Projet National IDEE

Infrastructures Décarbonées

aux Enrobés à l'Emulsion

Etude de Faisabilité et de Montage

Etude rédigée par :

Nelson Alvarado (Roger Martin)
Michel Dauvergne (UGE)
Brice Delaporte (Routes des France)
Frédéric Delfosse (Vinci Construction)
Benoît Digonnet (Eiffage)
Camilo Duran (IREX)
Vincent Gaudefroy (UGE)
Claude Giorgi (Eiffage)
Cédric Leroux (Colas)
Caroline Leveque (Colas)
Lionel Odie (Cerema)
Alvaro Pedraza (Razel Bec Fayat)
Henri Péjouan (Sb Malet)
Philippe Raimond (Colas)
Ciryle Somé (Cerema)

MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
ET DE LA COHÉSION
DES TERRITOIRES
Liberté
Égalité
Fraternité

Avec la collaboration de :

Alain Beghin (Spie Batignolles)
Abdeltif Belkahia (Arkema)
Pierre Beauquesne (Vince Construction)
Louis-Robert Borrel (Razel Bec Fayat)
Nicolas Brau (Sb Malet)
Marc Chiavassa (NGE)
Hervé Di Benedetto (ENTPE)
Ismaël Elfraa (Eiffage)
Bruno Espinasse (CD Puy de Dôme)
Cécile Friedel (Colas)
Stéphane Gallais (Razel Bec Fayat)
Benoît Hamon (Ermont)
Stéphane Lepaisant (CD Ille-et-Vilaine)
Salvatore Mangiafico (ENTPE)
Ludovic Martinez (Eiffage)
Jérôme Muller (NGE)
Nicolas Picard (Ingevity)
Cédric Sauzeat (ENTPE)
Thomas Zanini (Colas)

Et des nombreux partenaires pressentis qui ont proposé des actions de recherche à mener dans ce futur Projet National.

Sommaire

Sommaire **3**

Glossaire **5**

Abréviations **7**

Introduction **8**

1 État de l'art **12**

1.1 Aspects technologiques et scientifiques *12*

1.1.1 Spécificités des procédés à froid à l'émulsion de bitume 12
1.1.2 Fabrications des mélanges à l'émulsion de bitume 13
1.1.3 Formulation et caractérisation des produits 14
1.1.4 Mise en œuvre et moyens d'applications 25
1.1.5 Dimensionnement des structures incorporant des mélanges à l'émulsion et modélisation 26
1.1.6 Retour d'expériences et comportement sur site 30
1.1.7 Réglementation et normes en vigueur 32

1.2 Aspects environnementaux *33*

1.2.1 Emissions de gaz à effet de serre et consommation énergétique 33
1.2.2 Eaux de rupture des émulsions 34

2 Originalité du projet national **36**

2.1 Positionnement du projet par rapport à l'existant *36*

2.2 Précision des verrous scientifiques et techniques identifiés et objectifs du Projet National *37*

2.2.1 Optimisation de la formulation du mélange 38
2.2.2 Comportement au jeune âge 39
2.2.3 Dimensionnement et durabilité 40
2.2.4 Fabrication et mise en œuvre des mélanges 41

3 Programme de recherche **42**

3.1 Axe 1. Etudes en laboratoire *43*

3.1.1 Thème 1.1 : Méthodologie de formulation en laboratoire 44
3.1.2 Thème 1.2 : Comportement et Propriétés des Mélanges non-Structurants 51
3.1.3 Thème 1.3 : Comportement et Propriétés des Mélanges Structurants 55

3.2 Axe 2. Etude à l'échelle industrielle *66*

3.2.1 Thème 2.1 : Chantiers pilotes 67
3.2.2 Thème 2.2 : Comportement de mélanges issus de chantiers pilotes 70
3.2.3 Thème 2.3 : Adaptation du matériel pour la fabrication et mise en œuvre des mélanges à l'émulsion 70
3.2.4 Thème 2.4 : Analyse de Cycle de vie des Enrobés à l'émulsion 72

3.3 Axe 3 : Transfert et valorisation des résultats *75*

3.3.1 Thème 3.1 Normalisation et règlementation 76
3.3.2 Thème 3.2 : Communication et publications 77

4 Organisation du projet **79**

4.1 Consortium et éléments de gouvernance *79*

4.1.1 Partenariat potentiel 79
4.1.2 Assemblée Générale 80
4.1.3 Comité de pilotage 80
4.1.4 Thèmes et sous-thèmes 80
4.1.5 Bureau 80

4.2 Planning prévisionnel du Projet National *81*

4.3 Budget prévisionnel et plan de financement 83
4.3.1 Budget Prévisionnel 83
Plan de financement 85
ANNEXE 1 86
5 Références bibliographiques 88

Glossaire

(extrait de IDRRIM, 2020a)

Agrégats d'enrobés : Matériaux granulaires provenant du fraisage ou de la démolition d'enrobés bitumineux et entrant dans la composition d'enrobés de recyclage [NF P98-150].

Bitume : Matériaux très visqueux, pratiquement non volatil, adhésif et hydrofuge, dérivé du pétrole brut ou présent dans le bitume naturel, qui est entièrement soluble dans le toluène ou presque [NF EN 12591].

Béton Bitumineux à l'émulsion : Les BBE sont des mélanges bitumineux à l'émulsion de bitume destinés aux couches de roulement et de liaison. On distingue deux types :

- Type 1. Destinés à des opérations d'entretien et de restauration de caractéristiques de surface sur des chaussées à faible trafic.
- Type 2. Leurs caractéristiques mécaniques leur permettent d'apporter un gain structurel pour les fortes épaisseurs de mise en œuvre.

Couche d'accrochage : Film de liant hydrocarboné, répandue sur un support préalablement à la mise en œuvre d'une couche d'enrobé, destinée à assurer le collage de cette dernière sur le support.

Emulsion : Dispersion sous forme de particules très fines, d'un liquide dans un autre liquide dans lequel il n'est pas soluble. Les émulsion bitumineuses routières sont constituées d'une phase aqueuse continue dans laquelle les particules (globules) de bitume sont dispersées.

Enrobé hydrocarboné : Mélange de gravillons, de sable avec ou sans fines, d'un liant hydrocarboné et éventuellement d'agrégats, de tensioactifs et/ou d'additifs [NF P98-150]. Il peut être élaboré à chaud ou à froid, en usine ou en place. Les caractéristiques du produit dépendent de sa composition, des méthodes d'élaboration, de transport et de mise en œuvre [NF P98-150].

Enrobé hydrocarboné à chaud : Enrobé hydrocarboné réalisé à chaud (plus de 120°C) à partir de granulats séchés, d'un liant hydrocarboné et éventuellement d'agrégats, de tensioactifs et/ou d'additifs [NF P98-150].

Enrobé hydrocarboné à froid : Enrobé hydrocarboné réalisé à partir des granulats, d'un liant hydrocarboné, et éventuellement des tensioactifs et/ou d'additifs dont les caractéristiques permettent un enrobage sans séchage et chauffage de granulats.

Fluxant : Fluide ajouté à un autre fluide pour en réduire la viscosité [NF EN 12597]. Les fluxants peuvent être d'origine minérale ou végétale. Pour fluxer les bitumes routiers, 2 types de produits existent :

- Volatils. Leur effet disparait (au moins partiellement) par évaporation des parties légères.
- Réactifs. Leur effet disparait progressivement par auto polymérisation.

Fraisage : Opération de désagrégation et d'enlèvement de matériaux liés à l'aide d'un tambour rotatif équipé d'outils adaptés (dents, pics, couteaux).

Grave-Emulsion : Enrobé bitumineux à l'émulsion de bitume destiné :

- Aux reprofilages et aux réparation localisés
- A la réalisation des couches d'assises structurantes

Recyclage : Introduction, dans un cycle d'enrobés à chaud, d'une proportion donnée d'enrobés de récupération (enrobés recyclés). Le recyclage peut être réalisé en usine ou en place. Dans ce dernier cas il peut être réalisé, soit par thermorecyclage, soit par fraisage à froid, malaxage à chaud des agrégats (fraisats) dans un matériel automoteur, et remise en place [NF P98-150].

Reprofilage : Technique d'entretien d'une chaussée consistant à améliorer son profil longitudinal et ou transversal.

Taux de recyclage : Proportion massique d'agrégats de recyclage dans l'enrobé de recyclage [NF P98-150].

Abréviations

AE : Agrégats d'enrobés
BB : Béton Bitumineux
BBE : Béton Bitumineux à l'Emulsion
GB : Grave-Bitume
GE : Grave-Emulsion
GE-R : Grave-Emulsion de Reprofilage
GE-S : Grave-Emulsion Structurante
RP : Retraitement en Place

Introduction

Les enrobés à l'émulsion représentent environ 5% (1,7 Mt) des enrobés utilisés en France pour la construction ou l'entretien des infrastructures routières, des voiries et des aménagements urbains. Ils sont fabriqués soit en usine, soit directement sur le chantier à l'aide d'un atelier de recyclage en place.

Ils peuvent être utilisés :

- en couche d'assise (grave-émulsion structurante),
- en couche de reprofilage (grave-émulsion de reprofilage),
- en couche de roulement (béton bitumineux à l'émulsion).

Les enrobés à l'émulsion font partie du panel des solutions techniques proposées par les entreprises de travaux routiers depuis de nombreuses années. Leur usage est stable depuis une dizaine d'années (Figure 1), les grave-émulsion (structurante ou de reprofilage) constituant la grande majorité de la production.

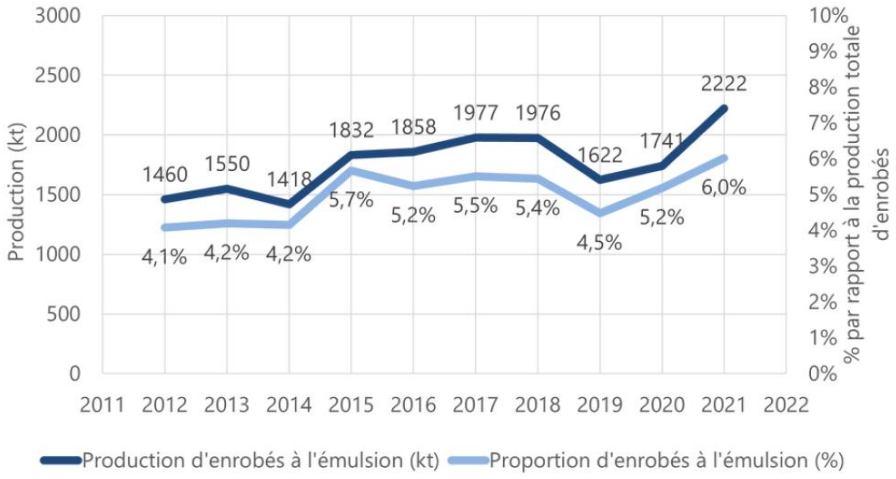

Figure 1. Production (kt/an) d'agrégats d'enrobés à l'émulsion en France et pourcentage de production par rapport au total d'enrobés produits (source : Routes de France)

Ce type de matériaux peut être utilisé dans toute la gamme des travaux routiers. D'une manière générale, ils conviennent jusqu'au trafic T2[1]. Dans certains cas, moyennant une étude spécifique, ils peuvent être utilisés jusqu'au trafic T1. Ils sont donc adaptés à une grande partie du linéaire d'infrastructure en France métropolitaine, probablement plus de 80%, et présentent donc un potentiel de déploiement très significatif.

Enjeux Environnementaux

Les enrobés à l'émulsion sont fabriqués à partir de granulats, éventuellement d'agrégats d'enrobés recyclés et d'une émulsion d'enrobage, par un procédé n'incluant **aucune étape de séchage, ni de chauffage**. Par rapport à un enrobé conventionnel fabriqué à chaud, une économie d'énergie est donc réalisée à la fois sur la température des granulats et sur l'énergie nécessaire pour chauffer et évaporer l'eau.

[1] Dans le dimensionnement des chaussées Ti désigne la classe du trafic routier en France. Elle correspond au Trafic Moyen Journalier Annuel (TMJA) de poids lourd (PL) par sens de circulation à la mise en service des chaussées. T2 : entre 150 et 300 PL/j, T1 : entre 300 et 750 PL/j.

Les enrobés à l'émulsion sont donc particulièrement intéressants d'un point de vue de **l'impact environnemental**. Leur déploiement représente ainsi des enjeux importants, notamment pour contribuer à la **décarbonation du secteur**.

Leur empreinte environnementale a été quantifiée dans le cadre de plusieurs études, à partir de cas génériques[2,3]. Sur le périmètre « du berceau à la sortie de l'usine », par rapport à un enrobé conventionnel fabriqué à chaud, la réduction des impacts ramenée à la tonne d'enrobé fabriqué en usine est de l'ordre de 21% sur la consommation des ressources énergétiques (énergie procédé) et de 31% sur les émissions de gaz à effet de serre (GES).

Ces matériaux sont également intéressants du point de vue de la préservation des ressources car ils permettent l'incorporation d'agrégats d'enrobés jusqu'à 100%.

Solution décarbonante

Le recours à des solutions à base d'enrobés à l'émulsion dans les marchés de travaux courants permettrait dans le secteur routier une réduction significative des émissions de GES à l'horizon 2030, par rapport à l'année de référence 1990 (protocole de Kyoto). Selon les estimations fournies ci-dessous (Source : Routes de France), les efforts de déploiement de ces pratiques par l'ensemble des acteurs, en complément des techniques d'abaissement de température, permettraient de réduire les émissions de GES de l'ordre de 34%. Un scénario plus ambitieux consistant à accélérer rapidement la transition vers ces solutions, davantage en rupture d'un point de vue industriel par rapport à la situation actuelle, conduirait à une baisse de l'ordre de 40% des émissions de GES. Ces estimations concernent uniquement le périmètre de fourniture des enrobés, à volume d'activité constant.

Il faut noter que l'utilisation d'agrégats d'enrobés issus de la déconstruction des chaussées anciennes est parfaitement compatible avec la fabrication des enrobés à l'émulsion. Les taux de substitution peuvent aller jusqu'à 100%. Même si les distances de transport sont à considérer avec attention, l'économie de matériaux générée permet le plus souvent de contribuer significativement à l'abaissement de l'empreinte carbone.

Des freins à leur développement

Plusieurs aspects scientifiques et techniques empêchent aujourd'hui un déploiement plus large de ces matériaux :

- Contrairement à un enrobé à chaud, le comportement mécanique d'un enrobé à l'émulsion évolue au cours du temps dans une phase appelée **« mûrissement »**. Malgré des nombreuses études et publications techniques et scientifiques sur le sujet, ce phénomène n'est pas entièrement maîtrisé car il est dépendant de plusieurs facteurs tel que la vitesse de rupture de l'émulsion, la formulation (granulométrie, teneur en liant, teneur en eau, additif), la minéralogie des granulats, les matériels, la méthode et les conditions de mise en œuvre.
- Par ailleurs, les méthodes accélérées du mûrissement en laboratoire ne sont pas satisfaisantes quant aux observations sur le chantier. Pour mieux prévoir le comportement de ces matériaux sur site, il est nécessaire d'améliorer la représentativité des méthodes.
- L'incorporation d'agrégats d'enrobés (AE) à des taux importants dans les mélanges à l'émulsion requiert souvent un apport supplémentaire en émulsion pour favoriser, en absence de chauffage, la remobilisation du liant vieilli. Cela n'est pas sans conséquences sur les propriétés des mélanges

[2] Guide IDRRIM « Enrobés à l'émulsion fabriqués en usine »
[3] Fiches de données environnementales et sanitaires collectives – Routes de France (https://www.routesdefrance.com/les-actions-de-la-profession/developpement-durable/analyse-du-cycle-de-vie-life-cycle-analysis/)

et les moyens techniques de préparation (matériaux, procédés) ce qui se traduit dans la pratique par des appréhensions lors du choix du taux d'AE à incorporer.

- Malgré la publication en 2020 du guide de l'IDRRIM « Enrobés à l'émulsion fabriqués en usine », la formulation, l'évaluation et le dimensionnement relèvent souvent de démarches empiriques généralement issues de compétences locales et non de pratiques généralisées à partir de référentiels techniques partagés.
- Le manque de connaissances sur les modes d'endommagement des enrobés à l'émulsion dans les chaussées constitue une difficulté importante pour le dimensionnement des structures associées et la prédiction de leur durée de vie. Dans l'état actuel des connaissances, le comportement en fatigue des matériaux à l'émulsion soulève bon nombre d'interrogations. Des lois de comportement ont été proposées mais elles doivent être améliorées et leur pertinence dans les différentes configurations d'usage doivent être démontrées.
- Il y a aujourd'hui une absence de critères, protocoles expérimentaux et coefficients de calage nécessaires au dimensionnement dans les règles de l'art d'une chaussée comportant un enrobé à l'émulsion.

Engagements collectifs

Les principaux acteurs des réseaux routiers, voiries et espaces publics se sont engagés depuis de nombreuses années à concevoir, construire et entretenir des infrastructures respectueuses de l'environnement. D'abord à travers une convention d'engagement volontaire (CEV) qu'ils ont signée en 2009, puis dans le cadre d'un pacte renouvelé en 2021 sous l'égide du ministère des transports et de l'IDRRIM. Le pacte d'engagement 2021 affiche de nouveaux objectifs ambitieux pour répondre aux enjeux de la transition écologique, de la transition énergétique et de la transition numérique.

Les entreprises de travaux se sont par ailleurs engagées en 2021, à travers la Fédération Nationale des Travaux Publics (FNTP), à réduire de 40% à l'horizon 2030 les émissions de GES liées à la construction et à l'entretien des infrastructures. Les techniques à base d'enrobés à l'émulsion font clairement partie des solutions à développer pour atteindre les objectifs fixés.

C'est dans ce contexte qu'est née l'initiative de monter ce **Projet National sur le développement des Enrobés à l'Emulsion.** Il ambitionne de contribuer au déploiement massif de ces solutions moins carbonées que sont les enrobés à l'émulsion, en définissant un cadre technique clair, partagé par l'ensemble des professionnels de la filière (maitres d'ouvrages, maitres d'œuvre, entreprises de travaux, chercheurs, industriels).

Ce rapport d'étude de faisabilité et de montage du Projet National fait suite à la Note d'opportunité présentée devant le CODOR GC le 21 octobre 2022.

L'étude de faisabilité et de montage a été réalisée de février 2023 à mai 2024 par un groupe de travail constitué d'une trentaine de personnes représentant l'ensemble des parties prenantes. Le lancement de l'étude a fait l'objet d'une communication lors des journées techniques de la route (JTR) 2023 coorganisées par l'UGE, le Cerema et l'IDRRIM. Le nombre de partenaires intéressés pour participer au montage du projet s'est ensuite élargi avec l'organisation d'un Webinaire (30/05/2023) et d'un atelier avec des tables rondes à l'EIVP (19/10/2023). Des nombreuses propositions d'actions ont alors été recueillies et des échanges autour des objectifs et des verrous à lever par le futur projet ont permis d'améliorer la structuration et l'organisation des Thèmes de recherche. Des groupes de travail par thématique ont ensuite été constitués pour faire la synthèse de toutes les contributions afin de bâtir collectivement le programme de recherche du Projet National.

Le projet ainsi défini s'articule autour de trois axes principaux :

- La méthodologie de formulation en laboratoire ainsi que le dimensionnement des structures de chaussées en enrobés à l'émulsion,
- Leur fabrication à l'échelle industrielle, leur mise en œuvre et leur comportement sur chantiers ainsi que leur impact environnemental,
- Le transfert et la valorisation des résultats.

Ce rapport d'étude de faisabilité et montage comprend les sections suivantes :

1. Etat de l'art enrobés à l'émulsion.
2. Identification de verrous et objectifs
3. Programme de recherche
4. Organisation du PN
5. Bibliographie

1 État de l'art

1.1 Aspects technologiques et scientifiques

1.1.1 Spécificités des procédés à froid à l'émulsion de bitume

1.1.1.1 Emulsions

Les procédés à l'émulsion de bitume « à froid » se distinguent des procédés anhydres (à chaud et à tiède) par plusieurs aspects. Les premiers se caractérisent par la présence, au moment de sa mise en œuvre, d'une quantité d'eau notable provenant des granulats et de l'utilisation d'émulsion de bitume (mélange d'eau et de bitume stabilisé par un produit appelé « tensioactif »). Cette présence d'eau est bénéfique du point de vue de la fabrication avec une forte économie d'énergie puisque les granulats ne sont ni séchés ni chauffés. De plus l'eau affecte avantageusement le comportement du mélange en diminuant fortement la viscosité de liant. Cela permet de travailler et de mettre œuvre les produits à température ambiante avec une facilité du compactage du matériau lié au caractère lubrifiant de l'eau. D'un autre côté, la présence de l'eau confère au mélange un comportement évolutif dans le temps (retard pour la formation d'un film de bitume continu à la surface du granulat, mélange fragilisé au très jeune âge).

A la différence des enrobés à chaud, les interactions entre la fraction minérale et le liant ont un effet sur la réactivité du mélange en particulier au jeune âge (qualité d'enrobage, maniabilité, vitesse de montée en cohésion). Les fines fractions du granulat ont un rôle majeur vis-à-vis de ces propriétés. Chaque couple granulat-émulsion est spécifique, avec une influence non négligeable sur les performances de l'enrobé. La formulation de l'émulsion pour le granulat à traiter est une des clés du succès pour ces produits.

1.1.1.2 Cadre méthodologique

La méthode d'étude des enrobés à chaud ne peut pas être totalement transposée aux enrobés à l'émulsion car elle ne prend pas en compte leurs particularités et surtout leur caractère évolutif. La formulation et l'évaluation des performances des enrobés à l'émulsion font appel à une série d'essais adaptés, effectués selon la méthodologie basée sur 3 étapes distinctes :

- une phase préalable de sélection des constituants et d'essais de calage pour pré-formuler l'émulsion et le mélange,
- puis une phase d'étude sur le mélange à l'état frais (qualité d'enrobage, sensibilité au désenrobage, maniabilité et montée en cohésion, tenue à l'eau),
- et enfin une autre à l'état muri (résistance à la compression et la sensibilité à l'eau, résistance à la déformation permanent et à la fatigue et module de rigidité) faisant intervenir des protocoles de mûrissement accéléré en laboratoire.
-

1.1.1.3 Domaine d'emploi et usage

L'absence de fumées et de vapeurs est un facteur d'amélioration des conditions de travail que ce soit lors de la fabrication et de la mise en œuvre. Cette mise en œuvre peut s'effectuer à température ambiante et n'est pas soumise aux impératifs liés au maintien en température des enrobés à chaud. Cependant, la période d'application recommandée est comprise entre mai et octobre avec une tolérance à une légère humidification du matériau par la pluie.

La plupart des types d'enrobés à l'émulsion se prêtent bien à une application en épaisseur variable. Les graves-émulsion sont des mélanges particulièrement adaptés pour les reprofilages de supports déformés. Cette capacité de reprofilage liée à la forte maniabilité du produit permet, avec une formulation adaptée, de recharger ou de renforcer, une chaussée déformée par application d'une seule couche.

Enfin les enrobés à l'émulsion de bitume offrent la possibilité d'inclure des agrégats d'enrobés à de très forts taux. L'utilisation d'une température d'enrobage basse permet de limiter l'oxydation du liant de l'agrégat d'enrobé et de ne pas plafonner le taux de recyclage, pouvant aller jusqu'à 100 % dans certains cas, à cause des matériels utilisés.

1.1.2 Fabrications des mélanges à l'émulsion de bitume

1.1.2.1 A l'échelle du laboratoire

Il s'agit de fabriquer en laboratoire des mélanges hydrocarbonés à l'émulsion (Grave-Emulsion, Béton Bitumineux à l'Emulsion et autres mélanges de matériaux traités à l'émulsion dans le cas de recyclage in situ). La fabrication de ces mélanges en laboratoire permet d'ajuster la formulation de l'émulsion de bitume en intégrant éventuellement des étapes de séquençage d'incorporation de matériaux, de pré-laquage ou d'autres spécificités propres à chaque entreprise. On distingue la fabrication d'émulsion et la fabrication de mélanges hydrocarbonés en laboratoire

1.1.2.1.1 Fabrication d'émulsion en laboratoire

Il existe plusieurs techniques pour la mise en émulsion de bitume au laboratoire et fabrication de petites quantités. L'émulsion peut être créée par enrichissement progressif de la phase aqueuse émulsionnante, par action de moulins colloïdaux ou encore à l'aide de dispositifs statiques utilisant la vitesse et la pression. La méthode de mise en émulsion par cisaillement dans un moulin colloïdal est celle la plus employée et la plus représentative d'une fabrication industrielle. Il en existe différents modèles (ex : technologie ATOMIX®) caractérisés par la présence d'un entrefer réglable (autour de quelques micromètres) entre le rotor et le stator et une vitesse de rotation. Ces paramètres influent directement sur la granulométrie de l'émulsion fixée de telle sorte à être en phase avec la qualité industrielle.

Le formulateur adaptera la composition de l'émulsion et les paramètres de fabrication au cahier des charges de son étude. La viscosité de la phase huileuse (liant éventuellement modifié aux polymères et/ou fluxé) devra être inférieure à 200 mPa.s afin d'assurer la bonne qualité de l'émulsification. La température de la phase aqueuse est quant à elle généralement comprise entre 30 et 50°C et contient de l'eau, la composition émulsifiante adaptée et de l'acide (généralement acide chlorhydrique). La phase de fabrication d'émulsion au laboratoire s'accompagne de la caractérisation de l'émulsion afin de s'assurer de la conformité du produit à la norme [NF EN 13808].

1.1.2.1.2 Fabrication des mélanges de matériaux à l'émulsion

En laboratoire, divers types de malaxeurs peuvent être utilisés (à axe vertical ou à deux arbres horizontaux) pour fabriquer des mélanges granulaires traités à l'émulsion. La procédure de malaxage doit représenter aussi fidèlement que possible celle, prévue ou utilisée, du chantier : ordre d'introduction des constituants, répartition de l'eau et de l'émulsion, ajout d'additifs, pré-enrobage éventuel d'une fraction granulaire... Le temps de malaxage en laboratoire doit être ajusté en fonction de différents paramètres (débit de fabrication, longueur du malaxeur).

Les normes [NF P 98-257-1, NF EN 12697-55] présentent des informations génériques pour formuler en laboratoire des enrobés avec des temps de mélange compris entre 15 à 60 s mais ne permettent pas de simuler l'ensemble des cas de figures sur chantier et de reproduire la qualité d'enrobage ou / et de maniabilité pour la mise en œuvre. En laboratoire, les entreprises mettent souvent en place des procédures internes pour remédier à ces écarts. Il est également important de déclarer la température à laquelle le mélange a été réalisé en laboratoire (généralement comprise entre 18 et 25°C) et préciser la température de l'émulsion.

1.1.2.2 A l'échelle du chantier : Fabrication en usine et en place

1.1.2.2.1 Fabrication en usine

D'une manière générale, les termes de la norme [NF P 98-150-2] s'appliquent. Toutefois des compléments et précisions sont nécessaires et sont détaillés dans le guide technique [IDRRIM, 2020a].

Les graves-émulsion sont normalement fabriquées par simple enrobage car la qualité d'enrobage est un critère moins important que pour les enrobés de couche de roulement. Pour certains bétons bitumineux à l'émulsion et certains enrobés stockables, ce procédé « simple enrobage » peut être également utilisé mais l'impératif d'un enrobage complet de toutes les fractions granulaires conduit souvent à recourir à un procédé spécifique. Quelques exemples d'enrobage optimisé par phases distinctes sont proposés : pré-enrobage d'une fraction (à chaud ou à l'émulsion), enrobage séquencé (ou double enrobage), enrobage séquencé avec pré-enrobage d'une fraction (à chaud ou à l'émulsion).

Les centrales avec malaxeur double-enrobage sont équipées d'un mélangeur allongé. Le gravillon est enrobé par une partie de l'émulsion en début de malaxeur, le sable est ensuite incorporé, puis l'ensemble est enrobé en aval, par le complément de l'émulsion, avec éventuellement l'ajout d'additif. Il est parfois souhaitable de prévoir également un pré mouillage à l'eau spécifiquement pour les fines. Dans ce cas, un petit mélangeur mono-arbre complémentaire, muni d'une rampe à eau, est installé en aval immédiat des doseurs et permet un pré mouillage à l'eau des granulats avant injection de l'émulsion de bitume. Le pré mouillage confère une meilleure homogénéité du mélange final.

Les centrales de production d'enrobés à l'émulsion sont également une solution économique de réutilisation des agrégats d'enrobés. Dans ce cas, les particularités d'écoulement de ces produits nécessitent l'adaptation des trémies et des doseurs. Un crible et un broyeur peuvent être associés au doseur pour la préparation des agrégats.

1.1.2.2.2 Recyclage in situ des chaussées

Dans le cadre d'une fabrication in-situ correspondant au recyclage en place des chaussées (c.-à-d. des couches de roulement ou d'assises soit en enrobés, soit en GNT, soit en matériaux naturels (type grave latéritique), il faut disposer de plusieurs matériels listés ci-après. Une recycleuse à double rampe pour injecter l'eau et l'émulsion de bitume. Les recycleuses doivent pouvoir recycler 30 à 50 cm de matériaux en place y compris jusqu'à 20 cm d'enrobés bitumineux. Les recycleuses sont équipées de tambour disposant de pics de rabotage adaptés à la déstructuration de chaussée et non de malaxages. Le type de pic dépend de l'abrasivité du matériau à recycler. La largeur de recyclage peut aller jusqu'à 3,80 m. La puissance des recycleuses (type MPH 600) est un point important pour pouvoir recycler sur de grandes profondeurs et pour pouvoir tirer et pousser la citerne à eau et la répandeuse à émulsion de bitume. Les recycleuses doivent être équipées d'un ordinateur de bord pour introduire le dosage en eau, en émulsion de bitume et la profondeur de recyclage. La largeur de répandage de l'émulsion peut être aussi contrôlée. Une citerne à eau tractée par la recycleuse et une répandeuse à émulsion de 7 à 9 t de capacité, poussée par la recycleuse seront nécessaire pour la réalisation des travaux.

1.1.3 Formulation et caractérisation des produits

1.1.3.1 Méthodologie de formulation

La formulation a pour objectif d'identifier la nature et le dosage des constituants d'un mélange bitumineux. Ces choix sont guidés par l'usage (couche d'assise, liaison / reprofilage ou roulement) et par la destination du mélange (ex. niveau de trafic de la route) qui conditionnent les niveaux de performances à atteindre. Pour les mélanges issus des procédés de fabrication « à chaud », la formulation relève d'étapes de caractérisation bien connues, qui n'intègre pas, par exemple, d'étape visant à identifier la réactivité entre un liant anhydre et des granulats.

1.1.3.1.1 Prise en compte de la réactivité liant granulat

Les enrobés à l'émulsion se singularisent par une étape préalable qui consiste à évaluer le niveau de réactivité « physico-chimique » entre le squelette granulaire et l'émulsion. Cette étape préalable est nécessaire pour discriminer les mélanges faiblement et fortement réactifs qui peuvent poser des problèmes de fabrication, de mise en œuvre et de comportement au jeune âge sur le chantier.

Plus précisément, les enrobés à l'émulsion de bitume sont obtenus en malaxant des granulats humides avec de l'eau d'apport et de l'émulsion de bitume. Les granulats, et particulièrement les fines, ont des échanges ioniques importants en milieu aqueux. La réactivité des granulats routiers vis-à-vis d'émulsions de bitume est un phénomène complexe qui est difficilement anticipé par la seule analyse pétrographique. La méthode d'essai LPC n°77 vise à reproduire une partie des phénomènes chimiques qui interviennent dans le processus de rupture des émulsions cationiques au contact de granulats, à savoir l'hydrolyse acide de la surface minérale et la libération de cations. La libération de ces espèces basiques a pour conséquence une remontée du pH de la phase aqueuse et une déstabilisation de l'émulsion. Ainsi, la réactivité chimique des granulats peut être quantifiée par le suivi du pH et le dosage des cations relargués par spectrométrie d'absorption atomique.

Un mélange faiblement réactif apporte la maniabilité nécessaire à la transportabilité du produit et à sa mise en œuvre adéquate sur le chantier. Il sera cependant susceptible de rester fragile après le compactage et donc de subir des dommages (déformation, arrachement) dès la réouverture au trafic de l'itinéraire.

Un mélange fortement réactif (par une mauvaise diffusion de l'émulsion dans le mélange et / ou par une montée en cohésion trop rapide) pourra limiter la transportabilité du produit et perturber sa bonne mise en œuvre sur le chantier (hétérogénéité, mottage). Ce type mélange sera certes moins sensible aux sollicitations mécaniques lors de la réouverture au trafic de l'itinéraire, mais ne pourra pas forcément atteindre les performances mécaniques finales et la durabilité attendues.

1.1.3.1.2 Paramètres influents pour la formulation et caractéristiques recherchées

Cette étape préalable est généralement personnalisée à l'approche chaque formulateur, qui développe des essais et une méthodologie propre aux produits qu'il fabrique (Grave Emulsion ; Retraitement en place à l'émulsion et / ou Béton Bitumineux à l'Emulsion) ainsi qu'à la spécificité des outils industriels qu'il utilise (centrales avec procédés de simple enrobage ou de pré-enrobage, machine de retraitement en place ; …).

Cette étape est d'autant plus importante et nécessaire à réaliser que le mélange visé intègre :

- une forte teneur en liant d'apport (ex. Béton Bitumineux à l'Emulsion) ;
- une forte teneur en granulats naturels à forte réactivité vis-à-vis de l'émulsion (ex. granulats de pétrographie calcique) ;
- un délai important entre la fabrication et la mise en œuvre (ex. fabrication en centrale associée à un chantier nécessitant un long temps de transport).

Même si les moyens d'essais peuvent varier selon les formulateurs, la méthodologie repose sur la prise en compte des caractéristiques suivantes :

- la qualité d'enrobage : cette caractéristique, appréciée visuellement, est très dépendante de la teneur en fluides (eau et émulsion) du mélange. La teneur optimale en émulsion est d'abord calée à partir de la teneur en liant nécessaire pour l'usage envisagé du mélange. La teneur en eau d'apport est calée vis-à-vis de l'enrobage (pourcentage de surface granulaire couverte) compatible avec l'usage envisagé. On recherchera plutôt un bon enrobage pour les usages en couche de roulement (ex. Béton Bitumineux à l'Emulsion). On pourra être plus tolérant sur la qualité d'enrobage pour les usages en reprofilage et structure (ex. Grave Emulsion).

