



HAL
open science

Etude en laboratoire des performances mécaniques des enrobés à la mousse de bitume utilisant des granulats tièdes

Vincent Gaudefroy, Bogdan Cazacliu, Chantal de La Roche, François Olard, Etienne Beduneau, Jean Pierre Antoine

► **To cite this version:**

Vincent Gaudefroy, Bogdan Cazacliu, Chantal de La Roche, François Olard, Etienne Beduneau, et al.. Etude en laboratoire des performances mécaniques des enrobés à la mousse de bitume utilisant des granulats tièdes. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 2007, 270-271, pp 165-174. hal-00350491

HAL Id: hal-00350491

<https://hal.science/hal-00350491>

Submitted on 10 Jul 2009

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.

Étude en laboratoire des performances mécaniques des enrobés à la mousse de bitume utilisant des granulats tièdes

Vincent GAUDEFROY*
Bogdan CAZACLIU
Chantal de LA ROCHE
LCPC, Bouguenais, France

François OLARD
Étienne BEDUNEAU
Jean-Pierre ANTOINE
EIFFAGE Travaux Publics,
Centre d'Études et de Recherches,
Corbas, France

■ RÉSUMÉ

Pour répondre à des critères environnementaux devenus de plus en plus stricts, de nouvelles technologies d'enrobage à des températures inférieures à 100 °C, appelées « semi-tièdes », sont apparues sur le marché des matériaux bitumineux routiers. L'influence des paramètres de mélange, tels que la température et la teneur en eau initiale des granulats, sur la qualité du mélange obtenu et les propriétés mécaniques des enrobés tièdes à la mousse de bitume a été déterminée. Les propriétés de ces enrobés ont été comparées à celles des enrobés de référence : enrobés à froid traditionnels à la mousse et enrobés à chaud. L'existence d'une humidité optimale pour les granulats a été notamment mise en évidence. Les enrobés semi-tièdes à la mousse de bitume, fabriqués à 70 et 90 °C, présentent des propriétés mécaniques satisfaisantes, intermédiaires entre celles des enrobés à froid et des enrobés à chaud de référence.

Study in laboratory of the mechanical performances of the coating in the foam of bitumen using lukewarm granulats

■ ABSTRACT

In order to respond to increasingly stringent environmental criteria, new asphalt mixing technologies at so-called "half-warm" temperatures, i.e. less than 100°C, have been appearing on the market for asphalt road materials. The influence of mixing parameters, such as temperature and the initial water content of aggregates, on the quality of the mix obtained along with the mechanical properties of warm foamed bitumen mixes have been determined. The properties of these mixes have been compared with those of reference materials: conventional cold-mix foamed asphalt and hot-mix asphalt. The presence of an optimal aggregate humidity has, in particular, been underscored. These half-warm, foamed bitumen mixes, produced at 70° to 90°C, display satisfactory mechanical properties, lying between those of the reference cold-mix and hot-mix asphalts.

* AUTEUR À CONTACTER :

Vincent GAUDEFROY
vincent.gaudefroy@lpc.fr

INTRODUCTION

Avec des critères environnementaux de plus en plus exigeants, de nouvelles technologies d'enrobage à températures modérées dites « tièdes », voire « semi-tièdes » en deçà de 100 °C, ont vu le jour depuis quelques années. La société APPIA (aujourd'hui EIFFAGE Travaux Publics) s'y est naturellement intéressée en développant notamment la technique brevetée des enrobés à basse température E.B.T.[®] (acronyme anglais : low energy asphalt L.E.A.[®]) depuis fin 2004, d'abord en laboratoire puis très rapidement, au cours de la période 2005-2007, dans une vingtaine de centrales d'enrobage en France, en Espagne et aux USA [1, 2]. Ce procédé repose sur un séchage partiel du squelette granulaire et sur un enrobage avec un bitume additivé par des agents moussants, des agents de maniabilité et des dopes d'adhésivité.

Un tout autre éco-procédé d'enrobage semi-tiède à la mousse de bitume a par ailleurs été étudié au Laboratoire central des ponts et chaussées en 2005.

La première mousse de bitume a été réalisée par August Jacobi, dont le brevet a été déposé en 1928 en Allemagne, mais les spécialistes s'accordent à dire que c'est le professeur Ladis Csanyi, de l'Université de l'Iowa, qui le premier a introduit de la vapeur d'eau dans du bitume chaud pour enrober des granulats froids [3]. Les véritables essais industriels datent des années 1970 en Australie, mais il a fallu attendre 20 ans de plus pour que le procédé apparaisse comme réellement opérationnel.

