



HAL
open science

**Comportement et étude des
graves-émulsion :Coopération public-privé : Acquis,
perspectives et suites proposées**

Chantal de La Roche, Jean Pierre Serfass

► **To cite this version:**

Chantal de La Roche, Jean Pierre Serfass. Comportement et étude des graves-émulsion :Coopération public-privé : Acquis, perspectives et suites proposées. Revue générale des routes, 2012, 903, pp 67-70. hal-00850892

HAL Id: hal-00850892

<https://hal.science/hal-00850892>

Submitted on 9 Aug 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

AUTEURS

Chantal de La Roche
IFSTTAR

Jean-Pierre Serfass
USIRF



Comportement et étude des graves-émulsion Coopération public-privé

Acquis, perspectives et suites proposées

L'article résume les connaissances acquises au cours de la coopération IFSTTAR/RST/USIRF axée sur les graves-émulsion. Dans l'optique de définir une méthodologie d'étude complète, des procédures ont été définies pour la fabrication en laboratoire, la maniabilité et la montée en cohésion, la compactabilité, la résistance en compression, la tenue à l'eau, l'extraction et la caractérisation du liant. Des points restent à approfondir : les protocoles de mûrissement accéléré, la préparation des plaques pour essais lourds. Les recherches correspondantes permettront de compléter la méthodologie. Par ailleurs, les besoins en recherche fondamentale ont été identifiés, avec les thèmes suivants : microstructure interne de l'enrobé, état du film de liant, mouvements de l'eau, comportement sous sollicitations triaxiales et tenue en fatigue.

Cet article clôture la série consacrée aux travaux sur les graves-émulsion menés conjointement par le secteur public et les entreprises routières. Il n'en est pas vraiment la conclusion, car plusieurs des questions que cette recherche a soulevées n'ont pas encore reçu de réponses complètes et des travaux complémentaires sont déjà en cours. Il est néanmoins utile de faire le point des connaissances acquises et des perspectives qu'elles ouvrent.

Acquis

Amélioration des connaissances sur le comportement des graves-émulsion (GE)

Le suivi fin du comportement de la section de GE de la RD 44 en Ile-et-Vilaine et les importantes études de laboratoire effectuées parallèlement ont produit une très grande quantité de données. Celles-ci viennent compléter l'ensemble des connaissances, constitué au cours des travaux précédemment menés par les entreprises, le réseau technique public et les maîtres d'œuvre. Les résultats obtenus confirment les traits essentiels du comporte-

ment des GE (montée en cohésion, durcissement du liant, résistance aux déformations permanentes, etc). Plusieurs de leurs caractéristiques mécaniques (maniabilité, compactabilité, tenue à l'orniérage, module de rigidité) ont été évaluées avec précision.

En outre, l'instrumentation d'une partie de la section fournira de précieux enseignements sur les variations de température et de teneur en eau au sein du matériau en place, ainsi que sur la distribution et l'évolution des contraintes dues au trafic.

Enfin, la mise en parallèle des multiples données recueillies *in situ* et des nombreux résultats d'essais de laboratoire a permis

d'avancer dans la définition des corrélations nécessaires à la mise au point d'une méthode d'étude performante.

Méthodologie d'étude et d'évaluation

Essais sur mélange frais

Fabrication, prélèvement et conservation des échantillons

Des recommandations précises ont été définies pour ces opérations, qui sont loin d'être anodines. Bien que les divers malaxeurs de laboratoire fonctionnent de manière différente des malaxeurs industriels, il a été

Recherche Enrobés à l'émulsion

établi qu'ils peuvent répliquer convenablement le processus de fabrication effectivement utilisé sur chantier. Pour cela, il faut que le laboratoire suive exactement la séquence du processus industriel : ordre d'introduction des différents constituants, répartition de l'apport d'émulsion, prétraitements éventuels (pré-humidification, pré-enrobage). Le prélèvement *in situ* d'échantillons intacts doit être, au moins au jeune âge, effectué par carottage à sec, avec refroidissement par air. Par ailleurs, la conservation des échantillons doit obéir à des règles strictes, sous peine d'altérer les caractéristiques du matériau.

