'applications, y compris sur des chaussées à fort trafic.

Toutefois, en cas d'utilisation d'enrobés recyclés et d'enrobés tièdes, les points suivants doivent faire l'objet d'une attention particulière :

- Le chantier est-il situé en localité ? Les surfaces nécessitant une mise en œuvre manuelle des enrobés sont-elles nombreuses ?
- S'agit-il de travaux de nuit, d'avant-saison ou d'arrière-saison ?
- A quelle altitude se situe le chantier ?

Ces points renvoient aux principaux points d'attention relatifs aux technologies de recyclage et de fabrication tiède, à savoir la maniabilité, les températures permettant une mise en œuvre adéquate et le comportement à basse température des produits. Toutefois, cela ne signifie pas nécessairement que les enrobés recyclés et les enrobés tièdes ne doivent pas être utilisés dans ces cas. Ces aspects doivent cependant être étudiés en détail. Dans ce cas, un avis d'expert ou du producteur d'enrobés et de l'entreprise de construction peut s'avérer pertinent. Durant la phase de construction, les conditions de mise en œuvre devront également être contrôlées attentivement et documentées de manière adéquate à l'aide d'un protocole de mise en œuvre.

6.1.4 Dimensionnement

Comme déjà évoqué au chapitre 6.1.1, il est important d'évaluer la durée de vie résiduelle d'une chaussée existante afin de pouvoir optimiser le dimensionnement et la nature des travaux à réaliser. Pour ce faire, des essais d'investigation de la structure existante sont nécessaires.

Par ailleurs, l'utilisation d'enrobés recyclés et/ou d'enrobés tièdes n'affecte généralement pas les calculs de dimensionnement. Aussi, la structure mise en œuvre sera la même avec des enrobés recyclés et/ou des enrobés tièdes qu'avec des enrobés à chaud sans agrégats d'enrobés. Les enrobés recyclés et les enrobés tièdes ont en effet des performances (rigidité, comportement en fatigue) et une durabilité comparables aux produits standards.

6.1.5 Aspects financiers

L'utilisation d'enrobés recyclés et d'enrobés tièdes peut, selon la situation, générer des coûts supplémentaires.

Le prix de la fourniture des enrobés recyclés et des enrobés tièdes est généralement similaire à celui des enrobés standards.

Un budget supplémentaire doit toutefois être prévu, notamment en raison des motifs ci-dessous:

- L'offre la plus avantageuse du point de vue du développement durable n'est pas nécessairement l'offre la plus avantageuse du strict point de vue économique. En effet, les offres répondant aux exigences de maîtres d'ouvrage, soutenant activement le développement durable dans le cadre des appels d'offres, peuvent conduire ces derniers à retenir la meilleure offre (mieux disant) qui n'est pas nécessairement celle avec le prix le plus bas (moins disant). En effet, d'après la réglementation sur les marchés publics, les travaux doivent être adjugés à l'offre économiquement la plus avantageuse et les aspects en lien avec le développement durable peuvent primer sur les aspects économiques. Afin de promouvoir le développement durable au sein des projets, des critères d'adjudication appropriés doivent être établis. Ces critères doivent également être pondérés en conséquence (cf. chapitre 6.3).
- La réalisation d'investigations et d'essais préliminaires et l'optimisation de la méthodologie de déconstruction (cf. chapitre 6.1.1).
- L'utilisation d'enrobés recyclés et d'enrobés tièdes nécessite la mise à disposition de ressources supplémentaires, au début d'un projet et éventuellement aussi en phase de réalisation, notamment pour développer et mettre en place une méthodologie adaptée et répondant aux spécificités de ces produits et pour effectuer les contrôles nécessaires.

6.2 Documents pour l'appel d'offres

Ce chapitre présente les éléments à intégrer dans les documents d'appel d'offres, notamment en ce qui concerne l'utilisation d'enrobés recyclés et d'enrobés tièdes dans le cadre du projet.

6.2.1 Conditions-cadres de la soumission et de l'appel d'offres

Afin de compléter et consolider les documents de soumission et d'appels d'offres, il peut être utile, dans les documents d'appels d'offres, de faire référence aux éléments suivants :

- Contexte législatif et normatif relatif à la préservation des ressources, au recyclage et à la valorisation des matériaux, à la limitation des émissions, aux enrobés bitumineux en tant que produits et à leurs constituants. Les références énumérées en introduction dans le chapitre Contexte législatif et normatif peuvent être mentionnées dans les documents d'appels d'offre. Il s'agit notamment de l'OLED [4] et de certaines normes VSS.
- Le cas échéant, les directives internes en vigueur (par exemple, directives élaborées au niveau cantonal). Voir également le chapitre 4.3.
- Les teneurs minimales et maximales d'agrégats d'enrobés que doivent respecter les enrobés bitumineux proposés dans le cadre d'une offre, l'objectif étant de promouvoir les enrobés recyclés avec une teneur optimale en agrégats d'enrobés.
- Définition des enrobés tièdes. Il est en effet important de clarifier ce terme afin de préciser aux entrepreneurs le type de produit attendu. Voir la définition proposée dans l'introduction.
- Les caractéristiques, les performances et la durabilité des enrobés recyclés et des enrobés tièdes doivent être équivalentes à celles mentionnées dans les normes pour les produits standards. Il est important de le rappeler. Pour cela, il convient notamment de faire référence aux normes relatives aux enrobés bitumineux en tant que produit (par exemple la SN 640 431-1-NA/EN 13108-1 [11] pour les enrobés bitumineux standards de type AC et les AC EME) et les normes relatives aux aspects de conception et de mise en œuvre (par exemple la VSS 40 430 [14] pour les AC et les AC EME).
- Les valeurs (exigences) à prendre en compte pour l'analyse de la conformité des propriétés du liant récupéré, dans le cadre des contrôles de mise en œuvre, doivent être indiquées. Il n'y a aucune exigence relative au liant récupéré dans les normes VSS. Voir à ce sujet le chapitre 5.3 et le tableau 23. Pour rappel, en ce qui concerne les enrobés recyclés et les enrobés tièdes, les caractéristiques du liant récupéré ont un impact important sur la qualité et la durabilité des enrobés.

6.2.2 Description précise des produits

Dans les documents de soumission et d'appel d'offres, il est essentiel de fournir une description détaillée des enrobés bitumineux qui devront être mis en œuvre dans le cadre du projet. Cela permet de s'assurer que les produits proposés dans les offres des entreprises correspondent à ceux effectivement souhaités par le maître d'ouvrage.

Dans le cas des enrobés recyclés, les teneurs en agrégats d'enrobés visées doivent être clairement indiquées. Dans le cas des enrobés tièdes, la température de fabrication, ou au moins la définition de ce qui est attendu sous la dénomination « enrobés tièdes », doit être indiquée (voir également 6.2.1).

Vous trouverez ci-dessous un exemple de la manière dont les ACT 22 S sont décrits dans la soumission modèle du canton d'Argovie. Le canton d'Argovie souhaite, dans le cas ci-dessous, mettre en œuvre un AC T 22 S, contenant au moins 60% d'agrégats d'enrobés. Pour rappel, les teneurs recommandées d'agrégats d'enrobés dans les enrobés bitumineux sont indiquées au chapitre 5.1.