- la réactivité du mélange / montée en cohésion : Cette caractéristique peut être appréciée de façon différente (empirique ou plus rationnelle) selon l'approche du formulateur. Des méthodes d'essais (normalisées ou non) ont été publiées sur le sujet.
    - Méthodes d'essais empiriques : Certaines méthodes reposent sur une appréciation « organoleptique » (toucher) de la montée en consistance du mélange. Elles se pratiquent généralement dans la continuité de l'essai d'enrobage précité. D'autres méthodes reposent sur l'évaluation de la quantité d'eau libre qui peut quitter le mélange (essai d'égouttage) et ainsi contribuer à la montée en cohésion.
    - Méthodes d'essais plus rationnelle : Ces méthodes reposent sur une mesure de la cohésion (via une sollicitation en cisaillement du mélange), généralement pratiquée à plusieurs échéances (du temps t0 à t+3heures) pour avoir une évaluation cinétique de cette caractéristique, qui aidera à définir la transportabilité du mélange

1.1.3.1.3 Optimisation de la formulation

Si les résultats de cette qualification préalable ne donnent pas satisfaction, le formulateur ajuste alors la composition du mélange en commençant généralement par une adaptation de la formulation de l'émulsion. Cette dernière est généralement ajustée sur ses caractéristiques intrinsèques et / ou sur les caractéristiques de son liant résiduel.

Les caractéristiques intrinsèques de l'émulsion correspondent à :

- la rupture (ex. ajustement de la nature et du dosage en émulsifiant, dosage voire nature de l'acide),
- la viscosité (ex. ajustement de la teneur en liant et / ou du dosage en fluxant),
- l'adhésivité (ex. ajustement de la nature et /ou du dosage en fluxant)

L'ajustement des caractéristiques du liant résiduel est principalement obtenu par un changement de la classe de bitume et/ou par un changement de nature et de dosage du fluxant.

Une fois que le formulateur a cadré sa formulation initiale, il peut entreprendre (comme il pourrait le faire pour un mélange fabriqué « à chaud ») de caractériser son mélange en compactabilité (en quantifiant le départ de l'eau d'exsudation via une Presse à Cisaillement Giratoire (PCG) équipée du kit « grave-émulsion » pour sa récupération et sa pesée en temps réel en fonction du nombre de giration), en sensibilité à l'eau et en maniabilité, notamment pour les Bétons Bitumineux à l'Emulsion. Pour certains usages et trafics, le mélange peut être caractérisé après un mûrissement de laboratoire, sensé simuler une évolution du matériau sur site dans des conditions favorables, après 1 ou 2 cycles climatiques.

1.1.3.2 Mûrissement des mélanges à l'émulsion

1.1.3.2.1 Introduction et définitions

Les enrobés à l'émulsion présentent des particularités (présence d'eau, réactivité chimique entre granulats et émulsion, existence de micro-vides, …) qui distinguent nettement leurs propriétés de celles des enrobés bitumineux à chaud. Une des principales distinctions est le caractère évolutif. En effet, ces matériaux passent d'un état initial non ou faiblement lié (état frais) à un état final solidement lié (état mûri) sous l'effet de plusieurs phénomènes progressifs : coalescence de l'émulsion, départ de l'eau, collage des grains minéraux, augmentation de la cohésion du liant, serrage du squelette minéral sous compactage puis sous l'effet du trafic.

L'évolution de la compacité est un des principaux paramètres qui caractérise les enrobés à l'émulsion. En effet, ceux-ci présentent à la fin de leur compactage des niveaux de compacité nettement inférieurs à ceux d'enrobés à chaud de formulation équivalente. Par la suite, ceux-ci augmentent au cours du temps sans pourtant atteindre des niveaux identiques. La présence de « microvides » dans le liant explique le niveau

de compacité initial relativement faible que les compacteurs sont impuissants à faire disparaître. La densification ne sera obtenue que graduellement, par l'action de la température, du départ de l'eau (mûrissement) et par le trafic (consolidation).

1.1.3.2.2 Indicateurs du suivi du mûrissement et mûrissement accéléré en laboratoire

Le suivi de l'évolution du mûrissement des enrobés à l'émulsion peut être réalisé à travers des essais mécaniques sur le matériau mais aussi avec la caractérisation du liant résiduel de l'enrobé à l'émulsion. La procédure de mûrissement en laboratoire qui a été retenue par la communauté routière est la suivante : 14 jours 35°C et 20 % d'hygrométrie relative. Ces valeurs ont été choisies comme provoquant un mûrissement marqué sans causer de choc thermique ni fissuration. La durée de mûrissement dépend toutefois du volume et de la géométrie de l'éprouvette. Pour les « petits » corps d'épreuve (diamètre 80 à 100mm), une durée de 14 jours suffit en général pour atteindre un état « muri », qui correspond à 1 ou 3 étés in-situ. Pour les grands corps d'épreuve (cylindres PCG, plaques pour essais d'orniérage, …) des recherches sont en cours pour déterminer des conditions et des temps plus adaptés.

1.1.3.2.3 Essais sur mélange mûri et propriétés recherchées

Module de rigidité[4] : La détermination du module de rigidité s'effectue selon l'une ou l'autre des méthodes d'essai définies dans la [NF EN 12697-26]. Les essais pratiqués sont la traction indirecte sur éprouvettes cylindriques, la traction compression sur éprouvettes cylindriques et la flexion 2 points sur éprouvettes trapézoïdales ou parallélépipédiques. Le protocole de mûrissement retenu est celui-défini ci-dessus (14 jours 35°C et 20% HR).

Résistance en compression / Duriez Aménagé : Le protocole de mûrissement 14 jours à 18°C et 50% d'HR fait très peu évoluer l'enrobé et correspond à l'état « frais » atteint en place après quelques jours ou semaines, selon les conditions météorologiques. Un protocole de mûrissement accéléré pourra être réalisé avant le conditionnement à l'air ou à l'eau des éprouvettes : avec conservation sans immersion : T35H20D14 + T18H50D7 (T température en °C, H hygrométrie en %, D durée en jours) et conservation avec immersion : T35H20D14 + T18WD7 (W signifie immersion dans l'eau).

Résistance à la déformation permanente : L'essai d'orniérage est réalisé à 60°C sur des plaques de 5 ou 10 cm en fonction de l'épaisseur de l'enrobé à l'émulsion mis en œuvre. Pour les plaques de 5cm, la durée de mûrissement est de 21 jours à 35°C et 20%HR. Pour les plaques de 10 cm, une durée plus longue est nécessaire.

Essais sur liant récupéré : La caractérisation du liant résiduel à différentes échéances de mûrissement n'est pas à prévoir dans une étude de routine. Toutefois, elle est utile pour l'étude d'un nouveau produit, ou bien lors d'une expertise. La phase de séchage et d'extraction est importante lorsque le liant contient un fluxant volatil car celui-ci peut s'évaporer lors de la phase de séchage. Les études réalisées par la profession ont démontré qu'un séchage de 30 minutes à 50°C + 24h à température ambiante permettait de s'affranchir des risques de présence d'eau et des phénomènes d'évaporation de fluxant. La méthode d'extraction retenue est celle de la norme [NF EN 12697-3]. Le solvant utilisé est le dichlorométhane ou le perchloroéthylène. La caractérisation des liants extraits peut ensuite être réalisée avec les méthodologies suivantes :

- Pénétrabilité à 25°C [NF EN 1426]
- Point de ramollissement bille-anneau [NF EN 1427]
- Spectroscopie Infra-Rouge : Mesure des Indices d'oxydation Carbonyle et Sulfoxyde [Méthode d'essai LPC n° 69 / Méthode MURE]
- Rhéologie DSR [NF EN 14770] : détermination du module G*, Diagramme de Black et Cole-Cole.

[4] Module de rigidité : Rapport de la contrainte à la déformation relative subie par un corps d'épreuve lors d'un essai mécanique. Il caractérise la raideur d'un matériau. (Idrrim, 2020a).

1.1.3.3 Comportement des mélanges

1.1.3.3.1 Expériences en France

Les essais des enrobés à l'émulsion sont issus des essais des enrobés à chaud ; ils ont été adaptés du fait de la spécificité de ce genre d'enrobés, due notamment à la présence d'eau, entrainant la nécessité d'un mûrissement avant d'atteindre des propriétés mécaniques optimales. Les essais se font en général en 3 étapes, une première phase de faisabilité, une seconde sur mélange frais et une dernière éventuelle sur mélange mûri.

1.1.3.3.1.1 Phase de faisabilité

Cette étape consiste à valider les constituants de cet enrobé à l'émulsion :

- Utilisation de l'enrobé à l'émulsion
- Choix des granulats/agrégat d'enrobé
- Choix du bitume, choix de l'Emulsion- affinité Liant/Granulat
- Reformulation éventuelle

Ces essais se font en général sur une petite quantité d'enrobé et les caractéristiques de celui-ci sont déterminées de façon organoleptique. A la suite de cette caractérisation, un dosage en eau, en émulsion sont établis, conférant à un temps de malaxage adéquat, une vitesse de rupture liant/granulats adaptée et une maniabilité et montée en cohésion maitrisées.

1.1.3.3.1.2 Essais sur mélange frais

Cette étape se fait avec des quantités d'enrobés plus importantes afin d'évaluer les propriétés mécaniques des enrobés à l'émulsion au jeune âge.

La fabrication se fait alors au moyen de malaxeur de laboratoire à arbre vertical ou horizontal, suivant une procédure adaptée de l'outil industriel (temps de malaxage, ordre d'introduction des composants). En laboratoire, la température de confection est généralement comprise entre 18 et 25°C, sauf contraintes locales de fabrication. Dans ce cas tous les composants et le malaxeur seront mis à la température voulue.

Qualité d'enrobage : À la suite d'une première gâchée fabriquée au malaxeur de laboratoire, la qualité d'enrobage est vérifiée de façon visuelle suivant la norme [NF P98-254-1], les méthodes d'analyses d'images et numériques n'étant pas encore très répandues et/ou au point.

Egouttage : Cet essai nous permet de visualiser la qualité de l'eau relarguée après la formation du film de liant sur les granulats et à la montée en cohésion de l'enrobé. Une quantité d'enrobé est confectionnée et est mise en tas sur un plan incliné pendant 24h à température voulue (suivant conditions de chantier). L'eau égouttée est alors caractérisée : claire, brunâtre…

Maniabilité de l'enrobé : La maniabilité de l'enrobé est souvent jugée par le savoir-faire du technicien/ne et de l'entreprise. Des méthodes de mesures de couple ont été aussi développées pour mesurer le couple d'un enrobé frais déposé dans un moule (simulation d'une pose à l'aide d'un finisseur ou d'une niveleuse) et ou déversé dans un moule (simulation de la chute de l'enrobé du malaxeur industriel dans la benne du camion ou chute de la benne du camion dans la vis du finisseur). Cet essai se fait grâce à un équipement type maniabilimètre Nynas. Une autre méthode consiste à mesurer la décohésion du mélange grâce à une pale ancre.

Compactibilité d'un mélange à l'émulsion : Cet essai se fait suivant la norme NF P98-252, à l'aide de presse à cisaillement giratoire (différents modèles sur le marché) avec un mode opératoire adapté aux enrobés à l'émulsion compte tenu de la quantité d'eau présente dans le mélange. Le but de celui-ci est de comparer la compactibilité d'enrobés à l'émulsion et sa facilité à se mettre en place sur chantier.

Sensibilité à l'eau : La norme appliquée est la [NF P 98-251-4/MC1]. Dans ce cas le protocole de mûrissement est à 18°C et 50 d'humidité relative avec une confection d'éprouvettes sous une contrainte

de 60 KN ou 120 KN. Cette contrainte classique a été révisée afin d'atteindre des niveaux de vide plus réalistes, représentatifs de chantier : procédure dite aménagée sous 20KN ou 40 KN. Ces deux procédures nous permettent d'évaluer la sensibilité à l'eau avec différentes teneurs en vide au jeune âge.

1.1.3.3.1.3 Essais sur mélange mûri

Afin de valider les performances mécaniques des enrobés à l'émulsion, une méthode de mûrissement a été retenue : 14 jours à 35°C et 20% d'humidité relative.

Orniérage : Suivant la technique utilisée et après mûrissement accéléré, un essai d'orniérage peut être envisagé en 5 cm ou 10 cm d'épaisseur de plaque, si le trafic envisagé est plus élevé que prévu.

Sensibilité à l'eau : À la suite de ce mûrissement accéléré, un essai de sensibilité à l'eau peut être mené afin de comparer le gain en tenue à l'eau à terme sur ces enrobés.

Module : La détermination de celui-ci suit la norme [EN 12697-26], après mûrissement accéléré et généralement en utilisant des éprouvettes cylindriques (Traction indirecte IT-CY ou traction-Compression TC-TY). L'utilisation d'éprouvettes trapézoïdales ou de carottes chantier, bien que possible, comporte des difficultés en partie liées à la fragilité de celles-ci principalement au jeune âge.

Essai de résistance à la fissuration par fatigue : Dans l'état actuel des connaissances, seule la déformation verticale de la plateforme support de la chaussée est prise en compte dans le dimensionnement. Cet essai est donc pour l'heure non réalisé dans l'étude d'enrobés à l'émulsion structurant, en effet la dégradation par fissuration observée en enrobés à chaud n'est pas transposable aux dégradations observées aux enrobés à l'émulsion. Il n'y a donc pas de loi d'endommagement disponible pour le moment.

1.1.3.3.2 Expériences à l'international

A l'heure actuelle aux Etats Unis [ARRA CR201] ou en Chine [JTG, 2019], les techniques de recyclage en place ou en centrale à l'émulsion sont utilisées pour les couches de base. Au niveau des études en laboratoire, les essais suivants permettent de caractériser ces enrobés :

- Qualité d'enrobage-Maniabilité : Un contrôle visuel est effectué et la maniabilité est jugée par le savoir-faire du technicien.
- Teneur en eau optimale : Une recherche de teneur en eau optimale est faite sur le mélange afin d'obtenir le bon compris liquidité du mélange/compaction.
- Sensibilité à l'eau/Résistance : Aux Etats Unis, une stabilité Marshall est effectuée pour déterminer la résistance R, le fluage Marshall et donc la sensibilité à l'eau. En Chine, l'ITS est privilégié sur des échantillons muris à 60°C pendant 2 jours (correspondant à 7 jours local après application)
- Orniérage : En Chine, un essai d'orniérage avec le "wheel tracking test" est réalisé à 60°C durant 45 à 60 minutes.
- Essai d'arrachement : Cet essai réalisé aux Etats Unis est effectué afin de simuler la résistance à l'arrachement de l'enrobé à l'émulsion pour recyclage en place ou en centrale après un retour prématuré au trafic au jeune âge.

1.1.3.4 Comportement des liants

1.1.3.4.1 Présentation des méthodes d'extraction et distillation des liants

Le liant issu d'un enrobé à l'émulsion est généralement extrait et récupéré de la même manière que celui provenant d'un enrobé à chaud ou tiède, c'est-à-dire suivant les procédures décrites dans les normes [NF EN 12697-1] et [NF EN 12697-3] respectivement. L'extraction consiste à séparer le liant bitumineux de la phase granulaire à l'aide d'un solvant approprié soit à chaud (le solvant est porté à haute température), soit à froid (le solvant est à température ambiante ou légèrement élevée). Une fois le matériau granulaire séparé de la solution de liant, le plus souvent par centrifugation, sa granulométrie peut être analysée ultérieurement par tamisage. Enfin, la quantité de liant est déterminée par différence de pesée ou bien par

récupération du liant et la teneur en liant soluble est calculée. Parmi les procédés d'extraction à chaud, on recense l'extraction automatique (appelée Asphalt analysator ou Infratest), couramment pratiquée par les entreprises routières françaises et décrite dans l'Annexe B.1.2, ou encore la méthode Soxhlet (appelée aussi Kumagawa), présentée dans l'Annexe B.1.3 de la norme. Les procédés d'extraction à froid les plus connus sont la méthode par centrifugeuse à flux continu (cf. Annexe B.1.5 de la norme) et la méthode de Rouen (voir Annexe B.1.6 de la norme).

La récupération du liant est réalisée consécutivement à l'extraction et repose sur une séparation du liant bitumineux du solvant à l'aide d'un évaporateur rotatif, dans des conditions de température et de pression dépendant de la nature du solvant [NF EN 12697-3]. La procédure est scindée en au moins 2 étapes : la première à une température légèrement supérieure à la température d'ébullition du solvant et une pression basse (30-85 kPa), la seconde à une température bien supérieure à la température d'ébullition et une pression encore plus faible (2 kPa). Une troisième phase de chauffage peut être appliquée dans le cas des liants durs. À la fin du procédé, le liant est coulé en vue de sa caractérisation suivant les essais conventionnels (pénétrabilité, point de ramollissement bille et anneau), rhéologiques, physico-chimiques (indices d'oxydation par spectroscopie infrarouge).

L'influence de la méthode d'extraction sur les caractéristiques des enrobés à l'émulsion a fait l'objet d'une étude lors de la coopération entre l'IFSTTAR (aujourd'hui Université Gustave Eiffel), le CEREMA et les entreprises routières [Delfosse et al., 2012]. En l'occurrence, plusieurs laboratoires ont participé à des essais croisés impliquant différentes procédures et différents solvants utilisés sur des formules de graves-bitume (GB) et graves-émulsion (GE) non fluxées et fluxées. Le groupe de travail a considéré l'impact de tous ces paramètres sur la pénétrabilité et le point de ramollissement bille et anneau (TBA) des liants récupérés. Il en a été conclu que :

- Sur une GE fluxée, le procédé d'extraction affecte significativement les propriétés conventionnelles des liants. C'est la méthode à froid par centrifugation à flux continu qui confère un liant plus mou. La procédure de mûrissement et surtout la nature du solvant employé impactent également le liant. Le procédé en présence de perchloroéthylène fournit des résultats plus « fiables », tandis que les liants interagissent probablement avec le dichlorométhane et le toluène
- Sur une GB : l'impact de la méthode d'extraction et de la nature du solvant existent, mais est moins visible que sur une GE fluxée
- Sur une GE non fluxée : les écarts de péné/TBA entre les laboratoires (méthode d'extraction et solvant différents) sont moins élevés qu'avec une GE fluxée
- Sur une GE fluxée non séchée : les valeurs de péné/TBA entre les laboratoires sont assez similaires. Le procédé Kumagawa permettrait ainsi de s'affranchir du paramètre « méthode de séchage » sur les caractéristiques du liant récupéré
- Sur une GE fluxée avec différents types de fluxant : suivant la nature du fluxant, l'influence du solvant est plus ou moins importante. On trouve moins d'écarts en péné/TBA avec le perchloroéthylène, tandis que le toluène et le dichlorométhane font durcir le liant récupéré quand le fluxant est d'origine pétrolière.

1.1.3.4.2 Méthodes de récupération et stabilisation du liant de l'émulsion

Afin de déterminer les caractéristiques du liant résiduel de l'émulsion, il est nécessaire d'avoir recours à une évaporation de la phase aqueuse. Cela est possible en appliquant les procédures de récupération et stabilisation du liant, suivant les normes [NF EN 13074-1] et [NF EN 13074-2] respectivement. La première méthode consiste à étaler l'émulsion sur une plaque de dimensions fixées, puis à la chauffer dans une étuve ventilée à 50 °C pendant 24h. Le récipient peut ensuite être raclé pour récolter le liant résiduel à des fins d'analyse, ou bien être porté à 85 °C pendant 24h supplémentaires pour subir l'essai de stabilisation. À l'issue de ce dernier essai, le liant est récupéré par chauffage et homogénéisation par mélange avant d'être caractérisé.

1.1.3.4.3 Comportement des liants - Suivi de leurs caractéristiques dans le temps

Depuis une quarantaine d'années, les GE et les BBE ont fait l'objet d'études mécaniques et physico-chimiques en laboratoire et sur terrain. Les parties prenantes se sont intéressées aux caractéristiques des liants à différents états de mûrissement, notamment en contexte de recyclage. Dès la fin des années 1980, le procédé Recycold de retraitement en place à l'émulsion, commercialisé par Screg, a été appliqué sur les RN 20 et 88 [Serfass et al., 1993]. À partir de liants extraits des agrégats d'enrobés, l'ajout d'émulsion permet de légèrement ramollir les liants finaux et après 3 à 5 ans de mise en service, les liants durcissent signe qu'un vieillissement in situ s'est produit. D'autres chantiers de retraitement en place, pilotés par Colas, ont été suivis et ont montré qu'après traitement à l'émulsion, la TBA du liant global diminue de 12 °C, et qu'après 4 ans de mise en service de la chaussée, elle augmente de 6°C, correspondant à une diminution de 50 % de l'effet « régénérant » [Lafon et al., 1993].

Les études qui ont suivi se sont plutôt portées sur des enrobés neufs. Ainsi, des expérimentations de GE ont été menées en 1993-1994 sur le manège de fatigue de Nantes, en collaboration avec Screg. Elles visaient à évaluer le comportement de ces GE sous des sollicitations répétées [Serfass et al., 1995]. D'autres travaux ont principalement consisté à déterminer une méthode de mûrissement en laboratoire permettant de reproduire les conditions rencontrées sur le terrain. Ainsi, vers la fin des années 1990, Colas et Screg ont conduit des chantiers de GE et BBE et ont réalisé des carottages à différentes périodes pour récupérer les liants [Serfass et al., 2004]. Plusieurs méthodes de mûrissement accéléré en laboratoire ont été appliquées et il a été conclu que celle à 35 °C et 20 % d'humidité relative fournit une évolution similaire en péné/TBA à celle de la GE extraite du chantier et fabriquée avec le liant 70/100.

Dans le but de mieux comprendre le comportement évolutif des enrobés à l'émulsion, un premier travail collaboratif a été mené dès 2004 au sein de la profession, sous l'égide de l'USIRF (aujourd'hui Routes de France). Ainsi, dans ce cadre, quatre chantiers de GE de classe 0/10 à 0/14 ont été contrôlés sur des durées de quelques mois à presque 10 ans : RD 437, RD 10, RD 79 et RN 126 [Serfass et al. 2004]. Il est conclu des résultats que le revêtement en surface joue un rôle « protecteur » face au vieillissement. Une des explications possibles du vieillissement in situ est le pourcentage de vides, plus important que dans une formule de GB. Une autre hypothèse est la répartition du liant résiduel dans la matrice granulaire, qui va préférentiellement sur les fractions les plus fines, de surface spécifique plus élevée. Cette distribution confère un mortier « souple » et les fractions plus grossières sont moins enrobées et recouvertes d'un film plus mince de liant, d'où une oxydation plus rapide.

Dans ce même contexte collaboratif, des BBE, appliqués sur les RD 15, RD 21 et RD 60, ont également été suivis dans le temps sur les plans mécanique et physico-chimique [Serfass et al. 2010]. Les liants récupérés, initialement de grade 70/100, évoluent vers des grades plus durs. Même après 4 ans, ils continuent à durcir et la cinétique semblerait dépendre du module de richesse[5].

Suite à ce premier travail collaboratif, qui a permis de mieux cerner les enjeux relatifs aux enrobés à l'émulsion, un travail de coopération public-privé, rassemblant l'IFSTTAR (aujourd'hui Université Gustave Eiffel) et le CEREMA avec l'USIRF, a été lancé et s'est centré sur les graves-émulsion sans agrégat d'enrobé. Ainsi, des chantiers de GE ont été réalisés en Haute-Garonne (RD 20, 2006), Ille-et-Vilaine (RD 44, 2008) et Haute-Loire (RD 26, 2011) et suivis dans le temps [Serfass et al. 2018].

Les liants extraits ont été analysés en termes de pénétrabilité et température bille-anneau en fonction du temps et comparés avec ceux des éprouvettes mûries à 35 °C, 20 % HR [Beghin et al., 2012]. Il a été montré que la TBA augmente fortement et la pénétrabilité diminue après 28 jours de mûrissement des corps d'épreuves de laboratoire. D'ailleurs, les caractéristiques des liants après 28 jours sont équivalentes à celle du liant extrait du chantier après 468 jours in situ. Même après 1012 jours de mûrissement réel, les propriétés de consistance du liant continuent d'évoluer.

[5] Module de richesse : Grandeur proportionnelle à l'épaisseur conventionnelle du film de liant enrobant les granulats (Idrrim, 2020a).

Une démarche de suivi a également été mise en place sur la RD 26. Pour ce chantier, l'analyse des liants extraits a été complétée [Valéry et al. 2018] avec des essais rhéologiques et physico-chimiques ont été pour rendre compte de l'évolution avec le mûrissement/vieillissement [Delfosse et al. 2018]. Ainsi, après 10 mois, le liant récupéré passe d'un grade 160/220 à 70/100 et la norme du module à 15 °C augmente de 2 MPa. Après 40-42 mois, le liant atteint un grade 50/70 et la norme du module à 15 °C, 10 Hz est de 11 MPa. D'un point de vue rhéologique, d'autres paramètres ont été considérés, tels que les coordonnées au crossover (G', G'', température, fréquence). Après 40 mois de mise en œuvre de la GE, G', G'' et la fréquence au crossover décroissent et la température de crossover augmente. Ces résultats ont été comparés avec ceux des liants issus d'une formule fabriquée en laboratoire et vieillie à 35 °C, 20 % HR pendant 60 jours. Les caractéristiques du liant à l'échelle du laboratoire correspondent à environ un an in situ. Enfin, une analyse SARA sur les liants a montré qu'au bout de 16 mois de mûrissement, le pourcentage en aromatiques diminue fortement, le pourcentage en saturés reste stable et les pourcentages en résines et asphaltènes augmentent. Après cette période jusque 42 mois, les paramètres se stabilisent. Sur le liant récupéré de la GE fabriquée en laboratoire et mûrie à 35 °C, 20 % HR pendant 60 jours, l'évolution des fractions SARA est moins marquée, les teneurs sont proches de celles obtenues après un mûrissement in situ de moins d'un an.

1.1.3.5 Recyclage et remobilisation du liant vieilli

Les techniques de recyclage et de retraitement à l'émulsion de bitume sont de grand intérêt sur les plans industriel, économique et environnemental. Elles s'inscrivent dans le pacte d'engagement des acteurs des infrastructures de mobilité, en particulier dans l'engagement N°1 de développer des infrastructures bas carbone [IDRRIM, 2021]. En effet, contrairement aux procédés à chaud et tièdes, qui sont limités par des contraintes notamment techniques, les enrobés à l'émulsion peuvent incorporer un fort taux d'agrégats d'enrobés (AE) jusqu'à 100%. Cela est dû au fait qu'il n'est pas nécessaire de chauffer les matériaux granulaires.

1.1.3.5.1 Avantages et inconvénients du recyclage/retraitement à l'émulsion

Les techniques de recyclage/retraitement à l'émulsion présentent de nombreux avantages. L'incorporation d'AE dans les formulations permet d'économiser les ressources naturelles et de favoriser ainsi l'économie circulaire. L'impact environnemental est amélioré, puisque les émissions de gaz à effet de serre diminuent avec l'utilisation d'émulsion. La teneur en liant d'apport peut également être moindre, ce qui garantit un gain financier. Dans le cas du retraitement en place, moins de déchets de chantier sont produits et le coût de transport est réduit, ce qui engendre un gain économique et environnemental. La rentabilité du procédé dépend du taux d'agrégats introduit. Par ailleurs, le retraitement en place à l'émulsion permet un temps de construction plus court, une suppression de surlargeurs de plate-forme et une limitation des travaux annexes (rehaussement des accotements, par ex.). La chaussée est ainsi remise en circulation rapidement, sans causer de gêne majeure aux usagers [Setra, 2003]. Sur le plan technique, le recyclage/retraitement à l'émulsion est employé pour entretenir et renforcer les structures de chaussée [Cardenas, 2013], mais aussi pour restructurer les couches dégradées, retarder les fissures de retrait et traiter le faïençage [IBEF, 2023]. Il améliore l'uni et le profil transversal. L'enrobé recyclé obtenu est souple et, puisque l'AE est introduit à température ambiante, le liant d'AE conserve mieux sa souplesse et son adhésivité [IDRRIM, 2020a].

Cependant, il est rapporté dans la littérature que le retraitement en place à l'émulsion n'est pas adapté à toutes les chaussées, notamment celles orniérées en raison d'une teneur élevée en liant, celles présentant des défauts en couche inférieure ou du désenrobage de liant [Modarres et al., 2014]. En outre, quelques freins subsistent au recyclage à 100 % des AE dans les enrobés à l'émulsion, notamment le manque de spécifications techniques bien établies et la méfiance des agences d'administration des routes sur son déploiement à grande échelle [Grilli et al. 2018]. Les techniques de recyclage/retraitement à l'émulsion ne sont pas conseillées pour des températures faibles (< 10 °C) ou par temps pluvieux. Des fissures

longitudinales peuvent survenir si les bandes adjacentes ne sont pas correctement reliées [ARRA, 2001]. Les enrobés recyclés à l'émulsion ne supportent pas les trafics élevés [Ma et al. 2015], montrent une faible cohésion au jeune âge, de la fissuration et un temps de mûrissement élevé [Modarres et al. 2014]. Leur maniabilité diminue et leur compactage est à adapter, en particulier à fort taux d'AE [IDRRIM, 2020a]. La surface spécifique des AE est plus petite que celle des granulats contenus dans ceux-ci ; par conséquent, le collage du liant de l'émulsion est moins bon.

1.1.3.5.2 Taux d'AE admis et Influence des AE sur les propriétés des enrobés recyclés à l'émulsion

Le pourcentage de recyclage rencontré sur chantier dépend du matériau formulé. Quand le taux d'AE est inférieur à 20 %, les propriétés des enrobés recyclés à l'émulsion sont équivalentes à celles des enrobés neufs et la formulation est à adapter légèrement ; et lorsqu'il est supérieur à 20 %, les propriétés varient : la qualité d'enrobage s'améliore quand la part d'AE augmente. Dans le cas des bétons bitumineux à l'émulsion, lorsque le pourcentage d'AE dépasse 20 %, les granulats des AE doivent avoir de bonnes propriétés d'adhérence [IDRRIM, 2020a]. Dans les graves-émulsion structurantes, le pourcentage d'AE est compris entre 10 et 100 %, avec des résultats sur chantier satisfaisants même à fort taux de recyclage. En revanche, pour les graves-émulsion destinées au reprofilage, il est inférieur à 50 % car l'effet de l'ajout d'AE sur la maniabilité est défavorable. De plus, des échecs sur chantiers de GE ont été observés avec une part d'AE supérieure à 50 %. Les BBE avec 100 % d'AE appliqués sur chantier ont révélé un comportement globalement satisfaisant, mais dépendant de la qualité des AE [IDRRIM, 2020a].

L'ajout d'AE impacte les propriétés finales de l'enrobé recyclé à l'émulsion. En particulier, le pourcentage d'AE, son origine, son état de vieillissement, sa granulométrie, son homogénéité, la nature et la teneur en liant vieilli jouent un rôle important sur les caractéristiques finales de l'enrobé recyclé. Il est couramment admis que le recyclage/retraitement à l'émulsion améliore les propriétés mécaniques de l'enrobé, et ce en raison de l'effet des propriétés du liant vieilli [IDRRIM, 2020a]. Cependant, des études ont montré des résultats disparates en termes de tenue à l'eau [Khalid et al. 2009], ductilité et résistance en traction [Ouyang et al. 2021]. Dans un travail de recherche [Grilli et al. 2018], des enrobés à l'émulsion contenant 0, 50 et 80 % d'AE et 1 à 2 % de ciment ont été testés. La teneur en AE a un impact peu significatif sur la résistance en traction indirecte. Le paramètre traduisant la tenue à l'eau, l'ITSR, reste élevé (>80 %), mais est inférieur à celui de l'enrobé de référence sans AE, et est maximal à 80 % d'AE quand le pourcentage en ciment est de 2 % en masse. Le module résilient des enrobés recyclés est plus faible que celui de l'enrobé de référence sans AE, et il diminue avec l'augmentation de la teneur en AE. Les auteurs attribuent ce dernier résultat aux propriétés mécaniques de l'AE qui sont médiocres. [Todd et al. 2007] ont également prouvé que le module dynamique d'un revêtement retraité en grande épaisseur avec de l'émulsion (full-depth reclamation) dépendait du pourcentage d'AE. [Ojum et al. 2017] ont trouvé que les propriétés anti-fatigue des enrobés recyclés à l'émulsion sont satisfaisantes quand les AE introduits dans la formulation sont moyennement vieillis, en comparaison avec des enrobés recyclés contenant des AE fortement vieillis. Enfin, [Zhu et al. 2019] ont confectionné des enrobés recyclés différant par leur distribution granulaire. Ils ont constaté qu'une formule avec une courbe granulométrique plus fine a de meilleures propriétés mécaniques.

1.1.3.5.3 Règles de mélanges utilisées dans la formulation et choix du liant

Pour un enrobé recyclé à chaud, des lois de mélange sont appliquées. Elles font intervenir les caractéristiques conventionnelles des liants d'apport et d'AE, les teneurs de ces liants et le taux de recyclage. Les développements mathématiques permettant de calculer la consistance du liant final sont de type logarithmique pour la pénétrabilité et linéaire pour la TBA. Celles-ci sont valables si la remobilisation est totale, ce qui n'est probablement pas le cas pour le procédé à l'émulsion.

Pour un enrobé recyclé à l'émulsion de bitume, un des modèles admis est celui du « black rock » : l'agrégat est considéré comme un granulat car on suppose que le liant vieilli qui l'entoure n'est pas remobilisé. Par conséquent, on ne comptabilise pas sa teneur dans la formulation de l'enrobé recyclé. La teneur en liant d'apport sera dont proche de celle choisie pour un enrobé sans AE. Ce n'est cependant pas l'approche

toujours choisie. La teneur en liant d'apport trouvée dans la littérature est d'environ 3 % de liant résiduel, soit 5 % en masse d'émulsion, c'est-à-dire environ 2 % de moins que lors d'une utilisation en enrobé neuf et en couche de surface [Ojum, 2015]. Elle peut même être ramenée à 1-2,5 % si la couche de chaussée concernée est épaisse (couches d'assise). C'est d'ailleurs la gamme de teneurs choisie lors d'un retraitement en place de classes II et III, tel que préconisé dans le guide du [SETRA, 2003] pour des épaisseurs de 5 à 12 cm. De façon courante, la teneur en liant total est d'abord sélectionnée, puis la teneur en liant d'apport est calculée en soustrayant la teneur en liant de l'AE et en considérant le taux de recyclage, de la même manière que dans un enrobé recyclé à chaud avec remobilisation totale du liant d'AE. Suivant les caractéristiques du liant d'AE, un régénérant peut être ajouté [Jain et al. 2021]. D'autres études font appel à d'autres approches plus empiriques pour déterminer dans un premier temps la demande initiale en liant, puis à des essais d'enrobage et des méthodes volumétriques/de compactage pour optimiser les teneurs en liant résiduel et eau totale.

