



## Comportement et étude des graves-émulsion. Coopération public-privé : Compactabilité des enrobés à l'émulsion de bitume

Louissette Wendling, Jean Pierre Triquigneaux, Eric Cregut, Cédric Petiteau,  
Daniel Claudel, Lionel Odie, Vincent Gaudefroy, Stéphane Ollier

### ► To cite this version:

Louissette Wendling, Jean Pierre Triquigneaux, Eric Cregut, Cédric Petiteau, Daniel Claudel, et al..  
Comportement et étude des graves-émulsion. Coopération public-privé : Compactabilité des enrobés  
à l'émulsion de bitume. Revue générale des routes, 2012, 901, pp 40-43. hal-00850887

**HAL Id: hal-00850887**

**<https://hal.science/hal-00850887>**

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

Louissette Wendling  
Ingénieur de recherche  
Division Laboratoire d'Autun  
Centre d'études techniques  
de l'Équipement (CETE) de Lyon

Jean-Pierre Triquigneaux  
Directeur du laboratoire central  
Centre d'études et de recherches  
de Corbas  
Eiffage Travaux Publics

Eric Cregut  
Chargé d'affaires  
Division Laboratoire  
de Clermont-Ferrand  
CETE de Lyon

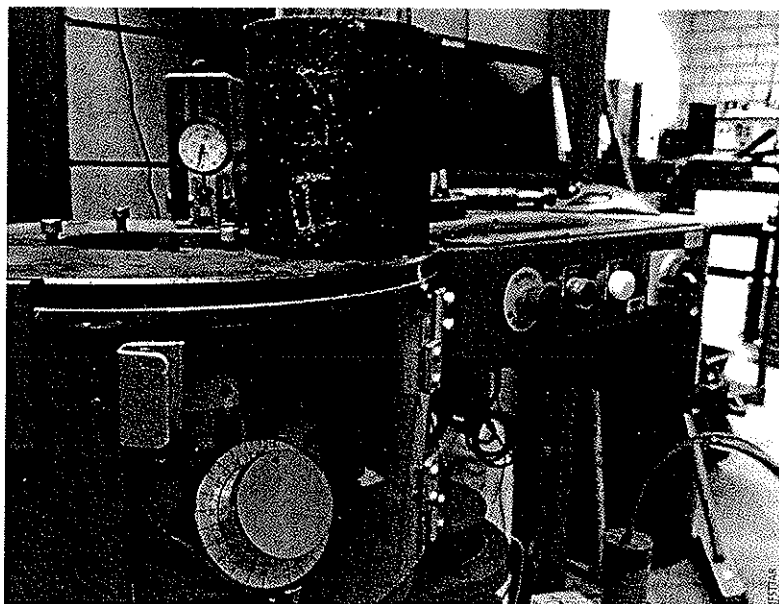
Stephane Ollier  
Consultant  
Perennise Chaussées MC

Cédric Petiteau  
Technicien principal  
Institut français des sciences  
et technologies des transports,  
de l'aménagement et des réseaux  
(IFSTTAR)

Daniel Claudel  
Assistant section Liants  
Laboratoire central  
Centre d'études et de recherches  
de Corbas  
Eiffage Travaux Publics

Lionel Odie  
Responsable  
Unité Route durable et économe  
Laboratoire régional  
de Saint-Brieuc  
Centre d'études techniques  
de l'Équipement (CETE) Ouest

Vincent Gaudefroy  
Chargé de recherches  
IFSTTAR



Presse à cisaillement giratoire Version 3  
Gyratory Shear Compactor Mark 3

## Comportement et étude des graves-émulsion Coopération public-privé

### Compactabilité des enrobés à l'émulsion de bitume

L'une des étapes de la démarche expérimentale spécifique pour répondre aux besoins d'évaluation du comportement *in situ* des mélanges bitumineux à froid, consiste à s'assurer de la pertinence de l'évaluation en laboratoire des propriétés des graves-émulsion par rapport à leur fabrication industrielle et à leur comportement *in situ*. Cet article porte sur la propriété de compactabilité d'une grave-émulsion. La compactabilité est mesurée selon la norme française NF P 98 252 avec les presses à cisaillement giratoire (PCG) LPC. Trois aspects sont abordés. Le premier traite de la compactabilité du produit industriel sur site, au cours de la construction de l'ouvrage. Ces résultats ont ensuite été comparés à ceux obtenus en laboratoire à partir de matériaux reformulés avec les constituants du chantier. Une très bonne régularité de la fabrication industrielle est observée et la représentativité de la simulation de laboratoire par rapport au comportement *in situ* est validée. Ces résultats permettent *a priori* d'envisager la confection de corps d'épreuve avec la PCG. Cette fonctionnalité est présentée dans la troisième partie, dans le but de réaliser des corps d'épreuve destinés à des essais rhéologiques sur matériaux cohésifs.

Le support de cette expérimentation est le troisième chantier expérimental instrumenté réalisé dans le cadre de l'opération de recherche intitulée « Optimisation des matériaux routiers économes et incorporant des recyclés de la route (OPTIMIRR) » donnant lieu à une collaboration entre IFSTTAR-RST, les entreprises de l'USIRF et le gestionnaire de la voirie, le conseil général d'Ille-et-Vilaine.

Cet article est le 8<sup>e</sup> de la série dédiée aux travaux du groupe constitué par l'IFSTTAR, le RST et les entreprises de l'USIRF.

## Introduction

La complexité du fonctionnement des matériaux à l'émulsion de bitume et les connaissances sur les mécanismes fondamentaux mis en jeu, conduisent à

une démarche d'optimisation en laboratoire à caractère plus opérationnel que fondamental. Après identification des propriétés, qui semblent importantes, du comportement *in situ*, la démarche consistera à les pré-

dire en laboratoire en fonction d'une liste de paramètres préalablement définis. A cet effet, de récentes publications de l'IFSTTAR et la diffusion du « Kit PCG grave-émulsion », guidant le choix des constituants

et des caractéristiques performantielles et volumétriques des mélanges fraîchement malaxés, sont venues compléter les référentiels techniques existants, notamment normatifs [1 à 6].

