



HAL
open science

Comportement et étude des graves-émulsion Coopération public-privé: Mûrissement et évolution temporelle des propriétés de l'enrobé et des caractéristiques du liant

Alain Beghin, Louissette Wendling, Xavier Carbonneau, Chantal de La Roche,
Frédéric Delfosse, Lionel Odie, Jean-Michel Piau, Jean Pierre Triquigneaux

► To cite this version:

Alain Beghin, Louissette Wendling, Xavier Carbonneau, Chantal de La Roche, Frédéric Delfosse, et al.. 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*, 2012, 902, pp 54-64. hal-00850884

HAL Id: hal-00850884

<https://hal.science/hal-00850884>

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.

Recherche Enrobés à l'émulsion

AUTEURS

Alain Béghin
Responsable R&D
Direction technique
et développement
Entreprise Malet

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

Xavier Carbonneau
Chef du service Enrobés
Campus Scientifique et
Technique
Colas

Chantal de La Roche
Ingénieur des Ponts EF,
Animateur d'Axe
« Economie d'énergie
et de ressources naturelles »
Institut français des sciences
et technologies des transports,
de l'aménagement
et des réseaux (IFSTTAR)

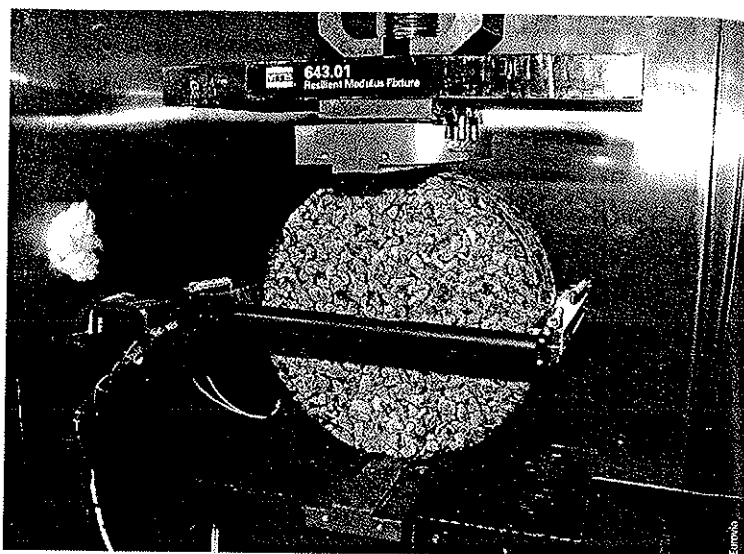
Frédéric Delfosse
Chargé d'affaires
Centre de recherche de Mérignac
Eurovia

Vincent Gaudefroy
Chargé de recherches
IFSTTAR

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

Jean-Michel Piau
Ingénieur des Ponts
IFSTTAR

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



Mesure de module en traction indirecte
Indirect tension modulus measurement

Comportement et étude des graves-émulsion Coopération public-privé Mûrissement et évolution temporelle des propriétés de l'enrobé et des caractéristiques du liant

Le module de rigidité a été choisi comme principal indicateur de suivi du mûrissement. D'autres essais (Duriez, ornié-
rage) ont fourni des renseignements utiles. L'analyse a été complétée par la caractérisation des liants extraits à diverses
échéances. Plusieurs protocoles de mûrissement accéléré ont été testés. Diverses méthodes de mesure du module ont
été utilisées : complexe en flexion et en compression, sécant en traction directe et indirecte. Un parallèle a été établi
entre les cinétiques d'évolution du module *in situ* et en laboratoire. Par exemple, avec de « gros » échantillons, 28 jours
selon le protocole M35 (35 °C – 20 % humidité) correspondent à environ 1 an sur site, et 90 jours à 3 ans. Des proto-
coles comportant deux paliers de température ont aussi été expérimentés. Par ailleurs, les suivis montrent que le
module augmente dans une première phase, puis tend à se stabiliser, alors que le durcissement du liant se poursuit.
L'analyse des résultats de module complexe, en particulier ceux relatifs à l'angle de phase, aide à expliquer cette diver-
gence. Des travaux complémentaires permettront de compléter la définition de tous les protocoles de mûrissement
nécessaires à la méthodologie d'étude.

Cet article est le 11^e de la série dédiée aux travaux du groupe constitué par l'IFSTTAR, le RST et les entreprises de l'USIRF

Introduction

Ainsi qu'évoqué dans les articles précédents de cette série, le caractère évolutif des enrobés à l'émulsion est une de leurs spécificités. La simulation de cette évolution en laboratoire est un facteur-clé dans la prédiction du comportement du matériau mis en œuvre, à court terme (de la fabrication à la mise sous trafic)

et en service (tenue à l'eau et performances mécaniques) [1 à 3]. Pour cela, il est nécessaire de maîtriser les conditions de température et d'hygrométrie nécessaires pour obtenir en un temps relativement court un état identique ou très proche de celui qu'aura le matériau en place.

Le premier indicateur de mûrissement et le plus simple à mesurer est la perte d'eau. Plusieurs recherches [4, 5] ont suivi la cinétique du départ d'eau et son incidence sur des performances mécaniques. Elles ont ainsi montré que l'évaporation, rapide au début du mûrissement, ne suffit pas à expliquer la suite de l'évolution des performances.

Devant cette problématique, l'USIRF, l'IFSTARR et le RST ont développé un volet d'étude spécifique au sein de leur programme de coopération. Ce travail est basé sur la caractérisation et la comparaison du comportement du matériau prélevé sur site à divers âges et du matériau préparé et mûri en laboratoire, suivant différentes modalités de température et

l'hygrométrie [6, 7]. Les essais de caractérisation retenus sont les suivants :

- la résistance en compression simple et la tenue à l'eau (essai Duriez),
 - la résistance aux déformations permanentes (essais à l'ornièreur),
 - le module de rigidité, mesuré selon différents modes opératoires,
 - la consistance du liant extrait.
- Seuls les deux derniers critères permettent de suivre le mûrissement de la GE tout au long de sa vie.

Le présent article a pour objectifs de :

- Présenter les différentes modalités de mûrissement qui ont été testées.
- Exposer, par type d'essai, l'influence des conditions de mûrissement accéléré (température, hygrométrie, durée) sur les résultats.
- Etablir, si possible, des relations entre les évolutions temporelles *in situ* et les simulations en laboratoire.

Les résultats supports du présent article ont été obtenus sur la grave-émulsion 0/14 du chantier expérimental de la RD 44, réalisé dans le cadre de l'opération de recherche OPTIMIRR en collaboration avec l'USIRF et le conseil général d'Ille-et-Vilaine. Ce chantier, construit en 2008, a été régulièrement suivi jusqu'en décembre 2010 [6, 8 et 9].