Lors de la formulation des enrobés recyclés à l'émulsion, un bitume d'apport de grade 70/100 ou 160/220 est généralement requis, en particulier lorsque le taux d'AE et le niveau d'oxydation du liant vieilli sont élevés. Un grade 50/70 ou 35/50 est plus rarement sélectionné [Ojum, 2017]. La consistance du liant d'apport reste donc la même que dans un enrobé neuf. La consistance du liant d'AE ne doit pas être trop importante afin que celui-ci soit « remobilisable » (i.e. pénétrabilité > 10 1/10 mm). Le liant d'apport est choisi pour restaurer les caractéristiques du liant d'AE. Ainsi, l'émulsion doit satisfaire les critères d'enrobage et de vitesse de rupture. Elle est formulée suivant l'état de surface et la granulométrie de l'AE. Le plus important est que sa viscosité soit faible pour faciliter son étalement sur la surface granulaire vierge et enrobé (pour les AE). Lors d'un retraitement en place, l'émulsion peut être régénérante si le matériau à traiter est « noir », ou d'enrobage spécifique si ce matériau est « blanc » [IBEF, 2023].

1.1.3.5.4 Remobilisation du liant vieilli - Miscibilité des liants de l'AE et du liant d'apport

La problématique de la remobilisation du liant vieilli recouvrant les AE se pose. En effet, dans le cas des procédés chaud et tièdes, l'apport de température favorise la miscibilité à minima partielle des liants neuf et vieilli [NGuyen, 2013 et Vassaux, 2017]. En procédé à froid, l'enrobage est réalisé à basse température ; les deux liants ne se mélangent donc pas, a priori.

Très peu d'éléments figurent dans la littérature sur ce sujet. Une étude datant de 1993 [Bicheron et al, 1983] affirme qu'un phénomène de double enrobage se produit à court terme : le liant neuf se superpose au liant vieilli. En revanche, la miscibilité entre les liants pourrait avoir lieu à long terme. La question de la remobilisation a également été traitée dans le cadre du projet SCORE par des essais de rhéologie en cisaillement (DSR) sur des bicouches bitume mou/bitume dur et bitume dur/huile [Walter et al. 2006]. D'après les résultats, la diffusion constatée sur le bicouche bitume mou/bitume dur dépend de la température et est également tributaire de l'épaisseur du film de liant.

1.1.3.5.5 Régénération du liant vieilli

Sur le plan industriel, un fluxant d'origine pétrochimique ou agrochimique est parfois ajouté dans le bitume utilisé dans l'émulsion pour tenter une remobilisation du liant d'AE [IDRRIM, 2020a]. L'utilisation de régénérants dans les enrobés à l'émulsion a fait l'objet de plusieurs recherches techniques et scientifiques. Dans le cadre du projet SCORE, une huile régénérante mise en émulsion a été pulvérisée sur des agrégats issus d'un hot rolled asphalt. Aucun changement d'aspect n'a été constaté, mais un effet a été détecté lors du compactage. Après un essai à la presse à cisaillement giratoire sur les AE, le volume de vides dans le squelette minéral (VMA) décroît quand la teneur en huile augmente, et cette baisse est significative jusqu'à 0,2 % d'huile. Au-delà, le VMA reste assez stable. L'impact de la nature de l'huile est moins marqué. Un temps de maturation long n'a pas d'impact négatif sur le compactage. Cependant on peut noter que la régénération dépend de l'AE, en particulier du granulat d'origine, de sa teneur en liant et de la consistance du liant [Walter et al. 2006].

Dans une autre étude, un agent de recyclage issu de ressources renouvelables a été introduit dans une émulsion en vue du recyclage en place d'une RD en couche de roulement [Durand et al. 2022]. Les

caractéristiques conventionnelles et rhéologiques du liant issu de l'AE, de celui extrait de l'enrobé recyclé le jour de l'opération de recyclage ont été suivies. Les résultats ont montré qu'au jour J et 17 jours après le recyclage en place, la pénétrabilité croît et la TBA chute par rapport aux valeurs du liant d'AE. Après un an, l'évolution des caractéristiques conventionnelles s'inverse, mais le liant final reste légèrement plus mou que celui de l'AE initial. D'un point de vue rhéologique, la norme du module complexe diminue et l'angle de phase augmente au jeune âge, confirmant ainsi le ramollissement du liant. Après un an, la tendance s'inverse : le liant a des caractéristiques comprises entre celles du liant extrait d'AE et celles du liant récupéré à J0. Ainsi, l'effet régénérant s'estompe avec le temps, la contribution du régénérant n'est probablement plus visible et les caractéristiques finales sont plutôt attribuées à l'émulsion seule (grade mou du liant).

1.1.4 Mise en œuvre et moyens d'applications

1.1.4.1 Introduction

Pour la grande majorité des technologies concernées, l'enrobé est épandu, réglé et compacté à température ambiante. Pour les cas particuliers de pré-enrobage à chaud par exemple, la température reste très modérée, de sorte que l'eau ne s'évapore pas lors de la mise en œuvre. Compte tenu du rôle important du départ de l'eau dans le comportement du mélange et son mûrissement, il convient d'arrêter la mise en œuvre ou de reporter les chantiers dès que les conditions météorologiques deviennent défavorables. Ainsi, la fabrication des enrobés à l'émulsion doit être interrompue par temps de pluie ou lorsque la température sous abri est inférieure à 5°C. La mise en œuvre et les moyens d'application sont très spécifiques en fonction du type de produit.

1.1.4.2 Graves-émulsion

La grave-émulsion est répandue au finisseur, à la niveleuse ou au finisseur d'intervention rapide (FIR) selon le domaine d'application. Les performances mécaniques de la grave-émulsion sont étroitement liées au niveau de compacité. Il est recommandé d'utiliser un atelier de compactage mixte, comprenant un tandem vibrant VT1 ou VT2 et un compacteur à pneus (charge min 3t/roue à 0.7MPa) ou bien un compacteur mixte. Pour les GE et BBE (voir paragraphe suivant), on se réfèrera à la notice de mise en œuvre du fournisseur pour définir les conditions de collage. Elle s'imposera dans certaines techniques d'autant plus que l'épaisseur de la couche sera faible et que la teneur en liant sera faible.

1.1.4.3 Bétons bitumineux à l'émulsion

Pour une application en couche de roulement, les BBE sont mis en œuvre à l'aide d'un finisseur. En fonction des déformations du support, un reprofilage est préférable pour limiter les tassements différentiels. Une table HPC (Haut pouvoir de compactage) est à favoriser dans le cas de certains enrobés de couche de roulement. Pour des applications spécifiques de reprofilage le FIR peut être également utilisé. Dans de rares cas, le finisseur peut être utilisé par demi chaussée et nécessite d'avoir une circulation alternée. Comme pour les GE, les performances mécaniques de la couche de surface dépendent fortement du niveau de compacité. Les procédures de compactage diffèrent entre les entreprises en fonction des procédés de fabrication et des formulations. Dans de très nombreux cas, il est souvent fait usage de cylindres travaillant en lisse avec de la vibration éventuellement avant d'utiliser un compacteur à pneus.

1.1.4.4 Enrobés à l'émulsion retraités en place

Le choix de matériels adaptés au cas de chantier à réaliser est très important pour la réussite de l'ouvrage. De nombreuses avancées ont eu lieu ces dernières années chez les constructeurs de matériels. Ces matériels de retraitement sont classifiés en fonction de 5 critères notés de 3 à 1 regroupés sous le coefficient HEPIL :

- H : qualité d'Homogénéisation du matériau avec l'émulsion suivant que le matériel dispose ou ne dispose pas d'un malaxeur associé au rotor de fragmentation
- E : maîtrise de l'Epaisseur de retraitement de la chaussée
- P : Puissance disponible pour fragmenter l'ancienne chaussée
- I : présence d'un dispositif d'Injection de l'eau
- L : dosage en Liant sous forme liquide

Le mode d'exécution des retraitements en place ne permet pas de réaliser la mise en œuvre de la couche d'accrochage avec une épandeuse. Selon le % d'agrégats d'enrobés une attention sur le collage est à justifier en ajustant la technique d'exécution : formulation, process… (guide technique du Setra d'août 2020). Ces matériaux nécessitent une énergie de compactage élevée. La procédure de compactage sera fonction de nombreux paramètres : épaisseur, type de retraitement, …Pour les classes I à III, par exemple des compacteurs vibrants de la classe V2 ou V3 sont utilisés dans un premier temps avant de faire passer un compacteur à pneus de la classe P1 ou P2. Des compacités comprises entre 13 et 19% sont mesurées.

Pour ces différents procédés, dans le cas où un enrobé doit être mis au-dessus, un temps de mûrissement est couramment appliqué pour favoriser le mûrissement et l'évaporation de l'eau. Ce temps de mûrissement est fonction des conditions climatiques qui suivent la mise en œuvre du retraitement, du trafic que sollicitera la couche et de son évolution au tout jeune âge : un temps de 2 à 3 semaines est couramment observé. Dans certains cas (GE et enrobés recyclés en place), un enduit superficiel de scellement, faiblement dosé (pour ne pas trop ralentir le départ de l'eau lors du mûrissement), peut être ajouté après la mise en œuvre pour faire office de couche de roulement provisoire.

1.1.5 Dimensionnement des structures incorporant des mélanges à l'émulsion et modélisation

1.1.5.1 Règles de dimensionnement

Le dimensionnement rationnel (ou semi-empirique) d'une chaussée routière est basé sur le principe suivant : la valeur des sollicitations au sein des différentes couches constitutives de la chaussée doit demeurer inférieure à celle des sollicitations admissibles correspondantes.

Les sollicitations au sein de la chaussée sont calculées en assimilant la structure à un modèle multicouche, le modèle de [Burmister, 1943]. Les données d'entrée nécessaires à ce calcul sont les suivantes : le module de rigidité des différentes couches de matériaux, la qualité de l'interface entre les couches, l'épaisseur de chaque couche et la portance de la plateforme support. Le logiciel qui permet d'effectuer ce calcul a été développé par le LCPC et est disponible sous le nom d'Alizé.

Les lois d'endommagement s'expriment selon le formalisme de Wöhler. Les valeurs de leurs paramètres descriptifs découlent d'essais en laboratoire pour les matériaux liés, et des retours d'expérience pour les plateformes. Le modèle comporte une composante probabiliste à travers le choix du risque de dégradation structurelle acceptée à l'issue de la durée de service. Il comporte également une composante empirique à travers ses coefficients de calage assurant l'ajustement entre les comportements théoriques prévus par le modèle, et les retours d'expérience reflétant les comportements réels observés sur les chaussées en service.

Les sollicitations admissibles qui en découlent sont : la déformation verticale pour les matériaux non liés et la déformation ou la contrainte horizontale en traction par flexion pour les matériaux liés.

Le logiciel Alizé bien que largement utilisé, n'est pas l'unique moyen de concevoir une structure de chaussée correctement dimensionnée. Il existe de nombreux catalogues et guides nationaux ou locaux (Catalogue [Scetauroute, 1997]) qui permettent par l'intermédiaire d'abaques (généralement construites par calcul) d'aboutir rapidement à une solution basée sur certaines données d'entrée (trafic, portance du sol support et type de matériaux envisagés).

Compte-tenu de l'état des connaissances concernant les graves-émulsions, aucune vérification liée à la déformation horizontale en traction par flexion n'est effectuée sur le matériau. La grave-émulsion sera modélisée dans le modèle de Burmister [Burmister, 1943] par le biais d'une couche dont le module sera fixé pour toute la durée de service. Le seul critère de vérification qui sera pris en compte sera celui lié à la plateforme support : la déformation verticale au sommet de la plateforme (dans le cas où aucune autre couche de matériaux liés n'est présente dans la structure). Dans la pratique, les épaisseurs de grave-émulsion sont donc choisies a priori en leur attribuant un module non évolutif puis une vérification sur la plateforme support est effectuée (associée éventuellement à une vérification sur l'enrobé de la couche supérieure). Cette vérification est finalement celle d'une chaussée souple.

Un synoptique détaillé des critères à retenir en fonction du contexte est disponible dans l'ouvrage [SFERB, 2006] intitulé « les émulsions de bitume » édité en 2006 par la Section des Fabricants d'Emulsion Routière de Bitume (SFERB) de l'USIRF aujourd'hui Routes de France et repris récemment dans le guide des enrobés à l'émulsion fabriqués en usine.

La déformation verticale admissible (ε_z) du sol support est alors calculée en utilisant les relations suivantes (avec NE qui est le nombre de passage de l'essieu de référence (essieu de roues jumelées chargé à 130 kN) cumulé sur la durée de vie considérée) :

$$\text{Fort trafic (NE} > 250\,000) : \varepsilon_z = 0{,}012 \times NE^{-0.222}$$

$$\text{Faible trafic (NE} \leq 250\,000) : \varepsilon_z = 0{,}016 \times NE^{-0.222}$$

$$\text{Renforcement chaussées souples} : \varepsilon_z = 0{,}0225 \times NE^{-0.244}$$

Les modules attribués à la grave-émulsion dans la norme [NF P 98-121] (annulée le 15 mai 2020) sont attribués selon le type « structurant » soit de classe 1 (≥ 1500 MPa), soit de classe 2 (≥ 2500 MPa) pour les l'essai de module complexe retenu (NF EN 12697-36A et 26/C). Il n'y a pas d'attribution pour la grave-émulsion de reprofilage. Dans la nouvelle norme [EN 13108-31], les modules ne sont plus indiqués de manière explicite mais sont utilisés pour catégoriser les graves-émulsion.

Concernant les guides qui abordent l'utilisation de la grave-émulsion, on peut faire référence au manuel de dimensionnement des chaussées neuves à faible trafic paru en 2020 [IDRRIM, 2020b]. Dans ce guide, la présence de grave-émulsion est actée dans la catégorie chaussée souple. L'abaque correspondant a été établi sur la base d'une grave-émulsion de type S et de classe 2 à laquelle un module de 2500 MPa a été attribué.

A ce stade, pour le dimensionnement, on considère donc que la grave-émulsion n'est pas un matériau évolutif (le module de rigidité est considéré comme constant) et qu'il ne travaille pas en fatigue (pas de critère de ruine sur ce dernier).

1.1.5.2 Modélisation du comportement mécanique

La méthodologie suivie actuellement pour dimensionner les graves-émulsion est extrêmement réductrice et ne prend pas véritablement en compte le comportement réel de ce matériau. Toutefois, la prise en compte des caractéristiques réelles des graves-émulsion se heurte à la complexité de leur comportement.

De nombreuses études ont été menées sur le sujet et il est totalement acquis que le module d'une grave-émulsion est évolutif dans le temps. Les caractéristiques des graves-émulsion évoluent par mûrissement (qui lui-même dépend des conditions environnementales du chantier et de la formulation) et par consolidation sous trafic. Au départ, leur comportement est proche de celui des GNT au jeune âge pour atteindre celui des matériaux à chaud à un stade de mûrissement total. Le mûrissement ne se développe pas de manière linéaire dans le temps : s'il est en général important pendant les premiers mois, l'évolution pourra être plus lente durant les 2 à 3 années suivantes. La consolidation sous trafic ne se développe pas

de manière homogène sur toute l'épaisseur de la couche de grave-émulsion : les effets du trafic se font plus sentir sur la partie supérieure. De plus, le gradient de compacité (qui entraine un gradient de module) dépend de la rigidité du support. L'évacuation de l'eau est aussi facilitée dans la partie supérieure de la couche (le rechargement ayant lieu majoritairement sur des structures anciennes constituées d'une succession de couches étanches). Les observations in-situ montrent d'ailleurs que les graves-émulsion sont généralement plus cohésives dans la partie supérieure et bien moins dans la partie inférieure.

A l'énumération de l'ensemble de ces points, on se rend compte que la prise en compte d'un module de rigidité évolutif n'est pas si triviale. La formulation de la grave-émulsion, son environnement et les sollicitations auxquelles elle est soumise, entrainent des évolutions propres à chaque contexte. Une fois ce point levé, la prise en compte dans le dimensionnement d'un gradient de module dans la couche de grave-émulsion est possible en séparant la couche en plusieurs sous-couches. Il est aussi envisageable de travailler par phase pour incorporer un module évolutif en utilisant ensuite les lois de Miner (cumul du dommage). Toutefois, on peut s'interroger sur le bien-fondé du cumul de dommages à ce stade puisque le matériau ne s'endommagera sans doute pas de la même façon au cours de ces différentes phases de vie.

Concernant le critère de ruine des graves-émulsion, la question bien qu'étudiée, reste pour le moment sans véritable réponse. Les essais traditionnellement effectués sur les matériaux à chaud sont difficilement transposables sur les graves-émulsions (fragilité et faible résistance au cisaillement au jeune âge). Sont-ils aussi véritablement pertinents compte-tenu du comportement de ces dernières ? Il existe un réel besoin de comprendre quelles sont les conditions qui entrainent la ruine des graves-émulsion. Sans cette compréhension, aucun essai permettant de dégager des critères de durabilité à long terme des graves-émulsion ne pourra être établi afin de développer une méthode de dimensionnement rationnelle adaptée à ce type de matériau.

Différents travaux ont été ou sont actuellement menés pour tenter de répondre à la problématique de la modélisation du comportement mécanique des graves-émulsion.

La thèse de M. Lambert [Lambert, 2018], réalisée en collaboration entre Routes de France, l'Université Gustave Eiffel (ex IFSTTAR-LCPC) et l'Université de Limoges, a permis d'avancer sur le sujet du dimensionnement dans une approche rhéologique des grave-émulsions. Son objectif consistait à développer un modèle générique évolutif pour enrobé bitumineux à l'émulsion de bitume ainsi qu'un essai de caractérisation de type œdométrique pour mesurer, du point de vue mécanique, l'évolution du comportement du matériau en fonction du temps de son état frais à un état muri et alimenter par des résultats expérimentaux la loi de comportement. Ainsi un modèle à une dimension a été conçu pour rendre compte d'une évolution continue entre :

- un comportement de type élastique non linéaire, caractéristique des graves non traitées et donc représentatif a priori des graves émulsions au très jeune âge.
- et un comportement de type thermo-viscoélastique linéaire, représentatif du comportement des enrobés et donc des graves-émulsion à l'état mûri.

Ces différents comportements devant être pris en compte dans une future méthode de dimensionnement.

Cette thèse a été suivie par un projet de recherche (entre Routes de France et l'Université Gustave Eiffel) à caractère plus expérimental en laboratoire [Thiriet, 2021] (2019-2021) et sur site réel (2022-2023) avec la réalisation d'un démonstrateur de 50 m de long constitué de plusieurs planches expérimentales en grave-émulsion soumises au temps et aux sollicitations périodiques des machines FABAC de l'UGE. Cette dernière expérimentation vise à apporter des éléments complémentaires sur le comportement de structures routières et des mélanges qui les composent dans des conditions mécaniques variables pouvant aller jusqu'à leur ruine. Il s'agit de quantifier les valeurs de modules équivalents obtenus par calcul inverse des données expérimentales (bassins de déflexion et signaux de l'instrumentation in situ) et de les comparer aux valeurs attendues mesurées en laboratoire à partir des prélèvements du chantier ainsi que des éprouvettes mûries en laboratoire étudiés durant la thèse d'Amélie Thiriet [Thiriet, 2021]. Il s'agit ensuite de mener jusqu'à la rupture certaines sections du démonstrateur par un grand nombre de chargements

FABAC afin de déterminer le(s) principal(ux) mode(s) d'endommagement des structures de chaussées avec GE. L'analyse devra notamment déterminer quels sont les matériaux les plus soumis à dommage, ceux-ci n'étant pas nécessairement la GE.

De plus, SPIE Batignolles Malet, en partenariat avec le Cerema et l'UGE, a réalisé des planches expérimentales sous machines FABAC, une qui concernait un produit mixte (Ecomix) et l'autre une GE structurante. Ces planches ont fait l'objet d'un suivi poussé avec de nombreux essais (portance du support, suivi continu en déflexion et température, suivi météorologique, détermination des performances mécaniques des différents matériaux), qui ont permis d'approfondir la connaissance du mode d'endommagement des mélanges à l'émulsion et de dégager une méthode et des paramètres de dimensionnement. La méthode de calcul développée se réalise en 2 étapes (i) une première phase avec un matériau traité à l'émulsion ou au liant mixte rigide qui reprend les efforts en extension par flexion jusqu'à la ruine, et (ii) une seconde étape avec un matériau à l'émulsion ou au liant mixte ruiné (module divisé par 4) et un support plus fortement sollicité développant un orniérage par cumul de déformation permanente. Cette méthode a conduit à l'adoption, d'un comportement à la fatigue très supérieur pour ces matériaux à celui d'une GB classique et d'un critère de déformation verticale admissible εz,adm très supérieur à celui retenu habituellement (adaptation du coefficient A). La prochaine étape consiste à confronter cette nouvelle méthode de calcul sur d'autres chantiers afin d'apprécier sa fiabilité à long terme, en prenant notamment en compte la capacité d'autoréparation des mélanges à l'émulsion sous des températures élevées.

Enfin deux autres projets associés à ce type de matériau à l'émulsion de bitume peuvent compléter ces références : il s'agit de l'expérimentation Grave Mousse sur le manège de fatigue du LCPC (UGE) en 1996 [Goacolou et al., 1996] et le suivi (veille technique) sur une dizaine d'années de chantiers Recyclovia® (retraitement en place des chaussées de classe I, II et III) dans le cadre de l'appel à innovation routière lancé en 2008 par le ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire [Eckmann et al. ,2017].

L'approche expérimentale grave mousse sur le manège de fatigue réalisée en 1996 s'est accompagnée d'essais en laboratoire relativement complets avec mesure des modules complexes, détermination d'une courbe maitresse du matériau et l'évaluation des caractéristiques de résistance en fatigue suivant l'essai en flexion deux points du référentiel français. Cette expérimentation a montré qu'un comportement en fatigue des graves à la mousse de bitume était mesurable en laboratoire avec une valeur d'Epsilon_6 de l'ordre de 90 microdéformations et un module de 5500 MPa à 15°C - 10Hz. Les essais sur le manège ont démontré la bonne tenue de ces matériaux notamment vis à vis de l'orniérage en comparaison d'une grave bitume standard (8 cm pour la GB et 10 cm pour les GM et GE) et d'une grave-émulsion.

Le suivi des sections Recyclovia® incluant des retraitements de classe I, II et III à la mousse de bitume ainsi qu'à l'émulsion de bitume a permis de mettre en évidence certaines caractéristiques de ces matériaux et en particulier les paramètres mécaniques qui pourraient être utilisés dans le cadre de la méthode de dimensionnement rationnelle française. Les principaux résultats de cette étude ont mis en évidence le mûrissement des Recyclovia® à la mousse et à l'émulsion (augmentation dans le temps des modules de rigidité) avec un plateau atteint après environ une à deux années et des modules dépendants du type de retraitement (classes I, II ou III) et de la portance du support. La plage des rigidités retenues à 15°C – 10Hz après un an s'étend (selon les paramètres énoncés précédemment) de 3000 à 4500 MPa. Un modèle de dimensionnement en deux phases a été proposé intégrant un comportement en fatigue lors de la 1ère phase puis une deuxième phase de rupture du matériau avec calcul des dommages sur le support et les matériaux sus-jacents. Ces huit chantiers Recyclovia® ont contribué à fixer une valeur réaliste d'Epsilon_6 permettant une bonne adéquation entre le modèle et les observations sur différents sites.

En résumé, des études à tendance plus théorique ont permis de définir et de lier deux périodes de vie de la grave-émulsion. Les études à caractère plus expérimental ont contribué à mieux comprendre le comportement sous sollicitation des graves-émulsion jusqu'à la ruine au travers des mesures de variations de module de rigidité des matériaux. Ceci permettant de mieux apprécier les modes d'endommagement et

ainsi de construire un premier scénario de dimensionnement. Toutefois cette ébauche ne prend pas forcément en compte les résultats obtenus lors de la première étude et doit être éprouvée sur d'autres sites.

1.1.6 Retour d'expériences et comportement sur site

Malgré les avantages économiques et environnementaux, l'usage des techniques à l'émulsion a longtemps été associé à des opérations de maintenance visant à reprofiler et recharger des chaussées à faible trafic. Des développements récents ont permis de mettre en avant l'apport structurel pour les GE et BBE permettant d'ouvrir le domaine d'application à des trafics modérés voire élevés. Les développements les plus significatifs s'appuient sur des suivis de l'évolution in situ de ces matériaux par des auscultations externes mais aussi internes à la chaussée via une instrumentation appropriée. Ces suivis sont souvent associés à une évaluation de leur comportement en laboratoire menant à des méthodologies d'étude et de dimensionnement en passant notamment par des démonstrateurs sous simulateur de trafic.

1.1.6.1 Retour d'expériences à l'échelle nationale

Des expérimentations menées dès 1993 sur le manège de fatigue de l'UGE avaient déjà mis en évidence la bonne tenue d'enrobés à l'émulsion sous un grand nombre de chargements [Serfass et al., 1995]. Plus tard, un projet commun à plusieurs entreprises s'est appuyé sur la réalisation en parallèle du suivi en place de sections routières et de l'évaluation en laboratoire des performances des matériaux utilisés [Serfass et al., 2010]. Trois sections de GE ont ainsi été construites en 2004 :

- RD 437 (Jura), Septembre - Trafic T4. Climats altitude hivers très froid (jusqu'à -25°C) granulats Porphyre (0/10). Epaisseur 5cm. Recouvert d'un BBTM à 1 an
- RD 10 (Corrèze) Mars – Trafic T4. Climat continental. Zones ombragées. Granulats Gneiss Leptynique (0/14). Epaisseur 6-10 cm. Non revêtue.
- RD 79 (Dordogne) Juin – Trafic T4. Climat océanique. Granulats Diorite (2/6) Amphibolite (6/10). Epaisseur 5-10cm. Enduit de scellement (4/6) peu de temps après mise en œuvre.

Le suivi a duré pendant 5 ans et a permis de constater un comportement d'ensemble excellent, hormis quelques arrachements en zone ombragé sur le RD10 nécessitant une réparation et quelques faïençages en rive pour le RD79 correspondant à de très faibles épaisseurs.

Selon la même approche, trois sections de béton bitumineux à l'émulsion (BBE) ont été mises en œuvre en 2005 [Serfass et al., 2011]:

- RD 15 (Corrèze) : Juillet - Trafic T3. Climats continental – granulats Gneiss Leptynique (0/6)
- RD 60 (Cantal) : Juillet. Trafic T4. Climat : altitude, hivers froid – granulats basalte (0/10)
- RD 21 (Finistère) : Septembre. Trafic T4. Climat : océanique tempéré. Granulats Gneiss (0/10)

Les épaisseurs mise en œuvre varient entre 3 et 6 cm, avec une couche d'accrochage systématique. Ces chantiers ont été suivis pendant 5 ans. Dans l'ensemble les sections ont été jugées en bon état général malgré quelque départ de gravillons localisés et des fissures longitudinales en rives inhérentes au support (correspondants à des élargissements).

Le développement des bétons bitumineux avec 100% d'agrégat d'enrobé a fait l'objet d'un suivi de chantiers réalisés à Lamasquère (31) en 2010 dans le cadre du projet européen TRACC [Liffraud et al., 2011]. Le comportement après 3 ans de suivi s'est avéré très satisfaisant pour ces sections qui n'ont pas été recouvertes en 2023.

A la suite de ces importantes recherches menées, par ces entreprises et par le réseau scientifique et technique visant à poursuivre la veille technologique sur ces produits et à étudier leur comportement dans

le temps, une coopération public-privé a permis d'unir les efforts des acteurs de la profession dans une recherche commune consacrée aux GE.

Trois sections de GE, choisies pour représenter à la fois des climats et des granulats différents ont été construites et suivies [De La Roche et al., 2012] :

- RD 20 (Haute-Garonne) : octobre 2006 – trafic T2. Etés chauds, hivers doux – granulats alluvionnaires de Garonne semi-concassés
- RD 44 (Ille-et-Vilaine) : juillet 2008 – trafic T3. Climat océanique (humide et doux) – granulats de roche massive dure (cornéenne)
- RD 26 (Haute-Loire) : juin 2011 – trafic T4. Climat montagnard (altitude 1200m, hivers rudes, enneigés et ventés) – granulats de roche massive (basalte)

Par ailleurs plusieurs initiatives locales ont été menées. On peut citer d'abord les travaux du Cerema Ouest qui a expérimenté des structures instrumentées à base de Grave Emulsion (11+10cm) sous Trafic T0 dans le cadre d'un programme de recherche de l'IFSTTAR en 2015. Une planche de référence en Grave Bitume de même épaisseur a également été suivie dans les mêmes conditions ainsi qu'une autre planche fusible car volontairement sous dimensionnée avec une couche de 10 cm de GE. Des déformations sont apparues prématurément (après 2 à 3 ans) sur cette planche fusible mais également quelques amorces de dégradations au droit des capteurs sur la GE (11+10 cm). Elles ont donc été reprises en 2018.

Ensuite une expérimentation menée dans le cadre d'une charte innovation route et rue [Odeon et al., 2021] a permis de comparer en 2018 les comportements de structures à base de GE de 9cm avec une autre en Grave Bitume d'épaisseur équivalente (recouvertes dans les deux cas d'un Béton Bitumineux Mince). Ces différentes structures ont été soumises à des sollicitations via le simulateur de Trafic FABAC ce qui a conduit à la ruine de la chaussée en GE après 570 000 passages de l'essieu de référence est équivalente à environ 30 à 35 ans de durée de vie sous circulation T3 (avec CAM = 0,5).

Un autre chantier a été réalisé pour le compte du CD 33 en 2016. Une section standard avec 16cm de grave bitume, dimensionnée pour un trafic TC3 (150 PL/j/sens) est comparée à des sections avec des GE type S2 0/14 d'épaisseur « équivalente », « sous dimensionnée » (12cm et 14cm) ou « sur dimensionnée » (18cm). Ce chantier fait l'objet d'un suivi par le CEREMA des déformations en fond de couche via une instrumentation in situ, couplée à des mesures de déflexion ainsi que l'évolution des modules (carottages) et du liant extrait. En 2023, la planche fusible largement sous dimensionnée à 12 cm de GES n'a toujours pas montré de signes particuliers de fatigue.

D'autres expérimentations ont eu lieu de façon isolée permettant de conforter la bonne tenue dans le temps de ces revêtements en comparaison avec des enrobés à chaud de référence. Ainsi en 2018 à Gagnac sur Garonne, pour la métropole de Toulouse une section de 9cm de GES 0/14 recouverte de 6 cm de BBSG3 0/10 a été comparée à une section témoin de 8 cm de GB3 0/14 recouverte de 6 cm de BBSG3 0/10 sous un trafic de l'ordre de 300 PL/J/Sens. Les mesures de déflexion au FWD effectuées montrent une baisse marquée pour la GE traduisant la montée en cohésion par mûrissement, puis de 1 à 3 ans une augmentation identique entre les 2 sections. Il est à noter quelques points de déflexion en rive en légère augmentation traduisant un début de faiblesse de la GE. Les autres suivis de PMT et à la règle de 3m sur tout l'itinéraire montre une similarité très forte entre les 2 sections au bout de 4 ans de service.

Concernant une autre technique à l'émulsion, on peut parler du retraitement en place à l'émulsion, qui a connu un fort développement dans les années 80 avec l'apparition de matériel spécifique (note SETRA n°42 Avril 1988). Le déploiement de cette technique a été fortement limité par le faible niveau d'équipement des acteurs industriels et par le cout lié à l'installation ainsi qu'au repli du matériel. En 2006, le projet SCORE [Potti et al., 2007] a permis de mieux comprendre le recyclage à l'émulsion, depuis le fraisage jusqu'au mélange et aux propriétés finales. Plus récemment, le projet TRACC s'est penché sur des retraitements en place à l'émulsion de 2ème génération ainsi que sur le retraitement de bitume d'un fraisât hors spécification [Liffraud et al., 2011]. La faisabilité de ces 2 cas spécifiques a été démontrée au travers du suivi de chantiers expérimentaux.

1.1.6.2 Retour d'expériences à l'international

Sur le plan international les techniques à l'émulsion ont suscité beaucoup d'intérêt dans les années 90 en Europe notamment à travers du projet européen OPTEL [Potti et al., 2010]. Actuellement les pays de l'Europe de l'Est qui ont terminé de structurer leurs réseaux routiers se tournent vers ces techniques dans leur politique d'entretien. En Pologne, la Grave Emulsion fabriquée en centrale avec un fort taux de recyclage a par exemple connu un fort développement ces dernières années.

En Chine, le marché du recyclage en centrale à l'émulsion est en plein essor car après avoir construit le réseau routier dans les années 1990, ils sont également en phase d'entretien.

D'autres pays ont une expertise reconnue dans l'usage de ces matériaux à l'émulsion fabriqués en centrale (Royaume-Uni, Etats Unis...) mais d'une façon générale ce sont principalement les retraitements en place (à l'émulsion mais beaucoup à la mousse) qui sont privilégiés (Afrique, Chine, Canada, Australie …).

1.1.7 Réglementation et normes en vigueur

1.1.7.1 Introduction et contexte

La norme européenne [NF EN 13108-31] de septembre 2019 décrit les spécifications pour « les enrobés à l'émulsion de bitume ». L'objectif de cette norme est de donner les spécifications des différents enrobés bitumineux à l'émulsion, quelle que soit leur destination (roulement, couche de base), en fonction de leurs performances. Elle doit s'adapter à toute l'industrie routière européenne et à toutes les pratiques et types de mélanges à l'émulsion réalisés dans les pays de l'union. En tant que tel, c'est un inventaire de méthodes d'essai et de classes de performance associées à chaque propriété listée dans la norme.