# Recherche Enrobés à l'émulsion

Ainsi, sur des mélanges utilisés dans la région du Département Laboratoire d'Autun, l'influence des paramètres de composition sur les cinétiques d'extrusion de l'eau a été quantifiée [8]. Plus récemment, d'autres études ont validé l'usage de la PCG2 comme outil de formulation des enrobés à l'émulsion de bitume pour une vitesse de rotation de 6 tr/min et avec dérogations aux réglages normatifs d'angles et d'efforts [9]. La deuxième application récente faite avec la PCG, lors de la construction des chantiers expérimentaux instrumentés en GE, est présentée. Il s'agit de la GE 0/14 du chantier expérimental instrumenté, objet de la collaboration IFSTTAR-RST/USIRF/CG 35 sur la route départementale RD 44 en Ile-et-Vilaine [10 à 12]. Sont abordés successivement :

- la formulation par approche volumétrique et la méthode d'essai de compactabilité à la PCG ;
- les résultats de compactabilité recueillis lors de la construction de l'ouvrage ainsi que les résultats de laboratoire, y compris la réflexion préliminaire pour la préparation des mélanges ;
- les relations entre les comportements sur site et en laboratoire ;
- l'utilisation de la PCG comme outil de confection de corps d'épreuves destinés à des essais rhéologiques sur matériaux cohésifs.

## Formulation des enrobés à l'émulsion de bitume : approche volumétrique

Dans une approche volumétrique simplifiée, telle que proposée pour les enrobés à chaud et décrite dans le manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés, le volume des vides est par définition la somme des volumes occupés par les pores et les interstices du mélange solide constitué du squelette minéral et du bitume [13]. Dans les enrobés à l'émulsion de bitume, ce volume est égal à la somme des volumes occupés par l'eau et par l'air [14]. La contraction du corps d'épreuve observée sous l'effet du compactage résulte, pour ces matériaux, de la combinaison des diminutions des volumes occupés par l'air et par l'eau. Si l'on pose comme postulat que l'eau est incompressible, l'initialisation de

la diminution du volume occupé par l'eau s'observe à l'instant  $t$  correspondant au début de l'extrusion de l'eau du corps d'épreuve. Cet instant  $t$  est fonction des propriétés de drainabilité et d'égouttage des enrobés à l'émulsion ainsi que des énergies de compactage transmises au corps d'épreuve [15, 16].

En première approximation, le pourcentage de vides  $v\%$  d'un enrobé à froid est, comme pour les enrobés à chaud, une fonction du rapport entre sa masse volumique apparente (MVA géométrique ou hydrostatique) et sa masse volumique réelle (MVR) [13].

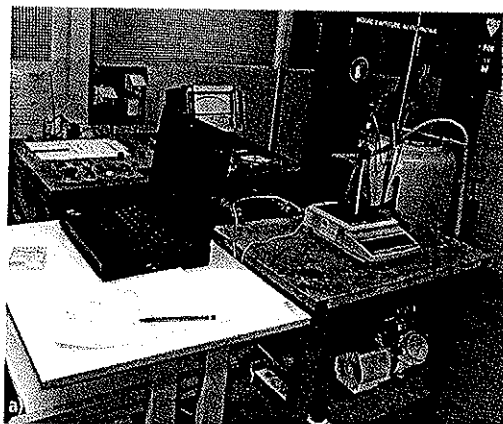
$$v\% = 100 [1 - (MVA/MVR)]$$

## Essai de compactabilité à la PCG

L'essai de compactabilité à la PCG des enrobés à l'émulsion de bitume est inclus dans le référentiel normatif français sous la référence NF 98-252 de juin 1999 [1]. Les normes produits des enrobés à l'émulsion de bitume, XP P 98 121 grave-émulsion et NF P 98 129 béton bitumineux à froid (BBF), en précisent les caractéristiques de compactabilité à respecter [17, 18].

## Description de l'appareillage

Les PCG utilisées sont de type 2 et type 3 du matériel LPC [2]. Pour réaliser le suivi des extrusions d'eau, les bancs d'essai sont équipés des options spécifiques dédiées aux enrobés à l'émulsion (photos 1 et 2).



Photos 1  
PCG type 2 a) Vue d'ensemble, b) Zoom sur le dispositif d'aspiration des eaux  
Gyratory Shear Compactor Mark 2 - a) Overall view, b) Zoom on the moisture suction device

En effet, sous l'action des sollicitations de compactage, les eaux extrudées des enrobés à l'émulsion s'évacuent en parties supérieure et inférieure de l'échantillon. En partie supérieure, elles se stockent dans l'espace libre situé au-dessus de la pastille et en partie inférieure, elles s'écouleront sur le plateau médian (PCG3) et dans « le réservoir GE » fixé en six points sur les bords latéraux inférieurs du fourreau chauffant (PCG2).

Les eaux extrudées sont aspirées et pesées en fonction du nombre de girations. Ces mesures, initialement volumétriques sur la PCG2, sont proposées actuellement par pesées. Il est souligné que la répartition des quantités d'eau extrudée en parties supérieure et inférieure diffère entre les deux PCG. Cette différence est attribuée aux modes de fonctionnement des deux versions [8, 15].

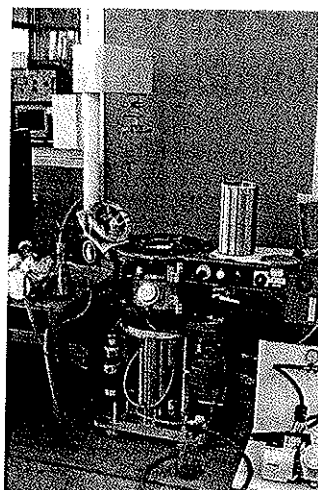
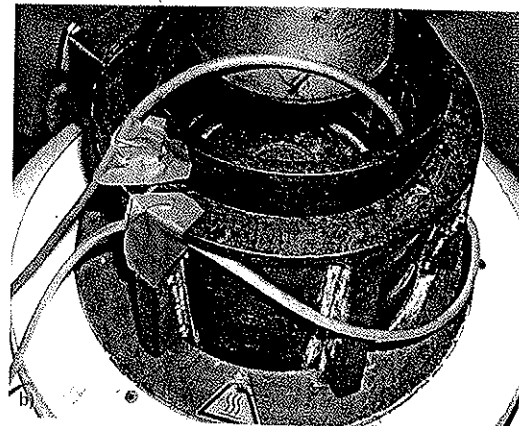


Photo 2  
PCG type 3, vue d'ensemble du banc d'essai  
Gyratory Shear Compactor Mark 3, overall view of the apparatus



## Expression des résultats

Les données recueillies sont celles définies dans la norme d'essai NF P 98-252 : variations de hauteur de l'éprouvette en fonction du nombre de girations. En complément, peuvent être mesurées les masses d'eau extrudées (ou volumes) en parties haute et basse du moule, ainsi que l'effort de cisaillement  $F_c$ . A partir de ces grandeurs, sont calculées à chaque giration l'évolution des pourcentages de vides, décomposés en pourcentages de vides occupés par l'air et par l'eau, ainsi que la contrainte de cisaillement [14 à 16].