Procédures de mûrissement testées

Rappelons que des recherches antérieures ont prouvé que le mûrissement dépend principalement de deux grandeurs : la température et l'hygrométrie imposées au matériau [4, 5]. Ces travaux ont montré que :

- à 5 °C, il n'y a aucun mûrissement,
 - à 18 °C, le mûrissement est très lent,
 - à 50 °C, des fissures apparaissent dans le corps d'épreuve si cette température est appliquée directement, ce phénomène étant d'autant plus marqué que le corps d'épreuve est plus volumineux.
- Sur la base de ces acquis, diverses modalités de mûrissement ont été retenues en fonction des essais envisagés. Dans la suite de cet article, celles-ci sont définies à partir de la nomenclature « Tx_HRy » ou « Tx_HRy_Dz » avec :
- Tx : température « x » de conservation de l'échantillon, exprimée en °C,
 - HRy : humidité relative « y », exprimée en %,
 - Dz : durée de conditionnement « z », exprimée en jours.

Volume et géométrie des échantillons

L'une des difficultés auxquelles se heurte la définition de protocoles de mûrissement accéléré tient à la variété des formes et tailles des corps d'épreuve soumis aux divers essais.

Les essais Duriez sont effectués sur des corps d'épreuve cylindriques de diamètre 120 mm, moulés par compression et démoulés le lendemain de leur fabrication.

La résistance aux déformations permanentes est mesurée sur des corps d'épreuve de dimension 180 X 500 X 100 mm moulés au compacteur de plaque [10].

Les essais de module de rigidité sont réalisés sur des corps d'épreuve prismatiques, trapézoïdaux ou cylindriques. Ces corps d'épreuve sont extraits de plaques 400 X 600 mm confectionnées au compacteur de plaques. Les corps d'épreuve cylindriques sont, soit des cylindres de diamètre 160 mm confectionnés à la PCG2, soit des cylindres de diamètre 100 mm et de hauteur 50 mm extraits de plaques 180 X 500 mm ou de cylindres PCG2.

Le tableau 1 rassemble le mode de préparation et les dimensions des échantillons, en faisant apparaître le rapport S/V entre la surface S exposée à l'air, déduction faite des surfaces confinées (sur le support ou par le moule) et le volume V de matériau. Ce rapport joue évidemment un rôle dans le mûrissement, dont l'allure croît avec la valeur S/V. Les hauteurs des éprouvettes cylindriques prises en compte sont données à titre indicatif et peuvent varier en fonction du pourcentage de vides visé.

Effets des protocoles de mûrissement sur les résultats Duriez

Un intérêt de cet essai dans le cadre de la présente recherche est que les mesures sont faites directement sur les échantillons moulés.

Effets sur la tenue à l'eau

Les conditions de conservation des éprouvettes sont fixées par la norme Duriez NF P 98-251.

Echantillon	Mode de compactage	Diamètre (mm)	Hauteur (mm)	Épaisseur (mm)	Dimensions (mm)	Rapport S/V (m ² /m ³)
Cylindre	Moulage Duriez	120	145			40
Cylindre	Moulage PCG2	160	170			31
Plaque 1	Compacteur de plaque			100	500 X 180	10
Plaque 2	Compacteur de plaque			100	600 X 400	10

Tableau 1
Echantillons : géométrie, mode de compactage, dimensions et rapport S/V
Specimens geometry, compaction mode, dimensions and S/V ratio

Quatre couples température-hygrométrie ont été utilisés : T18-HR50, T18-HR20, T35-HR20, T50-HR20, notés en abrégé M18a, M18b, M35, M50. De plus, des modalités comprenant deux phases successives (modalités « mixtes ») ont été expérimentées, par exemple M35 + M50, notée M35_50.

Il est à noter que ces conditions s'appliquent aux volumes de mélange compacté (sous forme de plaques ou cylindres), appelés par la suite « échantillons », dont sont extraits les corps d'épreuve soumis aux essais. Dans certains cas, ces deux notions sont confondues.

Les plaques (400 X 600 et 180 X 500 mm) ont été conservées dans les moules métalliques ou bien démoulées, puis maintenues dans des bâtis en bois de mêmes dimensions. Les cylindres « PCG2 » sont démoulés immédiatement après leur confection. Avant extraction des corps d'épreuve cylindriques par carottage, leur température a été abaissée à 5 °C pendant 2 heures environ [2].

L'extraction de corps d'épreuve à partir d'un échantillon induit une période supplémentaire de conservation à température ambiante, pendant laquelle l'évolution du matériau est supposée faible pour un matériau déjà suffisamment vieilli.

Dans la première étape, les corps d'épreuve sont conservés pendant sept jours à l'air à 18 °C et 50 % d'humidité. La seconde étape consiste à conserver simultanément à l'air et dans l'eau, dans les mêmes conditions de température, deux lots d'éprouvettes pendant 7 jours [11].

Dans cette étude, l'influence de deux variantes du protocole de mûrissement de l'étape 1 ont été testées, en remplaçant le conditionnement M18a normalisé par les conditionnements :

- M35 pendant 14 jours,
- mixte M35_50 (modalité M35 pendant 7 jours, suivie de la modalité M50 pendant 7 jours).

Remarque importante

Cet article ne traite pas des méthodes de mesure du module de rigidité, qui sont multiples et diverses. Il s'agit là d'un sujet à part entière, auquel est dédié un groupe de travail IFSTTAR/RST/USIRF. Un article spécifique lui sera consacré ultérieurement dans la RGRA. Le présent article ne vise donc pas à juger de la validité d'une méthode de mesure de module par rapport à une autre, ni à établir des corrélations entre elles.

Recherche Enrobés à l'émulsion

Les résultats Duriez (photo 1) ont été détaillés dans un précédent article de cette série [3]. Une synthèse en est donnée dans le tableau 2. Par rapport à la conservation normalisée à 18 °C, la tenue à l'eau s'améliore lorsque l'on mûrit les éprouvettes 7 jours à 35 °C - 20 % HR. L'amélioration devient très marquée après mûrissement 7 jours à 35 °C plus 7 jours à 50 °C (M35_50) car les résistances après immersion augmentent bien plus que les résistances à sec. Ces observations montrent que les spécifications ne doivent pas être limitées à la tenue à l'eau et doivent aussi prendre en compte le niveau de résistance mécanique.

Effets sur la consistance du liant

Les liants extraits des corps d'épreuve conservés à l'air ont été caractérisés par leur pénétrabilité à 25 °C et leur température de ramollissement Bille & Anneau [12, 13].

Le mûrissement M18a, conformément à la norme NF P 98251-4 de l'essai (14 jours à 18 °C 50 % HR) du mélange moulé selon la modalité 2, amène le liant à un état quasi identique à celui observé à la mise en œuvre sur chantier. Il caractérise donc le mélange à l'état frais.

Pour un même pourcentage de vides, le mûrissement M35 amène le liant à un état voisin de celui observé en place après environ 2 ans. Il caractérise donc le mélange à l'état mûri. Les augmentations des contraintes à la rupture sont probablement en liaison directe avec ce durcissement. Le mûrissement M35_50 ne modifie pratiquement pas la consistance du liant par rapport au mûrissement M35.