Malheureusement, afin de répondre à tous les cas rencontrés en Europe, les étendues des performances sont très larges et ne permettent pas réellement de spécifier des réelles propriétés sur les mélanges. Par exemple, pour la tenue à l'eau, l'essai ITSR est retenu et la norme autorise des rapports immersion/compression allant de 40 à 90%. Cette norme est plus un guide déclaratif de performances des mélanges qu'une réelle norme de spécifications.

C'est pour cela que la profession routière s'inspire plus du guide [IDRRIM, 2020a] des « enrobés à l'émulsion fabriqués en usine » et qui reprend en grande partie les spécifications des anciennes normes françaises sur les graves-émulsions et les bétons bitumineux à l'émulsion, avant la parution de la norme européenne évoquée plus haut. Pour chaque type de produit, les spécifications sont résumées ci-dessous.

1.1.7.2 Graves-émulsion

La grave-émulsion fait référence à la norme [NF P 98-121] d'octobre 2014 qui succède à la version précédente de février 2005 et qui la définit ainsi : « Enrobé bitumineux à l'émulsion de bitume destiné (i) soit aux reprofilages et aux réparations localisées : type R avec des granularités 0/6, 0/10 ou 0/14 ; (ii) soit à la réalisation de couches d'assise structurantes : type S avec des granularités 0/10, 0/14 ou 0/20 ». Cette norme introduit deux classes de grave-émulsion structurante : S1 ayant à la fois une fonction de reprofilage et une fonction de structure, et S2 ayant la seule fonction de structure.

1.1.7.3 Bétons bitumineux à l'émulsion

Le guide [IDRRIM, 2020a] reprend la norme [NF P 98-139] publiée en décembre 2016 pour la description et les propriétés des bétons bitumineux à l'émulsion. Les BBE sont classées en deux types possibles de mélanges (Type 1 et Type 2) suivant l'épaisseur et la résistance à la compression dans l'air (R) de l'essai DURIEZ. Les spécifications décrites dans la norme prennent en compte les progrès accomplis au cours des dernières décennies et s'appuie sur une approche performantielle. Toutefois, les retours d'expérience ont été jugés encore insuffisants pour fixer certaines spécifications, en particulier pour la résistance à l'orniérage et le module de rigidité des BBE de Type 2. C'est pourquoi la norme recommande d'indiquer, pour ces caractéristiques, « valeur à déclarer VAD », de manière à imposer au formulateur la réalisation de

l'essai correspondant, afin d'alimenter une banque de données, d'augmenter les connaissances et, à terme, de compléter la normalisation.

1.1.7.4 Enrobés à l'émulsion retraités en place

L'enrobé à l'émulsion retraité en place ne fait l'objet d'aucune norme et n'est repris pas dans le guide [IDRRIM, 2020a] car fabriqué in-situ et non en centrale. Le document de référence est le guide [SETRA, 2003] qui traite du retraitement en place à froid des anciennes chaussées. Pour les mélanges à l'émulsion de bitume, le guide décrit 3 classes possibles de retraitement en fonction de la part de matériaux hydrocarbonés dans le mélange ainsi que l'épaisseur de retraitement.

Dans la pratique, le retraitement à l'émulsion est principalement utilisé pour la réhabilitation des couches de surface usagées (classes II et III) afin d'en faire une couche de liaison qui sera recouverte par une couche de roulement (ESU, ECF, BBTM, BBM).

Le guide fête ses 20 ans cette année et ne prend plus en compte les dernières avancées réalisées depuis, que ce soit sur le matériel de mise en œuvre utilisé que sur les retours d'expérience acquis depuis. Aussi, par sa complexité, il est plutôt un frein au développement de cette technique qui est pourtant extrêmement vertueuse du point de vue de son impact environnemental (100% de matériaux recyclés, technique à l'émulsion, réalisation in-situ limitant le trafic des engins de chantier…).

La profession a donc décidé de remettre ce dernier à jour et un travail de révision est actuellement en cours avec l'objectif de pouvoir publier un nouveau guide en 2024.

1.2 Aspects environnementaux

1.2.1 Emissions de gaz à effet de serre et consommation énergétique

1.2.1.1 Enrobés à l'émulsion fabriqués en usine

L'empreinte environnementale des enrobés à l'émulsion a été quantifiée dans le cadre de nombreuses études. De manière générale, en comparant d'un point de vue de la consommation énergétique la production d'un enrobé à l'émulsion par rapport à celle d'un enrobé usuel à chaud, il est constaté :

- une légère augmentation de la composante « matières premières », liée à la fabrication de l'émulsion ;
- une forte diminution de la consommation lors de la phase de fabrication en usine, en raison d'une chauffe inexistante dans les cas des enrobés à l'émulsion ;
- globalement, sur le périmètre complet pris en compte (du berceau à la sortie de l'usine ou à la mise en œuvre), une diminution significative de l'énergie consommée dans le cas des enrobés à l'émulsion.

Les études [Goyer et al., 2012a][Goyer et al. 2012b][Xiao et al., 2018] montrent des économies d'énergie importantes d'au moins 30% (du berceau à la mise en œuvre). Il peut atteindre 50% dans certains cas en fonction des constituants et des distances de transport considérées.

Les émissions de gaz à effet de serre (GES) sont également fortement impactées par le procédé de fabrication à l'émulsion. [Jain et al., 2021] ont par exemple évalué à -32% l'écart entre les émissions de GES d'un enrobé à l'émulsion et celles d'un enrobé à chaud sur le périmètre « matières premières, fabrication, transport et mise en œuvre ». Dans certains études, l'écart atteint -60%.

En France, une étude d'analyse de cycle de vie menée par [Routes de France, 2022] a abouti à la publication en 2022 d'une fiche de données environnementale et sanitaire (FDES) collective « Chaussée en enrobé bitumineux à l'émulsion pour véhicules légers, voies piétonnes et cyclables (contenu en agrégats d'enrobé de 18%) ». Sur le périmètre « du berceau à la sortie de l'usine », par rapport à un enrobé conventionnel fabriqué à chaud, la réduction des impacts ramenée à la tonne d'enrobé est de l'ordre de 21% sur la

consommation des ressources énergétiques (énergie procédé) et de 31% sur les émissions de gaz à effet de serre (GES).

Le guide « Enrobés à l'émulsion fabriqués en usine » publié par l'[IDRRIM, 2020a] présente plusieurs comparaisons d'impacts environnementaux à l'échelle de matériaux et de chantiers réalisées à l'aide de l'éco-comparateur SEVE. Un exemple proposé traite d'un chantier-type de 1000 m^2 en chaussée neuve comparant une structure de 13 cm de grave-émulsion (GE), avec une variante sur la distance de transport, et une structure de 12 cm de grave-bitume (GB), toutes les deux recouvertes d'un enduit superficiel d'usure (ESU) de type bicouche. Il est constaté une réduction de 37% sur les émissions de GES avec l'emploi d'un enrobé à l'émulsion.

1.2.1.2 Cas d'étude par type de structure

Une étude de comparaison des impacts environnementaux de différents types de structures a été menée par la Section des fabricants d'émulsion routières de bitume de France (SFERB) en fonction de la classe de trafic [SERFB, 2006]. Il a par exemple été constaté que les techniques à l'émulsion (BBE/GE) permettent une diminution des émissions de GES liée à la construction de la chaussée de plus de 50% par rapports aux techniques à chaud de type BB/GB3. La diminution est d'environ 30% par rapport à une chaussée en enrobé à module élevé.

1.2.1.3 Cas du retraitement en place

Par rapport aux enrobés à l'émulsion fabriqués en usine, la technique du retraitement en place à l'émulsion présente des intérêts complémentaires d'un point de vue des impacts environnementaux : la préservation de la ressource en matériaux neufs ; la suppression du transport lié à l'acheminement des matériaux, à l'exception des matériaux « correcteurs » (liant et éventuellement granulat) qui représentent une très faible part des matériaux utilisés. La réduction des impacts environnementaux par rapport aux techniques à chaud est donc encore plus marquée. [Xiao et al., 2022] ont montré que le recyclage en place à l'émulsion permet d'abaisser la consommation énergétique de plus de 75%. En France, l'éco-comparateur SEVE permet d'évaluer entre -55% et -70% la diminution des émissions de GES en fonction du cas et des conditions de retraitement.

1.2.1.4 Recyclage en usine

Les enrobés à l'émulsion sont également intéressants du point de vue de la préservation des ressources car ils permettent l'incorporation d'agrégats d'enrobés jusqu'à 100% et l'utilisation d'agrégats d'enrobés contenant des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). La remobilisation du liant vieilli des agrégats d'enrobés est cependant prise en compte de manière variable selon les pratiques. Il est en effet parfois considéré qu'une partie de ce liant vieilli n'a pas d'influence directe sur le comportement du matériau, notamment au jeune âge et au niveau de son aptitude au compactage, dans la mesure où elle n'est pas remobilisée par le liant d'apport. Cela conduit à doser plus fortement le liant d'ajout et à obtenir une teneur totale en liant plus importante que celle d'un matériau, de nature et fonction équivalentes, ne contenant pas d'agrégat d'enrobé.

1.2.2 Eaux de rupture des émulsions

L'INERIS [INERIS, 2011] a réalisé de 2004 à 2007 une étude visant à qualifier l'utilisation des émulsions de bitume au regard de leur éventuel impact environnemental. Un protocole expérimental a été mis au point notamment sur les enrobés à l'émulsion dont il est question dans ce Projet National. Il consistait en la génération d'eau de rupture et la réalisation d'essais d'écotoxicité sur les lixiviats obtenus. Trois essais ont été sélectionnés pour la caractérisation initiale de l'eau de rupture : un essai de toxicité aiguë et deux essais de toxicité chronique : inhibition de la mobilité de la daphnie (Daphnia magna), inhibition de la croissance d'une population de rotifère (Brachionus calyciforus), inhibition de la croissance d'une algue verte unicellulaire (Pseudokirchneriella subcapitata).

Cette caractérisation a été menée sur trois types de formulations de graves-émulsion : à base de polyamine de suif, de polyamine de suif et d'un mélange de dérivés gras d'imidiazolines et d'amidoamines, d'un mélange de polyamine de suif et de diamine de suif. Ces essais ont été complétés par des analyses de teneur en amine résiduelle, d'hydrocarbures et des mesures de pH.

L'ensemble de la démarche a été expertisé et validé par URS, un bureau d'études nord-américain spécialisé dans les processus industriels. Les formulations classiques aux dosages habituels ne montrent aucun impact sur l'environnement. Pour l'étude, des dosages élevés et inhabituels avait été réalisés. Un impact sur certains organismes aquatiques avait alors pu être mesuré sans que ce dernier ne dépasse les seuils écotoxiques règlementaires.

2 Originalité du projet national

2.1 Positionnement du projet par rapport à l'existant

L'intérêt des ministères des routes pour la technologie des enrobés à l'émulsion est identifié par le financement de recherches sur ce sujet dans le cadre de plusieurs projets dans le passé. Grâce à plusieurs projets de recherche internationaux sur les matériaux routiers financés dans le cadre du programme-cadre (OPTEL [Optel, 1996], DIRECT-MAT [Direct-mat, 2007]) ainsi que des programmes de financement initiés par la CEDR – Conférence des Directeurs des Routes (par exemple les projets CoRePaSol [Corepasol, 2012] et CRABforOERE [Crabforoere, 2017]), les enrobés à l'émulsion ont été identifiées comme des procédures de construction rapides, rentables et respectueuses de l'environnement.

En améliorant l'application des enrobés à l'émulsion dans le secteur de la construction de routes, une contribution significative aux objectifs politiques environnementaux peut être obtenue. Cela se traduit par des améliorations de la capacité du réseau routier ainsi que de la qualité des chaussées avec des avantages supplémentaires en termes de sécurité routière et de coûts pour les usagers. Cependant, afin de permettre une application plus large de ces matériaux, des recherches sont nécessaires pour harmoniser et spécifier des procédures appropriées de conception des mélanges et des chaussées. En identifiant les limites techniques de ces matériaux, la confiance est accrue et permettrait d'aider au choix des solutions adaptées pour l'entretien et la rénovation des chaussées existantes.

Les matériaux bitumineux à froid à l'émulsion utilisés en Europe varient considérablement en termes de type et de teneur en liant et donc de propriétés structurelles et mécaniques. En France, l'enrobé à l'émulsion appelé Béton Bitumineux à l'émulsion (BBE) est utilisé en couche de surface et la Grave Emulsion (GE) pour couche de base sont des mélanges qui ne contiennent que du bitume (avec des teneurs entre 3 et 6%). Ces produits sont destinés à un usage sur des réseaux à faible et moyen trafic [IDRRIM, 2020a].

Cette pratique d'usage exclusif du bitume est singulière par rapport des usages en Europe comme en Allemagne et en Italie ou aux Amériques (historiquement au nord, Canada – Etats Unis, et plus récemment au sud). A l'échelle européenne, on rencontre plutôt des matériaux traités au ciment-bitume appelés « CBTM » qui incorporent du ciment (teneur inférieure à 3%). La présence de liant hydraulique de résoudre en partie les contraintes liées à l'utilisation de l'émulsion et la présence d'eau (séchage, réduction du temps de montée en cohésion et de murissement, moindre sensibilité à la charge de trafic élevée …). Cet apport mène à une augmentation de la résistance et de la rigidité des mélanges ainsi qu'à une amélioration des performances de déformation permanente pouvant être utilisés sur des réseaux à plus fort trafic et accroitre sa durabilité. En contrepartie, l'apport de ciment peut affecter le bilan environnemental du produit, limiter le caractère souple de l'enrobé lié à l'utilisation du bitume seul et affecter sa résistance à la fissuration voire à ses capacités d'autoréparation.

Quels que soient le type et la quantité de liants, tous les matériaux routiers à l'émulsion nécessitent l'ajout d'eau afin de permettre le mélange et le compactage du mélange. La présence d'eau dans le mélange entraîne des différences significatives dans les propriétés du matériau par rapport à l'enrobé dit à « chaud » ou à « température réduite » (i.e. tiède) utilisé : le séchage du matériau entraîne des teneurs en vides élevées et un réarrangement du liant dans le squelette minéral ainsi qu'une faible résistance et rigidité du matériau au début de sa durée de vie après la pose et le compactage, puis augmentation durant plusieurs mois mais de manière plus ou moins constante.

Cela nécessite des procédures spécifiques de conception et de formulation des mélanges, y compris des procédures de murissement accélérées en laboratoire pour permettre l'évaluation des propriétés à long terme requises pour les contrôles de qualité et la conception de la chaussée. Ce travail a été initié en France

depuis une dizaine d'années entre les partenaires publiques (Université Gustave Eiffel - ex IFSTTAR et le CEREMA) et les industriels (Routes de France – ex USIRF) au travers d'actions en laboratoire (cofinancement de thèses) et de mise en œuvre/suivi de chantiers expérimentaux sur sites réels en collaboration des conseils départementaux (CD 31, 35, 43) engagés et convaincus de l'usage de ces techniques sur leurs réseaux routiers [De La Roche et al., 2012] [Beghin et al. 2012] [Delfosse et al. 2018] [IDRRIM, 2020a].

Afin d'accroître la confiance dans les performances à court et long terme des matériaux bitumineux à froid à l'émulsion (y compris incorporant des matériaux recyclés de la route), le développement de solutions de conception rationnelles, transportables et validées sur le terrain est nécessaire et sera apportée par le Projet National. Ces procédures doivent couvrir diverses charges, types de véhicules et évolution des charges liées au trafic routier, ainsi que proposer les adaptations nécessaires à effectuer dans le cas de plateformes variées et de conditions météorologiques différentes.

D'un point de vue de l'impact environnemental, l'intérêt des enrobés à l'émulsion a été mis en évidence par différentes études. Cependant, la plupart des études citées (voir §1.2.1) se concentrent sur la consommation d'énergie et le changement climatique sans vérifier les résultats sur les autres indicateurs et ne couvrent pas toujours le cycle de vie complet. L'intérêt du Projet National est d'aboutir à une analyse plus large de manière à couvrir une gamme de scénarios représentatifs des pratiques et usages des enrobés à l'émulsion. Ainsi, à la fin du projet, un maitre d'ouvrage ou un maitre d'œuvre aura à sa disposition des éléments permettant de le guider dans son choix technique afin d'obtenir les meilleurs résultats environnementaux. De plus, les résultats d'inventaires de cycle de vie obtenus seront utilisables dans d'autres outils (l'éco-comparateur SEVE-TP par exemple) permettant à un utilisateur de réaliser ses propres calculs.

2.2 Précision des verrous scientifiques et techniques identifiés et objectifs du Projet National

Un certain nombre de verrous scientifiques et techniques à lever pour accompagner le développement des mélanges à froid à l'émulsion de bitume ont été identifiés grâce à l'étude bibliographique et au travail collectif réalisé par le groupe de montage. Il est rappelé dans ce paragraphe les éléments les plus importants, qui seront traités dans le programme de recherche. Ainsi quatre verrous scientifiques et techniques ont été identifiés :

- Le premier vise à **optimiser la formulation des mélanges** par le développement d'essais adaptés pour répondre efficacement aux sollicitations climatiques et de trafic associés à un emploi plus systématique sur le territoire national et développer un volet spécifique sur l'utilisation d'agrégats d'enrobés pour le recyclage et le multirecyclage.

- Le second concerne le **comportement au jeune âge des enrobés à l'émulsion lié aux phases de montée en cohésion et de mûrissement** afin de mieux réceptionner les produits et autoriser leur remise sous trafic.

- Le troisième se focalise sur la **durabilité des mélanges et des chaussées** avec l'identification des mécanismes d'endommagement et de la dynamique des dégradations (vieillissement, fissuration, perte d'adhésion à l'interface bitume/granulat, dégradation des interfaces de couches, détérioration des couches de surface) nécessaire pour le dimensionnement des chaussées incorporant des produits à l'émulsion (critère de ruine, scenarii de dimensionnement).

- Le dernier verrou concerne les **procédés de fabrication et la mise en œuvre des mélanges**, afin de supporter la montée en production des produits à l'échelle industrielle tout en s'assurant de la

représentativité des mélanges fabriqués en laboratoire pour renforcer l'approche performantielle de la méthode de formulation française.

2.2.1 Optimisation de la formulation du mélange

La formulation a pour objectif d'identifier la nature et le dosage des constituants d'un mélange bitumineux. Ces choix sont guidés par l'usage (couche d'assise, liaison / reprofilage ou roulement) et par la destination du mélange (ex. niveau de trafic subi) qui conditionnent les niveaux de performances à atteindre. Pour les mélanges issus des procédés de fabrication " à chaud ", la formulation relève d'étapes de caractérisation bien connues et se base sur l'obtention de performances stabilisées juste après leur mise en œuvre sur chaussée et refroidissement à température ambiante. Concernant les mélanges à l'émulsion, cette méthodologie de formulation doit être complétée pour prendre en compte certains points spécifiques : par exemple, la présence d'eau, la réactivité entre le liant et les granulats, la faible cohésion au jeune âge des mélanges et leur mûrissement, la compacité et la taille des vides.

Le Guide [IDRRIM, 2020a] des Enrobés à l'émulsion fabriqués en usine et la série d'articles publiés entre 2011 et 2012 dans la revue française RGRA présente le cadre méthodologique d'étude des mélanges à l'émulsion et les essais spécifiques permettant leur caractérisation. Toutefois, cette littérature technique et scientifique a besoin d'être complétée sur plusieurs aspects.

L'approche de formulation initiale reste très largement empirique ce qui constitue un verrou important à lever et constitue une limite à la diffusion des techniques à l'émulsion. Le Programme National aura pour objectif de rationaliser cette approche et / ou de l'améliorer, par un travail spécifique sur les formulations (ex. usage de certains additifs) et les caractéristiques considérées comme les plus fragiles.

2.2.1.1 Protocoles de mûrissement et de vieillissement

Une des principales distinctions des enrobés à l'émulsion de celles des enrobés bitumineux à chaud est leur caractère fortement évolutif à court terme après fabrication et mise en œuvre. En effet, le comportement mécanique de ces matériaux évolue progressivement (avec une dynamique variable) d'un état initial non ou faiblement lié (état frais) à un état final solidement lié (état mûri) sous l'effet de plusieurs phénomènes : rupture de l'émulsion et coalescence des globules de bitume, départ de l'eau, collage des fractions minérales, augmentation de la cohésion du liant, serrage du squelette minéral sous compactage puis sous l'effet du trafic. Cette période est appelée " mûrissement ". L'étude de cette étape est un point clé de la méthode de formulation dans l'optique d'une approche performantielle.

Pour le protocole de mûrissement des corps d'épreuve, les paramètres actuellement retenus, pour simuler l'état " stabilisé " que l'enrobé atteindra in situ, s'appuient sur des conditions de températures et d'hygrométrie qui sont de 35 °C et de 20 % d'humidité relative pour une durée de mûrissement accéléré actuellement fixée à 14 jours. L'effet du mûrissement est évalué au travers de l'évolution des performances des mélanges muris (module complexe par différents essais normalisés (flexion, compression diamétral sinusoïdale ou impulsionnelle, ou non (essai œdométrique et triaxial, résistance à la compression, à la déformation permanente et à la fissuration).

Ce protocole de mûrissement nécessite néanmoins d'être adapté sur différents points. Il s'agit ; d'élargir les conditions climatiques imposées à d'autres paramètres : UV, immersion dans l'eau par exemple, ensuite de prendre en compte la géométrie des corps d'épreuve utilisés (petite éprouvette cylindrique à grosse plaque). Cette action dédiée pour une meilleure connaissance du mûrissement des mélanges sera également déclinée sur le liant bitumineux.

Les avancées obtenues seront complétées pour une seconde action visant à mettre au point de protocoles de montée en cohésion et du vieillissement en faisant appel à des méthodologies innovantes de caractérisations rhéologique et physico-chimique.

2.2.1.2 Apport des agrégats d'enrobés (AE)

Les techniques de recyclage/retraitement à l'émulsion présentent de nombreux avantages du point de vue économique et environnemental et favorise le renforcement de l'économie circulaire au niveau national. Elles s'inscrivent en effet dans le pacte d'engagement des acteurs des infrastructures de mobilité, et en particulier dans l'engagement n°1 qui vise à " développer des infrastructures bas carbone " [IDRRIM, 2021]. Au contraire des procédés à chaud et tièdes, qui sont limités par des contraintes notamment techniques, les enrobés à l'émulsion peuvent incorporer un fort taux d'agrégats d'enrobés (AE) jusqu'à 100%. Cela a un double intérêt : D'abord l'incorporation d'AE dans les formulations permet d'économiser les ressources naturelles en conséquence la teneur en liant d'apport peut également être plus faible. Ensuite, il n'est pas nécessaire de chauffer les matériaux granulaires ce qui limite les émissions de gaz à effet de serre à la fabrication et l'exposition aux travailleurs aux fumées lors de la mise en œuvre. Pourtant, lorsque des forts taux d'AE sont utilisés, la remobilisation du liant vieilli n'est pas assurée et nécessite souvent de surdoser en émulsion d'apport.

Le travail à mener dans le cadre du Projet National portera d'abord sur l'ajout dans la méthode de formulation d'un volet spécifique dédié au recyclage en se basant sur la démarche explicitée précédemment. Il serait complété par des actions associées à l'étude de la compatibilité entre le liant vieilli des AE et l'apport par l'émulsion de bitume dans le but de mieux appréhender les mécanismes de remobilisation (ou de valorisation) du point de vue (i) physico-chimique, à l'échelle du liant et du mélange, (ii) des conséquences pour les propriétés d'usage des mélanges et (iii) des moyens techniques (matériaux, procédés) pour y parvenir.

2.2.2 Comportement au jeune âge

Une des limites des mélanges à l'émulsion concerne leur faible cohésion au très jeune âge. Ce comportement résulte de la présence d'eau résiduelle dans le mélange et limite (temporairement) la structuration du squelette granulaire par le mastic (mélange d'éléments fins et du bitume). Pour les enrobés utilisés en couche de roulement, il est nécessaire que tous les granulats soient fixés par le liant pour résister à des pathologies de type plumage et d'orniérage lors de la remise sous trafic. Cela est assuré par la répartition du liant dans l'ensemble du mélange et la qualité de blocage des éléments les plus gros du squelette granulaire mais peut être rendu difficile selon les conditions climatiques (humidité, zone d'ombre, période de mise en œuvre…) et la formulation du mélange (rupture de l'émulsion non maitrisée, utilisation d'agrégats d'enrobés…).

Durant le projet, il s'agira de travailler sur la caractérisation et la qualification du comportement au jeune âge en laboratoire et que cette approche puisse être transposable sur chantier. Différentes techniques pourront être utilisées (essais normalisés de résistance au cisaillement à la compression, techniques d'auscultation non destructives par propagation d'ondes…). Ce travail sera réalisé en lien avec celui basé sur la formulation des mélanges avec ou sans AE en pourra amener au développement/transfert de solutions déjà utilisées à l'international permettant une rigidification du mélange à très court terme (et dans le temps) tout en s'assurant de maintenir un gain environnemental suffisant et compatible avec les engagements de la profession routière.

2.2.3 Dimensionnement et durabilité

Le dimensionnement mécanique vise à s'assurer que les couches d'assise et la plateforme support de la chaussée, les sollicitations calculées sont inférieures ou égales aux sollicitations admissibles. Les sollicitations sont calculées en assimilant la structure à un modèle multicouche. Les données d'entrée nécessaires à ce calcul sont : le module de rigidité des différentes couches de matériaux, la qualité de l'interface entre les couches, l'épaisseur de chaque couche et la portance de la plateforme support. D'un autre côté, les sollicitations admissibles sont la déformation verticale pour les matériaux non liés et la déformation ou la contrainte horizontale en traction par flexion pour les matériaux liés. Dans les cas des mélanges à l'émulsion, on considère que pour le dimensionnement les deux points suivants : (i) prise en compte d'un module évolutif et (ii) mise en évidence des mécanismes de dégradation, constituent des verrous nécessaires à lever dans le cadre du Projet national.

2.2.3.1 Prise en compte d'un module complexe évolutif

Compte-tenu de l'état des connaissances, les épaisseurs des couches en grave-émulsion sont choisies en leur attribuant un module non évolutif fixé pour toute la durée de service. Cette pratique n'est pas réaliste pour les produits à l'émulsion compte tenu de l'évolution de leurs propriétés mécaniques durant le mûrissement (et dans la couche elle-même) puis dans une autre phase associée à l'endommagement des mélanges généré par les sollicitations climatiques et mécaniques.

2.2.3.2 Mise en évidence des mécanismes de dégradations

Une autre difficulté concerne le manque de connaissances sur les modes d'endommagement des mélanges à l'émulsion dans les chaussées et l'absence à fortiori de critères, protocoles expérimentaux et coefficients de calage permettant de déterminer les intensités des sollicitations admissibles. On considère que les mélanges à l'émulsion ne travaillent pas en fatigue comme les enrobés élaborés à chaud. Le seul critère de vérification pris en compte sera celui lié à la plateforme support : la déformation verticale au sommet de la plateforme (dans le cas où aucune autre couche de matériaux liés n'est présente dans la structure). Au-delà des mécanismes classiques utilisés par la méthode de dimensionnement non pris en compte pour les mélanges à l'émulsion, il existe d'autres modes de dégradations à l'échelle du matériau et de la structure (comportement de la plateforme support, déformation permanente, conditions climatiques avec effet de l'eau…).

Il est donc nécessaire d'améliorer l'état des connaissances du comportement des matériaux à l'émulsion pour identifier ce qui conduit à des dégradations. Cette étape pourra aussi amener à se questionner sur le besoin ou non de développer de nouveaux essais spécialement adaptés aux enrobés à l'émulsion afin de déterminer les propriétés réversibles et les caractéristiques à la ruine entrant dans la méthode de dimensionnement.

2.2.4 Fabrication et mise en œuvre des mélanges

Le dernier verrou concerne les procédés de fabrication et la mise en œuvre des mélanges à l'émulsion, afin de supporter la montée en production des produits à l'échelle industrielle tout en s'assurant de la représentativité des mélanges fabriqués en laboratoire pour renforcer l'approche performantielle de la méthode de formulation française.

Actuellement, les mélanges à l'émulsion de type grave-émulsion et béton bitumineux à l'émulsion sont fabriqués dans des usines fixes ou mobiles en utilisant des procédés basés sur une ou plusieurs étapes tout en visant un enrobage complet de toutes les fractions granulaires du mélange. Il est également possible de produire des mélanges in situ correspondant au recyclage en place des chaussées. En laboratoire, divers types de malaxeurs peuvent être utilisés pour fabriquer des mélanges granulaires traités à l'émulsion. La procédure de malaxage doit représenter aussi fidèlement que possible celle, prévue ou utilisée, du chantier : ordre d'introduction des constituants, répartition de l'eau et de l'émulsion, ajout d'additifs, pré-enrobage éventuel d'une fraction granulaire... De plus le temps de malaxage en laboratoire doit être ajusté en fonction de différents paramètres (débit de fabrication, longueur du malaxeur). Il en est de même pour les aspects de mise en œuvre pour obtenir le niveau de compacité (et les performances mécaniques) et l'uni à l'aide de matériels adaptés ; du plus simple au plus évolué que ce soit pour les finisseurs et les compacteurs.

Dans le cadre du projet national, des expérimentations seront menées pour évaluer la capacité des matériels de fabrication existants (usines d'enrobage à chaud ou à température réduite) pour produire des enrobés à l'émulsion afin de supporter leur utilisation croissante et l'augmentation des tonnages sans investissement supplémentaire pour l'achat et l'installation d'usine d'enrobage à l'émulsion.

En complément, la complexité de la fabrication des enrobés à l'émulsion, d'autant plus pour les formules incorporant des matériaux recyclés, amène à se questionner sur la représentativité de la fabrication des produits industriels à l'échelle du laboratoire (et de leur compactage).

3 Programme de recherche

Le programme de recherche du Projet National est structuré en trois axes complémentaires pour répondre aux objectifs identifiés afin de développer et de mieux comprendre le comportement des matériaux routiers à l'émulsion de bitume et les structures de chaussées les incorporant dans un contexte de sobriété énergétique et d'économie des ressources par le recyclage de la route dans la route. La Figure 2 présente une vue globale du programme de recherche du Projet National.

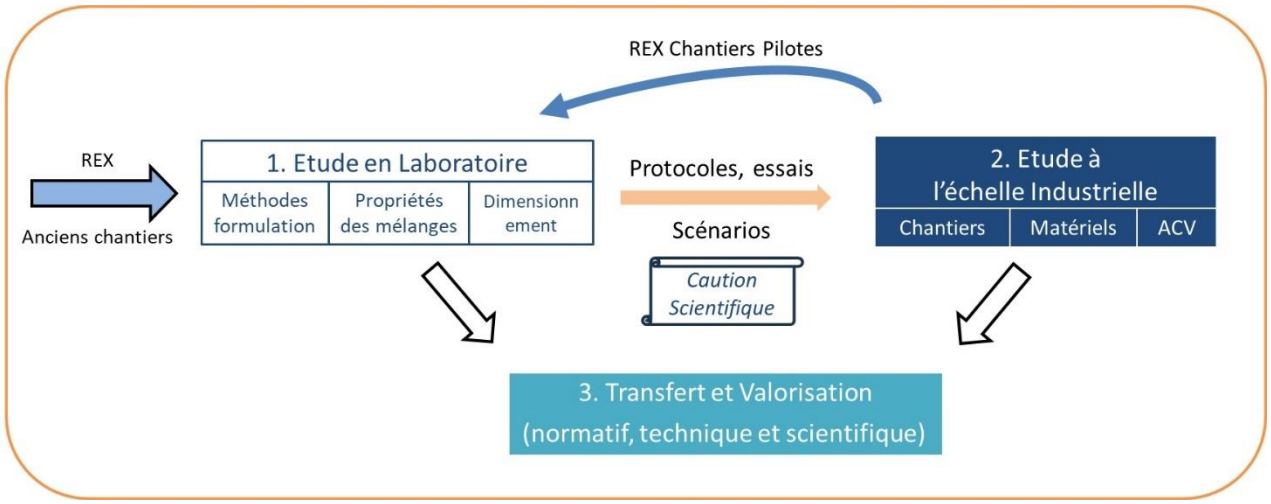

Figure 2. Vue globale du programme de recherche du Projet National

Le premier axe du projet sera focalisé sur des **développements à l'échelle du laboratoire** sur les thématiques d'abord concernant la formulation des mélanges, puis des propriétés des mélanges non structurants destinés à la réhabilitation de couches de surface ; et enfin celles des mélanges structurants avec la problématique de leur dimensionnement. Le Projet National capitalisera sur les connaissances disponibles dans la bibliographie et la connaissance de ces membres pour alimenter cette première partie avec des retours d'expérience en France et à l'international. Ces retours d'expérience permettront de mettre en lumière les lacunes sur les méthodes de formulation actuelles et le projet national permettra de mettre en place des méthodes plus adaptées à ces mélanges à l'émulsion avec notamment **des méthodes d'essai représentatives de la montée en cohésion de ces mélanges** et des **méthodes de calcul plus adaptées au dimensionnement des chaussées utilisant ces matériaux.**

Dans un second axe, **des actions à l'échelle industrielle** seront engagées. Elles se traduiront par le suivi de chantiers anciens et de nouveaux à mettre en œuvre dans le cadre du Projet National pour répondre aux verrous identifiés lors de l'étude de faisabilité et montage. Ce suivi permettra également de **définir de nouvelles méthodes de caractérisation de ces mélanges sur chantier en les corroborant avec les nouvelles méthodes mises au point lors de la formulation en laboratoire** (sur l'évaluation de la montée en cohésion notamment). L'identification des nouveaux chantiers à réaliser se fera à partir du REX des chantiers existants. Ceci permettra de compléter les connaissances sur le comportement de ces mélanges in-situ. Les actions viseront à apporter des avancées pour mieux comprendre le comportement des mélanges (structurants ou non) dans la structure de chaussée à court, moyen et long terme, en fonction de différents paramètres déjà repérés (trafic, type de support, climat, taux de recyclés, outil de fabrication…). Un volet « matériel » (fabrication, mise en œuvre …) sera décliné pour fournir des solutions afin d'accompagner la montée en volume de la production d'enrobés à l'émulsion attendue à la fin du Projet National et estimer

leur influence sur la qualité et les propriétés des mélanges obtenus. Sur la base des résultats obtenus en termes de matériaux (composition, durabilité…) et de procédés d'élaboration et de mise en œuvre (consommation, flux …), des inventaires et des Analyses de Cycle de Vie de différentes solutions élaborées à froid à l'émulsion de bitume seront réalisées. Les résultats permettront d'aider les gestionnaires dans les choix à opérer pour la construction et l'entretien des chaussées de leurs réseaux routiers.