Maniabilité et montée en cohésion

Les essais menés avec le maniabilité-mètre conçu à l'origine par la société Nynas ont donné un nombre suffisant de résultats cohérents pour qu'un projet de mode opératoire LPC soit publié. Cette méthode d'essai correspond au cas où le matériau est mis en tas à sa sortie du malaxeur et repris ensuite pour être transporté sur le chantier. Une variante existe, qui simule le cas où l'enrobé est chargé directement dans la benne du camion. Ces deux versions de l'essai de maniabilité pourront figurer dans le mode opératoire définitif, puis dans une norme.

A noter que, à ce jour, aucune valeur-limite de maniabilité n'a pu être déterminée pour les graves-émulsion, aucune difficulté liée à une maniabilité insuffisante n'ayant été observée au cours des chantiers. La définition d'un seuil de maniabilité pourra se faire par le suivi de chantiers de bétons bitumineux à l'émulsion (BBE), matériaux qui, eux, peuvent parfois s'avérer difficilement maniables au cours de leur mise en œuvre.

La montée en cohésion est le facteur principal de la diminution de maniabilité du matériau. L'essai de mesure de couple de décohésion mis au point par le laboratoire de Saint-Brieuc permet de suivre cette montée ; il apparaît comme discriminant et facile à réaliser. Il peut être très utile au formulateur, pour s'assurer de la maniabilité au cours

de toutes les phases de la mise en œuvre et de la tenue de l'enrobé frais lors de sa mise sous circulation. Cette caractérisation fait l'objet d'un projet de mode opératoire LPC. Une autre méthode de mesure de couple de décohésion a été mis au point par l'entreprise Malet. Se pratiquant sur un plus grand volume de matériau, il fournit des informations complémentaires par rapport à l'essai ci-dessus et constitue un outil de recherche intéressant.

Compactabilité

Deux types de presse à cisaillement giratoire (PCG) ont été utilisés dans le cadre du présent programme : la PCG 2 en configuration classique et, surtout, la PCG 3 équipée du «kit» de recueil et de pesée en continu de l'eau extrudée. Cette dernière fournit des données utiles concernant les phases successives du compactage (expulsion de l'air, extrusion de l'eau, etc). L'eau recueillie peut en outre être analysée. Une très bonne corrélation a été observée entre les courbes de densification obtenues avec les deux machines.

Par ailleurs, il est intéressant de noter que la compacité à laquelle débute l'extrusion d'eau avec la PCG 3 correspond, pour la GE de la RD 44, à celle mesurée sur le chantier à la fin du compactage.

Bien que non prédictif de la densification en place (essentiellement à cause de la grande diversité des supports sur lesquels les GE sont appliquées), l'essai à la PCG est indispensable pour caractériser le comportement au compactage d'un mélange et, si nécessaire, aider à sa formulation.

Mûrissement

Le module de rigidité a été choisi comme indicateur principal d'évaluation du mûrissement, à la fois en place et en laboratoire. Les caractéristiques du liant (pénétrabilité et température de ramollissement) ont été mesurées parallèlement. En place, le suivi a montré que la GE de la RD 44 a rapidement atteint un palier de compacité, avec des valeurs fluctuant entre 86 et 88 %. Ce niveau de compacité, habituel pour une GE, apparaît

stable à ce jour, soit après 3 ans et demi, dont 4 étés. Dans le même temps, on a enregistré un durcissement prononcé du liant *in situ*, ce qui est en ligne avec les constatations faites sur les autres sections de GE suivies précédemment dans le cadre d'autres travaux. Lorsque l'on compare l'évolution du liant de la RD 44 avec l'évolution moyenne du liant des GE fabriquées avec une émulsion de bitume 70/100 pur, on constate que, à âge égal, le liant extrait de la RD 44 reste un peu plus mou, au moins pendant la période du suivi. Pour mémoire, la GE de la RD 44 avait été fabriquée avec une émulsion de bitume 70/100 additionné de fluxant «volatil» d'origine pétrolière. Le décalage évoqué ci-dessus traduit le fait que le fluxant utilisé, bien que réputé volatil, subsiste partiellement et continue de ramollir le liant à moyen terme.