Die Beläge für die Trag- und die Binderschichten wurden im Leistungsverzeichnis wie folgt ausgeschrieben (Auszug aus dem LV):			
451.701	AC T 22 S	Mischgut	
		Anteil Recycling - Material mindestens 60 %.	
		Bindemittelart, -sorte	
		PmB 45/80-65 (CH-E).	
		d mm 70	
		Ausmass: Masse	
		LE = t	
		:RW	820 LE

Figure 14: Soumission – Descriptions des enrobés recyclés souhaités par le maître d'ouvrage (source: canton d'Argovie)

Une description des produits doit également être mentionnée sur les plans (plans de l'appel d'offres et plans d'exécution).

Une référence à la norme produit correspondante (dans l'exemple du canton d'Argovie ci-dessus, il s'agit de la norme SN 640 431-1-NA/EN 13108-1 [11]) est également nécessaire, notamment pour indiquer, ou au moins rappeler, les performances que doivent avoir les enrobés demandés dans l'appel d'offres.

Si les produits proposés par l'entreprise s'avéraient être non conformes aux exigences de l'appel d'offres, cela pourrait constituer un motif d'exclusion de la procédure d'attribution du marché (cf. 6.3.1).

6.2.3 Autres éléments à demander dans les documents d'appel d'offres

Lors de l'analyse de l'offre, le maître d'ouvrage doit s'assurer que le produit proposé par l'entreprise répond aux exigences de l'appel d'offres. Il doit également s'assurer que l'entreprise de construction, ainsi que ses fournisseurs (en particulier les producteurs d'enrobés), sont capables de fabriquer, de livrer et de mettre en œuvre les enrobés demandés dans l'appel d'offres de façon conforme, ceci tout en respectant le délai de garantie usuel. Pour ce faire, les documents ci-dessous peuvent être mentionnés dans les documents d'appel d'offres. Ceux-ci devront être remis avec l'offre par l'entreprise de construction afin qu'une analyse complète de l'offre puisse être réalisée.

Les documents listés ci-dessous s'appliquent à tous les types d'enrobés bitumineux. Ils ont toutefois une importance particulière lorsqu'il s'agit d'enrobés recyclés et/ou d'enrobés tièdes.

- Rapport technique

En ce qui concerne les enrobés bitumineux, le rapport technique doit notamment contenir les informations suivantes.

- Description/référence de la centrale d'enrobage (fournisseur) qui produira et livrera les enrobés durant le chantier.
- Courte description du processus de fabrication des enrobés.
- Température de fabrication à la centrale d'enrobage pour les enrobés concernés.
- Gamme de températures pour la mise en œuvre et le compactage des enrobés concernés.

Les informations relatives aux points listés ci-dessus peuvent être mises en relation avec les éléments présentés au chapitre 2.

En ce qui concerne les enrobés recyclés, les informations concernant l'équipement de la centrale d'enrobage sont particulièrement importantes, afin de s'assurer que des fabrications avec de fortes teneurs en agrégats d'enrobés sont techniquement réalisables.

En ce qui concerne les enrobés tièdes, les informations relatives à la température de fabrication (au niveau du malaxeur) et au procédé de fabrication tiède utilisé (bitume mousse ou utilisation d'additifs) sont importantes.

Dans le cas d'une combinaison des deux technologies (recyclage et fabrication tiède), il est important de s'assurer que les agrégats d'enrobés sont ajoutés à chaud au moment de la fabrication. En effet, un ajout à froid des agrégats d'enrobés peut faire indirectement baisser la température de fabrication (température dans le malaxeur), mais il ne s'agit alors pas d'une technologie de fabrication tiède à proprement parler.

- Copies de l'épreuve de formulation des enrobés, qui seront fournis et mis en œuvre dans le cadre du projet, ainsi que de la déclaration du dernier contrôle de production effectué sur ces enrobés et des certificats relatifs aux constituants de ces enrobés (cela concerne également les agrégats d'enrobés).

Comme déjà mentionné au chapitre 5.5, l'épreuve de formulation doit comprendre les informations suivantes relatives aux enrobés bitumineux:

- Garantie que tous les composants utilisés pour la fabrication de l'enrobé répondent aux exigences qui leur sont applicables. Il s'agit ici notamment de la fourniture des certificats pour ces composants ;
- Désignation de la centrale d'enrobage et du type d'enrobé. Ces informations doivent correspondre à la centrale d'enrobage et au type d'enrobé mentionnés dans le rapport technique.
- Composition/formulation théorique de l'enrobé (constituants utilisés et dosages) ;
- Gamme de températures relative à l'enrobé ;
- Résultats des essais réalisés sur l'enrobé bitumineux. Ceux-ci doivent répondre aux exigences de la norme produit correspondante.

Une épreuve de formulation n'est valable que pour un type d'enrobé donné. Si l'utilisation de plusieurs types d'enrobés bitumineux est prévue dans le cadre d'un projet, une épreuve de formulation par produit doit être fournie.

L'épreuve de formulation permet de s'assurer que les produits fournis par l'entreprise de construction correspondent aux enrobés effectivement commandés par le maître d'ouvrage. Elle fournit également une garantie que ces produits répondent aux exigences usuelles, conformément aux normes. L'épreuve de formulation est également utilisée dans le cadre des contrôles de mise en œuvre pour évaluer la conformité des produits.

L'absence des épreuves de formulation dans l'offre remise par l'entreprise de construction peut constituer un critère d'exclusion (cf. 6.3.1).

Si la composition d'un enrobé n'est pas modifiée de manière significative dans l'intervalle, la formulation d'un enrobé donné doit être contrôlée et validée, au minimum tous les 5 ans, au moyen d'une épreuve de formulation adaptée. C'est pourquoi, en complément de l'épreuve de formulation, il est important de demander également la déclaration relative au dernier contrôle de production effectué sur l'enrobé ainsi que les certificats relatifs à la conformité des constituants utilisés. Ces documents correspondent aux documents édités dans le cadre des contrôles de la production et de la qualité qui sont effectués régulièrement au niveau des centrales d'enrobage.

- Références de l'entreprise de construction pour des travaux similaires réalisés dans un délai inférieur à 5 ans

Pour les enrobés recyclés (resp. les enrobés tièdes), deux références de projets similaires, c'est-à-dire comprenant la mise en œuvre d'enrobés recyclés du même type et avec des teneurs en agrégats d'enrobés comparables (resp. d'enrobés tièdes de même type avec un procédé de fabrication similaire). Ces références sont essentielles pour s'assurer que l'entreprise de construction possède l'expérience nécessaire pour mettre en œuvre des enrobés recyclés contenant une teneur élevée en agrégats d'enrobés (resp. des enrobés tièdes). Il a déjà été mentionné à plusieurs reprises dans le guide que les conditions de mise en œuvre, par exemple la température au moment de la mise en œuvre et du compactage ainsi que la maniabilité des enrobés, sont primordiales pour une bonne mise en œuvre des enrobés recyclés (resp. des enrobés tièdes).

Si l'entreprise n'est pas en mesure de fournir les références demandées, celles-ci peuvent être remplacées par la réalisation d'une planche d'essai. Celle-ci devra être réalisée avant ou pendant la première phase de pose sur le chantier. Les coûts relatifs à la planche d'essai sont alors à la charge de l'entreprise.

6.3 Critères d'aptitude et d'adjudication

Ce chapitre aborde la thématique des critères d'aptitude et d'adjudication qui sont utilisés pour l'évaluation des offres remises par les entreprises de construction. Les critères d'aptitude et d'adjudication doivent être explicitement mentionnés et décrits par le maître d'ouvrage dans les documents d'appel d'offres.