En revanche, il fait augmenter considérablement la résistance après immersion et, par là, le rapport r/R. Cette constatation tend à démontrer que le mûrissement ne se résume pas au simple durcissement du liant.

En conséquence, dans le cadre de cette étude, les déformations permanentes ont été évaluées selon la norme d'essai pour enrobé à chaud EN 12697-22, soit à une température d'essai de 60 °C et une fréquence de sollicitation de 1Hz. L'essai est mené jusqu'à 30 000 cycles [15]. Les corps d'épreuve ont été soumis à cinq modalités de mûrissement, réparties comme suit :

- Laboratoire 1 : M18a pendant 14 jours - M35 pendant 14 jours - M18b pendant 60 jours ;
- Laboratoire 2 : M35 pendant 14 jours (+3 j ambiante) - M35_50 pendant 7+7 jours (+ 6 j ambiante).

Les résultats de ces tests ont été détaillés dans un précédent article de la série [10]. Les corps d'épreuve présentaient une teneur en vides moyenne comprise entre 16,4 et 19,2 %.

Pour les conditionnements M18a, M18b et M35, les profondeurs d'ornièrre à 30 000 cycles se situent entre 6,2 et 7,6 %. Ces trois conditions de mûrissement peuvent être considérées comme ayant eu le même effet sur la résistance à l'ornièrre, au demeurant excellente.

Après le mûrissement M35_50, la profondeur d'ornièrre est tombée à 4,7 %, résultat remarquable, malgré le pourcentage de vides élevé des corps d'épreuve (> 16 %). Ainsi, comme précédemment pour la tenue à l'eau, il apparaît que le mûrissement en deux étapes M35_50 a logiquement, un effet nettement plus marqué que les M18 et M35.

En tout état de cause, ces résultats ne sont pas assez nombreux pour sélectionner la modalité de mûrissement des plaques la mieux adaptée pour atteindre un état de maturation représentatif du terrain. Des études complémentaires sont nécessaires.

Protocoles de mûrissement, types d'essai de module et de caractérisation des liants utilisés

Le référentiel normatif ne comprend pas de spécification relative à la rigidité des enrobés à l'émulsion. Toutefois, on notera que le guide de retraitement à

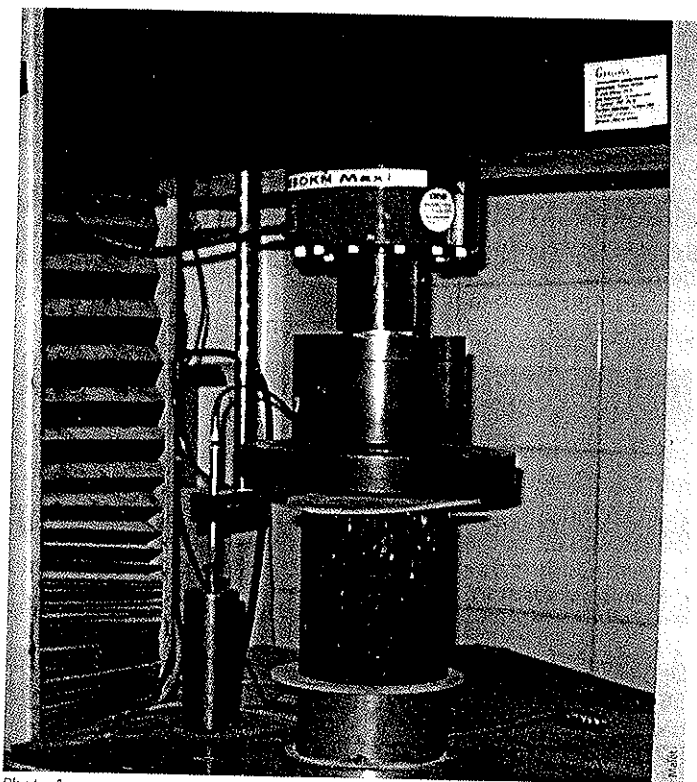


Photo 1
Essai Duriez sur éprouvette de diamètre 120 mm
Duriez compression test (specimen diameter 120mm)

Effet des protocoles de mûrissement sur la résistance à l'ornièrre

Les référentiels normatifs français et européen, y compris la norme « grave-émulsion » [14], ne comprennent ni spécification pour la résistance à l'ornièrre des enrobés à l'émulsion de bitume (photo 2), ni même de méthode d'essai pour la mesurer.



Photo 2
Essai de résistance aux déformations permanentes -
Mesure de la profondeur d'ornièrre
Wheel-tracking test -
Measuring the rut depth

Modalités de conservation	Modalité de compactage	% vides géométriques	Résistances en compression (MPa)	Tenue à l'eau (R)	Pénétrabilité (à 25 °C /10 mm)	TBA (°C)
A la fabrication t0					83	40
M18a	1 (120kN)	11,0	R = 4,7 r = 2,9	0,62	77	47
M18a	2 (40kN)		R = 2,7 r = 1,6	0,61	69	48,2
M35	2 (40kN)	16,5	R = 3,5 r = 2,3	0,67	44	54
M35_50	2 (40kN)		R = 3,9 r = 3,1	0,81	41	54,6

Tableau 2
Résultats des essais Duriez et caractérisation des liants extraits des éprouvettes
Duriez tests results and characterisation of extracted binders

froid [16] indique des valeurs de module dans la classification des classes de retraitement, en vue du dimensionnement des structures correspondantes.

Le module de rigidité est un critère incontournable en matière de dimensionnement selon les principes de la méthode française [17]. Il est indispensable pour la compréhension du comportement des GE à divers âges au sein des structures de chaussée.

De plus, le module est un indicateur d'état du matériau permettant d'étudier son mûrissement et d'établir une passerelle entre le terrain et le laboratoire. Son analyse peut être utilement complétée par la caractérisation des liants extraits des corps d'épreuve, fabriqués en laboratoire ou prélevés *in situ*. L'étude a donc été basée sur ces deux indicateurs.

Méthodes d'essai utilisées

Mesures de module de rigidité

En l'absence de normes d'essais spécifiques pour les enrobés à l'émulsion, les mesures de modules ont été menées selon les indications de normes d'essai pour enrobés à chaud [18, 19]. Les essais suivants ont été effectués :

- Selon la norme NF EN 12697-26 :
 - Annexe A : module complexe en flexion 2 points sur éprouvettes trapézoïdales (2PB-TR) ou prismatiques (2PB-PR) ;
 - Annexe C : module en traction indirecte sur éprouvettes cylindriques (IT-CY) ;
 - Annexe E : module en traction directe sur éprouvettes cylindriques (DT-CY) ou prismatiques (DT-PR).
- Selon la norme américaine AASHTO TP 62 07 :
 - Module complexe en compression uniaxiale sur éprouvettes cylindriques (notée MC-CU).

Comme pour les enrobés à chaud, les valeurs de module suivantes ont été retenues :

- norme du module complexe à 15 °C et 10 Hz (2PB-TR, 2PB-PR, MC-CU),
- module sécant à 124 ms, à 10 °C et 15 °C (IT-CY),

- module sécant à 15 °C et 0,02 s (DT-CY, DT-PR).