En laboratoire, la présente recherche a confirmé et précisé plusieurs points concernant le mûrissement accéléré :

- Le choix de la température de 35 °C et de l'humidité relative de 20 % est pertinent.
- Le volume V de l'échantillon, sa surface exposée à l'air S et le rapport S/V sont des paramètres déterminants de l'efficacité du mûrissement accéléré.
- La durée de mûrissement accéléré, nécessaire pour amener le matériau à un état dit mûri, c'est-à-dire très proche de celui qu'il aura en place après 1, 2 ou 3 étés (selon la réactivité de la GE et les conditions météorologiques réelles) varie en fonction des paramètres géométriques ci-dessus. Des travaux précédents ont montré qu'une durée de 14 jours convient pour les «petits» corps d'épreuve (petite presse giratoire, Duriez normal, par exemple). Les études réalisées dans le cadre de la présente coopération ont confirmé qu'une durée de mûrissement nettement plus longue est requise pour les «gros» corps d'épreuve (PCG, Duriez dilaté, par exemple). Elles ont aussi mis en évidence les problèmes qui se posent pour la préparation des plaques destinées aux essais lourds : orniérage, module complexe, fatigue.

Essais sur mélange mûri

Compression simple et tenue à l'eau (essais Duriez)

Les résultats obtenus confirment le bien-fondé de la procédure d'essai dit «Duriez aménagé». En effet, la compacité des éprouvettes moulées selon cette procédure, c'est-à-dire sous une pression égale au tiers de celle du «Duriez standard» s'est avérée très proche de celle constatée *in situ* à la fin du compactage. Comme indiqué plus haut, ce niveau de compacité correspond aussi au début de l'extrusion de l'eau lors de l'essai à la PCG 3 spécialement équipée.

La conservation normalisée (14 jours à 18 °C et 50 % HR) des éprouvettes «Duriez aménagé» n'a induit qu'un durcissement modéré du liant. Ce protocole aboutit donc à un enrobé à l'état «frais», très semblable à celui obtenu *in situ* à la fin du chantier.

Le mûrissement accéléré (14 jours à 35 °C et 20 % HR) des éprouvettes «Duriez aménagé» a durci très sensiblement le liant, l'amenant à un état très proche de celui observé en place après 2 étés. En outre, ce mûrissement a notablement amélioré la tenue à l'eau de la GE.

Les conservations, mûrissement et écrasements d'éprouvettes Duriez schématiquement décrits ci-dessus, s'avèrent donc produire des informations pertinentes en termes de compacités, de durcissement du liant et de tenue à l'eau.

Résistance à l'orniérage

Aucune amorce d'ornièrisme n'a été observée sur la grave-émulsion de la RD 44, un constat qui rejoint ceux faits sur l'ensemble des GE.

En laboratoire, la confection de plaques de matériau ayant des caractéristiques proches de celles *in situ* se heurte à deux difficultés : d'abord celle d'obtenir une compacité suffisante dans le moule, ensuite celle de parvenir à un mûrissement suffisant du corps d'épreuve, qui est à la fois volumineux et peu exposé à l'air. Les essais à l'ornièrisme sur la GE RD 44 ont été effectués sur des plaques très peu compactes (17 à 21 % de vides), plus ou moins

mûries. Malgré ces insuffisances, la tenue à l'ornièrreur a été très bonne. Cette performance s'explique par le caractère très frottant du matériau, qui est sans doute une propriété commune à toutes les graves-émulsion.

// Module de rigidité

Le module en place a été mesuré à différentes échéances sur carottes prélevées, soit directement, soit dans des plaques sciées dans la couche de GE. Plusieurs méthodes de mesure ont été employées : module complexe en flexion 2 points, module statique en traction directe, module impulsional diamétral (traction indirecte). De plus, les calculs à rebours à partir des mesures de déflexion (*Flash et Falling Weight Deflectometer*) fournissent des estimations du module en place. Les résultats dénotent une rigidification, rapide au départ (typique d'une GE fortement réactive), plus lente ensuite, avec atteinte d'un niveau de module quelque peu variable suivant les méthodes de mesure (3 000 à 4 000 MPa à 15 °C - 10 Hz ou 10 °C - 124 ms après 3 étés), habituel pour une GE structurante.