Dans une première phase, il est essentiel de s'assurer que les soumissionnaires sont aptes à réaliser le projet décrit dans l'appel d'offres tout en respectant les normes et les exigences du maître d'ouvrage. Pour ce faire, le maître d'ouvrage procède à l'évaluation des critères d'aptitude. Les entreprises de construction ayant déposé une offre ne correspondant pas au projet décrit dans l'appel d'offres ou ne respectant pas la norme et/ou les exigences du maître d'ouvrage sont exclues de la procédure. Il est donc primordial de bien déterminer et définir les critères d'aptitude dans les documents de l'appel d'offres.

La phase suivante consiste alors à déterminer les critères d'adjudication. Ceux-ci visent à garantir que le mandat est attribué à l'entreprise ayant déposé la meilleure offre (mieux disant) qui n'est pas nécessairement l'offre avec le prix le plus bas (moins disant). Le choix des critères

d'adjudication utilisés pour l'analyse de l'offre permet de définir ce que le maître d'ouvrage considère par « l'offre économiquement la plus avantageuse ». Dans certains cas, le critère du prix ou de la qualité technique peut être privilégié, dans d'autres cas celui de la contribution du projet au développement durable.

Dans la plupart des cas, la pondération relative au prix est déterminante dans le calcul de la note globale des offres (>50% de la note globale). En revanche, les aspects environnementaux (en particulier ceux liés au recyclage et aux enrobés tièdes) présentent, en général, une pondération correspondant au maximum à 15% de la note globale. Cependant la nouvelle loi sur les marchés publics (LMP) [58], de même que l'accord intercantonal sur les marchés publics (AIMP) [59], mentionnent que les fonds publics doivent être utilisés à des fins écologiques et que les aspects liés au développement durable sont à considérer comme critère d'adjudication possible. Les maîtres d'ouvrage devraient ainsi accorder plus de poids à ces facteurs dans les futurs appels d'offres.

L'utilisation de produits ayant un impact positif significatif sur le bilan environnemental d'un projet dépend fortement des exigences définies par le maître d'ouvrage. Ce dernier a en effet le pouvoir d'influencer et de promouvoir de manière notable l'utilisation d'enrobés recyclés et/ou d'enrobés tièdes dans le cadre des projets.

Dans les deux chapitres suivants (6.3.1 et 6.3.2), vous trouverez des informations et des recommandations relatives aux critères d'aptitude et d'adjudication. Celles-ci sont destinées aux maîtres d'ouvrage souhaitant promouvoir les enrobés recyclés et/ou les enrobés tièdes (et donc le développement durable) dans le cadre de leurs projets.

Comme mentionné ci-dessus, les pouvoirs adjudicateurs disposent d'une certaine liberté dans le choix et la définition des critères d'aptitude et d'adjudication. Ceux-ci doivent cependant être décrits de manière précise dans les documents d'appel d'offres. Concernant les critères d'adjudication, les pondérations correspondantes doivent également être indiquées.

6.3.1 Critères d'aptitude

Le non-respect d'un ou plusieurs des points suivants peut constituer un critère d'exclusion d'une offre.

- Les produits présentés dans l'offre doivent correspondre à ceux décrits et demandés par le maître d'ouvrage dans les documents d'appel d'offres.
 - Dans le cas des enrobés recyclés, il s'agit notamment du respect de la teneur minimale en agrégats d'enrobés spécifiée par le maître d'ouvrage.
 - Dans le cas des enrobés tièdes, la température de fabrication doit être réduite (par rapport à celle utilisée pour la fabrication des enrobés à chaud correspondants). Cela correspond généralement à une diminution de 30°C au minimum. La gamme de température de fabrication d'un enrobé tiède se situe donc aux alentours de 120 à 140°C.
- Une copie des épreuves de formulation doit être déposée avec l'offre (1 épreuve de formulation par type d'enrobé) ainsi qu'une copie de la déclaration du dernier contrôle de production effectué sur l'enrobé et des certificats des constituants utilisés dans la recette. Il existe toutefois des alternatives à cette démarche. Par exemple, dans le canton de Zurich, il existe une liste ([lien](#)) des enrobés bitumineux dont l'utilisation est autorisée dans le cadre des chantiers. Cette liste est établie par la VIWZ (Association intercantonale pour la certification des

enrobés). L'objectif étant de simplifier et d'harmoniser la procédure de validation des enrobés. Cela permet notamment à l'entrepreneur, pour un produit appartenant à la liste publiée par la VIWZ, de ne pas avoir à fournir les documents permettant d'attester de la conformité du produit dans chaque offre qu'il dépose.

Les épreuves de formulation, les déclarations relatives aux enrobés ainsi que les certificats des constituants permettent de valider la conformité des enrobés proposés dans les offres déposées, à la fois vis-à-vis des normes et aussi vis-à-vis des exigences des maîtres d'ouvrage. Ces documents permettent également de s'assurer que les produits proposés dans l'offre sont disponibles et peuvent être livrés sur le chantier.

Vous trouverez au niveau de ce [lien](#) un exemple de déclaration (cas d'un enrobé AC B 22 H).

Il est important de souligner une fois encore que le délai de garantie relatif aux enrobés recyclés et aux enrobés tièdes qui incombe à l'entreprise de construction est le même que celui pour les produits usuels.

6.3.2 Critères d'adjudication

Comme déjà mentionné, d'après la loi (nouvelle LMP) [58] et l'accord intercantonal (AIMP) [59], les aspects relatifs au développement durable doivent être considérés comme un critère d'adjudication possible dans le cadre des marchés publics. Les maîtres d'ouvrage publics devraient donc donner plus de poids et d'importance à ces aspects dans les futurs appels d'offres. Le développement d'une démarche, permettant d'intégrer les prescriptions de cette nouvelle loi et de l'accord intercantonal dans la pratique, est toutefois encore en cours dans la majorité des administrations cantonales.

Certains critères d'adjudication qui permettraient de donner plus de poids et d'importance aux enrobés recyclés et aux enrobés tièdes au moment de l'évaluation des offres sont présentés ci-dessous.

- Critère technique (qualité technique de l'offre)

L'analyse du rapport technique, de la teneur en agrégats d'enrobés des enrobés recyclés ainsi que du cycle de vie des enrobés tièdes peuvent être intégrées à l'évaluation de ce critère. Les deux derniers points mentionnés sont parfois aussi rattachés à d'autres critères (par exemple, critère environnemental).

- Critère environnemental

Les thématiques « recyclage des matériaux » et « analyse du cycle de vie » peuvent être intégrées pour la définition et l'évaluation de ce critère.

- Compétences, références

Il est question ici de la capacité des entreprises de construction à pouvoir mettre en œuvre des enrobés recyclés et des enrobés tièdes tout en respectant les exigences. Ce critère permet de garantir que l'entreprise de construction maîtrise la procédure de mise en œuvre des enrobés prescrits dans l'appel d'offres et que les équipes de pose qui travailleront sur le chantier ont une certaine expérience vis-à-vis de ces produits.

Vous trouverez ci-dessous deux exemples. Le premier est issu du modèle d'appel d'offres du canton de Vaud, le second du modèle d'appel d'offres du canton d'Argovie. Ces deux cantons ont intégré au niveau de leurs appels d'offres une démarche permettant d'évaluer de manière positive, et ainsi aussi de promouvoir, l'utilisation d'enrobés recyclés. Les maîtres d'ouvrage pourront s'inspirer de ces exemples et les adapter en fonction de leurs propres souhaits et exigences en matière d'enrobés recyclés et d'enrobés tièdes.