Enfin, un troisième axe sera consacré au **transfert et à la valorisation des résultats** obtenus. Les membres du Projet National s'attacheront à communiquer les avancées significatives du projet par différents canaux (dont celle de la normalisation) qui seront adaptés à différents publics et aux communautés scientifiques et techniques.

Le programme de recherche présenté ci-après a été construit sur la base des propositions d'actions des partenaires pressentis.

En complément de ce programme de travail, il est envisagé de traiter certains sujets plus fondamentaux avec des verrous scientifiques avancés dans le cadre d'un projet ANR qui sera, en cas de succès, conduit en lien étroit avec le Projet National.

3.1 Axe 1. Etudes en laboratoire

Cet axe sera décliné en 3 thèmes et leurs sous-thèmes comme suit :

Thème 1.1 Méthodologie de formulation en laboratoire

1.1.1 Retour d'expériences des règles de formulation en laboratoire d'un BBE/GE
1.1.2 Approche complémentaire pour mieux évaluer le comportement du mélange sans AE
1.1.3 Méthode de formulation des mélanges à l'émulsion avec des AE
1.1.4 Analyse complémentaire des performances mécaniques des enrobés pour aider au dimensionnement des structures

Thème 1.2 Comportement et propriétés des mélanges non-structurants

1.2.1 Analyse des REX : comportement au jeune âge de produit, remise au trafic, comportement en phase d'usage et fin de vie (durabilité) des mélanges (état d'endommagement, pathologies)
1.2.2 Qualification de la montée en cohésion
1.2.3 Définition des expérimentations in situ à mener (méthodologie)

Thème 1.3 Comportement et propriétés des mélanges structurants

1.3.1 Analyse de REX 5-10 ans : Prise en compte de l'évolution à court terme (mûrissement) dans le comportement mécanique (module évolutif et d'autres caractéristiques mécaniques à considérer).
1.3.2 Analyse des REX > 10 ans : Etude de lois de comportement des chantiers
1.3.3 Définition des critères de dimensionnement et scénarios de dimensionnement.
1.3.4 Définition des expérimentations in situ à mener (application des scénarios de dimensionnement à des chantiers)

3.1.1 Thème 1.1 : Méthodologie de formulation en laboratoire

Pilotes : Frédéric Delfosse (Vinci), Nelson Alvarado (Roger Martin)

Préambule : Actuellement, les règles de formulation restent propres à chaque entreprise, notamment l'évaluation de la qualité d'enrobage et de la maniabilité. Cela est considéré comme un frein au développement des enrobés à l'émulsion. Des protocoles communs permettraient de mieux préparer la fabrication industrielle en fonction des process, de mieux appréhender le comportement à la mise en œuvre de ces enrobés et ainsi de rassurer les maitres d'œuvre et les maitres d'ouvrage.

Sous-Thème 1.1.1 Retour d'expériences des règles de formulation en laboratoire d'un BBE/GE

Objectifs spécifiques : Ce sous-thème aura initialement pour but de réaliser un inventaire des méthodes de formulation pratiquées dans les différents laboratoires et de mettre en évidence leurs limites (matériel, norme d'essai). Dans un deuxième temps, les protocoles les plus pertinents pour fabriquer les enrobés, qualifier la qualité d'enrobage et la maniabilité seront sélectionnés et documentés. Des essais croisés seront ensuite organisés afin d'éprouver ces méthodes de formulation. Finalement, ces méthodes seront appliquées préalablement aux chantiers expérimentaux du PN. L'organisation des étapes du Thème 1.1.1 est représentée dans la Figure 3.

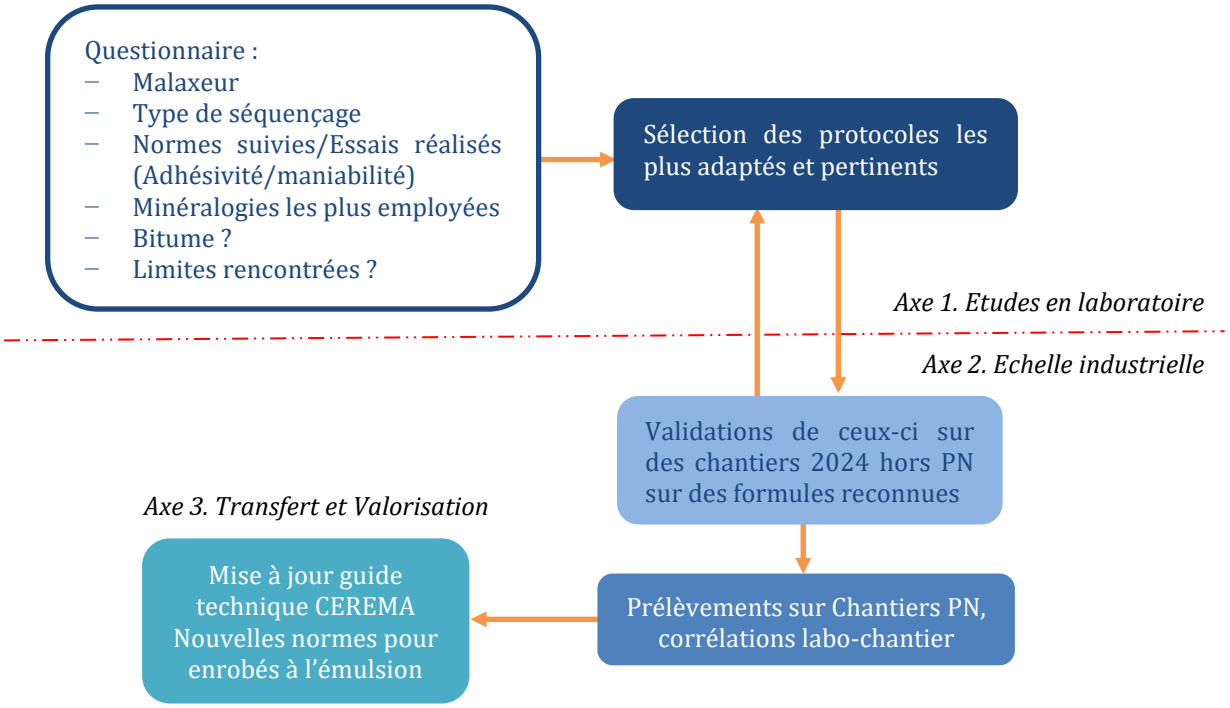

Figure 3. Organisation du sous-thème 1.1.1 REX des règles de formulation en laboratoire d'un BBE/GE

Deux 2 actions sont proposées au sein de ce sous-thème :

Action 1.1.1.1 Inventaire des méthodes de formulation

Pilotes de l'action : Abdeltif Belkahia (Arkema)/ Nicolas Picard (Ingevity)
Partenaires : Vinci Construction, Ingevity, Arkema, Roger Martin, Colas, Eiffage, Spie, UGE, NGE, Valochem, Charier, LCBTP, Braja
Livrables : Document de synthèse
Durée, jalons : T1-Q1Q2- fin du premier trimestre 2025
Description de l'action : Lister et décrire les différents protocoles de fabrication d'enrobés à l'émulsion pratiqués en laboratoires (type de matériel, procédé de séquençage, etc.), d'évaluation de la qualité d'enrobage et de la maniabilité.

Un **questionnaire** sera expédié aux différents laboratoires participants au PN. A la suite du dépouillement, les protocoles les plus pertinents seront sélectionnés. Des modes opératoires seront rédigés pour ensuite être transmis aux différents participants aux essais croisés.

Essais envisagés : adhésivités passives/actives, boiling test, maniabilimètre Nynas, essais de décohésion Malet. Des essais innovants pourront également être proposés.

Action 1.1.1.2 Organisation d'essais croisés

Pilotes de l'action : Abdeltif Belkahia (Arkema), Nicolas Picard (Ingevity)
Partenaires : Vinci Construction, Ingevity, Arkema, Roger Martin, Colas, Eiffage, Spie, UGE, NGE, Valochem, Charier, LCBTP, Braja.
Livrables : Document de synthèse sélectionnant les protocoles les plus pertinents pour les chantiers expérimentaux
Durée, jalons : T1T2 - fin 2025

Description de l'action : Le but de cette deuxième action est l'organisation d'essais croisés afin d'éprouver les méthodes de fabrication d'enrobé, d'évaluation de la qualité d'enrobage et de la maniabilité qui ont été sélectionnées dans l'action initiale. La corrélation laboratoire-chantier pourra ainsi être établie.

Sélection des chantiers :
Les chantiers sélectionnés ne seront pas des chantiers expérimentaux mais des chantiers issus de formulations éprouvées et intégrés dans un marché attribué. Ils devront couvrir différents types d'enrobés à l'émulsion (GE – BBE – recyclage en place). Il faudra pouvoir également tester différentes natures minéralogiques et différentes origines de bitume.

Organisation des essais croisés :
Des prélèvements des matières premières (granulat-émulsion) seront expédiés aux laboratoires participants. Des essais pourront également être réalisés in situ à l'usine d'enrobage ou sur le chantier.

Sous-Thème 1.1.2 Approche complémentaire pour mieux évaluer le comportement d'un enrobé à l'émulsion sans AE

Ce sous-thème se décline en 2 phases :

- **Phase 1 -** Approche complémentaire pour mieux évaluer la montée en cohésion au jeune âge d'un enrobé à l'émulsion
- **Phase 2 -** Caractérisations mécaniques/ Mûrissement

Action 1.1.2.1 Approche complémentaire pour mieux évaluer la montée en cohésion au jeune âge d'un mélange à l'émulsion (Phase n°1)

Pilotes de l'action : Frédéric Delfosse (Vinci Construction), Lionel Odie (Cerema Ouest).
Partenaires : Vinci Construction, Roger Martin, Cerema Ouest, Colas, Eiffage, Spie, Razel, Dep. Ille et vilaine, ENTPE, UGE, Arkema, NGE, Ingevity, Valochem, Unilim, Université Bourgogne, Charier, LCBTP, Braja, Cerema Occitanie.
Livrables : Essai innovant de laboratoire pour aider à évaluer la cinétique de montée en cohésion d'un enrobé à froid, articles scientifiques
Durée, jalons : 21 mois

Description des actions : L'un des problèmes des enrobés à l'émulsion réside dans les performances au jeune âge. De nombreux clients font état de problèmes de gravillonnage en fonction des conditions climatiques, % AE, …, durant les premières journées. Dans ce contexte, une réflexion pour mettre en place un essai de laboratoire pour qualifier cette performance a été définie comme prioritaire. Idéalement cet essai sera transférable sur chantier afin de pouvoir qualifier les productions industrielles (Thème 1.2).

a- Lister les essais de laboratoire en précisant les laboratoires équipés de l'essai, les contraintes de l'essai, la possibilité de décliner l'essai sur chantier. Le Tableau 1 présente les essais proposés par des entreprises ayant participé montage du projet. Cette liste pourra être complétée par les retours d'autres participants qui rejoindront le consortium.
b- Définir une entreprise par essai retenu. Cette entreprise proposera une méthodologie d'essai qui sera partagée avec les autres laboratoires avant de lancer un programme d'évaluation.
c- Dans un premier temps chaque laboratoire testera des formules internes pour ajuster et valider la pertinence de l'essai.
d- Pour les essais les plus pertinents, faire un essai croisé à partir de matériaux communs (granulats/ émulsion)
e- Corrélation avec Thème 1.2 qui se focalisera avec des essais sur chantier

En finalité le(s) essai(s)retenus devront permettre d'évaluer : la formule d'émulsion, la nature du bitume, la teneur en liant, les conditions de mûrissement : 10°C avec forte hygrométrie et 25 °C HR =55%, % AE…

Tableau 1. Liste d'essais de laboratoire proposés par des partenaires potentiels du projet pour qualifier la performance des enrobés au jeune âge.

Essais	Laboratoires
DSD (+ procédure de compactage)	VC, Colas, Cerema Ouest, Eiffage
IP, IPI	VC, Roger Martin
Triboroute (TS 12697-50)	UGE
Ravelling test (ASTM 7196)/ WTAT (NF EN 12274-5)	Colas , Vinci, Ingevity, Cerema Ouest
Radar	VC/UGE/ Unilim
Propagation d'ondes	ENTPE/ Eiffage / Unilim
Maniabilimètre	VC, Ingevity
Ecrasement en compression	Eiffage, VC
Cohesion Benedict	Eiffage
Essai de flexion (Barreau)	

Action 1.1.2.2 Caractérisations mécaniques/ Mûrissement (Phase n°2)

Pilotes de l'action : Frédéric Delfosse (Vinci Construction), Ciryle Somé (Cerema UMR MCD)
Partenaires : Vinci Construction ; Roger Martin, Cerema Ouest, Colas, Eiffage, Spie, Cerema UMR MCD, Dep. Ille et vilaine, ENTPE, UGE, Arkema, NGE, Ingevity, Valochem, Charier, LCBTP, Braja, Cerema Occitanie
Livrables : Articles scientifiques
Durée, jalons : 18 mois
Description de l'action :

a- Caler la mesure du module de rigidité des mélanges, en définissant des conditions de validité de l'essai (définition du domaine de linéarité). Evaluer l'impact du mode de confection des éprouvettes en laboratoire (PCG : diamètre 100 ou 150 mm, compression statique (120mm), marteau vibrant (150 mm), *plaque*).
   i. Lister les procédures de fabrication d'éprouvettes / laboratoire + partage du mode opératoire pour mesurer le Enat
   ii. Essais croisés après carottage sur une chaussée ancienne (module E 10°C 124 ms > 3500 MPa)
      - Un laboratoire mesure le E sur l'ensemble des éprouvettes + % vides puis distribution de 3 éprouvettes / laboratoire
   iii. Sur un chantier de GE R (maniabilité plusieurs jours), prélever de l'enrobé et l'envoyer aux laboratoires participants aux essais ;
      - Fabrication des éprouvettes à J+ 1 ou 2 à 2 en vides (13 et 17 % par ex.)
      - Suivi du Module Nat = f(t)
   iv. En fonction des variations de résultats :
      - Demander à un labo de fabriquer les éprouvettes pour les autres laboratoires / mode de compactage à définir ;
      - Refaire un essai sur un BBE à partir des matières premières ou /et un laboratoire fabrique des éprouvettes pour les autres laboratoires / mode de fabrication et compactage à définir.

b- Mesure de la tenue à l'eau d'un enrobé à l'émulsion après mûrissement
   i. Immersion d'éprouvettes dans l'eau à 40 ou 60 °C en fonction du (t)

c- Evaluer l'impact de l'eau sur le module de rigidité de ces mélanges.
   i. Caractériser le module Enat en fonction du temps d'immersion dans l'eau éprouvettes d'enrobé.

d- Faire évoluer les protocoles de mûrissement et de vieillissement des mélanges (pas que thermique comme RILEM) et essais de caractérisation : fissuration, déformation permanente, étude du durcissement
   i. Mettre au point un ou plusieurs protocoles de mûrissement prenant en compte l'effet thermique, des UV et de l'humidité pour simuler la montée en cohésion des enrobés à l'émulsion (zone ombragée, zone ensoleillé).
      - Conditionnement des éprouvettes (températures : 35 ou 60°C, hygrométries : 50 ou 90 % HR, durées : 7, 14, 21 jours)
      - Condition de mûrissement sous UV à définir (longueur d'onde et durée)
      - Valider ces protocoles de mûrissement en les comparant aux cinétiques de montée en cohésion constatées sur des mesures sur sites expérimentaux (E = f(t), maniabilité = f(t) ou méthode radar ou autres méthodes mis au point dans la phase I).
   ii. Mettre au point un ou plusieurs protocoles de vieillissement prenant en compte les effets thermiques, UV et humidité pour simuler le vieillissement :
      - Conditionnement des éprouvettes (températures : 35°C, 60°C, durées : 9, 14, 21 jours)
      - Condition de mûrissement sous UV à définir (longueur d'onde et durée)

- Caractérisation physico-chimique et rhéologique des liants extrait des mélanges vieillis,
    - ISO = f(t) et ICO = f(t), SARA = f(t), G*= f(t).
- Caractériser mécaniquement les matériaux vieillis
    - Déformation permanente (% d'ornière = f(t)), fluage-recouvrance =f(t), fissuration (ténacité =f(t))
    - Tenue à l'eau I/C= f(t)

e- Mettre au point un protocole de vieillissement à l'échelle du liant (à l'image du PAV + UV).

i. 20h de PAV + autre durée
ii. Condition de vieillissement sous UV à définir (3 longueurs d'onde et 3 durées)
iii. Caractérisation physico-chimique et rhéologique des liants extrait des mélanges vieillis
   - ISO = f(t) et ICO = f(t), SARA = f(t), G*= f(t).
iv. Comparer les propriétés des liants vieillis à celles des liants extraits des matériaux prélevés sur site.

Sous-Thème 1.1.3 Méthode de formulation des mélanges à l'émulsion avec des AE

Action 1.1.3.1 Compléter la méthode de formulation des mélanges à l'émulsion avec des AE et évaluer leur recyclabilité

Pilotes de l'action : Frédéric Delfosse (Vinci Construction), Nelson Alvarado (Roger Martin)
Partenaires : Vinci Construction, Charier, Ingevity, Colas, Valochem, LCBTP, Roger Martin, Eiffage, UGE, Arkema, Spie, INSA Strasbourg, NGE, Braja, Cerema Occitanie
Livrables : Mise à jour du guide du retraitement des enrobés à l'émulsion, articles scientifiques
Durée, jalons : 36 mois à partir T1 – Q3

Description de l'action : Étude de recyclage dans les enrobés à l'émulsion et apport de régénérant pour favoriser la **remobilisation ou la revalorisation d'une partie du bitume vieilli.**
Aide pour la sélection du bitume d'ajout, formulation de l'émulsion, prise en compte de la granulométrie de l'AE et GNT. Définir des règles en se basant sur des règles internationales et en structurant un programme de travail complémentaire. Ce travail portera sur la formulation des enrobés non structurants et structurants.

Le programme de travail détaillé intègrera les travaux des GT 1.1.1 et GT1.1.2.
Le REX des Thèmes 1.2 et 1.3 permettront d'affiner le programme de travail et sélectionner des AE (teneur et nature des liants / granulométrie avant et après extraction…).

En fonction du mode de fabrication et des attentes mécaniques (structurant/non structurant) des verrous technologiques complémentaires seront à étudier :

- Intégration des AE dans la fabrication des enrobés
- Ajout de liant hydraulique (structurant)
- Mûrissement (impact de l'épaisseur, impact de la présence de liant hydraulique…)

UGE et INSA Strasbourg proposent de mener un programme de travail sur la mise au point d'une méthode expérimentale de caractérisation du comportement mécanique avec l'essai triaxial en fonction des conditions de mûrissement (temps, Température) et pour différentes contraintes.

L'essai triaxial permet de simuler de façon plus réaliste les états de contraintes subis par les matériaux dans la chaussée, et permettra ainsi de déterminer des modèles de comportement viscoélastique à court terme, et viscoplastique à long terme, prenant en compte l'effet du confinement.

A partir de ces résultats, on définira un abaque traduisant le comportement limite de ces matériaux selon les critères de stabilité élastique (elastic shakedown), stabilité plastique (plastic shakedown) ou instabilité plastique (rochet).

Sous-Thème 1.1.4 Analyses complémentaires des performances mécaniques des enrobés (module, durabilité) pour aider au dimensionnement des structures

Pilotes : Ferhat Hammoum (UGE), Frédéric Delfosse (Vinci Construction)
Objectifs spécifiques : Afin de pouvoir promouvoir les enrobés structurants à l'émulsion sur le marché Français une meilleure compréhension des performances mécaniques est indispensable. Ce matériau présente un comportement évolutif que l'on schématise en 2 phases : une phase de mûrissement pendant laquelle on observe une montée du module (départ d'eau, prise hydraulique dans le cas d'un liant mixte…) et une phase de stabilisation. Ces produits peuvent être fabriqués en centrale ou in situ. Dans le monde (EU, Asie, Afrique) ces produits connaissent un développement plus important et des guides techniques sont proposés. Ce sous-thème a pour objectif d'évaluer les essais mécaniques conventionnellement utilisés pour **caractériser à long terme les matériaux « à froid » dans le domaine réversible et non réversible :**

- Etudier le **comportement réversible** à long terme des mélanges avec des essais innovants puis établir des corrélations entre les essais de module à 10°C 124ms avec des essais de module à 15°C 10hz (pour la prise en compte dans Alizé),
- Evaluer le **comportement non-réversible** à partir des essais de performances en fatigue en exploitant les possibilités des outils expérimentaux disponibles et les connaissances acquises dans le domaine de la fatigue des matériaux bitumineux.

Livrables : A partir de ces résultats obtenus et des rapports produits par chaque participant, un abaque sera établi afin de traduire le comportement de ces matériaux selon les critères de ruine à définir. En fonction du niveau de sollicitation, cela devrait permettre de vérifier si le matériau aura un comportement stable dans la chaussée, ou risque de se déformer ou de se fissurer après un grand nombre de cycles à définir. La présence d'un liant viscoélastique interroge sur la température de l'essai et le mode de ruine. Le mode de ruine (déformation permanente ou/et fissuration) sera pris en compte dans l'élaboration de l'abaque avec la définition de la plage de température applicable.

Action 1.1.4.1 Comportement à long terme des mélanges

Pilotes de l'action : Ferhat Hammoum (UGE), Bertrand Pouteau (Vinci Construction)
Partenaires : Vinci Construction, Roger Martin, UGE, Colas, Spie, ENTPE, Arkema, NGE, Ingevity, Valochem, Eiffage, LCBTP, Braja, Université de Bourgogne
Durée, jalons : à partir T1 Q3 sur 15 mois environ

Description de l'action : L'objectif ici est de caractériser le comportement à long terme des mélanges à froid pour couches structurantes, contenant éventuellement des agrégats d'enrobés. On exploitera les différents moyens mobilisables par les laboratoires (traction/compression, torsion/axial, cisaillement-compression ou flexion 4 points). La géométrie des éprouvettes diffère d'un essai à l'autre. La taille des granulats sera fixée pour éviter les effets d'échelle ou d'hétérogénéité.

Possibles préparations des éprouvettes :

- Un matériau de référence pourra constituer un dénominateur commun entre l'ensemble des participants au GT 1.1.4. Des laboratoires fabriqueraient des éprouvettes (attention à l'impact de l'outil de malaxage).
- Réalisation d'une planche expérimentale sur le site de l'UGE pour pouvoir procéder aux prélèvements pour l'ensemble des participants plus facilement.

- Prélèvement d'une grande quantité d'enrobé lors d'une fabrication industrielle. Des laboratoires prépareraient les éprouvettes aux dimensions demandées par les laboratoires d'analyses. Il sera nécessaire de prendre en compte les délais de maniabilité du produit étudié.

Les prélèvements des carottes dans les Thèmes 1.2 et 1.3 pourraient être utilisés également pour établir ces corrélations (mûrissements sur chantier entre 1 et plus de 15 ans). Au préalable, un échange avec les responsables des actions du PN sera nécessaire pour définir le matériau et le mode de mûrissement à partir des besoins de chaque participant du sous-thème 1.1.4.

Une concertation entre les différents participants permettra de cibler les conditions d'essai (conditionnement, collage des éprouvettes, instrumentation et conditions de l'essai - températures, mode de sollicitation (force ou déplacement), niveaux de chargement, fréquence, etc. Un tableau de suivi de l'avancement des essais sera élaboré et des réunions périodiques seront programmées pour faciliter les échanges.

Variables de formulation à étudier : % bitume, nature du bitume d'apport, % AE (prise en compte du pourcentage du liant de l'AE, gestion de l'hétérogénéité du mélange), % vides (VMA, VFA).

Action 1.1.4.2 Caractérisation des propriétés non réversibles des enrobés à l'émulsion

Pilotes de l'action : Ferhat Hammoum (UGE), Bertrand Pouteau (Vinci Construction)
Partenaires : Vinci Construction, Roger Martin, UGE, Colas, Spie, ENTPE, Arkema, NGE, Ingevity, Valochem, Eiffage, LCBTP, Braja, Université de Bourgogne
Durée, jalons : 36 mois à partir T1+ Q3

Description de l'action : Ces essais seront réalisés dans des conditions similaires à l'action précédente (1.1.4.1) dans le domaine non linéaire. Des travaux de modélisation numérique du comportement des enrobés à l'émulsion sont proposés par l'Université de Bourgogne. Cette démarche transposée à un suivi du mûrissement ou du vieillissement de l'enrobé à l'émulsion permettra de proposer une loi du comportement évolutif de l'arrangement granulaire et des propriétés mécaniques de la matrice. Il est également possible de généraliser cette démarche aux essais mécaniques hétérogènes comme la flexion 2, 3 et 4 points avec prise en compte de l'endommagement.

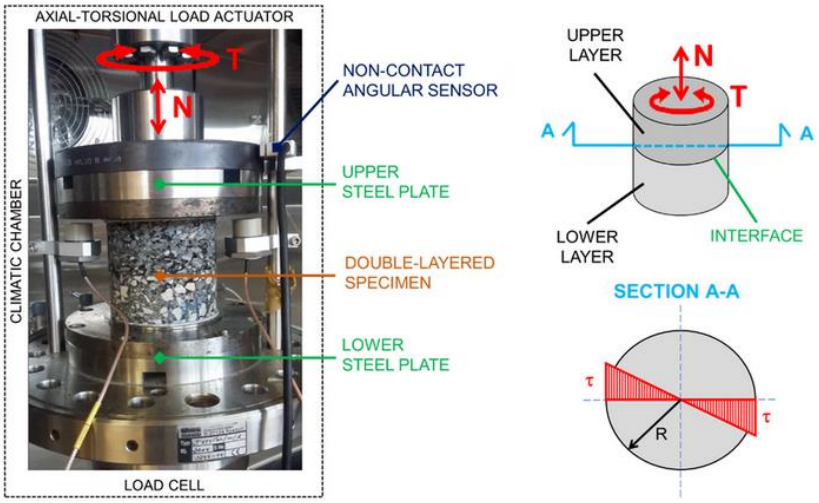

Figure 4. Dispositif d'essai de fatigue par cisaillement [Ragni et al., 2020].

3.1.2 Thème 1.2 : Comportement et Propriétés des Mélanges non-Structurants

Pilotes : Claude Giorgi (Eiffage Route), Lionel Odie (Cerema Ouest), Alvaro Pedraza (Razel Bec)

Contexte : Les enrobés à l'émulsion les plus couramment utilisés sont actuellement destinés à la réhabilitation de couches de surface. Ils correspondent principalement aux produits désignés ci-dessous :

- Bétons Bitumineux à l'Emulsion (BBE),
- Grave Emulsion (GE Reprofilage),
- Retraitement en Place (RP classes II et III).

Ces mélanges doivent répondre à une démarche de formulation individualisée, qui fera l'objet de travaux dans le cadre du sous-thème 1.1.2 du Projet National, notamment pour consolider la qualification de leur montée en cohésion.

Objectifs : Au-delà de l'approche de formulation de laboratoire, la montée en cohésion doit également pouvoir être appréhendée, dans l'environnement spécifique de chaque chantier, pour évaluer la résistance du mélange au jeune âge vis-à-vis de la remise en circulation.

Pour mieux appréhender le comportement des mélanges non structurants, le Thème 1.2 propose de rassembler les actions selon trois phases qui se succéderont dans la chronologie du PN. L'organisation du Thème 1.2 est représentée dans la Figure 5 est décrite par la suite.

Le déroulement de ce Thème est en lien avec autres GT du PN :

- Sous-thème 1.1.2 : Méthodologie de formulation en laboratoire / Approche complémentaire pour mieux évaluer le comportement du mélange sans AE ;
- Sous-thème 2.2.1 : Comportement des mélanges issus des chantiers Pilotes / Suivi des expérimentations avec mélanges non structurants

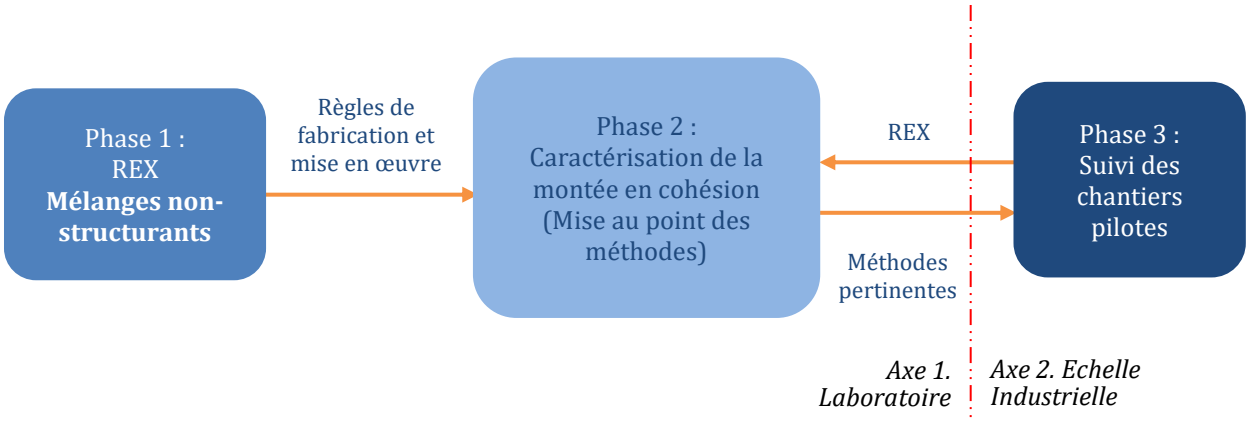

Figure 5. Schéma représentant l'organisation du Thème 1.2 : Comportement et Propriétés des Mélanges non-Structurants

Sous-Thème 1.2.1 Retours d'expérience (Phase n°1)

Partenaires : De nombreux chantiers ont été réalisés ces dernières années et vont permettre d'alimenter le retour d'expériences sur ces techniques non structurantes. Les partenaires retenus pour ce sous-thème seront aussi bien des entreprises ayant réalisées ces chantiers (Vinci, Eiffage, Colas, Spie, NGE, Razel-Bec) que des maitres d'ouvrage où ont été réalisés ces chantiers (CD de la Haute Garonne, CD de la Haute-Loire, CD de la Gironde, CD Hérault, CD Charentes).

Objectifs : Les retours d'expérience (REX) visent à identifier des chantiers de référence (expériences positives et /ou négatives) en lien avec les différentes étapes de vie des mélanges précités : fabrication, mise en œuvre, jeune âge, remise sous trafic, comportement sous trafic, fin de vie, modes d'endommagement.

La capitalisation des retours d'expérience permettra de consolider les règles de fabrication et de mises en œuvre de ces mélanges ainsi que de préparer les phases 2 et 3 du Thème 1.2.

Description : Il est proposé de structurer les retours d'expérience sur la base de 3 chantiers par type de techniques : Bétons Bitumineux à l'Emulsion (BBE), Grave Emulsion (GE Reprofilage), Retraitement en Place (RP classes II et III). Les chantiers seront choisis en intégrant :

- La variété de techniques proposées (formulations de l'enrobé, épaisseurs, âge, condition de mûrissement, nature de couche de surface pour GE et RP) ;
- La disponibilité des éléments de la caractérisation initiale (cf. tableau REX joint en ANNEXE 1).

Un forfait REX a été estimée. Il devrait permettre d'obtenir sur une échéance à minima les caractéristiques suivantes :

- Etat de surface : uni longitudinal, macrotexture, relevé visuel, déformations ;
- Caractéristiques des matériaux : carottage pour mesures de compacité et module (si épaisseur suffisante) ; Granulométrie, teneur en liant, consistance et du liant ;

Livrables : Cette phase se terminera par une capitalisation des enseignements issus des chantiers déjà réalisés avant le PN pour mettre en avant les point à améliorer sur ces techniques. Ceci permettra de mieux définir les chantiers qui seront réalisés pendant le PN pour compléter les données de ce REX et évaluer l'amélioration des performances sur ce type de mélanges (notamment la montée en cohésion au jeune âge).
Durée, Jalons : Ce REX s'articulera autour d'un travail de bibliographie qui pourra s'étaler sur les 3 premiers trimestres du terme 1 suivi d'évaluations complémentaires (notamment pour le suivi des dégradations en fin de vie de ces revêtements) jusqu'à la fin du second terme.

Sous-Thème 1.2.2 Caractérisation de la montée en cohésion, méthodologie (Phase n°2)

Partenaires : CEREMA-Ouest, Colas, Vinci, Eiffage, Spie, NGE, ENTPE, UGE.

Le Thème 1.2 propose de retenir comme « modèle principal » le BBE sans agrégats d'enrobés, du fait d'une approche de formulation « simplifiée » et de sa fonction de couche de roulement définitive.

Les autres mélanges non structurants tels que GE Reprofilage et ReP peu épais (5 à 8 cm), qui peuvent être également soumis à la circulation de façon transitoire, pourront également être étudiés, notamment pour mettre en évidence la sensibilité des méthodes de caractérisation proposées, aux variations de formulation.

Pour mieux qualifier la consolidation des mélanges sur chantier, les nouvelles méthodes attendues pourront viser une sollicitation « directe » des mélanges (e.g. cisaillement de surface : selon NF EN 12274-5, ASTM 7196-16, …) ou une caractérisation « indirecte » des mélanges (ex. ultrasons, radar et autres). La proposition de méthodes qui peuvent faire le lien entre la caractérisation de chantier et la démarche de formulation en laboratoire (cf. sous-thème 1.1.2), sera appréciée.

Description : Deux actions sont proposées sur cette thématique. Elles visent à caractériser en laboratoire (en lien avec le sous-thème 1.1.2) et sur le terrain la montée en cohésion des mélanges.

- La première action vise à évaluer la consolidation mécanique et l'évolution de la teneur en eau au travers de méthodes de « Contrôle et d'Evaluation Non Destructifs » (CEND) : ultrason et radar.