## Evaluation du comportement de la GE sur chantier

L'évaluation de la compactabilité de la GE mise en œuvre a été effectuée en continu lors de la construction du chantier expérimental instrumenté à partir de matériaux prélevés dans les vis du finisseur. Ces mesures ont été réalisées avec la PCG2 « embarquée » de l'IFSTTAR équipée du système de recueil des eaux extrudées (figure 1). Les difficultés rencontrées pour stabiliser le véhicule ne permettent pas l'utilisation de balances, aussi les mesures d'eau sont-elles volumétriques. Ce suivi couvre deux objectifs : le premier est de recueillir les données de compactabilité du produit industriel et le second de disposer d'un indicateur global de variabilité de la composition de sa phase « solide » (squelette minéral et bitume) et de sa phase aqueuse pendant toute la durée de la construction de l'ouvrage.

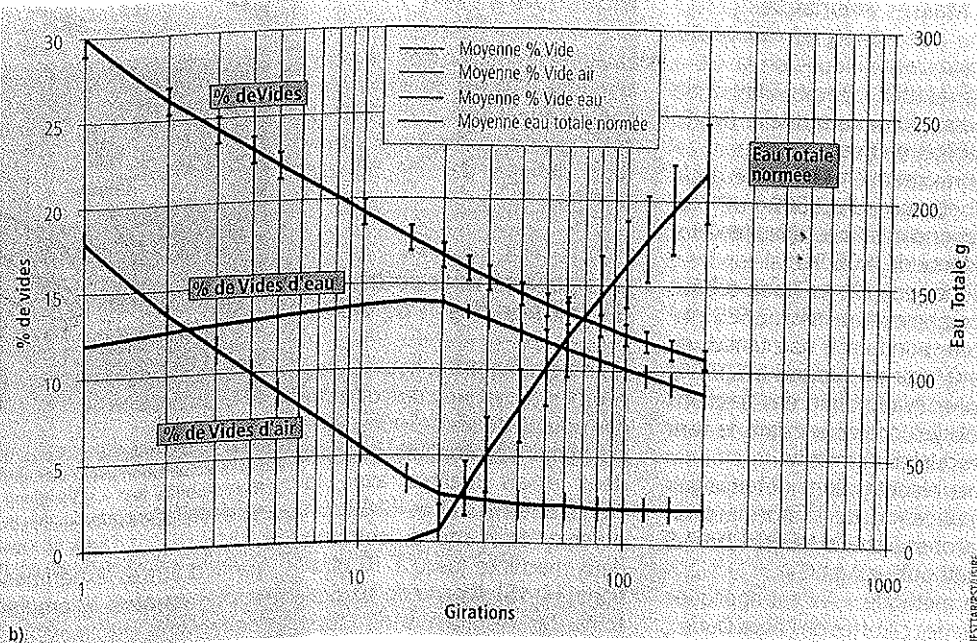


Figure 1  
Résultats des essais PCG *in situ* a) Mesures *in situ*, b) Evolution des pourcentages de vides et des extrusions d'eau en fonction du nombre de girations  
GSC tests conducted *in situ* - a) On-site testing, b) Voids percentages and extruded water weight versus number of gyrations

## Formulation de la GE

La GE est de type S de granularité 0/14 ; dosée à 6,6 % de teneur en eau externe (départ centrale) et 4,06 % de teneur en liant externe à la fabrication, soit 6,7 % de teneur en émulsion (tableau 1).

Traduit en pourcentage volumique et pour un volume unitaire, la composition du mélange à l'étape de malaxage est estimée à :

- 80 % de phase solide,
- 20 % de phase liquide.

## Modalités d'essai

La vitesse de rotation retenue est de 30 tr/min ; l'inclinaison du moule et l'effort vertical sont réglés aux valeurs standards dans la norme NF P 98-252. Le fourreau de la PCG2 n'est pas chauffé.

## Résultats des essais sur mélanges foisonnés prélevés sur site à la mise en œuvre

### Traitement préliminaire

Les résultats recueillis *in situ* sont ajustés à la formule moyenne des contrôles chantier avec correction de la hauteur de référence

(la masse volumique réelle de l'enrobé - MVRe - du chantier est différente de la masse volumique réelle de l'enrobé formulation) et de la teneur en eau totale moyenne contenue dans le mélange à la fabrication.

### Résultats

Dix-sept mesures de compactabilité ont été réalisées. Les moyennes des pourcentages de vides ainsi que celles des pourcentages de vides occupés par l'eau et occupés par l'air (12 mesures) sont présentées figure 1. Pour ces calculs, la masse volumique de l'eau est égale à 1 t/m<sup>3</sup>. Chaque point de mesure est assorti d'une variabilité égale à plus ou moins un écart-type [4]. Le pourcentage de vides étant inférieur à 22 % à 10 girations et à 15 % à 200 girations, la GE respecte les prescriptions normatives de la norme produit XP P 98-121 [17].

En termes de variabilité, l'écart-type observé en fonction du nombre de girations est stable, compris entre 0,58 et 0,78, témoin de la régularité de composition du mélange. Le début des extrusions d'eau est observé entre 15 et 20 girations. A 20 girations, 7 g d'eau sont extrudés et le pourcentage de vides est de 16,7 %.

## Evaluation du comportement de la GE en laboratoire

Deux essais PCG, sans suivi des eaux extrudées, ont été réalisés respectivement dans un laboratoire d'entreprise (PCG2) et dans un laboratoire de l'administration (PCG3). Ils ont été complétés par un test de répétabilité à la PCG3 dans le cadre des travaux de qualification des projets de développement du système de recueil des eaux extrudées [2].

## Travaux préliminaires

### Formulation

Le mélange a été fabriqué conformément au protocole défini, rappelé dans un précédent article de la série [19] avec une pré-humidification du sable.

La courbe de reconstitution visée est la « courbe » moyenne chantier de la GE 0/14, de même que les teneurs en liant anhydre résiduel et en eau totale.

Le mélange a été fabriqué à teneur en liant résiduel de 4,0 % (tableau 1) à partir d'une émulsion dont le bitume contient du fluxant (teneur de 3 %).