Caractérisation des liants extraits

Les liants extraits des corps d'épreuve ont été caractérisés uniquement par leur pénétrabilité à 25 °C [12] et leur température de ramollissement Bille & Anneau, TBA en abrégé [13].

Programme des mesures de module et de caractéristiques des liants

Sur échantillons confectionnés en laboratoire

Cinq laboratoires référencés M, E, L, V et C ont participé à l'étude, en utilisant les constituants de la GE mise en œuvre sur la RD44. Les modalités (mûrissement des échantillons, type d'essai et extraction éventuelle de liant) sont résumées dans les tableaux 3a et 3b. Les modalités de mûrissement retenues ont été M35 (35 °C - 20 % HR), M18 (18 °C - 50 % HR) et M35_50 (35 °C - 20 % HR, puis 50 °C).

Les corps d'épreuve soumis au test de module en compression diamétrale (IT-CY) ont un diamètre moyen de l'ordre de

100 mm et une épaisseur d'au moins 50 mm (photo 3). Les essais de modules complexes ont été réalisés suivant un spectre de fréquences et de températures variables selon les laboratoires. Ces essais sont menés dans un domaine de petites déformations, limitées ici à 50 µdef. Les dimensions des corps d'épreuve pour mesures de module complexe en flexion deux points (2PB-TR et 2PB-PR) ont été conformes aux prescriptions normatives.

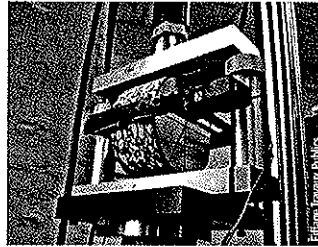


Photo 3
Module en compression diamétrale (IT-CY) sur éprouvettes cylindriques (diamètre 100 mm)
Indirect tension modulus (IT-CY) measurement on 100mm diameter specimen

L'un des laboratoires a utilisé l'essai américain de module complexe en compression uniaxiale (photo 4). Ces tests ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques confectionnées avec la presse à cisaillement giratoire (PCG) de type 2, sans découpe.

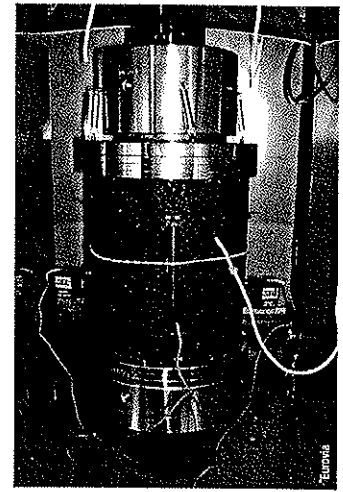


Photo 4
Mesure du module complexe en compression uniaxiale (MC-CU) sur éprouvette PCG entière
Uniaxial compression modulus (MC-CU) measurement on entire GSC specimen

Sur échantillons prélevés en place

Cinq campagnes de suivi ont été réalisées dans le cadre de la présente étude, la première après le premier été, soit 3 mois (90 jours) après la mise en œuvre, la cinquième après le troisième été, soit 29 mois (866 jours) après la mise en œuvre. La première prise d'échantillon a été exécutée par carottage à sec, les suivantes par découpage de plaques dans la zone instrumentée, exempte de couche d'accrochage [6, 8 et 9].

Quatre laboratoires, référencés A, B, E, L, ont participé à ce programme. Les déterminations des modules de rigidité ont été menées conformément aux annexes A (2PB-TR et 2PB-PR), C (IT-CY) et E (DT-PR) de la norme EN 12697-26. Ce dernier type d'essai (photo 5) a été réalisé

Laboratoires	Echantillons	Durées de mûrissement (en jours)		
		M35	M35_50	M18
M	Cylindre PCG2	7-14-28		
E	Cylindre PCG2	3-7-14-28-90/97		
L	Plaque 400*600	14		60-180
L	Plaque 400*600	14 (fab centrale)		
V	Cylindre PCG2	3-8-14-28-90	7+7	
C	Plaque 180*500	14	7+7	
C	Plaque 400*600	14	7+7	

Tableau 3a
Modalités de mûrissement des échantillons
Curing regimes applied to the specimens

Laboratoires	Essais de module			Essais liants
	M35	M35_50	M18	
M	IT-CY			Péné-TBA
E	IT-CY			Péné-TBA
L	2PB-PR et TR		2PB-PR(60 j) 2PB-TR et PR (180 j)	
L (fab centrale)	2PB-PR et TR			
V	MC-CU	MC-CU		Péné-TBA
C	IT-CY	IT-CY		Péné-TBA
C	2PB-TR	2PB-TR		

Tableau 3b
Méthodes d'essais de module utilisées
Modulus measurement methods used

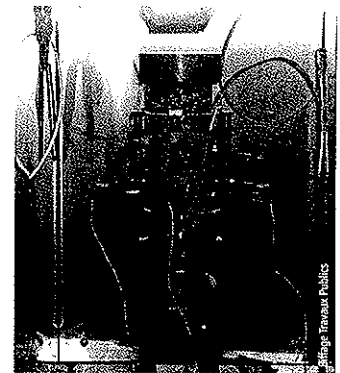


Photo 5
Mesure de module sécant en traction directe (DT-PR) sur prisme
Direct tension modulus (DT-PR) measurement on prismatic specimen

Recherche Enrobés à l'émulsion

avec des temps de chargement de 1 à 300 secondes, une déformation maximale de 100 μ def et à quatre températures.

Modules de rigidité en fonction du type d'essai après mûrissement (M 35 - D14) Comparaison avec les modules en place

Les cinq laboratoires ont appliqué la modalité commune M35 - D14 recommandée dans les publications antérieures pour amener la grave-émulsion dans un état comparable à un vieillissement sur site d'environ un an [21].

D'une manière générale, les valeurs affichées sont les moyennes de 3 à 6 résultats.

Les pourcentages de vides des corps d'épreuve testés et les modules de rigidité obtenus sont présentés sur les figures 1 et 2, assortis d'indicateurs de dispersion (écarts par rapport à la moyenne), valeurs non disponibles pour le laboratoire M.

L'équivalence approximative entre module complexe à 15 °C - 10 Hz et module en compression diamétrale à 10 °C - 124 ms mise en évidence sur les enrobés à chaud de module inférieur ou égal à 9 000 MPa se confirme dans la gamme des faibles modules.

L'essai de compression uniaxiale conduit à des valeurs nettement supérieures aux précédentes, écart que la différence de teneur en vides des corps d'épreuve explique en partie, mais ne semble pas pouvoir justifier entièrement. Un écart dans ce sens ne peut provenir non plus du ratio S/V des échantillons, qui sont les mêmes pour les essais MC-CU et IT-CY. Il est possible, en revanche, que la compression moyenne exercée sur le matériau au cours de l'essai MC-CU, allée à un comportement non linéaire des graves-émulsion, ait un effet rigidifiant sur le module (complexe) tangent du matériau. Ce point fera l'objet d'études ultérieures.