- La seconde action propose d'évaluer la résistance au cisaillement des mélanges au jeune âge sur la base d'un essai d'abrasion issu d'une adaptation de méthodes normalisées (NF EN 12274-5 :

abrasion pour MBCF; ASTM 7196-16 : Ravelling test of cold mixed emulsified asphalt samples, XP CEN/TS 12697-50 : résistance à l'arrachement superficiels des enrobés bitumineux, voir
- Figure 6) ou non normalisés (ACTE : Abrasion Cohesion Test Esso destinés aux ESU).

Essai NF EN 12274-5 (Crédit VIALAB)

Essai CEN/TS 12697-50 (crédit BRRC)

Figure 6. Dispositifs d'essais d'abrasion pour évaluer la résistance au cisaillement des mélanges au jeune âge

Le travail préparatoire de mise au point des méthodes se fera préférentiellement sur un (plusieurs) BBE sans agrégats (pour retenir un « modèle principal » relativement simple) qui pourrait correspondre à une formule pressentie pour une mise en œuvre sur un (plusieurs) chantier(s) pilote(s) ; cf. phase n° 3 en lien avec le sous-thème 2.2.1.

Les méthodes les plus pertinentes pourront faire l'objet d'une mise en œuvre sur les chantiers pilotes précités (formulations déjà étudiées au laboratoire), ainsi que sur les autres suivis dans le cadre du PN (cf. §3.1.2.3).

Livrables : Méthodes d'essais et protocoles de mesure de la montée en cohésion au jeune âge des mélanges à l'émulsion de bitume, aussi bien en laboratoire que sur chantier (in-situ).

Durée, Jalons : Ce sous-thème s'articulera également en 2 parties avec dans un premier temps la mise au point et l'optimisation d'une méthode de caractérisation de la montée en cohésion en laboratoire. Cette partie pourra s'étendre sur les 2 premiers jalons du PN. Dans un second temps, il conviendra de mettre au point une méthode adaptable sur chantier et de mesure cette cohésion sur plusieurs intervalles de durée, quasiment jusqu' à la fin du PN (milieu du terme 4).

Sous-Thème 1.2.3 Suivis de chantiers pilotes (Phase n°3)

Les chantiers qui feront l'objet d'un suivi dans le cadre du PN, seront identifiés par le Thème 2.1 « chantiers pilotes » et l'analyse des résultats obtenus dans le sous thème 1.2.3 sera menée par le Thème 2.2.1. Sur la base du REX (phase n°1) et des méthodes de caractérisation de la montée en cohésion (phase n°2), le Thème 1.2 pourra proposer d'initier le suivi de plusieurs chantiers correspondant aux différents types de mélanges non structurants, en privilégiant néanmoins le « modèle principal » que constitue le BBE. La fiche REX déjà établie pour synthétiser les informations des chantiers déjà réalisés pourra servir de base de récolte d'information pour les chantiers à réaliser dans le cadre de ce PN.

Figure 7. Exemple de mise en œuvre d'un BBE (Crédit : Eiffage)

La démarche de suivi de ces chantiers pilotes intégrera :

- Les prélèvements des constituants (formulation / caractérisation en laboratoire) en lien avec le sous-thème 1.1.2
- Les suivis de la montée en cohésion sur chantier via les méthodes proposées par le Thème 1.2 phase n°2
- Les suivis périodiques dédiés aux caractéristiques conventionnelles de consolidation mécanique (ex. module mélange ; consistance liants, …) et aux caractéristiques de surface (ex. relevés de dégradations, déformations, uni transversal et longitudinal, macrotexture).

Durée, Jalons : La périodicité cible pour les suivis est la suivante : T0 ; T0 + 6 mois, + 12 mois, + 18 mois, + 24 mois.

A l'image de la phase n°1, il est proposé de façon arbitraire de retenir 3 chantiers pilotes par type de techniques : Bétons Bitumineux à l'Emulsion (BBE), Grave Emulsion (GE Reprofilage), Retraitement en Place (RP classes II et III). Des choix différents (en nombre et en nature des procédés) pourront être faits en fonction des partenaires faisant qui intégreront le consortium.

Les chantiers seront choisis en intégrant la variété de techniques proposées (formulations de l'enrobé, épaisseurs, âge, condition de mûrissement, nature de couche de surface pour GE et RP). Le suivi sera assuré en lien avec les responsables du sous-thème 2.2.1.

Un forfait a été estimé par chantier. Il doit permettre d'obtenir sur une échéance à minima les caractéristiques suivantes :

- Etat de surface : uni longitudinal, macrotexture, relevé visuel, déformations ;
- Caractéristiques « de base » des matériaux : carottage pour mesures de compacité et module (si épaisseur suffisante) ; Granulométrie, teneur en liant, consistance et du liant ;
- Caractéristiques « complémentaires » des matériaux : caractérisation de montée en cohésion (consolidation mécanique, évolution de teneur en eau, résistance au cisaillement) issues de la phase n°2.

NB : Pour les chantiers ou techniques destinés à être recouverts dans un court délai (GE repro, Retraitement en place) seule la première échéance pourra être intégralement réalisée.

Livrables : Cette phase se terminera par l'initialisation du suivi des chantiers réalisés dans le cadre du PN avec la définition des essais et protocoles de suivi, en lien avec le groupe en charge du pilotage de ces essais (Thèmes 2.1 et 2.2). Les enseignements issus de l'analyse des ensembles des données recueillies à l'issue de ce chantier seront les livrables du thème 2.2.

3.1.3 Thème 1.3 : Comportement et Propriétés des Mélanges Structurants

Pilotes : Caroline Lévêque (Colas), Henri Péjouan (SB Malet)

Objectifs : Le premier objectif de ce groupe de travail est de valoriser au mieux les retours d'expérience internationaux ou français sur les deux **produits structurants que sont les retraitements en place et les grave-émulsion structurantes.**

Selon l'âge des chaussées considérées, l'analyse des données récoltées fera l'objet de deux sous-thèmes :

- Sous-thème 1.3.1 : REX entre 5 et 10 ans, évolution du comportement mécanique à court terme
- Sous-thème 1.3.2 : REX>10 ans, études de lois de comportement de chantiers

Ces sous-thèmes pourront être complétées par des essais complémentaires soit « classiques », soit de nature plus innovante développés notamment dans le sous-thème 1.1.4.

Cette analyse débouchera dans le sous-thème 1.3.3, sur une évaluation des modes de dégradation des produits à l'émulsion et de la structure de chaussée pour aboutir à une définition de l'état d'endommagement et finalement à la définition des critères et scénarios de dimensionnement.

Enfin, le sous-groupe 1.3.4 aura l'objectif de définir en concertation avec l'ensemble des pilotes des Thèmes dont le GT2.2, les chantiers pilotes qui permettront d'appliquer la nouvelle méthodologie de dimensionnement.

Le déroulé général du Thème 1.3 est présenté dans la Figure 8.

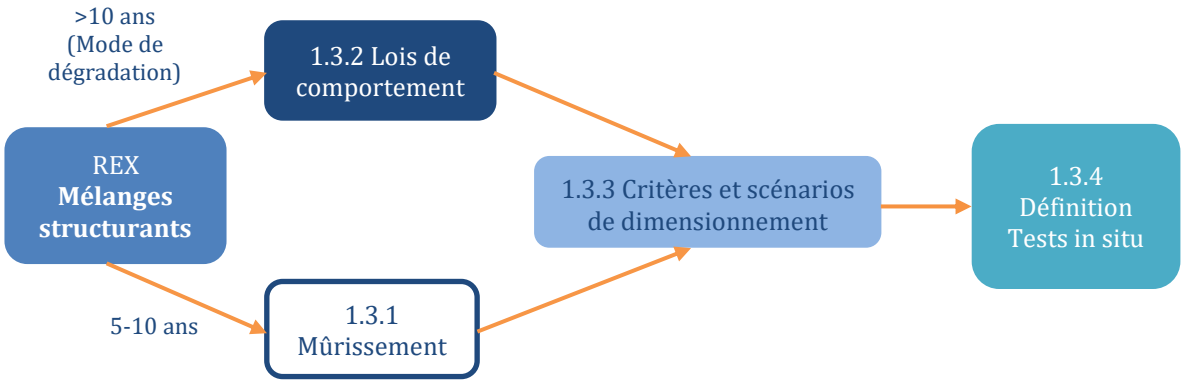

Figure 8. Schéma représentant l'organisation du Thème 1.3 : Comportement et Propriétés des Mélanges Structurants

Pour l'ensemble des actions des sous-thèmes 1.3.1 et 1.3.2, il semble opportun, avant de réaliser tout essai complémentaire, de mettre au point des procédures harmonisées d'essai (type d'appareillage, procédure d'essai, procédure de conservation des éprouvettes, etc.) afin d'obtenir des résultats d'essais les plus exploitables possibles.

Après un délai entre T1+6 mois et T1+12 mois d'analyse des données des REX, une concertation sera menée régulièrement avec les pilotes du sous-groupe 1.1.4 pour organiser une campagne des essais innovants de

caractérisation mécanique des produits structurants définie en 1.1.4.1 et 1.1.4.2 sur les chantiers qui présentent le plus d'intérêt et qui permettent surtout la réalisation de ces essais.

Sous-thème 1.3.1 Analyse de REX 5-10 ans : Prise en compte de l'évolution à court terme (mûrissement) dans le comportement mécanique (module évolutif et d'autres caractéristiques mécaniques à considérer).

Ce sous-thème est divisé en 10 actions comme présenté ci-après :

Action 1.3.1.1 REX international sur les retraitements en place et les graves-émulsion structurantes pour évaluer les pratiques existantes dans d'autres pays qui contribueront à alimenter les données françaises.

Pilote de l'action : Henri PEJOUAN, Sb Malet
Partenaires : Ensemble des pilotes d'action.

Action 1.3.1.2 Grave-émulsion structurante en renforcement de chaussée par décaissement – Chantier expérimental de la RD63j après 5 ans de mise service.

Pilote de l'action : Henri Péjouan (Sb Malet)
Partenaires : Sb Malet, Toulouse Métropole
Description de l'action : Prolonger un 1er suivi expérimental d'un chantier de GE structurante en renforcement de chaussées sous trafic lourd T1 de 300 PL/J/Sens et CAM important. Le chantier a été réalisé en septembre 2018 et a donc une durée de service de 5 ans.

Mettre en relation le comportement réel sur chaussée (chantier existant avec un suivi des sollicitations mécaniques et climatique) avec le laboratoire (essais de caractérisation) et définir des coefficients de calage (mûrissement et endommagement) pour affiner le dimensionnement.

Durée, jalons : Durée 4 ans, idéalement 10 ans pour arriver à la durée de vie du renforcement
Jalon tous les 2 ans sauf si dégradations constatées
Livrables : Rapport de retour d'expérience et précision de la méthode de dimensionnement utilisée dans le cadre de ce chantier.
Suivi de l'évolution de la section expérimentale (déflexion, module, autres) et du comportement de la GES
Caractéristiques de la GE en place, après 5 à 10 ans de mise en service et de son niveau d'endommagement.
Niveau d'endommagement du sol support.

Figure 9. Exemples de mise en œuvre d'une GE-S (crédits : Sb Malet)

Action 1.3.1.3 Suivi d'un chantier de Grave-Emulsion 0/14 structurante (GES) sur réseau DIR Massif-Central, RN88, trafic T1 à 900-1000m d'altitude support en grave laitier.

Pilote de l'action : Benoit Digonnet (Eiffage)
Partenaires : Eiffage Route, DIR Massif Central

Description de l'action : Mise à disposition de données, de prélèvement du matériau, réalisation des essais de caractérisation mécanique sur une planche d'essai :

- Poursuivre le relevé visuel annuellement et comparaison avec les sections avant et après en GB3.
- Réaliser des carottes à 4 (dès cette année), 6 ans, 8 ans (4 à 6/session min).
- Évaluer l'état du matériau : bord des trous, état des carottes
- Détermination du vide
- Détermination du module

Durée, jalons : Evaluation de l'évolution de la planche à 3 ans, à 5 ans, à 8 ans.
Livrables : Rapport de retour d'expériences et recommandations.
Comparatif entre solution GB3 et GE sur MTLH (Matériau Traité au Liant Hydraulique) dans la cinétique de remontée des fissures transversales.
Évolution du module dans le temps pour une GE structurante.
Première base pour rassurer quant aux capacités des matériaux à l'émulsion même pour une utilisation dans des conditions « extrêmes ».

Action 1.3.1.4 Emploi d'une grave-émulsion en renforcement d'une chaussée traitée aux liants hydrauliques. Evaluation de la capacité des graves-émulsion, à ralentir la remontée des fissures transversales par rapport à une solution à chaud classique.

Pilotes de l'action : Magali Vieillard (Cerema), Stéphane Ollier (Pérennise Chaussées)
Partenaires : Cerema, Pérennise Chaussées, DIR Massif Central (DIR MC)
Description de l'action : L'entretien des chaussées traitées aux liants hydrauliques est fastidieux. Sans pontage, la dégradation des fissures transversales s'accélère ce qui gangrène progressivement la structure de chaussée.

L'interface MTLH/MB est souvent dégradée et elle doit être traitée pour que la solution d'entretien soit pérenne. La DIR Massif-Central a souhaité évaluer une technique de retraitement en place à froid de la partie dégradée et du matériau bitumineux (12cm) avant de recharger avec une couche de roulement. Cette solution s'inspire des chaussées inverses mais la GNT est remplacée par une GE.

La RN88 à Bessamorel (T1-14500 veh/j) présentait des fissures transversales très graves avec des remontées de laitance ainsi que du faïençage en bandes de roulement. La technique de réfection consistait en le renouvellement total des enrobés ainsi que la reprise de l'interface.

La technique de retraitement étant trop compliquée à organiser pour une petite section, l'option d'une grave-émulsion a été retenue pour valider la propension du produit à froid à limiter la remontée des Fissures Transversales.

La DIR MC a opté pour la réalisation d'une planche d'essai de 300 m en voie lente où une grave-émulsion a été mise en œuvre à la place d'une grave-bitume sur le fond de rabotage en grave hydraulique.
Cette planche test devait permettre d'évaluer le comportement d'une Grave Emulsion sur un support en grave hydraulique. L'ambition d'expérimentation de cette solution était triple :

- Tester une technique à froid pour l'entretien des interfaces dégradées des chaussées semi rigides qui peuvent être réhaussées
- Valider la technique de retraitement en place ou matériau froid pour ralentir la remontée des Fissures Transversales
- Tester une technique de retraitement à l'émulsion (de la GNT) pour l'entretien des chaussées inverses

Le chantier s'est déroulé à l'été 2020. Les données d'étude avant, pendant et après travaux sont disponibles.

Durée, jalons : 1. 2024
2. 2024 – 2029
3. 2024-2029

En liaison avec les livrables suivants :

Livrables :
1. Rédaction d'un rapport de synthèse sur l'emploi de la grave-émulsion
2. Rédaction d'un rapport de suivi du chantier
3. Constat sur l'aptitude ou non de la grave-émulsion à ralentir la remontée des fissures transversales.

Action 1.3.1.5 Suivi de chantiers de retraitement à l'émulsion réalisés en région Ile-de-France/Centre/Ouest avec compilation des données existantes et mise à disposition de matériel d'auscultation de chaussée (carottages, déflexion FWD) pour poursuite des suivis.

Pilote de l'action : Simon Platelle (Eiffage Route)
Partenaires : Eiffage
Description de l'action : Auscultation et suivi de chantiers de retraitement à l'émulsion en Ile-de-France/Centre/Ouest (4 chantiers déjà réalisés)
Durée, jalons : Pendant 4 ans, suivi tous les 2 ans
Livrables : Rapports de suivi dans le temps de chantiers de retraitement à l'émulsion

Figure 10. Exemple de chantier de retraitement à l'émulsion (crédits : Eiffage)

Action 1.3.1.6 Suivi d'une chaussée instrumentée comportant 4 portions expérimentales (GE d'épaisseur variable) et 1 portion témoin (GB à épaisseur fixe) et capitalisation de 5 années d'acquisitions semestrielles de déformations.

Pilote de l'action : Damien Lesbats (Cerema direction territoriale Sud-Ouest)
Partenaires : Cerema, Conseil Départemental de la Gironde, NGE
Description de l'action : Débutée en 2016, l'instrumentation en place a pour objectif d'évaluer l'évolution structurelle de ce matériau, mis en œuvre à différentes épaisseurs, et en particulier de comparer son comportement à celui d'une structure d'épaisseur équivalente en grave bitume.

Le principe repose sur la réalisation de campagnes pluriannuelles d'acquisition des déformations (longitudinale et transversale) de la chaussée sous une charge connue puis d'en exploiter et interpréter les résultats. Ces acquisitions sont complétées par des auscultations traditionnelles (relevé de dégradations, FWD, déflectographe, carottages, analyse du liant, granulométrie et module).

Le mode de fonctionnement mécanique de ces matériaux est encore insuffisamment connu et il n'existe pas de méthode de dimensionnement rationnelle pour ces matériaux. Les auscultations réalisées (instrumentation, auscultation de surface), doivent permettre une meilleure appréhension de leur fonctionnement.

D'octobre 2016 à novembre 2020 date du dernier relevé, 2 campagnes annuelles d'acquisition de données ont été réalisées. Il est proposé de mettre à disposition les données de ce site expérimental et de poursuivre le suivi pour :

- Disposer d'un site instrumenté permettant de mesurer les déformations (longitudinales ; transversales) du corps de chaussée sous une charge connue
- Evaluer pour une même charge l'influence de l'épaisseur du corps de chaussée
- Capitaliser 5 années de mesures semestrielles (mesures avant/après hiver) résultats de laboratoire (granulométrie, teneur en liant ; valeurs de module) pour confronter les modèles théoriques à un modèle réel
- Disposer de résultats d'instrumentation sur une durée longue en relançant et poursuivant le suivi des planches expérimentales

Au préalable, il convient de vérifier le fonctionnement des capteurs afin de poursuivre le suivi.
Durée, jalons : Pendant 4 ans, suivi tous les 2 ans
Livrables : L'appui du site expérimental au projet national devrait permettre d'approcher un modèle de dimensionnement de la grave-émulsion.

Figure 11. Planches expérimentales instrumentées à épaisseur variable (crédits : CD Gironde, Cerema Sud-Ouest).

Action 1.3.1.7 Mise à disposition d'un chantier de retraitement en place à l'émulsion de bitume en été 2024

Pilote de l'action : Stéphane Ollier, Pérennise Chaussées
Partenaires : Pérennise Chaussées, DIR Massif Central (DIR MC)
Description de l'action : La DIR Massif-Central est moteur dans la décarbonation des chaussées.
Lors des études d'entretien elle souhaite que des solutions de retraitement puissent être proposées.
C'est le cas sur une section de la 43 N102 (T2 – 5000 veh./j) où elle envisage de réaliser un chantier de retraitement à l'émulsion avec une couche de roulement en enrobé.
Une étude d'entretien classique sera réalisée ainsi qu'un dimensionnement avec la méthode présentée dans le guide retraitement en place à l'émulsion (Critère Epsilon z). Les auscultations du point zéro sont disponibles.

Sur cette section, plusieurs études peuvent être menées :

1. Suivi de la mise en œuvre
2. Point zéro
3. Comportement en phase de montée en cohésion/rigidification pour réceptionner le produit (GE/BBE) et autoriser la remise au trafic
4. Suivi à moyen terme des modules (FWD, carottages et modules)
5. Validation de la méthode de dimensionnement

Durée, jalons : 1. 2024
2. 2024
3. 2024
4. 2029
5. 2029

Livrables :
- Rapport de Suivi de la mise en œuvre
- Rapport point zéro (FWD, UNIBOX)
- Rapport comportement en phase de montée en cohésion/rigidification pour réceptionner le produit (GE/BBE) et autoriser la remise au trafic
- Rapport de suivi à moyen terme des modules (FWD, UNIBOX, SSV, carottages et modules)
- Rapport validation du dimensionnement

Action 1.3.1.8 Transfert d'informations scientifiques et de suivi de trois chantiers déjà réalisés en Afrique

Pilote de l'action : Alvaro PEDRAZA (Razel Bec Fayat)
Partenaires : Razel Bec Fayat
Description de l'action : GE/BBE (Côte d'Ivoire) : Essais de module (TI-CY) sur des échantillons prélevés sur une plaque de test

• Stabilisation in situ avec l'émulsion de bitume (Côte d'Ivoire, couche de base structurelle) : un suivi de déflexion a été réalisé pendant 7 ans après la construction d'une structure de 5 cm de BBME + 20 cm de sol stabilisé avec 3% d'émulsion ECL65. Des essais de module complexe (TCD-CY) sur des échantillons de la couche de base en sol stabilisé à l'émulsion ont été réalisés à l'ENTPE de Lyon pour description de leur comportement thermomécanique.

• Stabilisation in situ avec émulsion de bitume (Mali, couche de fondation structurelle) : un suivi de déflexion a été réalisé pendant 3 ans après la construction d'une structure de 6 cm de BBME + 8 cm de GB4 + 22 cm de sol stabilisé avec 2,5% d'émulsion ECL60. Des essais de module complexe (TCD-CY) sur des échantillons de la couche de fondation en sol stabilisé à l'émulsion ont été réalisés à l'ENTPE de Lyon pour description de leur comportement thermomécanique.

Livrables : Résultats d'essais laboratoire et données terrains
Durée, jalons : Dès le démarrage du PN, action immédiate

Figure 12. Chantier couche de base structurelle (crédit : Razel Bec Fayat, Côte d'Ivoire)

Action 1.3.1.9 Analyse de REX de chantiers de retraitement 2017 à 2022 et poursuite de l'évaluation pour 3 années supplémentaires (2025 – 2027) ce qui permettra d'avoir un retour sur 10 années.

Pilote de l'action : Flavien Geisler (Eiffage Infrastructures)
Partenaires : Eiffage, CD 33 et CD 34
Description de l'action : Produit : Retraitement à l'émulsion de liant biosourcé en comparaison d'un retraitement à l'émulsion de bitume classique.

Le développement des techniques à l'émulsion se fera notamment sur l'aspect basse température et décarbonation de la technique. Le fait d'employer une technique in situ avec en plus un liant biosourcé, permet d'augmenter encore plus ce gain environnemental.

Dans le cadre d'un prix CIRR en 2017, 2 chantiers en Gironde et dans l'Hérault ont été suivi à 3 mois puis sur 5 années. Ces 2 chantiers ont été réalisés à chaque fois avec les 2 types d'émulsions précités.
La société EIFFAGE se propose d'analyser ces retours d'expérience et de continuer à suivre les 2 chantiers sur 3 années supplémentaires durant la période 2025, 2026 et 2027 pour totaliser un suivi de ces techniques sur un cycle de 10 années. Ce suivi permettra de consolider des données aptes à rassurer les donneurs d'ordre sur la pérennité de ces techniques.

Essais à réaliser :
Prélèvements des matériaux/composants utilisés pour la réalisation du chantier et analyse au laboratoire :

- Prélèvements carotte sur la chaussée (4 carottes/échéance)
  - Essais de module de rigidité
  - Récupération liant et caractérisation (consistance et rhéologie)
- Mesures caractéristiques chantier
  - Relevé visuel
  - Compacité
  - Macrotexture

Livrables : Résultats d'essais laboratoire et données terrains
Durée, jalons : 3 ans

Action 1.3.1.10 Analyse de REX de chantiers de retraitement mixte de 0 à 5 ans

Pilote de l'action : Alan Ezaoui (Vinci Construction)
Partenaires : Vinci Construction, CD 60 (Oise)

Description de l'action : L'action proposée consiste à suivre trois chantiers de retraitement en place au jeune âge. Ces chantiers se caractérisent par des retraitements en place de type mixte (émulsion de bitume + LHR, Liant Hydraulique Routier).

Le suivi de ces chantiers permettra : i) de mieux comprendre l'évolution des performances mécaniques des matériaux retraités en place au liant mixte (à court et moyen termes) ; ii) de confronter les écarts entre les études de laboratoire et les résultats sur matériaux prélevés in situ ; iii) de mieux comprendre les comportements rhéologiques de ces matériaux(viscoélasticité spécifique) ; iv) de suivre les évolutions des différentes structures à 5 ans (dégradations constatée), issues de différentes modalités de conception / dimensionnement et ainsi de mieux comprendre les mécanismes de dégradations de ces chaussées.

Trois chantiers identifiés :

- RD 60 (2022) (1 formulation, 1 structure) : planche de 700 m environ
- RD 50 (2023) (1 formulation, 1 structure) : planche d'environ 350 m
- RD 41 (2024) (1 formulation, 2 structures) : planche de 650 m environ

Livrables : Des rapports de suivis seront réalisés pour les différents chantiers (auscultations, essais en laboratoire) ; des rapports intermédiaires de synthèse (REX et synthèse) seront également transmis en milieu de projet et à la fin du PN.

- Mise en évidence des propriétés mécaniques des matériaux retraités ;
- Rhéologie des matériaux retraités en fonction des formulations retenues (dominante viscoélastique / élastique, angles de phase, mûrissement, etc.)

Comportement des chantiers à court terme (0 à 5 ans) -> dégradations constatés (+3 et +5 ans), lien avec les dimensionnements routiers (approche rationnelle française de dimensionnement)

Durée, jalons : 5 ans -> suivis des chantiers à +2 mois, +1an, + 3ans et +5ans
Rapport de suivi par chantier à +1an, +3ans et + 5ans
Rapport complémentaire de synthèse des chantiers et des principaux résultats sur la formulation ; les évolutions des performances / propriétés en 2024+2ans (2026) et 2024+5ans (2029)

Figure 13. Chantier retraitement en place, département de l'Oise, commune de Rémy

Sous-thème 1.3.2 Analyse des REx > 10 ans : Etude de lois de comportement des chantiers

Ce sous-thème est divisé en 6 actions comme présenté ci-après :

Action 1.3.2.1 REX international sur les retraitements en place et les graves-émulsion structurantes pour évaluer les pratiques existantes dans d'autres pays qui contribueront à alimenter les données françaises.

Pilote de l'action : Caroline Lévêque (Colas)
Partenaires : Ensemble des pilotes d'action.

Action 1.3.2.2 Mise à disposition de données de chantiers suivis dans le cadre d'une charte innovation

Pilote de l'action : Caroline Lévêque (Colas)
Description de l'action : Partage de REX : RD42-RD22-RD952-RN21-RD102
Analyse des données de chantier pour établissement mode de ruine et proposition de scenarios de dimensionnement (mûrissement et critère de ruine) + calculs associés
Participation à l'élaboration de nouveaux tests ou application méthode étrangère de qualification des matériaux structurants
Participation à la définition de nouveaux chantiers tests
Livrables : Données des chantiers « charte innovation » Diagnostic et suivis
Durée, Jalons : 4 ans

Action 1.3.2.3 Etude d'une chaussée souple renforcée en grave-émulsion – Exemple de la RN106 : suivi à 10 ans.

Pilote de l'action : Magali Vieillard (Pérennise Chaussées MC)
Partenaires : PC MC, DIR Massif Central
Description de l'action : En 2013, la DIR Massif-Central a opté pour des techniques à froid pour renforcer l'itinéraire complet de la RN106 en Lozère (T2 – 3600 veh/j). Cette technique, à l'époque, est moitié moins chère qu'un renforcement à chaud. De grandes sections ont été réalisées avec une grave-émulsion structurante recouverte d'un simple enduit.

Il est proposé de suivre, tout particulièrement, les sections PR 75 à 77 (2015) et PR 65 à 71 (2016). Dans cette optique, un suivi à 10 ans serait proposé avec la réalisation de différents essais :

- Du relevé de dégradations,
- Des carottages afin de réaliser des essais de module sur la grave-émulsion,
- Du FWD pour quantifier l'endommagement du sol,
- De l'Uni Longitudinal.

Les mesures avant travaux sont en partie, disponibles, ainsi que celles en cours de chantier.
Livrables :

- Ce suivi à 10 ans nous permettra de :
- Quantifier l'apport structurel de la grave-émulsion,
- Vérifier le dimensionnement réalisé à l'époque.

Durée, Jalons : 6 mois pour la réalisation des différents essais et rédaction du rapport de suivi, 2025-2026

Action 1.3.2.4 Suivi à long terme de chantier de Grave-Emulsion Structurante,

Pilote de l'action : Arnaud Mazars (Cerema)
Partenaires : CD31, CD35 et CD43
Description de l'action : Dans le cadre d'opérations de recherche conjointes LRPC/Ifsttar (opérations Optimirr et MBDE), des chantiers expérimentaux de Grave Emulsion structurante ont été réalisés dans différents départements (35, 31, 43) au début des années 2010.
Chaque chantier a fait l'objet d'un suivi de mise en œuvre détaillé et d'un suivi du comportement mécanique au moyen de mesures de déflexion (Déflectographe Flash, FWD, …). La périodicité de mesures était semestrielle sur une durée de 2 à 4 ans.
L'exploitation de ces données a à peine été initiée ; pourtant elles constituent une base sans équivalent à l'échelle nationale.
Nous proposons d'en dresser un état de lieux pour estimer son exploitabilité puis d'en réaliser l'exploitation pour mettre en évidence l'évolution des modules de ces matériaux au cours du temps
Livrables : Rapport de suivi, données chantiers et essais complémentaires
Durée, Jalons : 4 ans

Action 1.3.2.5 REX des chantiers réalisés dans le cadre du projet OPTIMIRR

Pilote de l'action : Arnaud Mazars (Cerema)
Partenaires : CD31, CD35 et CD43
Description de l'action : Dans le cadre d'opérations de recherche conjointes LRPC/IGE (opérations Optimirr et MBDE), des chantiers expérimentaux de Grave Emulsion structurante ont été réalisés dans différents départements (35, 31, 43) au début des années 2010.
Chaque chantier a fait l'objet d'un suivi de mise en œuvre détaillé et d'un suivi du comportement mécanique au moyen de mesures de déflexion (Déflectographe Flash, FWD, …). La périodicité de mesures était semestrielle sur une durée de 2 à 4 ans.
L'exploitation de ces données a à peine été initiée ; pourtant elles constituent une base sans équivalent à l'échelle nationale.
Nous proposons d'en dresser un état de lieux pour estimer son exploitabilité puis d'en réaliser l'exploitation pour mettre en évidence l'évolution des modules de ces matériaux au cours du temps
Livrables : Rapport de suivi, données chantiers et essais complémentaires
Durée, Jalons : 4 ans

Action 1.3.2.6 REX sur les retraitements en place menés sur le réseau national de la DIR Sud-Ouest

Pilote de l'action : Henri Péjouan (SB Malet), Philippe Yaguez (DIR Sud Ouest)
Partenaires : SB Malet, DIR Sud-Ouest

Description de l'action : REX sur les opérations de retraitements en place de plus de 10 ans menés dans la campagne d'entretien de DIRSO grâce aux données de diagnostic et IQRN + essais complémentaires (carottages, modules de rigidité, essais sur liants).

Livrables : Rapport de synthèses des différentes opérations et analyses des IQRN et déflexions et rapport d'essais.
Durée, Jalons : 1 an pour REX + 1 an essais complémentaires

Pour l'ensemble des actions de ce sous-thème, il semble opportun, avant de réaliser tout essai complémentaire, de mettre au point des procédures harmonisées d'essai (type d'appareillage, procédure d'essai, procédure de conservation des éprouvettes, etc.) afin d'obtenir des résultats d'essais les plus exploitables possibles.

Après un délai entre T1+6 mois et T1+12 mois d'analyse des données des REX, une concertation sera menée régulièrement avec les pilotes du sous-groupe 1.1.4 pour organiser une campagne des essais innovants de caractérisation mécaniques des produits structurants définie en 1.1.4.1 et 1.1.4.2 sur les chantiers qui présentent le plus d'intérêt et qui permettent surtout la réalisation de ces essais.

Sous-thème 1.3.3 Définition des critères de dimensionnement, scénarios de dimensionnement. Méthodologie pour évaluer l'état d'endommagement des produits à l'émulsion et de la structure de chaussée.

Sur la base des analyses des REX sur les produits structurants, l'objectif de ce sous-thème est de définir des critères et des scénarios de dimensionnement. Ce sous-groupe pourra également proposer des essais complémentaires sur les chantiers existants afin d'affiner la connaissance des mélanges à l'émulsion appliqués. Dans cette optique, une liste d'essais connus a été dressée.

Les différents membres de ce sous-thème proposent la mise à disposition d'experts en dimensionnement pour effectuer ce travail d'analyse et les calculs qui en découleront.

Les participants sont les suivants :

- COLAS CORE, Cécile FRIEDEL, Caroline LEVEQUE
- CEREMA, Hugues ODEON
- ESITC, Marion LAMBERT
- EUROVIA, Alan EZAOUI
- EIFFAGE, Bruno SCHOENERSTEDT
- GINGER, Jean-François LE PARC
- INGEVITY, Nicolas PICARD
- NGE, Jérôme MULLER
- UGE, Pierre HORNYCH, Vincent GAUDEFROY
- SPIE BATIGNOLLES MALET, Henri PEJOUAN

Figure 14. Planches expérimentales GE-S Sb Malet soumises au simulateur de trafic FABAC (UGE) pour détermination d'un scénario d'endommagement.

Sous-thème 1.3.4 Définition des expérimentations in situ à mener (application des scénarios à des chantiers)

Les participants du sous-thème 1.3.3 seront également chargés de définir précisément les chantiers qu'il serait intéressant de mener dans le cadre du thème GT2.2, pour mise en pratique des scénarios de dimensionnement.

Ce groupe définira aussi en concertation avec les autres sous-groupes, notamment les pilotes du groupe 1.1.4, les éventuels essais complémentaires à mener dans les phases de diagnostic et de suivi de ces chantiers pilotes que ce soient des essais classiques d'auscultation ou de détermination des caractéristiques des produits appliqués ou des essais innovants introduits dans les sous-thèmes formulation.

Note sur les Livrables du Thème 1.3

Les travaux du Thème 1.3 doivent permettre de mieux prendre en compte le comportement et les performances associées de l'enrobé à l'émulsion au sein de la structure pour (i) développer une méthode de dimensionnement réaliste et (ii) assurer des durées de vie cohérentes avec un certain niveau de trafic. Voici une synthèse des livrables finaux prévus dans ce Thème et leur phasage.