L'agressivité du malaxage sur la composition granulaire (création de fines) est analysée dans chacun des trois laboratoires. Pour le test de répétabilité, cette agressivité est examinée sur un mélange sans émulsion dont la teneur en eau est portée à 10,7 % (pas de désenrobage) avec une pré-humidification du sable au malaxeur Guedu et un malaxage du mélange au BBMax 25 LPC [19, 20].

Les formules ajustées dans les trois laboratoires sont rappelées dans le tableau 1.

| Fractions granulaires | Pourcentages massiques (%) |            |              |
|-----------------------|----------------------------|------------|--------------|
|                       | Administration             | Entreprise | Répétabilité |
| 0/2                   | 40                         | 40         | 42           |
| 2/4                   | 12                         | 12         | 13           |
| 4/10                  | 26                         | 26         | 26           |
| 14/10                 | 22                         | 22         | 19           |

Teneur en eau extérieur totale : 6,60  
Teneur en émulsion extérieure : 6,70  
Teneur en liant extérieure résiduelle : 4,06 \*

\* TL ext avec Fluxant soit  $6,7 \times 0,606 \times 0,97 = 3,938$  % TL ext sans fluxant

Tableau 1  
Fabrication de laboratoire et formulation de chaque laboratoire  
Laboratory manufacturing: the 3 formulas tested

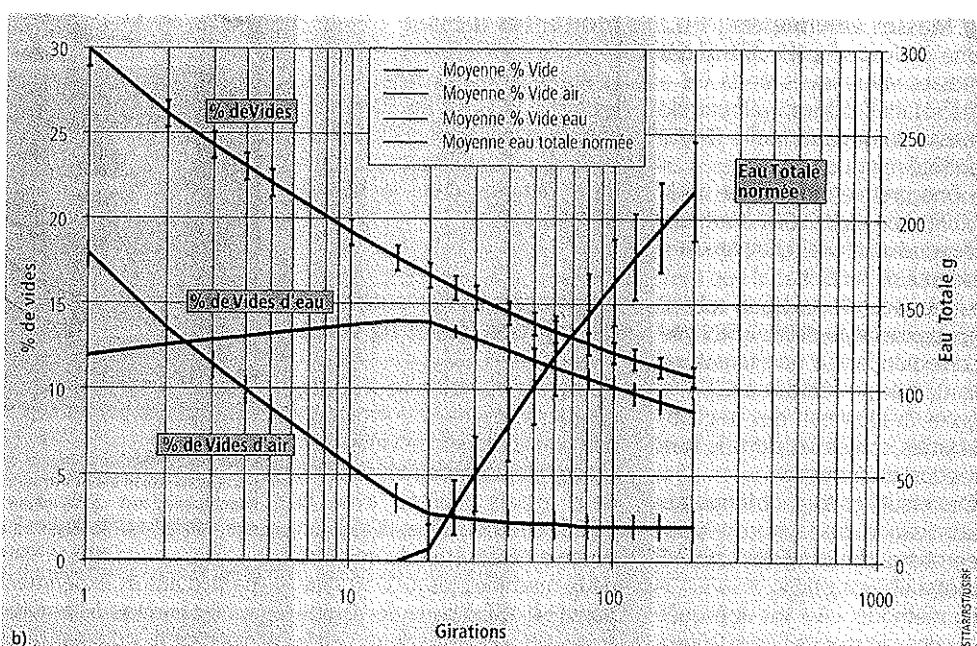


Figure 1  
Résultats des essais PCG *in situ* a) Mesures *in situ*, b) Evolution des pourcentages de vides et des extrusions d'eau en fonction du nombre de girations  
GSC tests conducted *in situ* - a) On-site testing, b) Voids percentages and extruded water weight versus number of gyrations

## Formulation de la GE

La GE est de type S de granulométrie 0/14 ; dosée à 6,6 % de teneur en eau externe (départ centrale) et 4,06 % de teneur en liant externe à la fabrication, soit 6,7 % de teneur en émulsion (tableau 1).

Traduit en pourcentage volumique et pour un volume unitaire, la composition du mélange à l'étape de malaxage est estimée à :

- 80 % de phase solide,
- 20 % de phase liquide.

## Modalités d'essai

La vitesse de rotation retenue est de 30 tr/min ; l'inclinaison du moule et l'effort vertical sont réglés aux valeurs standards dans la norme NF P 98-252. Le fourreau de la PCG2 n'est pas chauffé.

## Résultats des essais sur mélanges foisonnés prélevés sur site à la mise en œuvre

### Traitement préliminaire

Les résultats recueillis *in situ* sont ajustés à la formule moyenne des contrôles chantier avec correction de la hauteur de référence

(la masse volumique réelle de l'enrobé - MVRe - du chantier est différente de la masse volumique réelle de l'enrobé formulation) et de la teneur en eau totale moyenne contenue dans le mélange à la fabrication.

### Résultats

Dix-sept mesures de compactabilité ont été réalisées. Les moyennes des pourcentages de vides ainsi que celles des pourcentages de vides occupés par l'eau et occupés par l'air (12 mesures) sont présentées figure 1. Pour ces calculs, la masse volumique de l'eau est égale à 1 t/m<sup>3</sup>. Chaque point de mesure est assorti d'une variabilité égale à plus ou moins un écart-type [4]. Le pourcentage de vides étant inférieur à 22 % à 10 girations et à 15 % à 200 girations, la GE respecte les prescriptions normatives de la norme produit XP P 98-121 [17].

En termes de variabilité, l'écart-type observé en fonction du nombre de girations est stable, compris entre 0,58 et 0,78, témoin de la régularité de composition du mélange. Le début des extrusions d'eau est observé entre 15 et 20 girations. A 20 girations, 7 g d'eau sont extrudés et le pourcentage de vides est de 16,7 %.

## Evaluation du comportement de la GE en laboratoire

Deux essais PCG, sans suivi des eaux extrudées, ont été réalisés respectivement dans un laboratoire d'entreprise (PCG2) et dans un laboratoire de l'administration (PCG3). Ils ont été complétés par un test de répétabilité à la PCG3 dans le cadre des travaux de qualification des projets de développement du système de recueil des eaux extrudées [2].

## Travaux préliminaires

### Formulation

Le mélange a été fabriqué conformément au protocole défini, rappelé dans un précédent article de la série [19] avec une pré-humidification du sable.

La courbe de reconstitution visée est la « courbe » moyenne chantier de la GE 0/14, de même que les teneurs en liant anhydre résiduel et en eau totale.