- Exemple du canton de Vaud

- Dans le cadre du critère relatif à la qualité technique de l'offre, il existe un sous-critère concernant la teneur en agrégats d'enrobés dans les enrobés bitumineux proposés par l'entreprise. La pondération de ce sous-critère correspond à 8% de la note globale.

Pour chaque type d'enrobés, un coefficient relatif à la teneur en agrégats d'enrobés est attribué. Voir tableau ci-dessous.

	AC N AC B AC EME	AC T	AC F
Coefficient	5/30*	5/60*	5/70*

Tableau 34: Coefficients appliqués selon le type d'enrobé (Appel d'offres du canton de Vaud)

* ces coefficients correspondent aux teneurs admissibles en agrégats d'enrobés recommandées par la norme [11]. Le cas échéant, ceux-ci pourront être adaptés aux teneurs recommandées dans le guide.

Si plus d'un enrobé est concerné, la note globale correspond à la quantité de chaque enrobé multipliée par la note individuelle de chaque enrobé, le tout divisé par la quantité totale d'enrobés.

Le calcul de la note individuelle pour chaque enrobé se fait comme suit :

$$\text{Coefficient de l'enrobé en question} \times \text{Pourcentage en agrégats d'enrobés dans l'enrobé}$$

Dans le cas d'une couche de fondation AC F avec une teneur de 60% d'agrégats d'enrobés, cela amène au calcul suivant:

$$5/70 \times 60 = 4,29$$

La note individuelle attribuée est de 4,29.

Dans le cas d'une couche de fondation AC F avec une teneur de 60% d'agrégats d'enrobés (1200 tonnes) et une couche de base AC T avec une teneur de 50% d'agrégats d'enrobés (1500 tonnes), le calcul est le suivant:

$$5/70 \times 60 \times \frac{1200}{1200 + 1500} + 5/60 \times 50 \times \frac{1500}{1200 + 1500} = 4,22$$

La note globale attribuée est de 4,22.

- Dans le cadre du critère d'adjudication relatif aux « compétences et références » défini par le canton de Vaud, la maîtrise de la procédure de mise en œuvre des enrobés recyclés et des enrobés tièdes est aussi évaluée. La pondération de ce sous-critère correspond à 6% de la note globale.
- Exemple du canton d'Argovie
 - Dans le cadre du critère relatif aux aspects environnementaux, il existe un sous-critère concernant la teneur en agrégats d'enrobés. La pondération de ce sous-critère correspond à 7,5% de la note globale.

Les points pour le calcul de la note globale sont attribués comme suit :

	Teneur en agrégats d'enrobés	Nombre de points
Dans la couche de liaison	≥ 50%	100
	≥ 40% et < 50%	75
	≥ 30% et < 40%	50
	< 30%	1
Dans la couche de base	≥ 50%	100
	≥ 40% et < 50%	75
	≥ 30% et < 40%	50
	< 30%	1
Dans la couche de fondation	≥ 60%	100
	≥ 40% et < 60%	75
	≥ 30% et < 40%	50
	< 30%	1

Tableau 35: Nombre de points attribués en fonction du type d'enrobé et de la teneur en agrégats d'enrobés de ceux-ci (appel d'offres du canton d'Argovie)

- Dans le cadre du critère d'adjudication « compétences », il y a un sous-critère relatif aux « références de l'entreprise ».

La pondération de ce sous-critère correspond à 12% de la note globale.

En règle générale, 2 (maximum 4) objets de référence sont requis par type de travaux (par exemple : ouvrages d'art, travaux routiers ou encore parois antibruit). 50 points sont attribués pour chaque objet de référence (ou 25 points par objet pour 4 objets de référence). 2 (ou 4, par exemple 2 références relatives aux travaux routiers et 2 relatives aux ouvrages d'art) références répondant aux exigences du maître d'ouvrage donnent 100 points.

De façon similaire à cet exemple, en ce qui concerne plus spécifiquement le domaine de la construction routière, l'expérience de l'entreprise quant à la mise en œuvre d'enrobés recyclés et/ou d'enrobés tièdes pourrait, par exemple, constituer une « référence ».

Vous trouverez ici un [lien](#) vers le référentiel établi par le canton d'Argovie (département des ponts et chaussées) pour l'évaluation des offres (voir pages 15 et 17).

6.4 Phase d'exécution (fourniture et mise en œuvre des enrobés)

6.4.1 Fourniture de l'enrobé

Lors de la livraison des enrobés sur chantier, les recettes des enrobés livrés sont à contrôler par l'intermédiaire des bons de livraison. Il est recommandé de vérifier les bons de livraison au moment de l'arrivée des enrobés sur le chantier (c'est-à-dire avant la pose). Cela permet de s'assurer que les produits mis en œuvre correspondent aux produits commandés.

Concernant les enrobés recyclés, la teneur effective d'agrégats d'enrobés utilisés pour la fabrication de l'enrobé doit être indiquée sur le bon. Cela concerne également les enrobés tièdes, pour lesquels une mention spécifique « enrobé tiède », ou alors la température de fabrication correspondante, doit être indiquée sur le bon de livraison.

Dans le canton de Zurich, chaque formulation de la liste des enrobés autorisés par la VIWZ est désignée par un code, qui est indiqué sur le bulletin de livraison.

Il peut être utile de mentionner dans les documents d'appel d'offres que les informations susmentionnées sont attendues sur les bons de livraison qui seront émis au moment de la réalisation des travaux.

6.4.2 Mise en œuvre des enrobés

Au cours de la mise en œuvre, la température des enrobés doit être contrôlée. Dans le cas des enrobés recyclés et des enrobés tièdes, ce paramètre est primordial afin de garantir une qualité satisfaisante sur l'ensemble de la surface du chantier.

L'homogénéité (absence de conglomérat et de ségrégation) et le bon enrobage de l'enrobé doivent également être vérifiés visuellement.

Il est aussi important d'effectuer un suivi du compactage des couches pendant la mise en œuvre, en particulier lorsqu'il s'agit d'enrobés recyclés et d'enrobés tièdes. Ce suivi peut, par exemple, se faire par l'intermédiaire d'un nucléodensimètre (Troxler) mais d'autres méthodes pour le suivi du compactage existent également. Ce suivi est un indicateur sur lequel peut s'appuyer l'entreprise de construction durant la mise en œuvre. En effet, le suivi « en continu » du compactage permet de contrôler les conditions de mise en œuvre, notamment la vitesse de pose et l'énergie de compactage, et de les corriger quasiment en temps réel si nécessaire.

Le prélèvement d'échantillons d'enrobé foisonné au niveau des vis du finisseur est également important, notamment pour vérifier la conformité de la formulation du produit et des constituants utilisés (teneur en liant, courbe granulométrique, propriétés des granulats et du liant, etc.).

Enfin, il est aussi essentiel d'établir un protocole de mise en œuvre afin de documenter l'étape de mise en œuvre des enrobés.

Vous trouverez également des informations à ce sujet dans le chapitre 5.6.

6.4.3 Contrôles ultérieurs

Après la mise en œuvre des revêtements (délai allant de quelques heures à quelques jours), il est recommandé d'effectuer des prélèvements de la chaussée en place par l'intermédiaire de carottages. Ces prélèvements permettent de réaliser les contrôles suivants :

- La teneur en vides et le degré de compactage des couches.
- L'épaisseur des couches.
- Le collage inter-couches.

D'après la normalisation, une mesure de l'adhérence et/ou de la planéité peut également être requise selon les cas.

Des informations à ce sujet sont aussi disponibles au chapitre 5.6 (tableau 33).