De nombreuses mesures de module ont été réalisées sur mélanges fabriqués en laboratoire, selon les méthodes ci-dessus, ainsi qu'en compression axiale sinusoïdale sur cylindres, cela à l'issue de divers protocoles de mûrissement. La comparaison entre résultats obtenus sur GE chantier et GE laboratoire a montré le besoin de durées de mûrissement relativement longues pour les corps d'épreuve volumineux, moyennant quoi de bonnes corrélations peuvent être obtenues entre laboratoire et terrain.

Sans entrer dans l'analyse complète des méthodes de mesure du module, on a constaté que les essais en flexion 2 points sur éprouvettes trapézoïdales classiques (de petites dimensions, telles que pratiquées pour les enrobés à chaud) conduisent systématiquement à des valeurs de module sensiblement inférieures à celles données par les autres méthodes. Cet écart est à attribuer à l'endommagement dû au sciage de petites éprou-

vettes à fort élanement dans un matériau qui reste fragile. L'utilisation d'éprouvettes prismatiques au lieu de trapézoïdales donne des modules plus élevés, proches de ceux obtenus avec les autres méthodes. En outre, la confection d'éprouvettes représentatives par sciage dans une plaque (cas du module complexe en flexion 2 points) impose de disposer de plaques suffisamment compactes ; la difficulté est la même que pour les plaques d'ornièrage.

// Extraction et caractérisation du liant

Le suivi de l'évolution des caractéristiques du liant est d'un grand intérêt pour comprendre les phénomènes regroupés sous le terme « mûrissement ». Lorsque le matériau est fabriqué avec une émulsion de bitume pur, les étapes de séchage et d'extraction ne posent pas de problème particulier. En revanche, quand le liant contient un fluxant volatil, comme cela est le cas pour la RD 44, la phase de séchage de l'enrobé à l'émulsion peut conduire à un départ de fluxant variable selon la manière dont elle est conduite. Un important travail expérimental a été effectué afin de définir très précisément toutes les modalités de séchage et d'extraction à respecter dans le cas d'un enrobé à l'émulsion fabriquée à partir d'un bitume fluxé avec un produit volatil.

Approche pratique : problèmes à résoudre à court terme pour finaliser la méthodologie d'étude

Comme indiqué plus haut, plusieurs questions restent posées dans le cadre de la démarche pratique visant à définir une méthodologie aussi complète que possible pour les études et contrôles courants des enrobés à l'émulsion.

Procédures de mûrissement accéléré

Les procédures à appliquer aux plus gros corps d'épreuve restent à déterminer et à valider au regard du comportement en

place. Le ou les protocole(s) retenu(s) devront rester compatibles avec les équipements disponibles et les contraintes de fonctionnement des laboratoires routiers de moyenne importance. Pour les éprouvettes de type PCG, il devrait être possible de jouer simplement sur la durée de mûrissement.

Procédures de préparation des plaques pour essais lourds

Même si les déformations permanentes ne semblent pas, à ce jour, un souci pour les graves-émulsion (ni d'ailleurs pour les bétons bitumineux à l'émulsion), il faut apporter toutes les garanties de tenue si l'on veut développer l'emploi de ces produits sous des trafics plus importants que ceux auxquels on a l'habitude de les soumettre aujourd'hui. L'obtention de corps d'épreuve représentatifs passe par la confection de plaques ayant une compacité voisine de celle du terrain, puis par le mûrissement du matériau qu'elles contiennent. Il est clair que des protocoles spécifiques doivent encore être mis au point. Le premier devra concerner le serrage de ces matériaux très frottants, car non lubrifiés par un bitume chaud, dans un espace confiné. Le second devra couvrir le mûrissement, dans un délai raisonnable, d'un volume important et peu exposé à l'air. Des pistes ont été évoquées et seront expérimentées sous peu.

Sélection des méthodes de mesure du module les plus adaptées

Le premier point à noter est la multiplicité des méthodes qui ont été utilisées ; le second est le fait qu'elles ont été mises au point dans l'optique d'être appliquées aux enrobés à chaud. La pertinence de chacune d'elles vis-à-vis des particularités des enrobés à l'émulsion, et les possibilités de les y adapter, méritent d'être examinées. Cette analyse, complétée par des campagnes d'essais, devrait aboutir à la sélection d'un petit nombre de méthodes *ad hoc*.