Le mélange a été fabriqué à teneur en liant résiduel de 4,0 % (tableau 1) à partir d'une émulsion dont le bitume contient du fluxant (teneur de 3 %).

L'agressivité du malaxage sur la composition granulaire (création de fines) est analysée dans chacun des trois laboratoires. Pour le test de répétabilité, cette agressivité est examinée sur un mélange sans émulsion dont la teneur en eau est portée à 10,7 % (pas de désenrobage) avec une pré-humidification du sable au malaxeur Guedu et un malaxage du mélange au BBMax 25 LPC [19, 20]. Les formules ajustées dans les trois laboratoires sont rappelées dans le tableau 1.

| Fractions granulaires                                                                   | Pourcentages massiques (%) |            |              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|------------|--------------|
|                                                                                         | Administration             | Entreprise | Répétabilité |
| 0/2                                                                                     | 40                         | 40         | 42           |
| 2/4                                                                                     | 12                         | 12         | 13           |
| 4/10                                                                                    | 26                         | 26         | 26           |
| 14/10                                                                                   | 22                         | 22         | 19           |
| Teneur en eau extérieure totale : 6,60                                                  |                            |            |              |
| Teneur en émulsion extérieure : 6,70                                                    |                            |            |              |
| Teneur en liant extérieure résiduelle : 4,06 *                                          |                            |            |              |
| * TL ext avec Fluxant soit $6,7 \times 0,606 \times 0,97 = 3,938$ % TL ext sans fluxant |                            |            |              |

Tableau 1  
Fabrication de laboratoire et formulation de chaque laboratoire  
Laboratory manufacturing: the 3 formulas tested

# Recherche Enrobés à l'émulsion

## Masses volumiques

Une évaluation préliminaire des masses volumiques de la GE a été établie. Deux valeurs de masse volumique réelle (MVR) ont été retenues :

- une première au stade de la fabrication, soit 2,580 t/m<sup>3</sup> correspondant à une teneur en liant externe de 4,06 %.

- une seconde au stade cohésif après prise (et au-delà) : 2,585 t/m<sup>3</sup> correspondant à une teneur en liant externe réduite à 3,94 % après évaporation des fractions volatiles contenues dans le liant résiduel de l'émulsion.

Ces résultats sont obtenus par application de la norme pour enrobés à chaud NF EN 12697-5 méthodes «A et C».

La méthode «A» est appliquée sur des carottes de l'essai Duriez, la méthode «C» est appliquée sur deux squelettes minéraux : une grave 0/14 obtenue après passage dans le malaxeur de laboratoire BBMax 25 LPC et une grave 0/14 recomposée à partir de chacune des trois fractions granulaires. Les MVR des fractions minérales sont évaluées en application de la norme NF EN 1297 partie 6 méthode A pré-séchée [21, 22].

## Modalités d'essai

La vitesse de rotation retenue pour les essais PCG est de 30 tr/min, l'angle d'inclinaison et l'effort sont réglés aux valeurs standard définies dans la norme NF P 98-252.

## Comparaison des courbes d'évolution des % de vides

Comme le montre la figure 2, les courbes moyennes d'évolution des pourcentages de vides sont exactement confondues pour les deux essais réalisés avec la PCG3. Entre PCG2 et PCG3, on observe l'écart attendu entre les deux machines jusqu'à 10 girations [14, 15]. A partir de 10 girations, les résultats sont jugés équivalents par leur position dans l'intervalle de reproductibilité de la méthode d'essai. La forte variabilité observée sur les premières girations de la PCG2 n'est pas expliquée. Les trois bancs d'essai respectent les prescriptions normatives (NF P 98-252).

## Test de répétabilité avec mesures des cinétiques d'extrusion d'eau

Ces essais sont extraits des travaux de qualification du banc d'essai «PCG3 Kit GE» regroupant

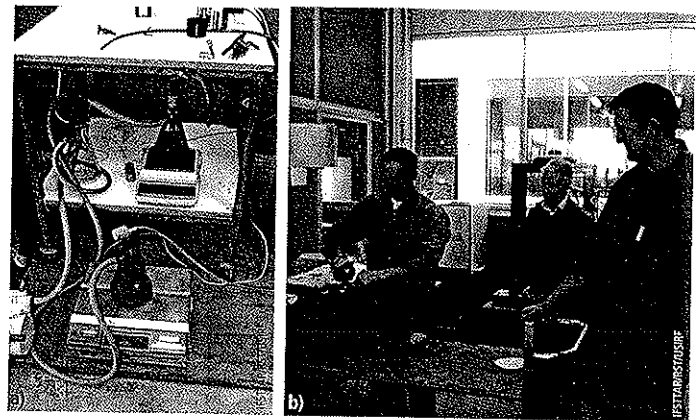


Photo 3

Essai de répétabilité a) Pesées des eaux extrudées b) Manipulation du moule porte-échantillon avant introduction dans la PCG  
Repeatability test – a) Weighing the extruded water, b) Handling the moulded specimen before introduction in the GSC

pant d'autres expérimentations sur les enrobés à l'émulsion partiellement publiées à ce jour [14, 15].

La préparation des essais de répétabilité est présentée sur la photo 3. Cette préparation suit un protocole spécifique visant à reproduire les configurations de mise en œuvre et à ne pas dégrader la répétabilité entre chaque répétition.

Six essais élémentaires correspondant à deux fabrications ont été réalisés.

Les courbes d'évolution des pourcentages de vides, ainsi que leur répartition en % de vides occupés par l'air et % de vides occupés par l'eau sont représentés en figure 3.

## Cinétiques des extrusions d'eau

- Coloration : les eaux supérieures sont légèrement colorées.

- Initialisation des extrusions d'eau : elles s'observent par le bas en avance de 1 à quelques girations sur les extrusions supérieures, soit entre 15 et 19 girations pour la première fabrication et entre 14 et 19 girations pour la seconde fabrication.

- Quantités d'eau extrudées en haut, légèrement supérieures à celles extrudées en bas.

- A 20 girations, en moyenne 2 % d'eau contenue dans l'éprouvette à sa fabrication sont extrudés auxquels correspond un pourcentage de vides moyen de 16,7 %.