La figure 4 compare les valeurs sur mélanges fabriqués en laboratoire avec celles atteintes sur chantier après trois étés, qui, comme indiqué ci-dessus, apparaissent à peu près stabilisées dès le deuxième été.

Afin de minimiser les biais expérimentaux, les comparaisons laboratoire-chantier sont présentées par type d'essai. On constate que les modules mesurés sur éprouvettes fabriquées en laboratoire et mûries selon le protocole M35 - D14 sont sensiblement inférieurs aux modules « stabilisés » du matériau en place. Ces écarts s'expliquent en partie par les différences de compacité :

- 12 à 14 % de vides *in situ*, contre 16 à 20 % pour les fabrications en laboratoire.
- Cependant, les écarts entre modules *in situ* et laboratoire ne proviennent pas seulement des différences de compacité. Les échantillons soumis au mûrissement accéléré (PCG et plaques) étaient volumineux et présentaient un rapport S/V peu favorable à une évolution rapide.

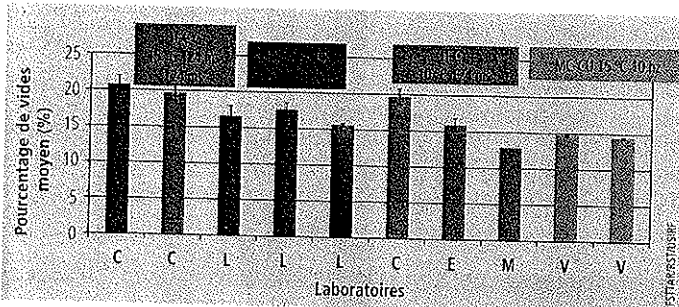


Figure 1
Pourcentages de vides moyens des corps d'épreuve
Mean voids percentages of the specimens

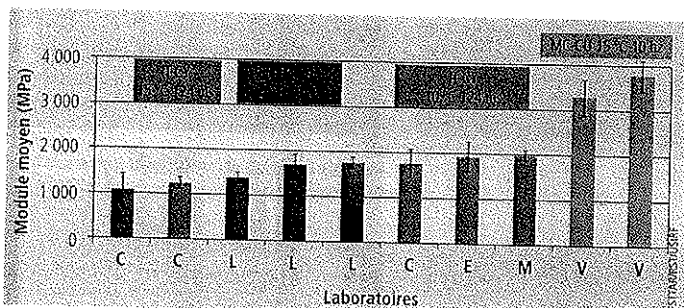


Figure 2
Modules de rigidité mesurés après mûrissement M35 - D14
Mean stiffness moduli after M 35 - D 14 accelerated curing

Les teneurs en vides des corps d'épreuve varient de 12,9 à 20,7 %. Les valeurs de modules s'échelonnent de 1 080 MPa à 3 770 MPa, assorties de barres de dispersion allant de 120 à 400 MPa.

Sur le chantier, la grave-émulsion est passée d'un état non cohésif à un état cohésif, dans un délai d'une semaine maximum. Son aptitude au carottage a été vérifiée à l'occasion du premier suivi, soit 90 jours après sa

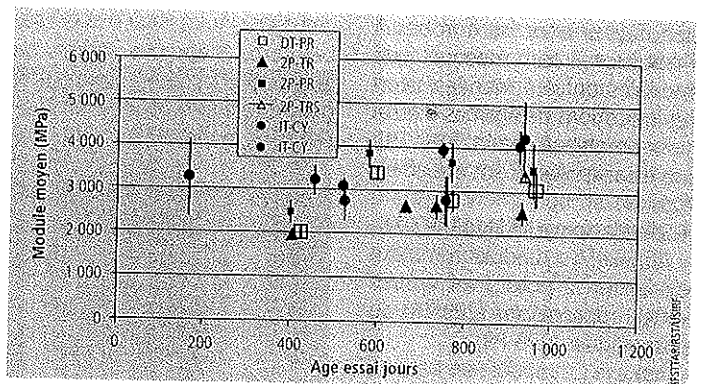


Figure 3
Modules de rigidité mesurés au cours du suivi de chantier en fonction de l'âge de la GE
In-place stiffness moduli over time

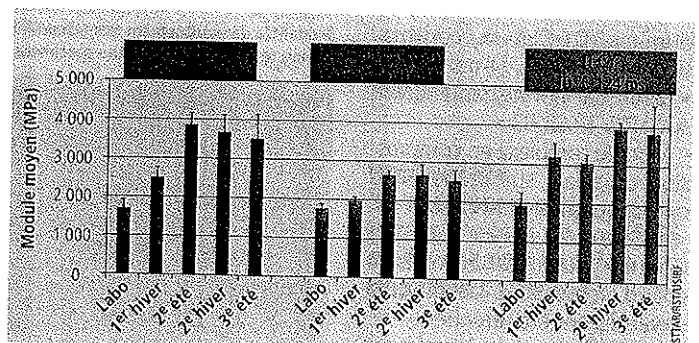


Figure 4
Comparaison des valeurs de module de rigidité obtenues en laboratoire (M35 - D14) avec les valeurs de module obtenues sur chantier à différentes échéances
Comparison of the moduli measured on laboratory-made specimens after M35 - D14 curing and those measured on field samples

Il est clair que le protocole M35 - D14 appliqué à ces types d'échantillon est insuffisant pour simuler l'évolution en place à moyen terme.

Ces résultats seront à recouper avec ceux des deux autres chantiers expérimentaux de grave-émulsion de l'opération OPTIMIRR, réalisés avec des GE différentes.

Cinétique d'évolution de la rigidité des corps d'épreuve fabriqués en laboratoire et prélevés sur site

Comparaison d'évolutions de mélanges de laboratoire au cours du mûrissement M35

Les laboratoires M et E ont évalué la cinétique d'évolution de la rigidité de moulages PCG2 de 3 à 90 ou 97 jours, dans lesquels des éprouvettes pour essai IT-CY ont été carottées. Le laboratoire V a suivi un échéancier équivalent, appliqué également à des moulages PCG2, ensuite soumis tels quels à l'essai de module complexe en compression uniaxiale CM-CU.

Les essais IT-CY ont été réalisés sur des corps d'épreuve différents à chaque échéance et carottés juste avant essai, tandis que les essais MC-CU ont été réalisés d'un bout à l'autre sur le même lot de corps d'épreuve. La teneur en eau après compactage des corps d'épreuve MC-CU était comprise entre 5,4 et 5,6 %. Après 3 jours de mûrissement M35, ces éprouvettes avaient perdu 0,4 % de leur teneur en eau et, à 8 jours, celle-ci était inférieure à 1 %. Le laboratoire E a testé deux lots de corps d'épreuve se différenciant par leur pourcentage de vides : 11 à 12 % et 15 à 18 %.