En France, l'entreprise Jean Lefebvre (aujourd'hui EUROVIA) a tenté, dans les années soixante-dix, de réaliser des enduits superficiels d'usure avec de la mousse de bitume. Progressivement, le champ d'application de la technique à la mousse s'est déplacé vers les graves traitées pour fabriquer des couches d'assise [3, 4]. À cette époque, les granulats du mélange étaient utilisés à température ambiante sans séchage préalable. En 1989, le procédé a été étendu au traitement des graves et les premières études de laboratoire ont été réalisées [5].

Aujourd'hui, quelques auteurs ont des avis très partagés sur l'influence de la composition et de l'origine du bitume sur sa capacité à mousser [6, 7].

La présente étude a consisté à déterminer l'influence des paramètres de fabrication, tels que la température et la teneur en eau initiale des granulats du mélange, sur la qualité d'enrobage et les propriétés mécaniques de l'enrobé semi-tiède à la mousse de bitume et de les comparer aux matériaux traditionnels, comme les enrobés à froid à la mousse de bitume et les enrobés à chaud.

MATÉRIAUX ET TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

■ Matériaux

La formule granulométrique choisie est un béton bitumineux semi-grenu 0/10 (appelé BBSG 0/10), utilisant des granulats provenant de la carrière de la Noubleau dont la nature pétrographique est la diorite. Deux bitumes différents appartenant à la même classe 35/50 ont été étudiés : un bitume naphthénique (pénétrabilité : $47 \times 0,1$ mm ; TBA : 52,2 °C), et un bitume paraffinique (pénétrabilité : $45 \times 0,1$ mm ; TBA : 53,0 °C). Il s'agissait de déterminer si l'origine du bitume et son aptitude à mousser pouvaient avoir une influence sur la qualité de l'enrobage et si le procédé de fabrication de la mousse pouvait s'adapter à différents bitumes.

■ Principe de fabrication

Des granulats humides, froids ou tiédés à température inférieure à 100 °C ont été mélangés avec une mousse de bitume. Hormis les additifs spécifiques, la mousse de bitume est composée de bitume (environ 95 % en masse) et d'eau (les 5 % restants). Le matériel utilisé pour sa fabrication est le Foamlab, développé par la société SAE du Groupe Fayat. Dans ce procédé, les deux liquides (l'eau et le bitume) se mélangent intimement sous pression et sont ensuite éjectés au travers d'une buse vers l'extérieur. L'eau se vaporise instantanément et des films de bitume se créent, ce qui conduit à la formation d'une mousse. Cette mousse est directement pulvérisée dans un malaxeur contenant les granulats à température et humidité contrôlée. Comme l'illustre la **figure 1**, la mousse est caractérisée par un coefficient d'expansion maximum (ERm) et par une période de demi-vie ($T_{1/2}$).

Lorsque la mousse est projetée sur les granulats humides, le bitume mélangé avec les particules minérales fines entraîne la formation de particules de mastic (**figure 2**). À température ambiante, ces particules restent dissociées des granulats tant que l'eau est présente dans le mélange, évitant ainsi la coalescence des composants entre eux [8].

■ Dispositifs expérimentaux et techniques de caractérisation

› Système de malaxage

Le malaxeur utilisé est un prototype (**figure 3**). Ce dispositif, qui s'apparente à un malaxeur discontinu à arbres horizontaux, est très couramment utilisé pour la fabrication de graves et bien adapté au

figure 1
Évolution du coefficient d'expansion de la mousse de bitume en fonction du temps.