- A la fin de l'essai, soit 200 girations, 43 % de l'eau contenue dans l'éprouvette au moment de sa fabrication sont extrudés et 57 % restent piégés dans l'éprouvette, avec un écart type de 5 % et un pourcentage de vides moyen de 11,0 %.

|                                      | MVR GE mesurées sur éprouvette Duriez | MVR mesurée sur grave 0/14 à 9,7 % de fines MVR GE calculées | MVR grave 0/14 et MVR GE calculées | MVRg et MVR retenues |
|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------|
| MVR grave 0/14                       |                                       | 2,748                                                        | 2,749                              | 2,748                |
| MVR GE : TL ext avec Fluxant 4,060 % |                                       | 2,580                                                        | 2,581                              | 2,580                |
| MVR GE : TL ext sans Fluxant 3,938 % | 2,585                                 | 2,585                                                        | 2,586                              | 2,585                |

Tableau 2

Détermination des masses volumiques réelles (MVR) de la GE 0/14  
Different specific gravities determined for the 0/14 grave-emulsion

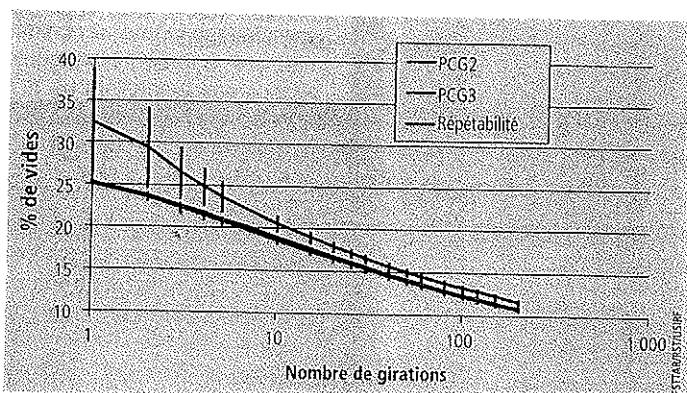


Figure 2

Evolution des pourcentages de vides en fonction du nombre de girations  
Voids percentage against number of gyrations

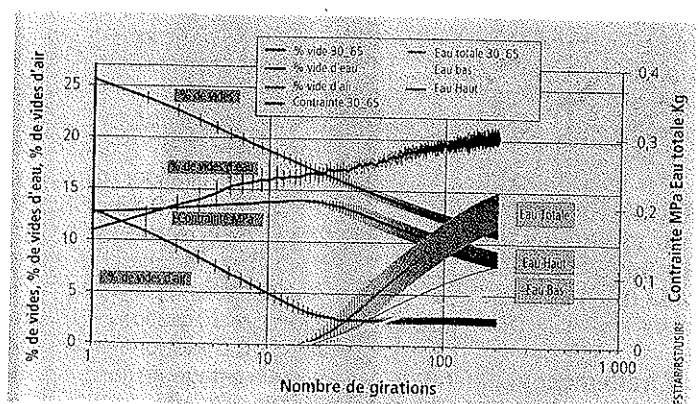


Figure 3

Résultats de l'essai de répétabilité avec suivi des extrusions d'eau en fonction du nombre de girations  
Results of the repeatability test: Voids and extruded water against number of gyrations

## Evolution des pourcentages de vides et de leur répartition en pourcentages de vides occupés par l'air et par l'eau

Dans cet exemple, l'écart-type de variabilité des teneurs en vides à chaque giration est constant et se situe aux alentours de 0,5 %, soit une valeur supérieure à l'écart-type de répétabilité de la méthode d'essai pour enrobé à chaud (0,34 % à 60 girations -  $r = 0,95$ ).

## Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction du pourcentage de vides et des pourcentages de vides occupés par l'air et occupés par l'eau

A titre de comparaison avec les interprétations faites pour les enrobés à chaud, les courbes d'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de ces teneurs en vides sont présentées sur la figure 4.

Il est clairement observé que toute l'énergie de cisaillement sert dans une première phase à la contraction des vides d'air relayés à partir de 16,7 % de vides par la contraction des vides occupés par l'eau. Cette valeur correspond à l'initialisation des extrusions d'eau.

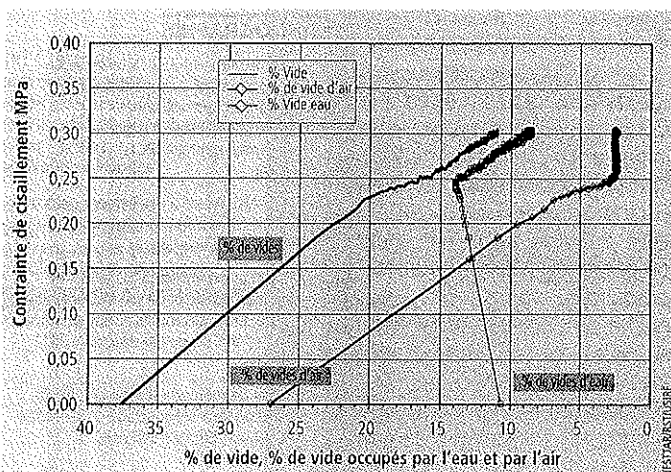


Figure 4  
Résultats de l'essai de répétabilité ; contrainte de cisaillement en fonction des pourcentages de vides  
Results of the repeatability test: Shearing stress against voids percentage

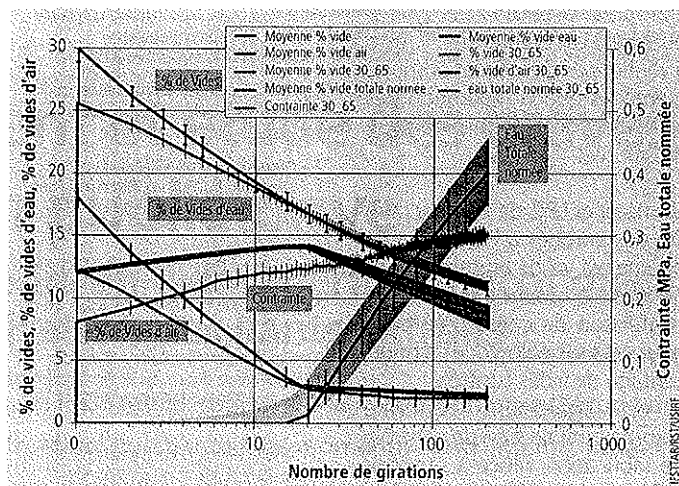


Figure 5  
Comparaison des résultats obtenus en laboratoire (PCG3 DL Clermont-Ferrand) et *in situ* (PCG2 embarquée IFSTTAR)  
Comparison of the results obtained in laboratory (GSC 3 of DL Clermont-Ferrand) and *in-situ* (embarked GSC 2 of IFSTTAR)

- Le fuseau de variation restreint autour de la valeur moyenne chantier est souligné à nouveau ; cette faible étendue est liée à la régularité dans la composition granulaire de la GE lors de sa fabrication industrielle.