Prise en compte des particularités liées à la présence d'un fluxant

Outre les protocoles de séchage et d'extraction, la présence d'un fluxant devrait conduire à revoir les procédures de mûrissement. La question n'est pas simple, car l'allure du mûrissement va dépendre de :

- la cinétique d'évaporation pour les fluxants volatils,
- la cinétique de polymérisation pour les fluxants réactifs.

Compte tenu du nombre de fluxants des deux catégories, on peut penser qu'il reviendra à chaque fournisseur ou entreprise d'étudier ces aspects dans l'optique du développement de ses produits.

Approche fondamentale : besoins de recherches à moyen et long terme

Au fur et à mesure que les connaissances ont progressé, de nouvelles questions ont surgi. Certains phénomènes ont été mis en évidence, dont les causes sont mal connues. Des pratiques ont été validées empiriquement, sans qu'une explication complète et rationnelle justifie leur bien-fondé. Une meilleure compréhension des phénomènes physiques et chimiques qui gouvernent le comportement des enrobés à l'émulsion devrait aider à leur optimisation, à l'extension de leur domaine d'emploi et au développement de nouveaux produits. Des recherches fondamentales sont indispensables dans cette optique. Plusieurs thèmes se dégagent d'ores et déjà.

Recherche sur la microstructure interne des enrobés à l'émulsion et son évolution

Des travaux antérieurs à la présente recherche ont montré que, au jeune âge, les enrobés à l'émulsion contiennent une quantité de microvides résultant de la coalescence des globules de bitume. Il sera intéressant d'étudier l'influence de divers paramètres de formulation sur les teneurs et tailles des vides, ainsi que leur évolution au cours du mûrissement et sous l'effet

Recherche Enrobés à l'émulsion

du trafic. Ce travail implique de disposer d'une méthode spécifique d'investigation par analyse d'image ou, mieux, par microtomographie, cette dernière permettant de travailler en 3 dimensions.

Au cours de cette recherche, ou dans son prolongement, on pourra s'intéresser aux notions de vides communicants et de perméabilités (à l'eau et à l'air). Plusieurs propriétés de l'enrobé en dépendent : sa perméabilité au sens habituel, sa sensibilité à l'eau et son exposition aux effets de l'air, donc au vieillissement.

Recherche sur la microstructure du film de liant, la migration de l'eau et les effets du tensio-actif

Au départ, le liant se présente sous forme de globules de bitume coalescés ; il contient alors une phase aqueuse. Par la suite, l'interdiffusion des globules se produit progressivement. Au cours de cette évolution, les molécules d'eau se déplacent jusqu'à ce qu'un film de liant continu se forme. On sait peu de choses sur ces mouvements, sur les liaisons qui peuvent exister entre les différents composants (bitume, eau, tensio-actif, etc.) au cours des étapes successives de l'évolution du film de liant et du mûrissement de l'enrobé. Une recherche d'ampleur est nécessaire pour répondre à ces questions.

Recherche sur le comportement triaxial des graves-émulsion

Le fonctionnement mécanique des couches de GE évolue sensiblement au cours de la durée de vie des chaussées, en fonction du mûrissement du matériau et de sa rigidité relative par rapport au support. Au jeune âge et aux faibles valeurs de module, la GE travaille en compression suivant les 3 directions (verticale, horizontales) à la façon d'un matériau non lié. Puis, au fur et à mesure de son mûrissement et de sa rigidification, la GE et son support tendent à se comporter comme une plaque bicouche en

flexion, avec une localisation descendante dans le temps de la surface neutre et une évolution des états de contrainte vers du cisaillement et de la traction bi-axiale.

L'étude des GE sous chargements triaxiaux cycliques devrait être à cet égard riche d'enseignements, en permettant d'étudier l'ensemble des facettes du comportement réversibles et non-linéaires du matériau à ses divers stades d'évolution. Cet essai devrait aussi contribuer à mieux caractériser le comportement frottant des GE et expliquer leur résistance aux déformations permanentes sous confinement.