6.4.4 Synthèse

Il est nécessaire de mandater un laboratoire accrédité externe, indépendant de l'entreprise de construction, afin d'effectuer le suivi et les contrôles requis pendant et après la mise en œuvre des enrobés. Ceci permettra au maître d'ouvrage (ainsi qu'à l'entreprise de construction) de bénéficier d'un accès direct aux résultats ainsi que d'un soutien technique en cas de besoin.

La réalisation de contrôles relatifs à la fourniture et à la mise en œuvre des enrobés bitumineux est essentielle. Ces contrôles permettent en effet de garantir la conformité du produit fourni et posé, notamment en ce qui concerne ses performances mécaniques et environnementales. La constitution d'une base de données, comprenant les résultats des contrôles réalisés ainsi que l'ensemble des informations recueillies in situ (bons de livraison, suivi et mesures de la température des produits, protocole de mise en œuvre, etc.), est également utile pour faire valoir la garantie en cas de défaut. L'ensemble de ces mesures contribue ainsi à garantir le bon usage de l'argent public.

Le programme des essais de contrôle à réaliser et, de manière générale, l'ensemble des mesures relatives au contrôle de la qualité (type d'essais, étendue des essais, nombre d'essais à réaliser) doivent être définis et modulés de manière spécifique pour chaque projet. Il est également important de souligner qu'un grand nombre de contrôles et d'investigations peuvent être effectués par le maître d'ouvrage ou ses mandataires sans augmenter de manière significative le budget des travaux. Il s'agit, par exemple, de vérifier les bons de livraison, de contrôler les températures (par exemple à l'aide d'un thermomètre laser) ou encore de documenter la mise en œuvre (rédaction d'un protocole de mise en œuvre, photos). En cas de budget limité, des échantillons de réserve peuvent être prélevés sur les enrobés fournis. Ces échantillons ne seront testés qu'en cas de besoin (suspicion d'un défaut, apparition de dégradations prématurées).

Annexes

7 Annexe 1

Brochure de présentation (Flyer)

8 Annexe 2

Questionnaire

9 Liste des figures

Figure 1: Les différents types d'enrobés bitumineux en fonction de la température de fabrication	11
Figure 2: Les différentes étapes de traitement/transformation des agrégats d'enrobés en vue d'obtenir une ressource secondaire à partir d'un matériau récupéré.	25
Figure 3: Exemple permettant de déterminer la quantité maximale d'agrégats d'enrobés à incorporer dans un enrobé recyclé en fonction de l'homogénéité des caractéristiques des agrégats d'enrobés – Exemple pour une couche de base (source [23])	30
Figure 4: Processus d'obtention des gravillons secondaires (source BHZ Baustoff Holding Zürich AG)	31
Figure 5: matériaux issus des agrégats d'enrobés récupérés selon le processus d'obtention des gravillons secondaires (source BHZ Baustoff Holding Zürich AG)	32
Figure 6: Principe d'un essai BBR (sources: pavementinteractive.org et bitumequebec.eu)	89
Figure 7: Principe de l'essai pour la détermination de la viscosité dynamique des liants (sources: BFH et bitumequebec.eu)	90
Figure 8: Aperçu d'un DSR (source: TA)	92
Figure 9: Principe d'un essai DSR (source: CTAA, Carter 2018)	92
Figure 10: Représentation de la contrainte (Spannung), de la déformation (Verformung) et de l'angle de phase enregistrés lors d'un essai DSR sur liant (sources: Eurobitume et pavementinteractive.org)	93
Figure 11: Représentation du module de cisaillement complexe G^* , avec sa composante réelle (élastique) et sa composante imaginaire (visqueuse) ainsi que l'angle de phase δ (source : pavementinteractive.org)	94
Figure 12: Exigences relatives aux essais rhéologiques sur le liant en fonction du type de liant (source : asphalt.de).	96
Figure 13: Principe de mesure de la maniabilité et exemple de données mesurées (source : SN EN 12697-53)	101
Figure 14: Soumission – Descriptions des enrobés recyclés souhaités par le maître d'ouvrage (source: canton d'Argovie)	108

10 Liste des tableaux

Tableau 1: Contribution du guide au respect des principes prescrits par le cadre législatif	15
Tableau 2: Liste des normes pertinentes pour les enrobés recyclés et les enrobés tièdes	17
Tableau 3: Genre et réparation des matériaux étrangers, y compris teneur maximale admissible (source: SN EN 13108-8 [8])	21
Tableau 4: Filières de traitement pour les agrégats d'enrobés selon leur teneur en HAP (selon OLED)	23
Tableau 5: Principales exigences de la norme SN EN 13108-8 s'appliquant aux agrégats d'enrobés.	28
Tableau 6: Principaux avantages présentés par les enrobés recyclés et les enrobés tièdes	35
Tableau 7: Paramètres et caractéristiques spécifiques à considérer pour les enrobés recyclés et les enrobés tièdes	37
Tableau 8: Description des différents types de centrales d'enrobage et taux de recyclage correspondant (situation en Suisse)	39
Tableau 9: Tableau comparatif des deux procédés principaux existant en Suisse pour la fabrication d'enrobés tièdes	41
Tableau 10: Enrobés bitumineux, quantités admissibles selon la normalisation suisse (ajout à chaud)	56
Tableau 11: plages de température d'enrobés admissibles pour toutes les phases de production (source normes VSS : SN 640 431-1-NA [11])	57
Tableau 12: références réalisées avec des enrobés recyclés à forte teneur en agrégats d'enrobés	61
Tableau 13: références supplémentaires réalisées avec des enrobés recyclés à forte teneur en agrégats d'enrobés	62
Tableau 14: références réalisées avec des enrobés tièdes.	67
Tableau 15: Quantité d'agrégats d'enrobés admissibles dans le cadre de projets réalisés pour la ville de Berne	69
Tableau 16: Quantité d'agrégats d'enrobés admissibles dans le cadre de projets réalisés pour le canton d'Argovie et le canton de Berne	70
Tableau 17: Quantité d'agrégats d'enrobés admissibles dans le cadre de projets réalisés pour l'OFROU	71
Tableau 18: teneurs recommandées en agrégats d'enrobés pour les couches AC F (fondation), AC T (base) et AC B (liaison)	79
Tableau 19: teneurs recommandées en agrégats d'enrobés pour les couches en AC EME et les couches de roulement	80
Tableau 20: ex. cant. Vaud - exigences complémentaires pour AC S et AC H relatives aux granulats issus des agrégats d'enrobés	80

Tableau 21: enrobés bitumineux, recommandations pour le choix des liants en fonction des couches, des sortes et des types d'enrobés (source: SN 640 431-1-NA / EN 13108-1 [11])	81
Tableau 22: enrobés bitumineux à module élevé AC EME, recommandations pour le choix des liants en fonction de la classe et des propriétés visées (source : SN 640 431-1-NA / EN 13108-1 [11])	82
Tableau 23: tableau de synthèse relatif aux exigences disponibles pour les liants	85
Tableau 24: Détermination du point de fragilité selon Fraass - Exigences relatives aux différents types de liant	87
Tableau 25: essais avancés intégrables au programme d'essai sur le liant (cas des enrobés recyclés et des enrobés tièdes).	88
Tableau 26: Viscosité optimale du liant lors des phases de malaxage et de compactage des enrobés (servant à la détermination de la température optimale pour chacune des phases)	90
Tableau 27: ordres de grandeur du module de cisaillement complexe et de l'angle de phase des liants bitumineux	95
Tableau 28: Exigences relatives aux essais rhéologiques sur le liant selon le type de paramètre étudié	95
Tableau 29: Paramètres relatifs aux constituants devant être testés et validés dans le cadre d'une épreuve de formulation.	98
Tableau 30: Paramètres relatifs aux enrobés bitumineux devant être testés et validés dans le cadre d'une épreuve de formulation.	99
Tableau 31: Essais complémentaires pour les enrobés recyclés et les enrobés tièdes	100
Tableau 32: Valeurs seuils déterminées selon l'expérience du canton de Zurich concernant le comportement à basse température et la résistance à la fissuration thermique des enrobés bitumineux (TSRST)	102
Tableau 33: liste des essais de contrôle de mise en œuvre	103
Tableau 34: Coefficients appliqués selon le type d'enrobé (Appel d'offres du canton de Vaud)	113
Tableau 35: Nombre de points attribués en fonction du type d'enrobé et de la teneur en agrégats d'enrobés de ceux-ci (appel d'offres du canton d'Argovie)	114