L'hypothèse d'exploitation de la prise en compte de la teneur en eau initiale équivalente à la teneur en eau moyenne chantier, conduit à :

- Des cinétiques d'extrusion d'eau totale très semblables :
  - A 20 girations en valeur moyenne, sont extrudés 1 % d'eau *in situ* et 2 % en laboratoires avec un pourcentage de vides commun de 16,7 %.
  - A 200 girations, la valeur moyenne du pourcentage d'eau extrudée est de 40 % pour les mesures chantier et de 43 %

pour les mesures de l'essai de répétabilité en laboratoire avec un pourcentage de vides final de 10,8 % *in situ* et 11,0 % en laboratoire.

- Des courbes d'évolution, des pourcentages de vides occupés par l'eau et par l'air en fonction du nombre de girations, équivalentes en valeurs moyennes.

## Comportement de la GE en place

L'ensemble des résultats ci-dessus est à mettre en relation avec les mesures de compacité effectuées depuis trois années sur des carottes prélevées dans la GE de la RD 44 [10]. Ces mesures montrent que la teneur en vides de la couche de GE oscille entre 12 et 14 %, fourchette qui correspond aux teneurs en vides obtenues à la PCG2 embarquée entre 50 et 100 girations (figure 1). Ces valeurs correspondent aussi aux teneurs en vides mesurées sur matériau fabriqué en laboratoire lors des essais conduits dans différents laboratoires avec les PCG2 et PCG3 (figures 2 et 3).

## Utilisation de la PCG pour la confection d'échantillons

La teneur en vides des enrobés à l'émulsion de bitume, et en particulier des GE, diminue sur site au cours du temps. Or, elle a une influence considérable sur la rigidité du matériau. Il est donc nécessaire de confectionner en laboratoire des corps d'épreuves à différentes teneurs en vides afin de pouvoir en quantifier l'incidence sur le module de rigidité de la GE. Les résultats seront ensuite comparés à ceux obtenus à partir d'éprouvettes extraites du chantier à diverses échéances. La PCG est, de ce fait, un outil tout à fait adapté pour la fabrication de corps d'épreuve à teneurs en vides maîtrisées : il suffit pour cela d'arrêter l'essai PCG à un nombre de girations, déterminé à l'avance en fonction de la teneur en vides visée, et de récupérer précautionneusement l'éprouvette ainsi fabriquée. Les trois laboratoires centraux d'entreprises ont ainsi confectionné des éprouvettes cylindriques de diamètre 160 mm à plusieurs teneurs en vides, encadrant celles obtenues sur chantier, avec la PCG de type 2 fonctionnant à 6 ou 30 tr/min. Dès leur démoulage, elles ont été conservées 3, 7, 28 et 90 jours en enceinte climatique à 35 °C et 20 % HR.

Deux laboratoires ont suivi la même procédure : en fin de conservation, pour chaque échéance, les éprouvettes ont

## Vérification de la relation chantier - laboratoire

La figure 5 présente une superposition des résultats de laboratoire PCG3 « essais de répétabilité » et de chantier PCG2 « embarquée » réalisés dans des conditions d'essai identiques.

Les quantités d'eau extrudées des PCG2 et PCG3 sont exprimées en valeurs relatives par rapport à la quantité d'eau initiale contenue dans les éprouvettes pour pouvoir être comparées (diamètre des moules différents : 160 et 150 mm).

Les courbes d'évolution des pourcentages de vides montrent :

- Comme attendu, des résultats des travaux de qualification du Kit PCG3, les courbes d'évolution des pourcentages de vides diffèrent en début d'essai [14 à 16].
- Au-delà de 10 girations, les deux courbes moyennes sont jugées équivalentes.

été placées 3 h dans une enceinte à 5 °C puis carottées en diamètre 100 mm à sec au cœur et enfin sciées aux extrémités pour obtenir un corps d'éprouve de cinq centimètres d'épaisseur. Les teneurs en vides mesurées vont de 17,9 % à 8,7 % ; elles encadrent les valeurs obtenues sur chantier après compactage et après mûrissement *in situ*.

A noter qu'il faut tenir compte d'une diminution d'environ 2 % de vides entre la valeur affichée de la PCG et celle mesurée sur le corps d'éprouve carotté au cœur de l'éprouvette.

Le troisième laboratoire a fabriqué des éprouvettes PCG entre 14,3 et 14,8 % de vides. Elles sont directement utilisées comme corps d'éprouve.

Les modules de rigidité ont ensuite été mesurés, soit en compression axiale sinusoïdale à 15 °C - 10 Hz pour les éprouvettes de diamètre 160 mm, soit en compression diamétrale (traction indirecte) à 10 °C - 124 ms pour les éprouvettes de diamètre 100 mm. Les valeurs obtenues seront présentées et comparées à celles mesurées sur chantier dans le cadre de l'article qui suivra sur le module de rigidité des GE.

## Conclusions et perspectives

La complexité du fonctionnement des matériaux à l'émulsion de bitume conduit le formulateur à appliquer une démarche d'optimisation en laboratoire à caractère opérationnel. Le suivi des chantiers instrumentés en GE réalisé dans le cadre de l'opération de recherche OPTIMIRR de l'IFSTTAR et plus particulièrement le chantier RD44 [10] a été l'occasion de mettre en application l'un des volets de cette optimisation que constitue l'approche volumétrique, dont la compactabilité est l'un des éléments-clés.

La présente étude a confirmé la bonne corrélation entre les résultats de compactabilité obtenus en laboratoire avec ceux de la fabrication sur chantier. Cette corrélation est observée tant pour les courbes d'évolution des pourcentages de vides en fonction du nombre de girations que des cinétiques d'extrusion d'eau.

Le deuxième point essentiel à retenir concerne le départ d'eau. Il a été constaté que le pourcentage de vides global mesuré à la PCG (ici 16,7 %) à l'instant *t* de l'initialisation des départs d'eau correspond exactement au pourcentage de vides moyen 16,8 % relevé à la mise en œuvre après compactage [10]. L'énergie de compactage transmise à la couche de GE, agit en premier lieu sur la réduction des vides d'air jusqu'à atteindre le pourcentage de vides désigné « pourcentage de vides de matelassage » dans la littérature [8].