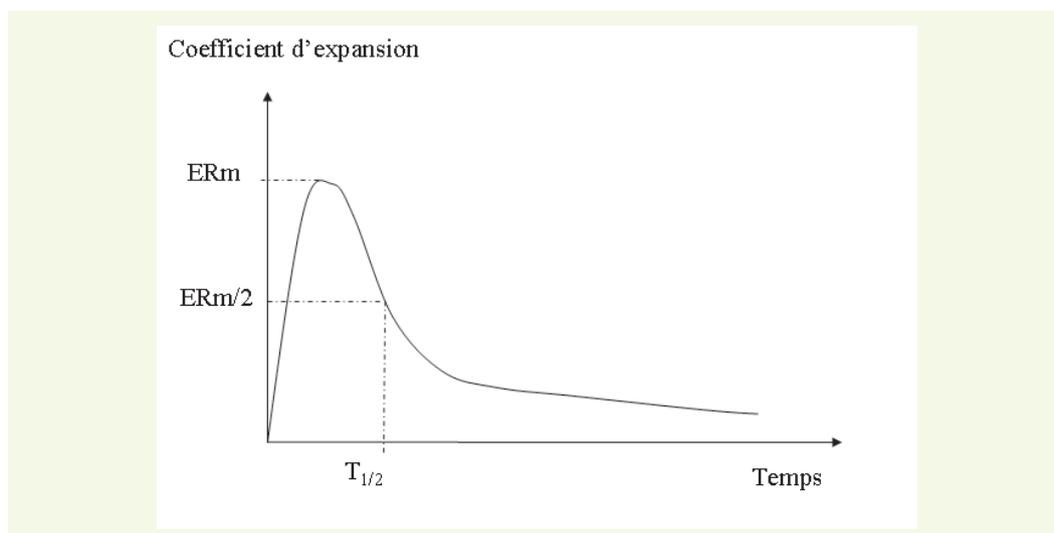
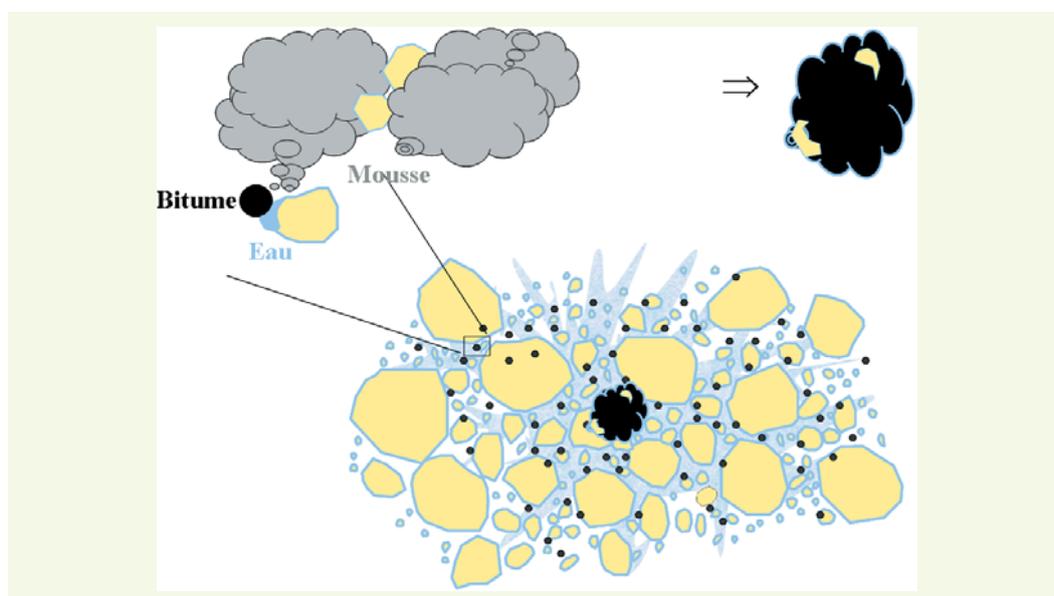


figure 2
Principe de formation d'une mousse de bitume au contact de granulats humides, froids ou semi-tièdes.



système de moussage de bitume. Le malaxeur est à double arbre horizontal, avec cinq bras par arbre et deux pales par bras. Les pales présentent une surface de $240 \times 150 \text{ mm}^2$ chacune et sont inclinées de 38° de manière à favoriser l'écoulement du matériau le long des axes des arbres. Les premiers et les derniers bras sont « rétroinclinés ». Enfin, le malaxeur n'est pas régulé en température, ce qui engendre des pertes importantes d'énergie.

Les paramètres étudiés sont la température (20, 70 et 90°C), la teneur en eau des granulats (1 à 7 %) et la teneur en bitume du mélange (3,5 et 5,6 % ext, où % ext désigne le pourcentage de bitume dans le mélange bitume + granulats).

Compte tenu du faible nombre de références bibliographiques traitant des enrobés à la mousse de bitume, les essais préliminaires ont été réalisés avec différentes teneurs en eau des granulats (1, 3, 5, et 7 %) à des températures de 20°C , 70°C , et 90°C . Bien que ces matériaux aient subi des essais d'aptitude au compactage, c'est la qualité d'enrobage (**figures 4 et 5**) qui a été principalement utilisée pour déterminer la teneur en eau optimale du mélange ; cette teneur est de 5 %. Par la suite, d'autres fabrications ont été réalisées avec cette teneur en eau, sur lesquelles ont été déterminées les caractéristiques mécaniques des enrobés obtenus.

figure 3

- a : Malaxeur SAE.
- b : Injection de la mousse dans le malaxeur.

a
b



figure 4

Mélange bitumineux à la mousse au cours du malaxage.