11 Glossaire

Additif

Constituant qui peut être ajouté au mélange en petites quantités, par exemple, des fibres minérales ou organiques, ou bien des polymères, pour modifier les caractéristiques mécaniques, la maniabilité ou la couleur du mélange (définition EN 13108-1).

Agrégats d'enrobés

Les agrégats d'enrobés (Reclaimed Asphalt RA) sont définis comme enrobés bitumineux provenant du fraisage de couches d'enrobé, du concassage de plaques extraites de chaussées en enrobés, de morceaux de plaques d'enrobé, de déchets d'enrobés ou de surplus des productions d'enrobés (définition SN EN 13108-8).

Il est important de mentionner ici que la norme européenne EN 13108-8 différencie:

- Les enrobés de récupération comme des matériaux devant être recyclés sous la forme de fraisât de couches d'enrobés, de plaques extraites de chaussées en enrobés, de déchets d'enrobés, de surplus ou de rebuts de production. Ces matériaux nécessitent une évaluation et souvent une élaboration avant d'être utilisés comme constituant.
- Les agrégats d'enrobés (AE) comme des enrobés de récupération élaborés et permettant leur usage comme constituant pour les enrobés après avoir été soumis à essais, évalués et classés selon la norme EN 13108-8. Le processus d'élaboration peut inclure une ou plusieurs des étapes suivantes : fraisage, concassage, calibrage (criblage), mélange, etc.

Dans ce guide le terme d'agrégats d'enrobés, conformément à la définition de l'annexe nationale de la norme EN 13108-8, définit à la fois les enrobés de récupération et les agrégats d'enrobés (en tant que constituant).

Bitume

Matériau, pratiquement non volatil, adhésif et hydrophobe, dérivé du pétrole brut ou présent dans l'asphalte naturel, qui est entièrement soluble dans le toluène ou presque, et très visqueux ou presque solide à température ambiante (définition EN 12597).

Bitume modifié par des polymères PmB

Liant bitumineux dont les propriétés rhéologiques ont été modifiées pendant la fabrication par l'emploi d'un ou plusieurs polymères organiques (définition EN 12597).

Bitume mousse

Mélange hydrocarboné obtenu par injection de petites quantités de vapeur d'eau dans un bitume chaud, utilisé comme liant d'enrobage ou d'enduisage (définition PIARC – World Road Association).

Classe de trafic

Classe définie en fonction du nombre journalier de véhicules et du pourcentage de poids lourds sur la voie la plus chargée de la chaussée (définition PIARC – World Road Association).

Coefficient d'écoulement

Le coefficient d'écoulement d'un granulats est le temps, exprimé en secondes, mis par un volume spécifié de granulats pour s'écouler à travers une ouverture donnée, dans des conditions précises, en utilisant un appareillage normalisé (définition EN 933-6).

Couche de base AC T

Couche située sous la couche de liaison et/ou la couche de roulement et destinée à répartir les efforts dus aux charges (définition SN 640 420).

Couche de fondation (AC F)

Couche située sous la couche de base, destinée à répartir les efforts dus aux charges au sol de fondation (définition SN 640 420).

Couche de liaison (AC B)

Couche située entre la couche de base et la couche de roulement assurant le lien entre celles-ci (définition SN 640 420).

Couche de roulement

Couche bitumineuse directement en contact avec les pneumatiques des véhicules (définition SN 640 420).

Emission

Rejet de polluants dans l'environnement (définition www.bafu.admin.ch).

Enrobé bitumineux

Enrobé dont la composition granulométrique est continue ou discontinue pour former un blocage des granulats (définition EN 13108-1).

Mélange de granulats et de liant bitumineux (définition EN 12597) ; à privilégier.

Enrobés bitumineux à module élevé AC EME

Les enrobés bitumineux à module élevé AC EME se composent d'un mélange de granulats minéraux de granularité continue, de bitumes routiers de grade dur et d'éventuels additifs (définition VSS 40 430).

Enrobé de recyclage (enrobé recyclé)

Enrobés bitumineux contenant un certain pourcentage d'agrégats d'enrobés (définition SN 640 420).

Essai Marshall

Des éprouvettes Marshall sont compactées selon l'EN 12697-30. La stabilité Marshall, le fluage et le quotient sont ensuite déterminés sur ces éprouvettes en utilisant des procédures définies. Ces valeurs sont notées au compte-rendu avec les valeurs de densité apparente (définition EN 12697-34).

Filler

Désignation du granulats dont la plupart des grains passent au tamis de 0,063 mm et qui peut être ajouté aux matériaux de construction pour leur conférer certaines propriétés (définition SN 670 050).

Fraisage

Désagrégation et enlèvement de matériaux de surface sur une épaisseur déterminée, par action d'un tambour rotatif équipé de dents, de pics ou de couteaux. Le fraisage peut s'effectuer après chauffage ou non du matériau (définition PIARC – World Road Association).

Granulat

Désignation du matériau granulaire utilisé dans la construction. Un granulat peut être naturel, artificiel ou recyclé (définition SN 670 050).

Granulométrie

Distribution dimensionnelle des grains (SN 670 050). Détermination des dimensions des grains d'un matériau granulaire (définition PIARC – World Road Association).

Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

Les HAP sont produits durant les processus de combustion partiels du charbon, mazout, carburant, bois ou tabac. Ils se lient aux particules de suie et se répandent ainsi dans l'air environnant. Certains hydrocarbures aromatiques polycycliques peuvent endommager le patrimoine génétique, provoquer des cancers ou affecter la procréation et le développement du fœtus. Les benz(a)pyrènes, qui combinent toutes ces caractéristiques, sont considérés comme les HAP les plus nocifs (définition www.bag.admin.ch).

Installation d'élimination des déchets (décharges, dépôts,...)

Installations où des déchets sont traités, valorisés ou stockés définitivement ou provisoirement ; sont exceptés les sites de prélèvement de matériaux où les matériaux d'excavation et de percement sont valorisés (définition www.bafu.admin.ch).

Liant

Matériau servant à coller des granulats et assurant la cohésion du mélange (définition EN 12597).

Liant bitumineux

Matériau adhésif contenant du bitume. Un liant bitumineux peut se présenter sous l'une des formes suivantes : pur, modifié, oxydé, fluidifié, fluxé, émulsionné (définition EN 12597).

Liant régénérant (réjuvenateur)

Huile spécifique qui permet de réduire la viscosité d'un liant altéré/vieilli (définition www.baustoffwissen.de). La régénération vise à redonner au liant bitumineux existant des caractéristiques proches de celles qu'il avait lors de sa mise en œuvre initiale (définition PIARC – World Road Association).