Recherche sur la tenue en fatigue des enrobés à l'émulsion

Cet aspect du comportement des enrobés à l'émulsion a, jusqu'à présent, été largement ignoré. A cela, deux raisons :

- D'une part, ces enrobés, et tout particulièrement les GE, sont généralement appliqués pour des trafics faibles ou moyens, sur des supports de rigidité souvent au moins égale à leur propre rigidité. Dans ces conditions, ils ne travaillent pas en fatigue. Lorsqu'ils ont été soumis à des trafics plus lourds, ils ont fait preuve d'une bonne résistance à la fatigue.

- D'autre part, l'évaluation de leur résistance en fatigue a quelque fois été tentée selon la méthode utilisée pour les enrobés à chaud (flexion 2 points sur trapèzes). Les résultats ont été médiocres, en contradiction avec les observations faites sur le terrain. Cela s'explique par les faibles compacités des éprouvettes et leur endommagement par leur sciage (voir plus haut).

Un travail de recherche est nécessaire pour répondre aux questions qui se posent, par exemple :

- Le critère de ruine par fatigue retenu pour les enrobés à chaud est-il pertinent pour les enrobés à l'émulsion ?

- Compte tenu de la capacité d'autoréparation constatée pour un certain nombre de GE, un essai de fatigue par cycles discon-

tinus n'est-il pas plus pertinent que l'essai continu en vigueur pour les enrobés à chaud ?

- Quels sont la forme de corps d'épreuve (prisme ?, cylindre ?) et le type de sollicitation les mieux adaptés pour l'essai de fatigue sur enrobé à l'émulsion ?

La prise en compte de la tenue en fatigue des enrobés à l'émulsion permettrait de compléter la méthode de dimensionnement les concernant, méthode dont le seul critère est actuellement la déformation du sol-support.

Perspectives et conclusion

Une convention a été signée récemment par le conseil général de Haute-Loire, l'IFSTTAR et l'USIRF pour la construction et le suivi d'une nouvelle section de grave-émulsion structurante. Les mesures relatives au comportement en place et les nombreux essais de laboratoire menés en parallèle permettront d'une part de compléter les connaissances, d'autre part de mettre au point l'ensemble des procédures de mûrissement accéléré.

De son côté, l'IFSTTAR poursuivra ses recherches sur les matériaux à l'émulsion dans la prochaine opération « Matériaux bitumineux durables et écologiques ». Les travaux porteront sur les relations entre performances mécaniques et microstructure. Ils comprendront deux approches, l'une « macroscopique », visant à évaluer le comportement évolutif des graves-émulsion (avec l'Université de Limoges), l'autre « microscopique » pour caractériser les teneur et répartition des vides dans l'enrobé (avec l'École centrale de Nantes). Une autre action sera menée sur le suivi de l'eau dans les matériaux à l'émulsion lors de leur séchage (avec l'Université de Nantes). Elle sera couplée avec l'étude de l'évolution du liant de l'état émulsifié à l'état anhydre.

Par ailleurs, la communauté routière a démarré la rédaction du guide IDRRIM « Matériaux fabriqués en centrale à l'émulsion ou à la mousse de bitume (enrobés à froid ou semi-froid) ». Ce guide synthétisera les connaissances, explicitera les utilisations possibles, indiquera les spécifications



Behaviour and design of grave-emulsion

Public-private cooperation

Outcomes, outlook and further research requirements

The paper summarizes the data acquired in the course of the IFSTTAR/RSTA/USIRF joint research on grave-emulsion. In order to establish a complete, suitable, design methodology, test procedures have been defined regarding mix manufacture in the laboratory, workability and cohesion build-up, compactability, compressive strength, water sensitivity, binder extraction and characterization. Some issues require further investigations: the protocols for accelerated curing, the preparation of slabs heavy tests. Complementary research is to provide the data required for setting up the complete methodology. Besides, the needs for upstream research have been identified, the topics of which are: mix internal microstructure, binder film state, moisture movements, mix behaviour under triaxial stresses and fatigue response.

applicables et les recommandations issues de l'état de l'art.

Enfin, la révision des normes « graves-émulsion » et « bétons bitumineux à l'émulsion » vient d'être lancée.

Toutes ces actions contribueront, à n'en pas douter, à un vrai développement des matériaux à l'émulsion, dont il faut encore rappeler les avantages vis-à-vis de l'environnement. ■