La figure 5 illustre les cinétiques d'évolution obtenues pour le conditionnement M35 appliqué de 3 à 90 ou 97 jours pour les deux types d'essais mécaniques. Le résultat de chaque éprouvette testée est présenté.

On retrouve sur ces courbes l'écart entre les modules MC-CU

et IT-CY qui existe à tout stade d'évolution du matériau. Mais on observe dans les deux cas une même évolution du module, caractérisée par une courbe concave, traduisant le mûrissement de la grave-émulsion. Ces résultats montrent que les essais de module sont des traceurs pertinents et précieux pour l'étude du mûrissement du matériau, que ce soit pour mettre en relation laboratoire et chantier ou pour établir des modèles d'évolution en fonction des conditions de température et d'hygrométrie subies par le matériau.

Comparaison laboratoire-chantier

La figure 6 compare les valeurs IT-CY obtenues en laboratoire entre 3 et 97 jours selon la modalité M35 avec celles obtenues sur des carottes prélevées *in situ* entre 90 et 866 jours. La comparaison est faite sur la base d'un même essai et de corps d'épreuves ayant un pourcentage de vides quasiment identique, compris entre 11 et 12 %.

Les modules de laboratoire à 28 jours sont très proches des modules en place à 1 an. Les valeurs de laboratoire à 97 jours sont quant à elles bien supérieures et très voisines des valeurs terrain après 3 étés. L'allure des courbes, laboratoire comme chantier, laisse penser que, à ces échéances, la GE de la RD 44 possède encore un potentiel notable de mûrissement. Là encore, le mûrissement M35 apparaît convenir pour simuler la rigidification en place, à condition de l'exercer pendant une durée suffisamment longue.

On voit aussi l'intérêt de pratiquer un seul et même essai pour les comparaisons, car on s'affranchit ainsi des divergences pouvant résulter de l'utilisation de méthodes de mesure différentes.

Analyse approfondie des résultats de module complexe

Les mesures de module complexe (photo 6) permettent de compléter ces évaluations de mûrissement/vieillessement par

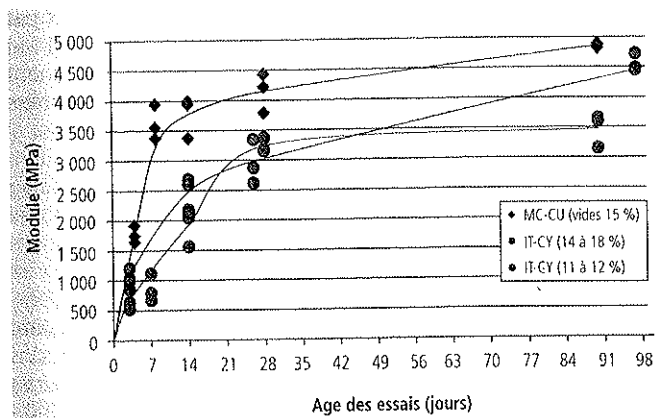


Figure 5 Mûrissement M35 de 3 à 97 jours - Cinétique d'évolution des modules de rigidité Accelerated curing M35 from 3 to 97 days - Kinetics of stiffness moduli variation

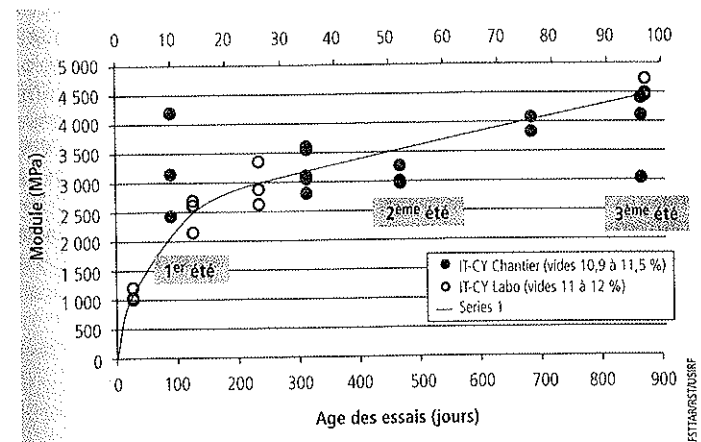


Figure 6 Comparaison des cinétiques d'évolution des modules de rigidité en laboratoire et *in situ* mesurés par IT-CY Comparison of the IT-CY modulus variation kinetics in the laboratory and *in-situ*

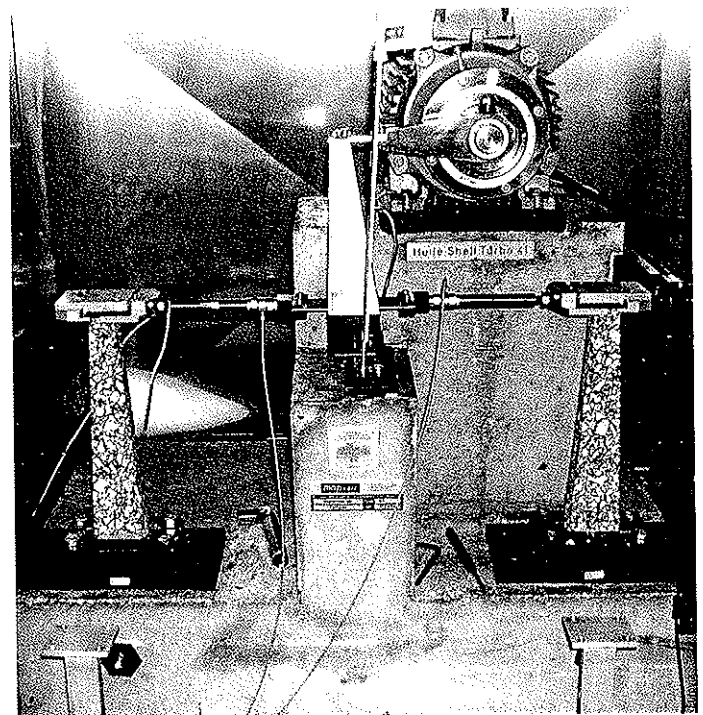


Photo 6 Mesure du module complexe sur éprouvettes trapézoïdales (2PB-TR) Two-point flexion modulus (2PB-TR) measurement on trapezoidal specimens

Recherche Enrobés à l'émulsion

L'observation de l'évolution de l'angle de phase. A titre d'exemple, la figure 7 présente dans l'espace de Cole-Cole les isothermes à 15 °C obtenus à diverses échéances de mûrissement M35 sur les corps d'épreuve de laboratoire. L'analyse de ces courbes (éventuellement étendue à d'autres températures) est pertinente pour une modélisation macroscopique de l'évolution du matériau visant à mieux comparer les phénomènes de vieillissement en laboratoire et sur chantier.

La figure 8 montre à ce titre des évolutions qualitativement distinctes entre le mûrissement M35 de laboratoire et le vieillissement chantier à partir du deuxième été (données > 468 jours). La norme E^* du module complexe sur chantier reste stable tandis que l'angle de phase continue à décroître, contrairement aux évolutions en laboratoire.