Matériaux étrangers

Matériaux qui ne sont pas issus des enrobés bitumineux (définition EN 13108-8).

Matières premières secondaires (ressources secondaires)

Matières premières obtenues à partir de l'utilisation, de la réutilisation, de l'utilisation à une autre fin ou de la valorisation de déchets ou de produits de matières premières primaires et à même de se substituer à ces dernières (définition www.bafu.admin.ch).

Méthode rapide de caractérisation du bitume - Bitumen-Typisierung-Schnell-Verfahren (BTSV)

La méthode rapide de caractérisation du bitume (BTSV) détermine le comportement rhéologique à l'aide du rhéomètre à cisaillement dynamique sur une rampe de température. Cette méthode se présente comme une alternative à l'essai bille-anneau (point de ramollissement) (définition Strasse und Autobahn et www.anton-paar.com).

Méthode RTFOT/ Vieillissement à court terme (RTFOT: Rolling Thin Film Oven Test)

Processus de conditionnement (méthode de vieillissement), plutôt qu'une méthode d'essai, décrite dans la norme EN 12607-1. Le RTFOT simule les effets combinés de la chaleur et de l'air

sur un film mince de liant bitumineux. La procédure est destinée à simuler le vieillissement qui a lieu pendant le processus d'enrobage et de transport pour les enrobés à chaud. Pour les bitumes routiers, il existe une bonne corrélation avec le vieillissement du bitume pendant la production d'enrobés. Cependant, la méthode de préparation standard n'est pas nécessairement applicable aux liants modifiés, dont la viscosité peut être trop élevée pour fournir un film régulier (définition: www.eurobitume.eu).

Norme orientée performance (approche fondamentale)

Approche spécifiant les enrobés bitumineux en termes d'exigences fondées sur des performances liées à des prescriptions limitées de composition et de constituants, offrant un large degré de liberté (définition EN 13 108-1).

Nucléodensimètre (Troxler)

Contrôle non destructif du compactage du revêtement mis en œuvre: mesure ponctuelle (définition www.impbautest.ch).

Pénétrabilité à l'aiguille

Méthode d'essai utilisée depuis plusieurs décennies, décrite par l'EN 1426. La pénétrabilité à l'aiguille est déterminée par la profondeur, mesurée en 1/10 mm, à laquelle une aiguille 100 g pénètre pendant 5 secondes dans le bitume à une température de 25 ° C. Elle permet de tester le comportement du bitume à des températures de service intermédiaires. Cette méthode d'essai est appropriée pour tous les types de bitume (définition www.eurobitume.eu).

Point de fragilité Fraass

La détermination du point de fragilité Fraass est décrite dans la norme d'essai EN 12593. Elle décrit la transition du liant d'un état flexible à un état fragile. Elle détermine la température à laquelle une couche de bitume mince se fissure sur une lame d'acier lors d'un refroidissement régulier, quand cette lame est pliée dans des conditions définies. Le test indique le comportement du bitume à basses températures de service (définition www.eurobitume.eu).

Point de ramollissement bille-anneau

Méthode décrite par la norme européenne EN 1427, sert à tester le comportement du bitume à des températures de service élevées. La température de ramollissement bille et anneau est déterminée lorsqu'un disque de bitume, inclus dans un anneau de cuivre, subit une certaine déformation sous le poids d'une bille d'acier sous l'augmentation de la température. Cette méthode d'essai est utilisée depuis plus de cent ans (définition www.eurobitume.eu).

RA (reclaimed asphalt)/ RAP (reclaimed asphalt pavement)

Voir « agrégats d'enrobés ».

Recouvrance (retour) élastique

Le test de recouvrance élastique est applicable à des liants modifiés aux élastomères, et sert à démontrer la modification du liant. L'échantillon est étiré à une température et une vitesse fixes, à un maximum de 20 cm puis sectionné. Après une période de temps déterminée, la recouvrance élastique est déterminée par rapport à la longueur initiale de l'échantillon (définition www.eurobitume.eu).

Rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR)

Le rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR) est un instrument qui est utilisé pour tester les propriétés du bitume dans diverses conditions de chargement et de températures. Le DSR consiste à appliquer à l'échantillon une contrainte contrôlée et à mesurer la réponse du bitume, à

partir de laquelle on peut déterminer des propriétés telles que le module complexe de cisaillement G^* et l'angle de phase. La méthode d'essai utilisant le DSR est décrite dans la norme EN 14770. En règle générale, le DSR est réalisé sur une plage de températures d'essai et / ou de fréquences de chargement, appelées respectivement températures et fréquences de balayage. Le module de cisaillement G^* et son angle de phase (δ) sont calculés à des températures / des fréquences données à partir l'ensemble de l'enregistrement des valeurs (définition www.eu-robitume.eu).

Pour d'autres définitions, vous pouvez, entre autres, vous reporter aux sites internet suivants :

- [Glossaire sur les déchets \(OFEV\)](#)
- [Translation or definition of a term | AIPCR \(piarc.org\)](#)
- [Normes VSS](#)

12 Bibliographie

[1] Loi fédérale sur les produits de construction, LP_{Co} [Lien](#)

Du 21 mars 2014, version du 1^{er} octobre 2014

[2] Ordonnance sur les produits de construction, OP_{Co} [Lien](#)

Du 27 août 2014, version du 9 décembre 2014

[3] Loi fédérale sur la protection de l'environnement – Loi sur la protection de l'environnement, LPE [Lien](#)

Du 7 octobre 1983, version du 1^{er} janvier 2021

[4] Ordonnance sur la limitation et l'élimination des déchets – Ordonnance sur les déchets, OLE_D [Lien](#)

Du 4 décembre 2015, version du 1^{er} janvier 2021

[5] Directive pour la valorisation des déchets de chantier minéraux [Lien](#)

Office fédéral de l'environnement OFEV, 2006, 2^{ème} édition

[6] SN 670 071 : Recyclage – Norme de base

Edition 2011-02

[7] SN 670 050 : Granulats – Norme de base

Edition 2010-02

[8] SN EN 13108-8 : Mélanges bitumineux – Spécifications pour le matériau – Partie 8 : Agrégats d'enrobés

Edition 2019-11

[9] SN 670 103b / EN 13043 : Granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels utilisés dans la construction des chaussées, aérodromes et d'autres zones de circulation

Edition 2006-02

[10] SN 640 420 : Enrobés bitumineux – Norme de base

Edition 2015-09

[11] SN 640 431-1-NA / EN 13108-1 : Mélanges bitumineux – Spécifications pour le matériau – Partie 1 : Enrobés bitumineux

Edition 2015-09

[12] SN 640 431-7a-NA / EN 13108-7 : Mélanges bitumineux – Spécifications pour le matériau – Partie 7 : Bétons bitumineux drainants

Edition 2008-02

[13] VSS 40 436 : Enrobés et couches de roulement semi-denses – Spécifications, exigences, conception et exécution
Edition 2019-03

[14] VSS 40 430 : Enrobés bitumineux compactés – Conception, exécution et exigences relatives aux couches en place
Edition 2019-03

[15] VSS 40 434 : Programme des essais pour enrobés bitumineux compactés – Détermination des essais à réaliser
Edition 2019-03

[16] SN EN 13 108-20 : Mélanges bitumineux – Spécifications pour le matériau – Partie 20: Epreuve de formulation
Edition 2019-04