- A l'issue des REX et l'étude bibliographique (sous-thème 1.3.1 et 1.3.2, 6 mois) un premier livrable sera produit afin d'orienter les travaux du groupe 1.1.4. pour apporter des réponses à la réalisation des études du comportement des structures de chaussées à court et à long terme :
  - Quels essais permettent de mieux caractériser les enrobés à l'émulsion et les valoriser dans le dimensionnement ?
  - Quels nouveaux essais sont à mettre en place ?
  - Quels nouveaux modèles sont à développer pour le dimensionnement des structures incorporant des mélanges à l'émulsion ? (à réaliser au sein du 1.3.3).
- A l'issue de la partie 1.3.3 un deuxième livrable sera produit et définira les principes de dimensionnement des enrobés à l'émulsion parallèlement aux travaux du 1.1.4. La durée pour obtenir ce livrable est à définir.
- A l'issue de la partie 1.3.4 un troisième livrable sera produit à l'attention des Thèmes 2.1 et 2.2 avec pour objectif d'identifier les travaux à mettre en œuvre afin d'éprouver les conclusions du sous-thème 1.3.3. En fonction des sites retenus, des essais pourraient être mis en place en tenant compte du sous-thème 1.1.4 pour disposer de l'ensemble des données nécessaires au dimensionnement et à l'analyse du suivi de chantier.

3.2 Axe 2. Etude à l'échelle industrielle

Les propositions de travail décrites précédemment dans l'Axe 1 (Etude en laboratoire) ont vocation à s'appuyer sur des chantiers routiers existants mais également ceux programmés par les maitrises d'ouvrage dans le cadre du plan d'entretien de leur réseau durant la période du projet (2024-2029). L'intégration d'expérimentations réelles doit permettre de fédérer les partenaires du PN Enrobés à l'émulsion et constituera un facteur de son succès.

Cet axe du Projet National traite de l'organisation et du suivi de réalisation de chantiers (faits, à engager en 2024 et lors des années suivantes), l'adaptation des outils industriels existants et l'évaluation par analyse de cycle de vie des impacts environnementaux potentiels des enrobés à l'émulsion. L'axe se décline en 4 Thèmes et leurs sous-thèmes comme suit :

GT 2.1 Chantiers pilotes

2.1.1 Recensement et proposition des chantiers correspondant aux objectifs du PN et chiffrer la réalisation des travaux et de leur suivi
2.1.2 Préparation et logistique des chantiers

GT 2.2 Comportement des mélanges issus des chantiers Pilotes

2.2.1 Suivi des expérimentations avec mélanges non structurants
2.2.2 Suivi des expérimentations avec mélanges structurants

GT 2.3 Adaptation du matériel de fabrication et mise en œuvre

2.3.1 Adaptation des usines existantes dédiées aux enrobés anhydres pour accroitre le potentiel de production de mélanges à l'émulsion.
2.3.2 Méthodes de mise en œuvre et de compactage des mélanges

GT 2.4 Analyse de Cycle de Vie

2.4.1 Inventaires de cycle de vie pour plusieurs émulsions d'enrobage génériques
2.4.2 Evaluation des impacts environnementaux de scénarios de constructions ou d'entretien de chaussées en enrobés à l'émulsion
2.4.3 Effet de la remobilisation du liant issu des agrégats d'enrobés sur les impacts environnementaux des enrobés à l'émulsion

3.2.1 Thème 2.1 : Chantiers pilotes

Pilotes : Benoît Digonnet (Eiffage) et Philippe Raimond (Colas).

Objectifs spécifiques : Le premier but de ce groupe de travail est d'apporter une base de données terrain partagée sur des chantiers suivis dans le cadre de protocoles établis de façon collaborative et collective. Ces chantiers « pilotes » sont ou seront des chantiers de BBE, GE structurantes ou de recyclage en place à l'émulsion.

Les actions qui seront mises en place s'appuient sur les orientations données par les groupes de travail de l'Axe 1 du Projet National (Etude en Laboratoire) et compte tenu de cette imbrication forte, le programme de suivi sera affiné dès les premières conclusions des groupes de travail de l'Axe 1 connues et validées.

La sélection des chantiers devra se faire selon des critères qui permettrons de faire avancer l'état des connaissances techniques des enrobés à l'émulsion en s'appuyant sur les premiers résultats des travaux de l'Axe 1. Le Tableau 2 présentes des exemples de critères de sélection des chantiers pilotes.

Tableau 2. Exemples des critères à collecter pour la sélection des chantiers pilotes

Informations générales
Date réalisation du chantier (année / mois)
Nom de la voie
Localisation précise (Département, voie, PR, géolocalisation, ...)
Maitre d'ouvrage
Type de produits
Type de travaux (surface / structure)
Nature du chantier
Intégration d'AER
Climat

Moyens de fabrication
Poste d'enrobage
Poste uniquement froid/Adapté du chaud
Séquençage
Retraitement en place

Nature du chantier
Trafic
Tonnage
Épaisseur
Atelier de mise en œuvre (nature finisseur, compacteurs, …)
Matériel de mise en œuvre
Conditions de remise au trafic (délai, …)

La réalisation des essais (de la reconnaissance des supports, aux sondages d'avant chantier -cas du recyclage en place notamment-, aux essais sur les matériaux) se fera selon les compétences reconnues de laboratoires d'entreprises ou d'organismes publics (CEREMA, UGE ou autres) en cohérence et avec les conseils des pilotes des groupes de travail de l'Axe 1.

Le plan d'expérimentation dépendra du type de matériau/procédé étudié, avec donc 4 cas identifiés :

- Béton Bitumineux à l'Émulsion
- Grave-émulsion non structurante
- Grave-émulsion structurante
- Retraitement en place à l'émulsion

Une liste de potentiels chantiers pilotes est présentée dans le Tableau 3.

Les essais seront à réaliser en respectant 4 phases dans la chronologie du chantier :

- Investigations sur le support
- Caractérisation du matériau mis en œuvre
- Déroulement du chantier
- Suivi du chantier à 6 mois, 1 an, 2 ans, 3 ans et 4 ans

Tableau 3. Proposition des chantiers potentiels du PN, selon les matériaux

Chantier	Matériau/Procédé	Critère 1 Trafic	Critère 2 Climat	Critère 3	Verrous		
1	BBE sans et avec AER	T5/T4	Variable	Selon retour GT1.2	Etendre les limites d'usage des BBE : Cohésion au jeune âge Macrotexture	Vérifier la durabilité du matériau	
2	BBE sans et avec AER	T3	Variable				
3	BBE sans et avec AER	T2	Variable		Etendre les limites d'usage des BBE : Cohésion au jeune âge Macrotexture Trafic élevé		
4	BBE sans et avec AER	T1	Variable				
5	GE non structurante sans et avec AER	≤ T3	Sévère dans le froid		Etendre les limites d'usage des GE de reprofilage : Période de réalisation		
6	GE non structurante sans et avec AER	≤ T3	Sévère dans le chaud				
7	GE structurante sans et avec AER	> T3	Sévère dans le froid	Selon retour GT1.3	Etendre les limites d'usage des GE structurantes : Période de réalisation		Dimensionner des structures de chaussées
8	GE structurante sans et avec AER	> T3	Sévère dans le chaud				Dimensionner des structures de chaussées
9	Retraitement en place	> T3	Variable		Etendre les limites d'usage des GE de reprofilage : Période de réalisation		Dimensionner des structures de chaussées
10	Retraitement en place	> T3	Variable		Etendre les limites d'usage des GE de retraitement : Période de réalisation		Dimensionner des structures de chaussées

Un budget prévisionnel par chantier (§4.3) a été estimé en intégrant un nombre d'essai par chantier suffisant mais non encore arrêté. Une dizaine de chantiers par an (2 à 3 chantiers par technique : BBE, GE, recyclage) seraient suivis dans le cadre de ce PN.

Le budget intègre également le travail de préparation de ces chantiers et de leur suivi en exécution et post exécution. Le budget n'inclut pas les essais complémentaires qui découleraient des conclusions, des groupes de travail de l'Axe 1.

Ce groupe de travail recensera toutes les opportunités de chantiers à suivre. L'arbitrage sur ceux qui seront effectivement retenus, aura lieu au sein du Comité de Pilotage.

Une transversalité avec le Thème 2.3 est souhaitable dans le cadre des réunions de ce groupe de travail (action toutefois minoritaire vs les démarches propres aux Thèmes 2.1 et 2.2 et incluses dans le sous budget 2 ci-dessus).

3.2.2 Thème 2.2 : Comportement de mélanges issus de chantiers pilotes

Partenaires : Agents concernés par le suivi et les travaux en lien avec les chantiers : Personnels en charge des essais expérimentaux et des calculs de structure et du dimensionnement, maitrise d'œuvre, maitrise d'ouvrage

Objectifs : Le Thème 2.2 prendra en charge l'organisation du suivi des chantiers expérimentaux définis dans le Thème 2.1 en lien avec les responsables des thèmes 1.1, 1.2 et 1.3 puis validés par le Comité de Pilotage, l'analyse et l'interprétation des résultats générés plus particulièrement dans le sous-thème 1.2.3 (pour les mélanges non structurants) et le sous thème 1.3.4 (pour les mélanges structurants).

En complément à cette première mission, le thème 2.2 vise à réunir en comité, autour des chantiers du projet national, les personnels en charge des essais expérimentaux et du dimensionnement, la maitrise d'œuvre et la maitrise d'ouvrage.

Compte tenu de la complexité des travaux et des résultats à traiter, une organisation en 2 sous-thèmes complémentaires est proposée : l'un sera consacré aux **mélanges non structurants** (sous-thème 2.2.1) et l'autre aux **mélanges structurants** (2.2.2). Ils auront tous les deux pour missions :

i. d'identifier les résultats les plus significatifs en s'appuyant sur les avancées issues des travaux menés dans l'axe 1 « Etude à l'échelle du laboratoire » pour améliorer la méthodologie de formation et/ou le développement d'essais innovants et l'approche classique du suivi du comportement des mélanges et des structures de chaussée,
ii. de formuler des recommandations, qui seront repris dans l'Axe 3 dédié au transfert et à la valorisation des résultats.

3.2.3 Thème 2.3 : Adaptation du matériel pour la fabrication et mise en œuvre des mélanges à l'émulsion

Pour accompagner la montée en volume de la production d'enrobés à l'émulsion et les déployer à l'échelle du territoire national dans des conditions d'usage adaptées, un volet « matériel » sera décliné dans le thème 2.3. Il s'attachera d'abord à apporter une contribution sur les moyens industriels de production des mélanges et ensuite de leur mise en œuvre sur chaussée.

Partenaires potentiels : Entreprises de construction routière, fabricants d'usine d'enrobage et de machines de recyclage en place, fabricants de matériel de fraisage de chaussée et de mise en œuvre.

Sous-thème 2.3.1 Adaptation des usines existantes dédiées aux enrobés anhydres pour accroitre le potentiel de production de mélanges à l'émulsion.

Concernant la partie dédiée à la fabrication des mélanges, il faut noter que les sociétés de construction ont fortement investi, au cours des dernières décennies, pour acquérir des usines d'enrobage et élaborer des mélanges routiers, historiquement à chaud ou plus récemment pour (i) réduire les températures d'enrobage (procédé tiède, *i.e* environ 30°C de moins qu'à chaud) et (ii) accroitre la quantité de matériaux recyclés de la route (AE) dans les formules d'enrobé. Pour accompagner une demande croissante en produits à froid à l'émulsion, la stratégie privilégiée des sociétés routières est d'adapter le parc fixe existant. Compte tenu de la spécificité des mélanges à l'émulsion et d'une demande croissante potentielle, il est nécessaire de ré-évaluer le bénéfice d'avoir recours à des solutions de recyclage en place en France qui sont utilisées à l'international. Ce travail sera mené dans le cadre du Projet National et pourra associer avantageusement les partenaires en charge des travaux sur l'inventaire et l'analyse de cycle de vie.

Action 2.3.1.1 Réalisation d'un BBE et d'un GE à partir d'une usine de chaud rétrofitée en comparaison à une usine de froid classique

Pilotes de l'action : Benoît Digonnet (Eiffage)
Partenaires potentiels : Eiffage, Métropole de Lyon ou CD 43 ou CD 26
Livrables : Résultats d'essais laboratoire et données terrains.
Durée, jalons : 3 ans.
Description de l'action Cette action permettrait de voir l'influence de l'outil industriel sur la qualité et la pérennité du produit à l'émulsion dans le temps. Il est proposé de réaliser un BBE et une GE suivant des critères à définir par le PN (trafic, climat, taux d'AE par exemple) à partir de 2 types d'outils différents. Cela concernerait donc quatre chantiers.

Essais à réaliser :
Prélèvements des matériaux/composants utilisés pour la réalisation du chantier et analyse au laboratoire :

- Prélèvements carotte sur la chaussée (4 carottes/échéance)
  - -Essais de module de rigidité
  - -Récupération liant et caractérisation (consistance et rhéologie)
- Mesures caractéristiques chantier
  - -Relevé visuel
  - -Compacité
  - -Macrotexture

Sous-thème 2.3.2 Méthodes de mise en œuvre et de compactage des mélanges

Les mélanges à l'émulsion sont mis en œuvre et compactés avec des matériels classiques et disponibles. La formulation particulière induite par la présence d'eau en quantité non négligeable devant être maitrisée conduit à des procédures spécifiques pour la mise en œuvre et particulièrement pour le compactage (bien que la compacité finale des produits soit élevée). Par ailleurs la volonté de (i) maximiser le taux de matériaux recyclés pour les produits à l'émulsion utilisés en couches de roulement et de (ii) développer des mélanges structurants de type grave-émulsion en couche d'assise en plus fortes épaisseurs nécessite le développement de méthodes avancées (avec potentiellement l'aide de l'intelligence artificielle) tant au niveau de la mise en œuvre au finisseur que du compactage dans une optique d'économie d'énergie et de limitation des émissions de gaz à effet de serre (mise en œuvre en 1 couche, efficacité du compactage, électrification des engins de chantiers). Ce sera l'objet des échanges au sein de ce groupe de travail alimenté initialement par un recensement des outils existants et les retours d'expérience des utilisateurs des équipements.

3.2.4 Thème 2.4 : Analyse de Cycle de vie des Enrobés à l'émulsion

Pilotes : Michel Dauvergne (UGE) et Brice Delaporte (Eurobitume)
Objectifs : Evaluation des impacts environnementaux des techniques utilisant des enrobés à l'émulsion.

Ce Thème est composé par 3 actions comme présenté ci-après :

Action 2.4.1 : Inventaires de cycle de vie pour plusieurs émulsions d'enrobage génériques

Pilotes de l'action : Michel Dauvergne (UGE) et Brice Delaporte (Eurobitume)
Partenaires : Université Gustave Eiffel, Routes de France, Entreprises de travaux, Fournisseurs (Arkema, Ingevity, Valochem), Cerema.
Livrables : Inventaires de cycle de vie pour plusieurs émulsions génériques accompagné d'un rapport décrivant les hypothèses retenues et analyse des résultats d'impacts.
Durée, jalons : 18 mois. Un jalon pour l'obtention des formulations d'émulsion par les entreprises et un jalon pour l'obtention des données sur les intrants par les fournisseurs.
Description de l'action : Les principaux procédés contributeurs aux impacts d'un enrobé bitumineux chaud ou tiède sont : le liant, le procédé de chauffage et le transport. Selon la formulation, la technique d'enrobage ou la localisation du chantier et des carrières d'approvisionnement, chacun de ces procédés peut être prépondérant. Dans le cas des enrobés à l'émulsion, il ne reste que deux de ces procédés : l'émulsion et le transport. A teneur en liant résiduel équivalente, une émulsion de bitume génère davantage d'impacts que le bitume de base en raison de la présence des intrants supplémentaires (émulsifiant, acide…) et du procédé de mise en émulsion. Pour appréhender les impacts des enrobés à l'émulsion, il est donc essentiel de connaitre les impacts des émulsions entrant dans leur composition.

Formulations d'émulsions
Pour appréhender les impacts des émulsions de bitume, il est nécessaire de définir des formulations génériques représentatives de l'activité courante des entreprises de travaux. Pour cela, un travail de collecte et d'agrégation de données sera mené sous couvert de confidentialité et permettra de retenir des formulations moyennes par famille et ainsi d'obtenir des émulsions génériques. La variabilité des formules (par ex : nature et/ou dosage de l'émulsifiant) engendrera une variabilité des impacts qui sera prise en compte.

La réalisation de cette action passe par un travail préparatoire en amont pour identifier différentes « familles » d'émulsions pouvant par exemple correspondre :
- **A différents cas d'usages des enrobés froids (GE-R, GE-S, BBE, Retraitement…)**
- **A différents trafics**
- **A différentes périodes de réalisation des travaux dans l'année**

Ce travail préparatoire se fera en lien avec d'autres groupes de travail du Projet National

Collecte des données sur les constituants
Les formulations génériques étant définies, il est nécessaire de rechercher les données d'inventaires de cycle de vie (ICV) disponibles pour l'ensemble des constituants ou familles de constituants recensés. Les données peuvent provenir des bases de données génériques (Ecoinvent par exemple), de déclarations environnementales de produits issues des fournisseurs ou de toutes autres études disponibles. En cas de manque, une collecte pourra être effectuée auprès des fournisseurs pour obtenir :

- Soit un ICV réalisé par le fournisseur lui-même (ou son sous-traitant)
- Soit une description précise du procédé d'obtention du constituant permettant de le modéliser pour en faire l'ICV

Dans le cas d'ICV donnés par le fournisseur, il sera nécessaire de s'assurer de la cohérence d'ensemble (frontières du système par exemple) et le cas échéant de retravailler les données.

Modélisation et calcul des impacts
Lorsque toutes les données seront réunies, les émulsions génériques retenues seront modélisées dans un logiciel ACV et les impacts seront calculés.

Livrables : En sortie de cette action, les ICV des émulsions génériques seront disponibles ainsi que les résultats d'impacts associés. Un rapport accompagnera ces ICV en décrivant les hypothèses retenues et en commentant les résultats obtenus. Ces éléments seront utilisés dans les autres actions du Projet National mais pourront également être utilisés dans des éco-comparateurs (SEVE par exemple).

Action 2.4.2 : Evaluation des impacts environnementaux de scénarios de constructions ou d'entretien de chaussées en enrobés à l'émulsion

Pilotes de l'action : Michel Dauvergne (UGE) et Brice Delaporte (Eurobitume)
Partenaires : Université Gustave Eiffel, Routes de France, Entreprises de travaux, Fournisseurs, CEREMA
Livrables : Un rapport décrivant les indicateurs d'impacts pour différents scénarios d'utilisation des enrobés à l'émulsion et une étude comparative avec d'autres solutions techniques courantes.
Durée, jalons : 12 mois. Un jalon pour l'aboutissement de l'action sur les émulsions.

Description de l'action : Différentes études ont montré qu'une tonne d'enrobés à l'émulsion « sortie d'usine » a un moindre impact sur le changement climatique qu'une tonne d'enrobés à chaud, et représente une moindre consommation énergétique. Mais peu de références existent sur les autres catégories d'impact et sur le cycle de vie complet.

L'objectif de cette action est de combler ce manque afin de :
- Constater d'éventuels transferts d'impacts ;
- D'appréhender les impacts après dimensionnement complet de la solution (ou calcul de durée de vie) ;
- De considérer le cycle de vie complet.

Pour cela, l'action prévoit de comparer un ensemble de cas d'usages utilisant des enrobés à l'émulsion ou du retraitement en place avec des alternatives techniquement équivalentes utilisant des enrobés chauds ou tièdes.

Définition des scénarios
La réalisation de cette action suppose de définir un ensemble de scénarios utilisant les enrobés à l'émulsion (certains scénarios pourraient être ceux des chantiers du GT2.1) en faisant varier notamment :
- Les types d'enrobés à l'émulsion (GE-R, GE-S, BBE, retraitement…) ;
- Les trafics ;
- La quantité d'agrégats d'enrobés issus du recyclage des anciennes chaussées

Les scénarios seront cohérents avec les familles d'émulsions génériques définit dans 2.4.1. Les comparaisons s'effectuent à unité fonctionnelle comparable : durée de vie équivalente notamment. Si certains enrobés froids nécessitent une couche superficielle supplémentaire par rapport aux enrobés chauds, elle est également prise en compte.

Pour chacun des scénarios définis, un (ou plusieurs) scénario(s) de référence utilisant des enrobés chauds/tièdes sera fixé.

Collecte des données sur les constituants

La majeure partie de la collecte de données est effectuée dans l'action 2.4.1 et concerne les émulsions. Les données complémentaires nécessaires (granulats, procédés d'enrobage, transport, mise en œuvre…) seront collectées dans les bases de données génériques ou au travers des données publiées par les entreprises de travaux ou leurs fournisseurs.

Modélisation, calcul des impacts et analyse
Lorsque toutes les données sont réunies, l'ensemble des scénarios seront modélisés dans un logiciel ACV et les impacts seront calculés. La comparaison entre les scénarios d'usage des enrobés à l'émulsion et les scénarios de référence sera analysée et la sensibilité à certains paramètres (distance de transport par exemple) sera étudiée. Le cas échéant, les situations d'emploi des enrobés à l'émulsion les plus prometteurs seront identifiés.

Action 2.4.3 : Effet de la remobilisation du liant issu des agrégats d'enrobés sur les impacts environnementaux des enrobés à l'émulsion

Pilotes de l'action : Routes de France
Partenaires : Université Gustave Eiffel, Cerema, Entreprises de travaux, Fournisseurs
Livrables : Rapport décrivant l'effet de la remobilisation du liant issu des agrégats d'enrobés sur les impacts environnementaux des enrobés à l'émulsion et pistes de recommandations pour optimiser les pratiques de recyclage des agrégats d'enrobés, dans les enrobés à chaud ou dans les enrobés à l'émulsion.
Durée, jalons : 4 mois

Description de l'action : Les agrégats d'enrobés peuvent être utilisés :

- Pour la fabrication des enrobés à chaud, à des taux variant généralement entre 10% à 70% (le taux de substitution moyen est de 22,6% en 2022 en France). Le plus souvent, il est considéré que dans le cas du recyclage des AE dans les enrobés à chaud, la remobilisation du liant vieilli contenu dans les AE est complète. La teneur en liant visée dans la formulation des enrobés contenant des AE est donc comparable à celle des enrobés sans AE.
- Pour la fabrication des enrobés à l'émulsion, les taux de substitution peuvent aller de 10% à 100%. Le mélange entre le liant vieilli et l'émulsion d'enrobage étant réalisé sans procédé de chauffe, la remobilisation du liant vieilli de l'AE est partielle. Afin d'obtenir un comportement adapté, notamment au jeune âge, la remobilisation partielle peut être compensée en augmentant le dosage en émulsion. La teneur en liant totale des enrobés à l'émulsions recyclés est donc généralement légèrement supérieure à celle des enrobés ne contenant pas d'AE.

Cette action a pour objet d'évaluer l'effet de la remobilisation du liant issu des agrégats d'enrobés sur les impacts environnementaux des enrobés à l'émulsion. Il s'agit en particulier de comparer l'effet de l'introduction des AE sur les impacts environnementaux (notamment l'empreinte carbone), entre un enrobé à chaud et un enrobé à l'émulsion.

Les impacts environnementaux seront évalués à l'aide de l'éco-comparateur SEVE. Le logiciel SEVE repose sur une méthode de calcul et une base de données génériques reconnues par un grand nombre d'acteurs (maitres d'ouvrages, ingénieries, entreprises de travaux).

Différents paramètres d'entrée seront étudiés dans l'analyse comparative :

- la nature de l'enrobé (pour couche d'assise / de surface)
- la teneur en AE
- le taux de remobilisation
- l'effet d'un réjuvénant (en lien avec 1-1-3 du programme du PN)
- la composition de l'émulsion (donnée d'entrée de l'action 2.4.1)

- la durée de vie
- les distances de transport (qui différent entre un enrobés à chaud et un enrobé à l'émulsion)

Les déclarations environnementales de produit (DEP) ou Fiches de Données Environnementales et Sanitaires (FDES) se développent rapidement et constituent un enjeu majeur pour les fournisseurs de produits de construction. Ces documents permettent aux entreprises de communiquer de manière crédible les caractéristiques environnementales de leurs produits, en conformité avec les méthodologies de référence définies par les normes internationales ou européennes.

Le Projet National cherchera à fournir des avancées significatives dans ce contexte :

- d'une part en produisant des inventaires de cycle de vie pour des familles de matériaux dont la fréquence d'emploi est la plus représentative des pratiques actuelles (émulsions et enrobés à l'émulsion), et leurs indicateurs d'impact calculés selon les normes en vigueur ;

- d'autre part en concourant à la mise à disposition des données environnementales des produits d'entreprises (sur la base d'une démarche volontaire).

L'ensemble des données produites ou utilisées pourront alimenter à la fois les bases de données environnementales de référence dans le domaine de la construction et des outils de calcul d'Analyse de Cycle de Vie ou d'éco-comparateurs (SEVE notamment). Cela permettra aux utilisateurs, à terme, de réaliser des évaluations d'impacts environnementaux à partir d'une modélisation la plus fine possible au cas par cas des projets d'infrastructure.

3.3 Axe 3 : Transfert et valorisation des résultats

La valorisation du projet sera traitée dans le cadre d'un groupe de travail dédié.

Pilotes : Claude Giorgi (Eiffage), Ciryle Somé (Cerema)

Partenaires : Ensemble des partenaires dont les résultats seront valorisés

Objectifs : Les enrobés à l'émulsion, alternative prometteuse aux enrobés à chaud classiques, offrent de nombreux avantages environnementaux et économiques. Cependant, leur déploiement à grande échelle est freiné par l'insuffisance d'un cadre technique harmonisé et reconnu. Pour répondre à ce défi, les travaux menés dans les autres GT du Projet National conduiront non seulement à faire évoluer les normes et guides existants mais aussi à proposer de nouvelles normes (qualification de la phase de montée en cohésion des enrobés à l'émulsion, méthode complète de formulation, méthodes de dimensionnement, ...).

Ce transfert des résultats du PN vers la normalisation vise à marquer une étape importante dans le développement des enrobés à l'émulsion. Cette démarche permettra de lever les freins à leur déploiement à grande échelle et de contribuer à décarboner le secteur des infrastructures routières.

Outre la normalisation, un plan de communication sur les travaux du PN sera mis en place afin de partager ces résultats avec l'ensemble des acteurs concernés, valoriser les travaux menés et promouvoir l'adoption des enrobés à l'émulsion.

Cet axe sera décliné en 2 Thèmes et leurs sous-thèmes comme suit :

GT 3.1 Normalisation et règlementation

3.1.1 Réaliser le transfert des protocoles, essais, méthodologies du PN vers la normalisation
3.1.2 Rédaction d'un guide de bonnes pratiques (mise en œuvre, période d'application, recouvrement, domaine d'application …) avec des recommandations pour la conception et l'entretien des produits pour couches de roulement et de base.
3.1.3 Faire des recommandations sur l'utilisation des AE en techniques à l'émulsion

GT 3.2 Communication

3.2.1 Organisation de séminaires de restitution des résultats
3.2.2 Participations à des conférences nationales et internationales et de publications dans des revues techniques et scientifiques
3.2.3 Site web

3.3.1 Thème 3.1 Normalisation et règlementation

Sous-thème 3.1.1 Réaliser le transfert des protocoles, essais, méthodologies du PN vers la normalisation

Le transfert des protocoles de mûrissement/vieillissement, des protocoles d'essais et des méthodologies mis au point au cours du PN vers la normalisation (CN E, CN EC) est une finalité importante qui permet de diffuser les connaissances et les bonnes pratiques issues de la recherche à toute la profession.

Il est envisagé le transfert des protocoles de mûrissement et de vieillissement en laboratoire mis au point dans le GT 1.1.2 à l'issu des travaux du PN vers la commission de normalisation CN EC en vue de transformer ces protocoles en normes. Aussi, les méthodes d'essais mis au point pour la qualification des enrobés à l'émulsion en laboratoire dans le GT 1.1.2 (radar, propagation d'ondes, DSD, WTAT) et ceux transposables in situ (radar, ...) pourront être transférés vers cette même commission de normalisation.

Enfin, parmi les scénarios de dimensionnement qui seront proposés dans les GT 1.3.3 et 1.3.4, les plus pertinents pourront être intégrés dans la norme de dimensionnement de chaussée NF P 98086 qui ne prend pas encore en compte à ce jour ce type de matériaux, par la commission de normalisation.

Le transfert des protocoles harmonisés issus du PN vers la normalisation permettra de garantir que les produits et services répondent à des exigences de qualité et de performance, ce qui contribue à rassurer les maitres d'ouvrages

Sous-thème 3.1.2 Rédaction d'un guide de bonnes pratiques (mise en œuvre, période d'application, recouvrement, domaine d'application …) avec des recommandations pour la conception et l'entretien des produits pour couches de roulement et de base.

Les normes européennes actuellement en vigueur sur les mélanges à l'émulsion de bitume sont très générales et se contentent de lister des classes de performances selon des caractéristiques issues des enrobés bitumineux à chaud, donc pas toujours adaptés.

La profession routière a donc rédigé en 2020 sous le couvert de l'IDRRIM et du CEREMA un document reprenant la philosophie française sur ces mélanges depuis la formulation jusqu'à la mise en œuvre. Ce document de 148 pages « **Enrobés à l'émulsion fabriqués en usine** » fait pour une large part référence aux anciennes normes françaises comme la NF P98-121 :2014 sur les grave-émulsions et la NF P98-139 sur les bétons bitumineux à l'émulsion.

S'il permet d'être beaucoup plus précis que les normes européennes actuellement en vigueur et de recenser un nombre important de recommandations et conseil sur la fabrication et mise en œuvre de ce type de mélanges, il n'en reste pas moins qu'il fait référence à d'anciens documents et à des pratiques encore très empiriques.

La réalisation de ce Projet National permettra de mieux comprendre le comportement des mélanges à l'émulsion et sera l'occasion de développer des essais spécifiques à leur formulation et leur caractérisation. Notamment sur la montée en cohésion et leur relative « fragilité » au jeune âge.

Aussi, la partie dimensionnement pourra être abordée de manière beaucoup plus précise lors de la réalisation de ce futur projet national. Ceci permettra de proposer des structures types et pérennes, aptes à rassurer les maitrises d'œuvres et d'ouvrage et ainsi favoriser le déploiement de ces techniques. Cet enjeu est primordial si on veut réussir à baisser l'empreinte carbone de nos chantiers d'entretien routier.

Toutes ces nouvelles connaissances acquises à l'occasion de ce projet national pourront être retranscrites dans une mise à jour du guide IDRRIM actuel et permettra ainsi une large diffusion du travail effectué.

Sous-thème 3.1.3 Faire des recommandations sur l'utilisation des AE en techniques à l'émulsion

L'un des principaux enjeux de l'utilisation d'enrobés à l'émulsion est la diminution de l'impact carbone lors de la réalisation des chantiers routiers grâce une moindre consommation énergétique. Mais l'impact environnemental peut être réduit encore plus largement si l'utilisation d'agrégats d'enrobés (AE) est augmentée par la généralisation de tels mélanges.

Le fait de ne pas avoir besoin de réchauffer les matériaux est un atout de taille dans la préservation et la non-détérioration du liant vieilli des AE. En revanche, cette absence de chauffage est également un frein dans la remobilisation de ce liant vieilli et nécessite souvent de surdoser en émulsion d'apport lorsque des forts taux d'AE sont utilisés.

Les travaux menés au cours de ce futur projet national permettront de mieux appréhender l'utilisation d'agrégats d'enrobés dans les mélanges à l'émulsion, également de pouvoir utiliser et évaluer différents types de liants régénérants.

Ceci permettra d'augmenter le taux d'AE dans ce type de mélanges et également de prescrire leur utilisation en couche de roulement, initiative que de nombreux maitres d'ouvrage sont encore réticents à prendre.

Ces recommandations viendront compléter la future mise à jour du guide IDRRIM évoqué dans le paragraphe précédent.

3.3.2 Thème 3.2 : Communication et publications

Sous-thème 3.2.1 Organisation de séminaires de restitution des résultats

Les réunions de l'Assemblée Générale seront l'occasion de partager annuellement avec tous les acteurs impliqués, l'état d'avancement des travaux de chaque GT. Un séminaire de clôture est envisagé pour effectuer le bilan des 4 années de travaux du PN. Ce séminaire sera l'occasion de faire un rappel du contexte et des objectifs initiaux du projet, de faire une restitution des résultats des travaux de chaque GT et l'ensemble des valorisations qui en découle, mais aussi d'identifier les besoins en matière de recherche et de développement futurs.

Sous-thème 3.2.2 Participations à des conférences nationales et internationales et de publications dans des revues techniques et scientifiques

La valorisation des résultats obtenus dans le cadre du PN sera réalisée par le biais de deux axes principaux:

- Participation à des colloques nationaux et internationaux :
  Il est d'ores et déjà envisagé des communications orales ou par affiche lors de conférences nationales qui rassemblent habituellement les acteurs de la communauté routière telles que les Journées Techniques Routes, le Congrès Français du Génie Civil, le congrès de l'IDRRIM.
  Des communications orales ou par affiche lors de conférences internationales telles que l'ISAP, l'Eurobitume, le TRB, l'ISAET et l'AEMA/ARRA/ISSA sont également envisagées.

- Publications scientifiques et techniques :
  Les travaux de recherche menés dans le cadre de ce PN devraient conduire à au moins une dizaine articles scientifiques et techniques. Il peut être envisagé de soumettre ces articles scientifiques dans des revues à comité de lecture spécialisées dans le domaine.
  - Road Material & Pavement Design (RMPD)
  - Construction & Building Materials (CBM)
  - Materials and Structures

  Mais aussi dans revues technico-professionnelles
  - Revue Générale des Routes et de l'Aménagement (RGRA)

- Bitume info

Publication de rapports techniques et de brochures destinés à un public plus large, incluant des acteurs professionnels et des décideurs politiques.

Sous-thème 3.2.3 Site web

Un site web dédié au projet national sera mis en place. Il servira de support principal pour la communication externe du projet et comportera en particulier les éléments suivants :

- Le programme de recherche proposé par le projet
- Les partenaires du projet
- Les actualités du projet
- Les documents et résultats du projet destinés à être diffusés largement.