Ce constat sera à confirmer par les résultats des suivis de 2011 et 2012 et à recouper également avec ceux des autres chantiers de l'opération OPTIMIRR.

Comparaison des mûrissements M35 et M35_50

Comme pour la tenue à l'eau et la résistance aux déformations permanentes, les deux modalités M35 - D14 et M35 - D7 + M50 - D7 ont été comparées, afin d'examiner l'effet accélérateur de cette seconde modalité mixte.

La comparaison a porté sur deux éprouvettes MC-CU présentant le même comportement rhéologique (valeurs de module complexe à 15 °C, 10 Hz) à l'issue des 7 premiers jours sous M35. Les courbes de la figure 9 montrent pour cette grave-émulsion une équivalence de la modalité mixte avec la modalité M35 à 70 jours. Cela correspond à un

« pouvoir accélérateur » de l'ordre de 5, aussi bien pour la norme du module complexe que pour l'angle de phase, ce qui semble indiquer également l'équivalence des deux modalités sur le plan de l'évolution physico-chimique du liant.

Caractérisation des liants extraits des corps d'épreuve et de leur cinétique de vieillissement

La caractérisation des liants des corps d'épreuve est un complément indispensable à l'analyse mécanique. La figure 10 illustre les évolutions de la pénétrabilité et de la TBA des liants extraits des éprouvettes IT-CY (issues d'échantillons PCG2) et MC-CU fabriquées en laboratoire et conditionnées suivant le protocole M35. Les résultats confirment les observations faites sur les autres chantiers de GE : ils montrent une augmentation

importante de la consistance du liant, se traduisant par une forte augmentation de TBA et une diminution de pénétrabilité. Comme cela a été observé pour les bitumes extraits des enrobés à chaud, l'augmentation de TBA et la diminution du logarithme de la pénétrabilité sont proportionnelles [22].

La figure 11 reprend ces résultats, complétés par ceux des liants extraits des corps d'épreuve (IT-CY) prélevés dans le cadre du suivi annuel du chantier RD44 [20].

On observe que la TBA du liant extrait des prélèvements chantier est également une fonction linéaire du logarithme de la pénétrabilité. Les évolutions chantier et laboratoire se superposent et permettent de situer l'échéance laboratoire de 28 jours au voisinage de l'échéance terrain de 468 jours, soit après le deuxième été. On retrouve ici les résultats obtenus sur la base des mesures de module (voir figure 6).

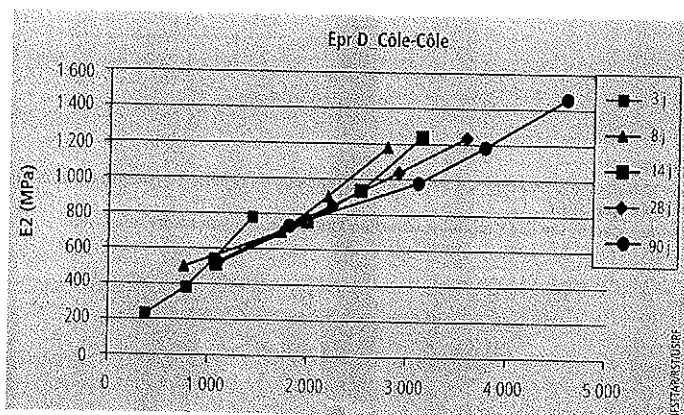


Figure 7
Cinétique d'évolution du module complexe MC-CU (corps d'épreuve laboratoire) dans l'espace Cole-Cole pour l'isotherme 15 °C et la modalité M35
Variation of MC-CU complex modulus in the Cole-Cole space for the 15°C isotherm, after M35 curing

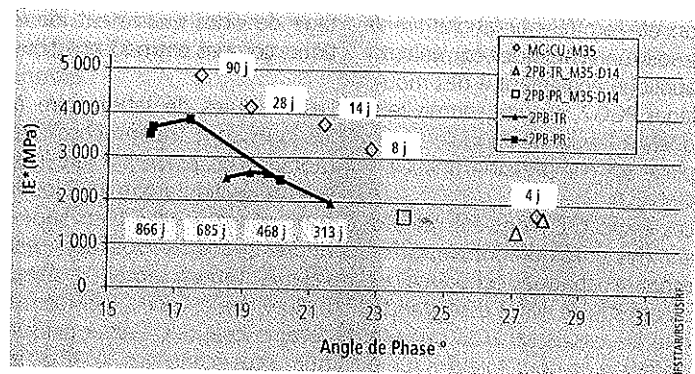


Figure 8
Comparaison des cinétiques d'évolution des modules complexes en laboratoire et *in situ* dans l'espace de Black
Comparison in Black's space of the variation of complex modulus (measured in the laboratory and *in-situ*)

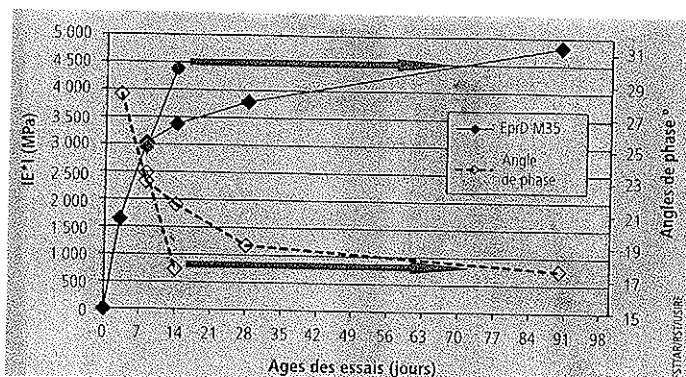


Figure 9
Comparaison des cinétiques d'évolution des modalités M35 - D7 et M35 - D7 + M50 - D7 sur la base du module complexe (norme et angle de phase)
Comparison of complex modulus components (norm and phase angle) variations during M35-D14 and M35-D7+M50-D7

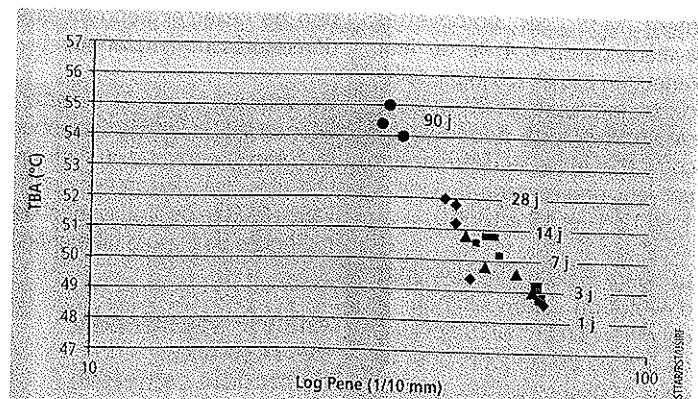


Figure 10
Cinétique d'évolution temporelle des caractéristiques des liants extraits des éprouvettes de module fabriquées en laboratoire (IT-CY et MC-CU) et mûries selon le protocole M35
Variation with time of the characteristics of binders extracted from laboratory-made IT-CY and MC-CU specimens subjected to M35 accelerated curing