Enfin, la faisabilité de la confection en laboratoire d'éprouvettes à teneurs en vides contrôlées avec les PCG type 2 ou type 3 est démontrée. Il reste à vérifier par des études complémentaires que la répartition des vides est proche de celle de la GE du site réel.

Le matériel LPC de compactabilité des enrobés à l'émulsion de bitume est validé en tant qu'outil d'aide à la formulation et de confection de corps d'éprouve pour essais rhéologiques à pourcentage de vides contrôlé.

Il est également confirmé comme outil de suivi de contrôle de fabrication, grâce à sa sensibilité aux paramètres de fabrication, usage qui peut trouver un développement significatif dans le cadre d'un élargissement des techniques à froid à l'émulsion de bitume.

*In fine*, ce travail servira également à l'élaboration ou à la révision des référentiels normatifs français et européen. ■

## Remerciements

Les auteurs remercient le personnel de l'IFSTTAR, des laboratoires régionaux (Autun, Clermont-Ferrand, Saint-Brieuc et Toulouse) et des entreprises (Colas, Eiffage Travaux Publics, Eurovia et Malet) qui ont participé à cette étude.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Norme, NF P 98-252 Détermination du comportement au compactage des mélanges hydrocarbonés - Essai de compactage à la presse à cisaillement giratoire (PCG), AFNOR, juin 1999
- [2] IFSTTAR : Presse à cisaillement giratoire, [www.lpc.fr/francais/produits/materiels-mlpc-r/fiche-mlpc-r/article/pcg-3](http://www.lpc.fr/francais/produits/materiels-mlpc-r/fiche-mlpc-r/article/pcg-3).
- [3] Chantier expérimental de la RD 44 Présentation du site et de son instrumentation, Revue générale des routes et des aérodrômes (RGRA), n° 898 novembre-décembre 2011, pp. 101-107
- [4] Projet de méthode d'essai LPC n° 75 « Mesure du taux d'égouttage d'un enrobé à l'émulsion », Editions IFSTTAR, novembre 2011
- [5] Projet de méthode d'essai LPC n° 76 « Mesure de la montée en cohésion d'un enrobé à l'émulsion », Editions IFSTTAR, novembre 2011
- [6] Projet de méthode d'essai LPC n° 77 « Réactivité physico-chimique d'un couple émulsion de bitume/granulats », Editions IFSTTAR, septembre 2011
- [7] ERLPC « état des connaissances du RST sur les matériaux traités à l'émulsion de bitume » - IFSTTAR à paraître
- [8] Utilisation et possibilités de la presse à cisaillement, Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées, spécial V, décembre 1977, pp.173-180
- [9] Enrobés à froid : Aptitude au compactage, Revue générale des routes et des aérodrômes (RGRA), n° 804 novembre 2002, pp. 58-66
- [10] Chantier expérimental de la RD 44 ; Suivi du comportement dans le temps, Revue générale des routes et des aérodrômes (RGRA), n° 899 janvier-février 2012, pp. 98-101
- [11] Projet de méthode d'essai LPC n° 74 « Essai d'enrobage et de consistance - Procédure d'optimisation d'un mélange à l'émulsion de bitume à partir d'une appréciation visuelle et de sa consistance », Editions IFSTTAR, novembre 2011
- [12] V. Gaudefroy, L. Wendling, L. Odie, J.-C. Fabre, C. de La Roche, "Laboratory characterization of cold mix treated with bitumen emulsion", Proceedings of the Euraspalt and Eurobitume 4th Congress, Copenhagen, Denmark, mai 2008
- [13] J.-L. Delorme, C. de La Roche, L. Wendling, Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés, ERLPC Routes et sécurité routière, CR 39F, novembre 2007.
- [14] L. Wendling, V. Gaudefroy, J. Gaschet, S. Ollier, S. Gallier, Laboratory Evaluation of the compactability of bituminous emulsion mixes: Experimental device and methodology, Soumis à International Journal of Pavement Engineering, 2011
- [15] L. Wendling J. Gaschet, S. Ollier, E. Maguet, S. Gallier, P. Gineys, "Compactability of cold bituminous mixes : a new device devoted to emulsion-treated gravel characterisation", Proceedings of the Euraspalt and Eurobitume 4th Congress, Copenhagen, Denmark, mai 2008
- [16] Kit Grave-émulsion pour la PCG3, Revue générale des routes et des aérodrômes (RGRA), n° 865, mars 2008, pp. 53-54
- [17] Norme, XP P98-121, Assises de chaussées en grave-émulsion - définition - classification-caractéristiques - fabrication - mise en œuvre. AFNOR, février 2005
- [18] Norme, NF P 98-139, Enrobés hydrocarbonés couches de roulement : bétons bitumineux à froid. AFNOR, janvier 1994
- [19] Fabrication, prélèvement et conservation des enrobés à l'émulsion de bitume, Revue générale des routes et des aérodrômes (RGRA), n° 899 janvier-février 2012, pp. 102-105
- [20] IFSTTAR : Malaxeur thermo-régulé pour matériaux enrobés, [www.lpc.fr/francais/produits/materiels-mlpc-r/fiche-mlpc-r/article/bmax](http://www.lpc.fr/francais/produits/materiels-mlpc-r/fiche-mlpc-r/article/bmax)
- [21] Norme, NF EN 12697-5, Méthode d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud, partie 5 : Masse volumique réelle (MVR) des matériaux bitumineux. AFNOR, mars 2010
- [22] Norme, NF EN 1097-6, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats, Partie 6 : Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau, AFNOR, juin 2001



## Behaviour and design of grave-emulsion Public-private cooperation Compactability of emulsified asphalt mixes

The design methodology for emulsified asphalt mixes is aimed at determining the characteristics of the material and predicting its behaviour in the field. One of the steps of the method corresponds to the assessment of the mix compactability in the laboratory and on site. The present article is focused on the compactability of grave-emulsion. The compactability is measured according to French standard NF P 98 252, using LPC gyratory shear compactors (GSC). Firstly, the in-site compactability of the industrial mix is presented. Besides, the voids content of the GE placed on the road have been recorded over 3 years. These results are then compared to those obtained on mixtures manufactured in the laboratory. A good correlation between the results of the two compactability tests has been observed. Overall, the results allow using the GSC's to manufacture specimens for rheological tests. The present study has been performed in the framework of both the IFSTTAR OPTIMIRR research program and the conseil général d'Ille-et-Vilaine/ IFSTTAR/ USIRF public-private cooperation.