[17] SN 670 061 : Bitumes et liants bitumineux – Norme de base
Edition 2017-03

[18] SN 670 202-NA/EN 12591 : Bitumes et liants bitumineux – Spécifications des bitumes routiers
Edition 2010-02

[19] SN 670 210b-NA/EN 14023 : Bitumes et liants bitumineux – Cadre de spécifications des bitumes modifiés par des polymères
Edition 2011-02

[20] SN 670 204-1-NA/EN 13924-1 : Bitumes et liants bitumineux – Cadre de spécifications pour les bitumes routiers spéciaux – Partie 1 : Bitumes routiers de grade dur
Edition 2016-12

[21] SN EN 13108-21 : Mélanges bitumineux – Spécifications pour le matériau – Partie 21: Contrôle de la production en centrale
Edition 2019-04

[22] Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) [Lien](#)
Office fédéral de la santé publique OFSP, Octobre 2020

[23] Merkblatt für die Wiederverwendung von Asphalt M WA
Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Publication 2009/Edition 2013

[24] Voie de circulation (TGC VOL. 25)
Dumont André-Gilles, Tille Micaël, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2019

[25] Projet initial – Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques [Lien](#)

Dumont André-Gilles, Bueche Nicolas, Angst Christian, Mandat de recherche VSS 2008/502, 2009

[26] Handbuch – Planen und Bauen im öffentlichen Raum – Normalien – Strassenbau – Recycling-Baustoffe [Lien](#)
Ville de Berne, Juillet 2019

[27] TAZ-Standard 2012 – Dimensionierung Strassenoberbau [Lien](#)
Ville de Zurich, Office des ponts et chaussées, 04 mai 2012

[28] Norm - Belagsaufbau - Konzeption und Anforderungen [Lien](#)
Canton d'Argovie, Office des ponts et chaussées, décembre 2020

[29] Newsletter der Abteilung Tiefbau - Aktualisierung bei den ungebundenen Gemischen und den Strassenbelägen [Lien](#)
Canton d'Argovie, Office des ponts et chaussées, mars 2020

[30] Schreiben – Erhöhung Anteile Ausbauasphalt für Warmzugaben in Asphaltbetone um 20%
Canton de Berne, Office des ponts et chaussées, 25 novembre 2019

[31] Handbuch Strassenbau [Lien](#)
Canton de Bâle-Ville, Département de la construction et des transports, Office des ponts et chaussées, Version 1.5, 1^{er} mai 2020

[32] Manuel technique Tracé/Environnement – structure normale d'un revêtement 21 001-10201 [Lien](#)
Office fédéral des routes, page 21 001-10201, 3 février 2021

[33] Paquet de recherche de recyclage des matériaux bitumineux de démolition des routes dans des enrobés à chaud : synthèse [Lien](#)
Dr. Markus Caprez, Dr. Carlo Rabaiotti, Paquet de recherche VSS 2005/450, février 2017

[34] Paquet de recherche PLANET: Gestion, coordination et synthèse [Lien](#)
Dr. Thomas Arn, Projet de recherche VSS 2010/540, novembre 2017

[35] Position Paper: The use of secondary materials, by-products and waste in asphalt mixtures [Lien](#)
European Asphalt Pavement Association, septembre 2020

[36] Position Paper: The use of Warm Mix Asphalt [Lien](#)
European Asphalt Pavement Association, octobre 2014

[37] SN 670 511/EN 1426 : Bitumes et liants bitumineux – Détermination de la pénétrabilité à l'aiguille
Edition 2016-03

[38] SN 670 512/EN 1427 : Bitumes et liants bitumineux – Détermination du point de ramollissement – Méthode Bille et Anneau

Edition 2016-03

[39] SN EN 13 398 : Bitumes et liants bitumineux – Détermination du retour élastique des bitumes modifiés

Edition 2018-06

[40] Instructions – Qualité des revêtements bitumineux – Mesures en cas de non-respect des exigences Edition 2010 V1.21 OFROU 71005 [Lien](#)

ASTRA, 71005, Ausgabe 2010 v1.21, 16.08.2019

[41] Anforderung an das rückgewonnene Bindemittel [Lien](#)

Canton de Zurich - Direction des travaux, Submissionsdokumente, Teil C2: Qualitätslenkung der Unternehmung, Register Nr. 315 Walzasphalt, août 2020

[42] Bindemittel aus Rückgewinnung, Anforderungen [Lien](#)

Ville de Zurich - office des ponts et chaussées, Qualitätskontrolle Walzasphalt, Anhang 6, février 2013

[43] SN 670 507 / EN 12593 : Bitumes et liants bitumineux – Détermination du point de fragilité selon Fraass

Edition 2016-03

[44] SN 670 560/EN 14771 : Bitumes et liants bitumineux – Détermination du module de rigidité en flexion – Rhéomètre à flexion de barreau (BBR)

Edition 2013-09

[45] SN EN 13302 : Bitumes et liants bitumineux – Détermination de la viscosité dynamique des liants bitumineux à l'aide d'un viscosimètre tournant

Edition 2019-04

[46] SN EN 12697-35: Mélange bitumineux – Méthode d'essai – Partie 35 : Malaxage de laboratoire

Edition 2018-06

[47] What you need to know about bitumen rheology

En. Nur Izzi bin Md. Yusoff, Prof. Dr Mohd Rosli bin Hainin, Prof. Gordon D. Airey, Jurutera-Zeitschrift, 09.2011

[48] Site internet : pavement interactive [Lien](#)

pavementinteractive.org/reference-desk/testing/binder-tests/dynamic-shear-rheometer/

[49] SN 670 559/EN 14770 : Bitumes et liants bitumineux – Détermination du module complexe en cisaillement et de l'angle de phase – Rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR)

Edition 2013-09

[50] FGSV 722: Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln im Dynamischen Scherrheometer (DSR) - Durchführung im Temperatursweep

Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Technisches Regelwerk, 2014

[51] FGSV 720: Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln im Dynamischen Scherrheometer (DSR) - Durchführung des Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahrens (BTSV)

Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Technisches Regelwerk, 2017

[52] FGSV 721: Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln im Dynamischen Scherrheometer (DSR) - Durchführung mit konstanter Scherrate

Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Technisches Regelwerk, 2016

[53] FGSV 723: Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln im Dynamischen Scherrheometer (DSR) - Durchführung der MSCR-Prüfung (Multiple Stress Creep and Recovery Test)

Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Technisches Regelwerk, 2016

[54] The Superpave Mix Design System - Manual of Specifications, Test Methods and Practices Strategic Highway Research Programm, SHRP-A-379, 1994

[55] SN EN 12697-10 : Méthode d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie 10: Compactabilité

Edition 2019-04

[56] SN EN 12697-53 : Mélanges bitumineux; Méthodes d'essai – Partie 53: Montée en cohésion par la méthode du maniabilimètre

Edition 2020-04

[57] SN EN 12697-46 : Mélanges bitumineux; Méthodes d'essai – Partie 46: Fissuration et propriétés à basse température par des essais de traction uniaxiale

Edition 2020-04

[58] Loi fédérale sur les marchés publics (LMP) [Lien](#)

Du 16 décembre 1994, version du 1^{er} janvier 2021

[59] Accord intercantonal sur les marchés publics (AIMP) [Lien](#)

15.03.2001

Gravier pour des génération

(en allemand: Kies für Generationen KFG)

c/o asr Recyclage matériaux construction Suisse

Bahnhofstrasse 6

8952 Schlieren

+41 44 813 76 56

info@kiesfuergenerationen.ch

www.kiesfuergenerationen.ch