Recherche Enrobés à l'émulsion

Remerciements

Les auteurs remercient le personnel des laboratoires du ministère (Nantes, Autun et Saint-Brieuc) et des entreprises (Colas, Eiffage Travaux Publics, Eurovia et Malet) qui ont participé à cette étude. Est remercié également le conseil général d'Ille-et-Vilaine pour avoir réalisé ce chantier expérimental sur son réseau routier, ainsi que pour la participation de ses agents aux suivis pluriannuels.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] L. Odie, A. Béghin, F. Delfosse, Ch. Naudat, F. Le Cunff, N. Brau, « Caractérisation de la montée en cohésion des enrobés à froid » Revue générale des routes et de l'aménagement (RGRA), n° 900, mars 2012, pp. 95-101
- [2] L. Wendling, J.-P. Triquigneaux, E. Cregut, S. Ollier, C. Petiteau, D. Claudel, L. Odie, V. Gaudefroy, « Compactabilité des enrobés à l'émulsion », RGRA n° 901, mai 2012
- [3] JP Triquigneaux, L. Wendling, L. Odie, D. Claudel, V. Gaudefroy « Essai Duriez : teneurs en vides, performances mécaniques, sensibilité à l'eau et caractérisation des liants extraits » RGRA n° 901, mai 2012
- [4] B. Eckmann, S. Le Bec, D. Lesueur, C. Leroux, Y. Brion, « Caractérisation des enrobés à froid vis à vis de la mise en œuvre et de la montée en cohésion » RGRA n° 802, janvier 2002, pp. 52-59
- [5] J.-E. Poirier, X. Carboneau, J.-P. Henrat « Les enrobés à froid : des matériaux évolutifs. Etude du mûrissement et de son impact sur les caractéristiques du liant résiduel » RGRA n° 805, avril 2002, pp. 49-55
- [6] L. Wendling, D. Guedon, V. Gaudefroy, L. Odie, J.-C. Fabre, J.-M. Balay, A. Millien, C. de La Roche, « Méthodologie de préparation d'instrumentation et de suivi de chantiers expérimentaux d'enrobé à froid à l'émulsion de bitume » RGRA n° 897, octobre 2011, pp. 75-81
- [7] V. Gaudefroy, J.-P. Triquigneaux, C. Petiteau, D. Claudel, F. Delfosse, M. Garbay, L. Wendling, C. de La Roche, « Comportement et étude des graves-émulsion Coopération public-privé. Fabrication, prélèvement et conservation des enrobés à l'émulsion de bitume en laboratoire », RGRA n° 899, janvier-février 2012, pp. 102-105
- [8] L. Wendling, D. Guedon, V. Gaudefroy, L. Odie, J.-C. Fabre, J.-M. Balay, A. Millien, C. de La Roche « Chantier expérimental de la RD 44, Présentation du site et de son instrumentation » RGRA n° 898, novembre-décembre 2011, pp. 101-107
- [9] L. Wendling, D. Guedon, L. Odie, J.-C. Fabre, V. Gaudefroy, J. Siry, J.-M. Balay, A. Millien, C. de La Roche « Chantier expérimental instrumenté de grave-émulsion - RD44 - Ille-et-Vilaine, suivi du comportement dans le temps » RGRA n° 899, janvier-février 2012, pp. 98-101
- [10] X. Carboneau, V. Gaudefroy, F. Lubineau, S. Buisson, L. Wendling, V. Dubois, « Résistance à l'orniérage » RGRA n° 902, juin 2012
- [11] Norme, NF P98-251-4, Essais statiques sur mélanges hydrocarbonés - Essais relatifs aux chaussées - Partie 4 : essai DURIEZ aménagé sur mélanges hydrocarbonés à froid à l'émulsion de bitume - AFNOR - août 2004
- [12] Norme, NF EN 1426, Bitume et liants bitumineux - Détermination de la pénétrabilité à l'aiguille, AFNOR, Juin 2007
- [13] Norme, NF EN 1427, Bitume et liants bitumineux - Détermination du point de ramollissement, AFNOR, Juin 2007
- [14] Norme, XP P98-121, Assises de chaussées en grave-émulsion - définition - classification - caractéristiques - fabrication - mise en œuvre, AFNOR, février 2005
- [15] Norme, NF EN 12697-22, Mélanges bitumineux-Méthode d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud, partie 22: Essai d'orniérage. AFNOR, septembre 2007
- [16] Retraitement en place à froid des anciennes chaussées - Guide Technique, Comité français pour les techniques routières (CFTR), Juillet 2003
- [17] Conception et dimensionnement des structures de chaussées - Guide Technique, SETRA-LCPC, Décembre 1994
- [18] Norme NF EN 12697-26, Mélanges bitumineux-Méthode d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud, partie 26 : Module de rigidité. AFNOR, Mars 2010
- [19] Norme AASHTO TP 62-07, Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)
- [20] F. Delfosse, B. Eckmann, M. Garbay, V. Gaudefroy, L. Odie, F. Le Cunff « Caractérisation des liants bitumineux des enrobés à froid au jeune âge » RGRA n° 900, mars 2012, pp. 89-94
- [21] JP Serfass, JE Poirier, JP Henrat, X Carboneau, "Influence of curing on cold mix mechanical performance", Performances Testing and Evaluation of Bituminous Materials SPTEBM'03, 6th International RILEM Symposium, Zurich, pages 223 to 229, avril 2003.
- [22] F. Migliori and JF Corté, "Comparative study of RTFOT and PAV ageing simulation laboratory tests"; Transportation Research Board 1638 (1998), pp. 56-63.
- [23] JP Serfass, X Carboneau, F. Delfosse, JP Triquigneaux « Comportement et évaluation de graves-émulsion », RGRA n°889, novembre 2010, pp. 66-76 ■



Behaviour and design of grave-emulsion Public-private cooperation Curing and time-dependant variation of the mix properties and binder characteristics

The mix stiffness modulus has been retained as main indicator of curing progress. Other tests (Duriez, wheel-tracking) have also provided useful data. The analysis has been completed with the characterization of the binders extracted from the GE at different ages. Several accelerated curing protocols have been tested. Various modulus measurement methods have been used: 2-points bending and compression for complex modulus, direct- and indirect tension for secant. A correlation has been established between the modulus increase rates in situ and in the laboratory. For example, regarding "large" specimens, 28 days of M35 curing protocol (35°C-20% RH) correspond to approximately 1 year in the field, and 90 days to 3 years. Protocols comprising two temperature steps have also been tried. The results analysis shows that the modulus has increased in the first phase and has then been tending to stabilize, whereas the binder keeps on hardening. Detailed analysis of the complex modulus data, in particular those regarding the phase angle, have contributed to explain this discrepancy. Further research is under way to finalize all accelerated curing protocols required for a complete mix design methodology.