Une plateforme avec un accès réservé aux acteurs du projet sera mise en place avec 2 objectifs principaux : Organisation et Communication.

i. Organisation (stockage et mis à disposition de fichiers) :
- Templates (rapports, présentations, fiches actions, etc.),
- Comptes-rendus (AG, COPIL, Groupes de Travail)
- Rapports et livrables
- Synthèse des actions de valorisation réalisées

ii. Communication au sein du PN :
- Convocations aux AGs et GT via l'outil de messagerie (toutes les adresses e-mail du PN y sont disponibles et des listes sont créées selon les besoins)
- Actualités (informations, évènements, …) via un onglet dédié et via l'outil de messagerie également.

4 Organisation du projet

4.1 Consortium et éléments de gouvernance

4.1.1 Partenariat potentiel

Près de 60 entités ont été identifiées comme participants potentiels du Projet National (Tableau 4). La plupart d'entre eux s'est impliquée dans la co-construction des actions du programme de recherche qui est proposé.

Tableau 4. Liste de partenaires potentiels ayant manifesté un intérêt pour le PN.

Industriels / Entreprises de travaux (23)	Maitres d'ouvrage (21)	Universités, Ecoles (7)	Fédération/ cluster / Association (3)	Ingénieries, Bureaux d'études / établissement R&D (3)
Arkema	Agglo Puy-en-Velay	ENTPE	FNTP	Cerema
Braja Vesigne	CD Côte d'Or	ESITC / GC2D	Routes de France	Ginger CEBTP
Charier	CD Essonne	INSA Strasbourg	Eurobitume	Pérennise Chaussées MC
Colas	CD Eure et Loir	Univ. Bordeaux (I2M)		
Eiffage	CD Gard	Univ. Bourgogne		
Ermont Fayat	CD Gironde	Univ. Limoges (GC2D)		
Infratest	CD Haute-Loire	Université Gustave Eiffel		
Ingevity	CD Hérault			
Laboratoire CBTP	CD Ille-et-Villaine			
Lafarge Granulats	CD Indre			
Lhoist	CD La Charente			
Lhotellier - ATECLAB	CD Nord			
Malet	CD Pas-de-Calais			
NGE	CD Puy-de-Dôme			
Razel Bec Fayat	CD Rhône			
Roger Martin	CD Seine-Maritime			
Routes et Chantiers Modernes	CD Vaucluse			
Surfact Green	DIR Massif central			
Total Energies	EPI 78-92			
Valochem	Grand Lyon			
Vinci Construction	Toulouse Métropole			
Wirtgen				
WIAME Vrd				

4.1.2 Assemblée Générale

L'assemblée générale est l'instance décisionnelle du projet. Le président du projet et l'animateur de cette réunion annuelle à laquelle participent un représentant de chaque entité partenaire et les pilotes des Thèmes. Participent également les membres de la direction et les chargés de la coordination et administration du projet avec une voix consultative chacun. Le président et les directeurs du projet seront nommés lors de la première Assemblée Générale (Assemblée Constitutive). Les représentants de la Direction Recherche et Innovation du Ministère de la Transition écologique assistent de droit aux AG.

4.1.3 Comité de pilotage

Le Comité de pilotage (Copil) prend le relais décisionnel entre deux AG pour les aspects considérés prioritaires. Réunit avec une fréquence d'environ 4 fois par an, son objectif principal est de veiller au bon déroulement des actions de recherche et communication du projet et de maintenir le dynamisme nécessaire au travail collaboratif. Le Copil est composé par les animateurs des Thèmes, les membres de la direction, le président et l'administrateur du projet.

4.1.4 Thèmes et sous-thèmes

Les Thèmes et sous-thèmes seront animés par un ou deux pilotes chargés de l'avancement et de la coordination des actions de recherche et du lien avec les différents contributeurs des groupes de travail. Les Thèmes sont composés par des actions de recherche qui sont aussi coordonnées par un ou deux responsables d'action.

4.1.5 Bureau

Le Bureau a comme mission principale d'assister le COPIL dans la mise en œuvre des actions. Il est animé par le Président, accompagné par les Directeurs, la coordinatrice et l'administrateur. Ces deux derniers sont respectivement chargés de l'organisation du projet et de la synthèse et diffusion des résultats, et de la gestion administrative et financière du projet. Deux rôles sont proposés dans la direction :

- Direction Scientifique : Veille scientifique et collaboration avec les laboratoires et organismes de recherche et avancement et coordination des actions de recherche ;
- Direction Technique : Collaboration avec les maitres d'ouvrage, maitres d'œuvre et entreprises impliquées dans les actions de recherche et de l'avancement des actions de transfert ;

L'organisation de la gouvernance du Projet National est représentée dans la Figure 15.

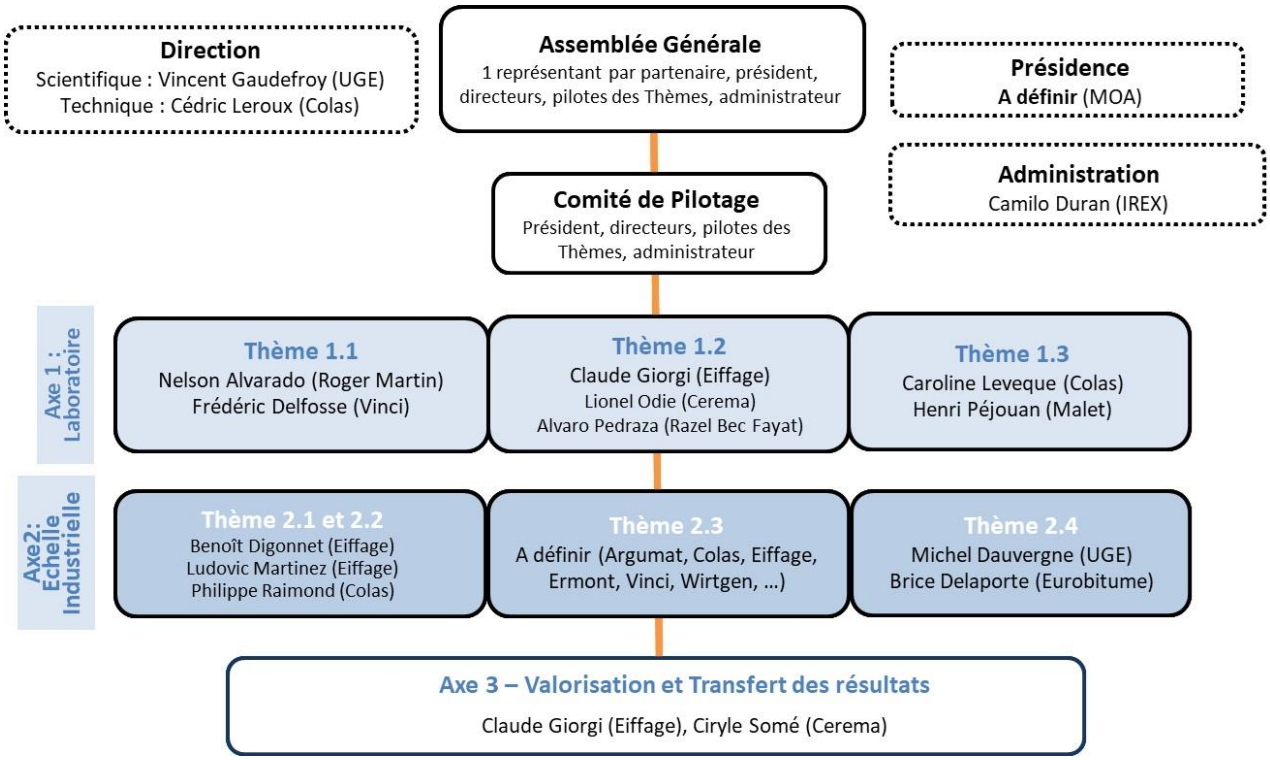

Figure 15. Organisation et gouvernance du Projet National

4.2 Planning prévisionnel du Projet National

Le planning prévisionnel pour les Thèmes et sous-thèmes est présenté dans le Tableau 5. Le démarrage du projet est prévu en septembre 2024 pour une durée de 4 ans.

Tableau 5. Planning prévisionnel du PN par Thèmes et sous-thèmes (par trimestre sur 4 ans).

Thèmes		Sous-thèmes	T1				T2				T3				T4				T5 et T6
Axe 1 : Etude en laboratoire																			
GT1.1	Méthodologie de formulation en laboratoire	1.1.1 Retour d'expériences des règles de formulation en laboratoire d'un BBE/GE																	
		1.1.2 Approche complémentaire pour mieux évaluer le comportement du mélange sans AE																	
		1.1.3 Compléter la méthode de formulation des mélanges à l'émulsion avec des AE																	
		1.1.4 Analyse complémentaire des performances mécaniques pour le dimensionnement																	
GT1.2	Comportement et propriétés des mélanges non structurants	1.2.0. Contribution à l'animation du Thème																	
		1.2.1.1. Phase 1 - REX : analyses fiches; échanges règles de l'art ; bibliographies; ….				REX Documentaire													
		1.2.1.2. Phase 1 - REX : suivi de chantiers supports									Continuation suivi chantiers pour REX								
		1.2.2 Phase 2 : Qualification de la montée en cohésion	lab					in	situ										
		1.2.3 Phase 3 : Définition des expérimentations in situ à mener => cf. GT2.2.1			Chantiers REX et futurs														
GT1.3	Comportement et propriétés des mélanges structurants	1.3.1 Analyse de REX 5-10 ans : Mûrissement																	
		1.3.2 Analyse des REx > 10 ans : Lois de comportement des chantiers																	
		1.3.3 Définition des critères et scénarios de dimensionnement.																	
		1.3.4 Définition des expérimentations in situ à mener => cf. 1.3.3																	
Axe 2 : Etude à l'échelle industrielle																			
GT2.1	Chantiers pilotes	2.1.1 Recensement chantiers correspondant aux objectifs du PN																	
		2.1.2 Préparation et logistique des chantiers expérimentaux																	
GT2.2	Comportement des mélanges issus des chantiers Pilotes	2.2.1 Suivi des expérimentations avec mélanges non structurants																	
		2.2.2 Suivi des expérimentations avec mélanges structurants																	
GT2.3	Adaptation du matériel	2.3.1 Adaptation des usines existantes dédiées aux enrobés anhydres																	
		2.3.2 Méthodes de mise en œuvre et de compactage des mélanges																	
GT2.4	Analyse de Cycle de Vie	2.4.1 Inventaires de cycle de vie pour plusieurs émulsions d'enrobage génériques																	
		2.4.2 Evaluation des impacts env. de scénarios de constructions ou d'entretien																	
		2.4.3 Effet de la remobilisation du liant issu des agrégats d'enrobés sur l'environnement																	
Axe 3 : Transfert et Valorisation des Résultats																			
GT3.1	Normalisation et règlementation	3.1.1 Réaliser le transfert des protocoles, essais, méthodologies du PN vers la normalisation																	T5 et T6
		3.1.2 Rédaction d'un guide de bonnes pratiques et des recommandations																	
		3.1.3 Faire des recommandations sur l'utilisation des AE en technique à l'émulsion																	
GT3.2	Communications et publications	3.2.1 Organisation de séminaires de restitution des résultats																	
		3.2.2 Participations à des conférences nationales et internationales et publications																	

4.3 Budget prévisionnel et plan de financement

4.3.1 Budget Prévisionnel

Le budget prévisionnel du PN est détaillé dans le Tableau 6 pour chacun des Thèmes et sous-thèmes.

Le montant global des actions envisagées est de 4926k€HT dont 71%, soit 3477k€HT seront pris en charge par les partenaires sous forme de temps passé ou de mise à disposition de matériel (Apports en nature). Les montant restant, soit 1449k€HT sera subventionné par le Projet National.

Tableau 6. Budget Prévisionnel du PN par Axe, thèmes et sous-thèmes

Thèmes		Sous-thèmes	Montant Global (k€HT)	Apports en Nature (k€HT)	Subvention PN (k€HT)
Axe 1 : Etude en laboratoire					
GT1.1	Méthodologie de formulation en laboratoire	1.1.1 Retours d'expérience des règles de formulation en laboratoire d'un BBE/GE	330,0	231,0	99,0
		1.1.2 Approche complémentaire pour mieux évaluer le comportement du mélange sans AE	720,0	504,0	216,0
		1.1.3 Compléter la méthode de formulation des mélanges à l'émulsion avec des AE	817,0	609,0	208,0
		1.1.4 Analyse complémentaire des performances mécaniques des enrobés pour le dimensionnement des structures	522,0	365,4	156,6
SOUS TOTAL			2389,0	1709,4,0	679,6
GT1.2	Comportement et propriétés des mélanges non structurants	1.2.0. Contribution à l'animation du Thème	66,0	46,2	19,8
		1.2.1.1. Phase 1 - REX : analyses fiches ; échanges règles de l'art ; bibliographies; ….	90,0	63,0	27,0
		1.2.1.2. Phase 1 - REX : suivi de chantiers supports	135,0	94,5	40,5
		1.2.2 Phase 2 : Qualification de la montée en cohésion	54,7	38,3	16,4
		1.2.3 Phase 3 : Définition des expérimentations in situ à mener => cf. GT2.2.1	-	-	-
SOUS TOTAL			345,7	242,0	103,7
GT1.3	Comportement et propriétés des mélanges structurants	1.3.1 Analyse de REX 5-10 ans : Mûrissement	293,0	205,1	87,9
		1.3.2 Analyse des REX > 10 ans : Lois de comportement des chantiers	140,6	98,4	42,2
		1.3.3 Définition des critères et scénarios de dimensionnement.	275,0	192,5	82,5
		1.3.4 Définition des expérimentations in situ à mener => cf. 1.3.3	-	-	-
SOUS TOTAL			708,6	496,0	212,6
Axe 2 : Etude à l'échelle industrielle					
GT2.1	Chantiers pilotes	2.1.1 Recensement chantiers correspondant aux objectifs du PN	150,0	105,0	45,0
		2.1.2 Préparation et logistique des chantiers expérimentaux	175,0	122,5	52,5
SOUS TOTAL			325,0	227,5	97,5
GT2.2	Comportement des mélanges issus des chantiers Pilotes	2.2.1 Suivi des expérimentations avec mélanges non structurants	276,0	193,2	82,8
		2.2.2 Suivi des expérimentations avec mélanges structurants (application des scenarios du GT1.3)	184,0	128,8	55,2
SOUS TOTAL			460,0	322,0	138,0
GT2.3	Adaptation du matériel	2.3.1 Adaptation des usines existantes dédiées aux enrobés anhydres	149,6	104,7	44,9
		2.3.2 Méthodes de mise en œuvre et de compactage des mélanges	23,1	16,2	6,9
SOUS TOTAL			172,7	120,9	51,8
GT2.4	Analyse de Cycle de Vie	2.4.1 Inventaires de cycle de vie pour plusieurs émulsions d'enrobage génériques	60,0	42,0	18,0
		2.4.2 Evaluation des impacts environnementaux de scénarios de constructions ou d'entretien	38,5	27,0	11,6
		2.4.3 Effet de la remobilisation du liant issu des agrégats d'enrobés sur les impacts environnementaux	9,4	6,5	2,8
SOUS TOTAL			107,9	75,5	32,4
Axe 3 : Transfert et Valorisation des Résultats					
GT3.1	Normalisation et règlementation	3.1.1 Réaliser le transfert des protocoles, essais, méthodologies du PN vers la normalisation	254,0	169,3	84,7
		3.1.2 Rédaction d'un guide de bonnes pratiques et des recommandations	52,8	37,0	15,8
		3.1.3 Faire des recommandations sur l'utilisation des AE en technique à l'émulsion	26,4	18,5	7,9
SOUS TOTAL			333,2	224,8	108,4
GT3.2	Communications et publications	3.2.1 Organisation de séminaires de restitution des résultats	38,0	26,6	11,4
		3.2.2 Participations à des conférences nationales et internationales et publications	46,5	32,6	14,0
SOUS TOTAL			84,5	59,2	25,4
TOTAL			**4926,4**	**3477,2**	**1449,3**

Plan de financement

Le montant de ressources à percevoir grâce aux cotisations annuelles des partenaires potentiels durant 4 ans, est estimé à 1015k€HT. Parmi les 21 maitres d'ouvrages listés comme adhérents potentiels du PN, seul une dizaine est prise en compte dans l'estimation de ce montant afin d'être plus réaliste sur les ressources potentielles. De façon complémentaire, il est envisagé de soumettre une demande de subvention au Service de l'Innovation et la Recherche (SRI) du Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires pour un montant d'environ 120k€HT. Ces ressources permettront de subventionner environ 23% du budget prévisionnel total présenté dans le Tableau 6, soit 1135k€HT des 4926k€HT. En complément, il est prévu de répondre à différents appels à projets à l'échelle nationale et européenne pour couvrir les besoins supplémentaires estimés à 314k€. Les sources alternatives de financement pourraient provenir des associations et entités suivantes :

- FEREC (Fondation d'Entreprise – Recherche Collective pour la Construction et les Infrastructures).
- ANR : financement d'un projet de recherche, dont des thèses.
- Comité d'Innovation Routes et Rues (CIRR)
- DGITM (Direction Générale des Infrastructures, des Transports et des Mobilités)

Un récapitulatif du plan de financement est présenté dans le Tableau 7.

Tableau 7. Plan de financement du PN

	Montant (k€HT)	**%**
Budget Global des actions	4926,4	100%
Apports en Nature partenaires	3477,2	71%
Cotisations partenaires PN	1015,0	21%
Etat (SRI – CGDD - MTECT)	120,0	2%
Autres sources de financement (FEREC, ANR, CIRR, DGTIM)	314,3	6%

ANNEXE 1
Fiches type pour structuration des REX - Thème 1.2

N°	Informations	à compléter
1	Date réalisation du chantier (année / mois)	
2	Nom de la voie	
3	Localisation précise (Département, voie, PR, géolocalisation, ...)	
4	Maitre d'ouvrage	
5	Type de produits	tableau 5
6	Type de travaux (surface / structure)	tableau 6
7	Nature du chantier	tableau 7
8	Caractérisations disponibles pour la fabrication	tableau 8
9	Caractérisations disponibles pour la mise en œuvre	tableau 9
10	Autres caractérisations disponibles (suivis)	tableau 10

tableau 5	**Type de produits**	**à compléter**
1	GE structurante	
2	GE reprofilage	
3	BBE	
4	Retraitement en place	

tableau 6	**Type de travaux (surface / structure)**	**à compléter**
1	Roulement	
2	Reprofilage / roulement	
3	Base / liaison	
4	Fondation / base	

tableau 7	**Nature du chantier**	**à compléter**
1	surface	
2	tonnage	
3	épaisseur	
4	conditions de remise au trafic (délai, …)	

tableau 8	**Caractérisations disponibles pour la fabrication**	**à compléter**
1	granulométrie	
2	présence d'agrégats d'enrobés	
3	teneur en liant	
4	caractérisation émulsion	
5	caractérisation liant résiduel	
6	caractérisation granulats	
7	PCG mélange	
8	tenue à l'eau mélange	
9	module mélange	
10	montée en cohésion	
11	autres caractéristiques du mélange	

tableau 9	Caractérisations disponibles pour la mise en œuvre	à compléter
1	compacité	
2	macrotexture	
3	adhérence	
4	uni longitudinal	
5	relevés visuels	
6	déformations	
7	autres relevés	

tableau 10	Autres caractérisations disponibles (suivis)	à compléter
1	compacité	
2	macrotexture	
3	uni longitudinal	
4	relevés visuels	
5	déformations	
6	autres relevés	
7	caractérisation liant résiduel	
8	caractérisation mélange	

5 Références bibliographiques

[ARRA, 2001] Asphalt Recycling and Reclaiming Association, Basic Asphalt Recycling Manual, 2001, 265 p.

[Beghin et al. 2012] A. Béghin, L. Wendling, X. Carbonneau, C. de La Roche, F. Delfosse, V. Gaudefroy, L. Odie, J.-M. Piau, J.-P. Triquigneaux, Comportement et étude des graves-émulsion – Coopération public-privé –Mûrissement et évolution temporelle des propriétés de l'enrobé et des caractéristiques du liant, Revue Générale des Routes et de l'Aménagement, 902, juin 2012, 81-89

[Bicheron, 1983] G. Bicheron, H. Lichtenstein, F. Migliori, Régénération des enrobés : Le recyclage à froid des enrobés, Compte-rendu d'essais, 1983, 33 p.

[BU, 2004] CCTG-Fascicule 24-Fourniture de liants bitumineux pour la construction et l'entretien des chaussées, 2004

[Burmister, 1943] Burmister D.M., The theory of stresses and displacements in layered systems and applications of the design of airport run ways, Proceedings of the Highway Research Board, 23, 1943, pp. 126-148.

[Cardenas et al., 2013] J.A. Cardenas, Évaluation de l'effet de la température de cure sur le comportement des matériaux bitumineux de type MR-5 traités à la mousse de bitume, Mémoire de maîtrise de l'Ecole de Technologie Supérieure de Montréal, 2013, 173 p.

[Corepasol, 2012] CoRePaSol – "Characterization of advanced Cold Recycling bitumen stabilized Pavement Solutions" (CEDR Transnational Road Research Programme 2012)

[Crabforoere, 2017] CRAB for OERE – "Cold Recycled Asphalt Bases for Optimised Energy & Resource Efficient Pavements" (CEDR Transnational Road Research Programme 2017)

[De La Roche et al., 2012] C. De La Roche, J.-P. Serfass, « comportement et études des Graves Emulsion. Coopération public Privé», RGRA n° 903, juillet 2012.

[Delfosse et al., 2012] F. Delfosse, V. Gaudefroy, B. Eckmann, L. Odie, M. Garbay, F. Le Cunff, Comportement et étude des graves-émulsion – Coopération public-privé – Caractérisation des liants bitumineux des enrobés à froid, Revue Générale des Routes et de l'Aménagement, 900, mars-avril 2012, 89-94

[Delfosse et al. 2018] F. Delfosse, A. Béghin, A. Belkahia, V. Gaudefroy, C. Gueit, L. Odie, Comportement et étude des graves-émulsion – Corrélations entre le comportement en place sur la RD 26 et le laboratoire, Revue Générale des Routes et de l'Aménagement, 954, mai 2018, 24-32

[Direct-mat, 2007] DIRECT-MAT – "DIsmantling and RECycling Techniques for road MATerials" (Coordination and Support Action, 7th Framework Programme for Research and Technological Development, FP7/2007-2013, no. 218656)

[Durand et al., 2016] G. Durand, A. Lorserie, C. Gueit, Recyclage à froid avec régénérant issu de matières premières renouvelables - Suivi de l'effet régénérant, Revue Générale des Routes et de l'Aménagement 938, 2016, 52-57

[FAYAT, 2018] guide FAYAT road equipment (construction, entretien, réhabilitation des routes (2018)

[Goacolou, 1996] Goacolou, La grave-mousse : un matériau économique pour couche d'assise, RGRA n° 742, juillet-aout 1996

[Goyer et al. 2012a] S. Goyer, M. Dauvergne, C. Ropert, L. Wendling, V. Gaudefroy, Environmental data of cold mix using emulsified bitumen for a better selection of road materials, 2nd International Symposium on Asphalt Pavement and Environment, Fortaleza, Brésil, October 2012.

[Goyer et al. 2012b] S. Goyer, M. Dauvergne, L. Wendling, J.C. Fabre, C De la Roche, V. Gaudefroy, Environmental evaluation of cold emulsion mixes, Proceedings of Life cycle assessment and construction international congress, Nantes, France, July 2012.

[Grilli et al., 2018] A. Grilli, F. Cardone, E. Bocci, Mechanical behaviour of cement-bitumen treated materials containing different amounts of reclaimed asphalt, 22(7), 2018, 836-851.

[IBEF, 2023] International Bitumen Emulsion Federation, Retraitement et recyclage à l'émulsion, https://www.ibef.net/emulsions-de-bitume/techniques-d-emulsion-de-bitume/retraitement-et-recyclage-a-l-emulsion/ (consulté le 26 juillet 2023).

[IDRRIM, 2020a] IDRRIM, Enrobés à l'émulsion fabriqués en usine, Éditions Cerema - Collections Références, 2020, 139 p.

[IDDRIM, 2020b] Manuel de dimensionnement des chaussées neuves à faible trafic, CEREMA, IDRRIM, 2020

[IDRRIM, 2021] IDRRIM, Pacte d'engagement des acteurs des infrastructures de mobilité, 2021, 27 p.

[INERIS, 2011] Méthodologie de qualification environnementale type de l'impact des eaux de rupture des émulsions de bitume dans leurs applications routières. Protocole relatif aux enrobés à l'émulsion Rapport d'étude, INERIS, Novembre 2011.

[Jain et al. 2013] S. Jain, B. Singh, Cold mix asphalt: An overview, Journal of Cleaner Production 280, 2021, 124378

[JTG, 2019] JTG T/5521 2019 China specifications English version

[Kerzreho et al., 1995] J.-P. Kerzreho, H. Odéon, Expérimentation d'enrobés à froid au manège de fatigue, Revue Générale des Routes et des Aérodromes, 734, novembre 1995, 57-69

[Khalid et al., 2009] H.A. Khalid, O.K. Monney, Moisture damage potential of cold asphalt. International Journal of Pavement Engineering 10, 2009, 311-318

[Lafon et al., 1993] J.-F. Lafon, F. Chaignon, Retraitement en place à l'émulsion, Revue Générale des Routes et des Aérodromes, 712, novembre 1993, 36-38

[Lambert, 2018] Lambert M, Comportement mécanique évolutif des enrobés bitumineux à l'émulsion : étude expérimentale et modélisation, Thèse de doctorat de l'Université de Limoges, 2018

[Li et al., 2021] C. Li, J. Ouyang, P. Cao, J. Shi, W. Yang, Y. Sha, Effect of Rejuvenating Agent on the Pavement Properties of Cold Recycled Mixture with Bitumen Emulsion, Coatings 11, 2021, 520

[Liffraud et al., 2011] M. Liffraud, A. Mazars, G. Crauzzo, G. Hauchard, L. Lascroux « Projet SUDOE-TRACC » RGRA n° 896, Septembre 2011

[Lundbert et al., 2016] Lundberg et al., Production and durability of cold mix asphalt, E&E Congress 2016, dx.doi.org/10.14311/EE.2016.074

[Ma et al. 2015] T. Ma, H. Wang, Y. Zhao, X. Huang, Y. Pi, Strength Mechanism and Influence Factors for Cold Recycled Asphalt Mixture, 2015

[Modarres et al., 2014] A. Modarres, M. Rahimzadeh, M. Zarrabi, Field investigation of pavement rehabilitation utilizing cold in-place recycling, Recycling, Resources, Conservation and Recycling 83, 2014, 112-120

[NF EN 1097-05] Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 5 : détermination de la teneur en eau par séchage en étuve ventilée

[NF EN 12697-1] Mélanges bitumineux – Méthodes d'essai – Partie 1 : Teneur en liant soluble, Collections AFNOR, 2020

[NF EN 12697-3+A1] Mélanges bitumineux – Méthodes d'essai – Partie 3 : Extraction des bitumes à l'évaporateur rotatif, Collections AFNOR, 2018 [NF EN 13108-31] Mélanges bitumineux-Spécifications pour le matériau-enrobés bitumineux à l'émulsion de bitume. (Sept. 2019)

[NF EN 12697-35] Mélange bitumineux – Essais – Partie 35 : Malaxage de laboratoire ANNEXE B

[NF EN 13074-1] Bitumes et liants bitumineux – Récupération du liant d'une émulsion bitumineuse ou d'un bitume fluidifié ou fluxé – Partie 1 : Récupération par évaporation, Collections AFNOR, 2019

[NF EN 13074-2, Bitumes et liants bitumineux – Récupération du liant d'une émulsion bitumineuse ou d'un bitume fluidifié ou fluxé – Partie 2 : Stabilisation après récupération par évaporation, Collections AFNOR, 2019

[EN 13108-31] Mélanges bitumineux - Spécifications pour le matériau - Partie 31 : enrobés bitumineux à l'émulsion de bitume, Septembre 2019

[NF EN 13808] Bitumes et liants bitumineux -cadre de spécifications pour les émulsions cationiques de liants bitumineux (Aout 2013)

[NF P 98-121] Assises de chaussées - Grave-émulsion - Définition - Classification - Caractéristiques - Fabrication - Mise en œuvre, annulée le 15 mai 2020

[NFP 98-150-2] Assise de chaussées, couches de liaisons et couches de roulement ; enrobés à froid : constituants, formulation, fabrication, transport, mise en œuvre et contrôle sur chantier (avril 2011)

[NF P98-257-1] Homogénéité des mélanges Partie 1 : Méthode de détermination de la qualité d'enrobage manuel de matériaux hydrocarbonés à froid

[Nguyen, 2013] H.V. Nguyen, Effects of mixing procedures and rap sizes on stiffness distribution of hot recycled asphalt mixtures, Construction and Building Materials 47, 2013, 728–742

[Odeon et al., 2021] H. Odéon, H. Péjouan, A. Béghin, Y. Kempf, E. Delaval, «projet CIRR Ecomix structure et Grave Emulsion – analyse calculatoire de l'expérimentation Fabac», RGRA n°983, aout 2021,

[Ojum, 2015] C. Ojum, The design and optimisation of cold asphalt emulsion mixtures, Thèse de doctorat de l'Université de Nottingham, 2015, 233 p.

[Ojum et al., 2017] C. Ojum, N. Thom, Effect of binder in recycled asphalt on cold-mix pavements, Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials, 2017, 170 (4), 205-210

[Optel, 1996] OPTEL. Optimisation of slow-setting cationic bitumen emulsions for the construction and maintenance of roads. FP 4 project BE-1516. 1996-1999.

[Potti, 2007] J.J. Potti, «le projet Score (Superior Cold REcycling) », RGRA n°855, février 2007

[Potti et al., 2010] J.J. Potti, D Lesueur, B Eckmann «Vers une méthode rationnelle de formulation des enrobés à froid : les apports du projet optel », RGRA n°805, Octobre 2010

[Ragni et al., 2020] D. Ragni, F. Canestrari, F. Allou, C. Petit, A. Millien « Shear-Torque Fatigue Performance of Geogrid-Reinforced Asphalt Interlayers », Sustainability 2020, 12, 4381.

[Routes de France, 2022a] Routes de France, Bilan environnemental, Rapport annuel - Données 2021, 2022, 14 p.

[Routes de France, 2022b] Routes de France, FDES Chaussée en enrobé bitumineux à l'émulsion pour véhicules légers, voies piétonnes et cyclables, février 2022, 23 p.

[Scetauroute] Catalogue 97, Manuel Scetauroute, manuel des chaussées neuves à faible trafic

[SETRA, 2003] SETRA, Retraitement en place à froid des anciennes chaussées, Guide technique, 2003, 98 p.

[SFERB, 2006] Les émulsions de bitume (USIRF, SFERB, route de France, RGRA, sept 2006)

[Serfass et al., 1993] J.-P. Serfass, M. Bertaud, Recyclage à froid des enrobés – Procédé Recycold, Revue Générale des Routes et des Aérodromes, 712, novembre 1993, 58-60

[Serfass et al., 1995] J.-P. Serfass, A. Joly, B. Mahé de la Villeglé, J. Samanos, J.-F. Corté, Y. Brosseaud,

[Serfass et al.,2004] J.-P. Serfass, J.-E. Poirier, J.-P. Henrat, X. Carbonneau, Influence of curing on cold mix mechanical performance, Materials and Structures, 37, 2004, 365-368

[Serfass et al. 2010] J.-P. Serfass, X. Carbonneau, F. Delfosse, J.-P. Triquigneaux, Enrobés à l'émulsion (2e partie) – Comportement et évaluation de graves-émulsion, Revue Générale des Routes et de l'Aménagement, 889, novembre 2010, 69-75

[Serfass et al. 2011] J.-P. Serfass, X. Carbonneau, F. Delfosse, J.-P. Triquigneaux, Enrobés à l'émulsion (3e partie) – Comportement et évaluation de bétons bitumineux à l'émulsion (BBE), Revue Générale des Routes et de l'Aménagement, 890, décembre 2010 – janvier 2011, 36-40

[Serfass et al., 2018] J.-P. Serfass, C. de La Roche, S. Goyer, C. Gueit, L. Wendling, A. Béghin, A. Belkahia, F. Delfosse, V. Gaudefroy, L. Odie, J.-P. Triquigneaux, L. Valéry, F. Verhée, Comportement et étude des graves-émulsion – Bilan de la coopération public-privé : acquis et suites à donner, Revue Générale des Routes et de l'Aménagement, 954, mai 2018, 34-45

[SCORE, 2005] SCORE: Superior cold recycling based on benefits of bituminous micro-emulsions and foamed bitumen. A EFCT system for the rehabilitation and maintenance of roads, GRDI-2001-40353, Projet Européen 5ème PCRD.

[Thiriet, 2021] Thiriet A, Contribution à la compréhension du mûrissement des mélanges granulaires à l'émulsion de bitume, Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes, 2021

[Todd et al. 2007] W.T. Todd, W.M. Richard, Mechanistic-empirical design guide modeling of asphalt emulsion full depth reclamation mixes, Proceedings of the 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C., 2007

[Triquigneaux et al., 2012] J.-P. Triquigneaux, L. Wendling, L. Odie, D. Claudel, V. Gaudefroy, Comportement et étude des graves-émulsion – Coopération public-privé – Essai Duriez : teneurs en vides, performances mécaniques, sensibilité à l'eau et caractérisation des liants extraits, Revue Générale des Routes et de l'Aménagement, 901, mai 2012, 62-65

[Valery et al., 2018] L. Valéry, L. Odie, Comportement et étude des graves-émulsion – Chantier expérimental de la RD 26 en Haute-Loire, Revue Générale des Routes et de l'Aménagement, 954, mai 2018, 17-22

[Vassaux, 2017] S. Vassaux, Mouillabilité et miscibilité des bitumes : application au recyclage, Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier, 2017, 236 p.

[Walter et al., 2006] J. Walter, P. Attané, I.M. Lancaster, A. Kalaaji, Le projet SCORE (Superior cold recycling) - Régénération du bitume dans le recyclage à froid, Revue Générale des Routes et des Aérodromes, 848, avril-mai 2006, 21-26

[Xiao et al., 2018] Xiao et al., A literature review on cold recycling technology of asphalt pavement, Construction and Building Materials 180 (2018) 579–604

[Zhu et al. 2019] C. Zhu, H. Zhang, L. Huang, C. Wei, Long-term performance and microstructure of asphalt emulsion cold recycled mixture with different gradations, Journal of Cleaner Production, 2019, 215, 944-951