Aptitude au compactage

Afin de caractériser les propriétés mécaniques des enrobés à la mousse de bitume, différents essais ont été réalisés. Pour toutes les modalités étudiées, des essais avec la presse à cisaillement giratoire (PCG) ont été effectués selon la norme EN 12697-31 (trois éprouvettes, 200 girations, angle de 1° et fourreau chauffant réglé à la température de fabrication). Lors des essais PCG, un dispositif d'aspiration placé sous le fourreau chauffant a permis de récupérer l'eau dans une éprouvette graduée. La quantité d'eau évacuée du mélange lors du compactage en fonction du nombre de girations a été également mesurée.

figure 5

Influence de la teneur en eau initiale du produit bitumineux sur son aspect visuel.

a : Mélange réalisé à 70 °C avec une teneur en eau de 0,84 %.

b : Mélange réalisé à 70 °C avec une teneur en eau de 7 %.

a
b



› Essai de compression directe et de résistance à l'eau

Les formules optimisées ont été soumises à l'essai Duriez modifié (NF P 98 251-4). Pour cet essai, douze éprouvettes cylindriques sont compactées. Un premier lot a été conservé huit jours dans l'eau à 18 °C et le second lot dans une étuve à 18 °C et 50 % d'humidité. La résistance en compression des deux lots d'éprouvette (r : résistance en compression pour les éprouvettes dans l'eau ; R : résistance en compression pour les éprouvettes dans l'air) a été ensuite mesurée ; le rapport r/R calculé caractérise la tenue à l'eau du matériau.

› Caractérisation de la composition du mélange par la méthode de Rouen

Cet essai permet de contrôler la formule de l'enrobé et sa teneur en liant et s'effectue selon le principe de la norme européenne NF EN 12697-1. Pour cet essai, une masse connue d'enrobé est mélangée à une quantité connue de tétrachloroéthylène puis agitée jusqu'à ce que le bitume soit totalement dissous. Une petite quantité de solvant est ensuite placée dans une centrifugeuse pour séparer les fines. La teneur en liant de l'enrobé est calculée par pesée après évaporation du solvant. Les granulats sont nettoyés au solvant, passés dans une colonne de tamis, ce qui permet de déterminer la courbe granulométrique de l'enrobé et de contrôler sa conformité à la courbe granulométrique théorique.

› Module complexe

Les matériaux hydrocarbonés sont viscoélastiques et thermo-susceptibles. Leur comportement varie en fonction de la fréquence de sollicitation et de la température. Contrairement aux matériaux élastiques caractérisés par leur module d'Young (nombre réel), les matériaux bitumineux nécessitent un nombre complexe E^* caractéristique pour une température et une fréquence données (15 °C et 10 Hz d'après la méthode de dimensionnement des chaussées [9]). Les mesures du module

complexe ont été réalisées sur des barreaux rectangulaires de $50 \times 50 \times 125$ mm (figure 6), sur le principe de la norme NF EN 12697-26, mais avec des dimensions plus importantes pour éviter les pertes de matériaux en périphérie des éprouvettes. Les éprouvettes ont été découpées après une semaine, puis testées deux semaines plus tard.

figure 6
Éprouvette utilisée
pour l'essai de module
complexe.



RÉSULTATS DES ESSAIS EN LABORATOIRE

■ Qualité d'enrobage

Il apparaît visuellement que l'enrobage des granulats du mélange foisonné n'est pas complet et semble dépendre des paramètres de fabrication et particulièrement de la teneur en eau. Par exemple, la présence de granulats non enrobés et de larges boulettes de mastic (mélange de fines et de bitume) a été observée pour des teneurs en eau inférieures à 3,5 %. Au contraire, pour une teneur en eau plus importante (plus de 4,5 %), les particules de mastic sont très petites et bien dispersées.

Ce phénomène s'explique par le rôle de l'eau dans un mélange granulaire traité à la mousse de bitume. Du fait du caractère hydrophobe du bitume, la présence d'eau agit comme lubrifiant dans le mélange, ce qui améliore la maniabilité des enrobés bitumineux et permet au bitume de ne pas coller aux granulats et donc de limiter le nombre de connections granulat-bitume. Cependant, les parties les plus fines des granulats, à cause de leur grande surface spécifique, mobilisent une part significative du bitume ce qui conduit à la formation de boules de mastic. Quand le nombre de connections entre le bitume et les plus gros granulats est faible, l'évolution de la cohésion est très lente pour un mélange entreposé dans des conditions hermétiques. De la même manière, les particules de mastic ne se collent pas les unes aux autres lors du malaxage, ce qui assure une dispersion homogène du mastic dans le matériau.

Finalement, l'accroissement de la température des granulats limite la chute de viscosité du bitume due à une importante diminution de température du mélange lorsque la mousse de bitume et les

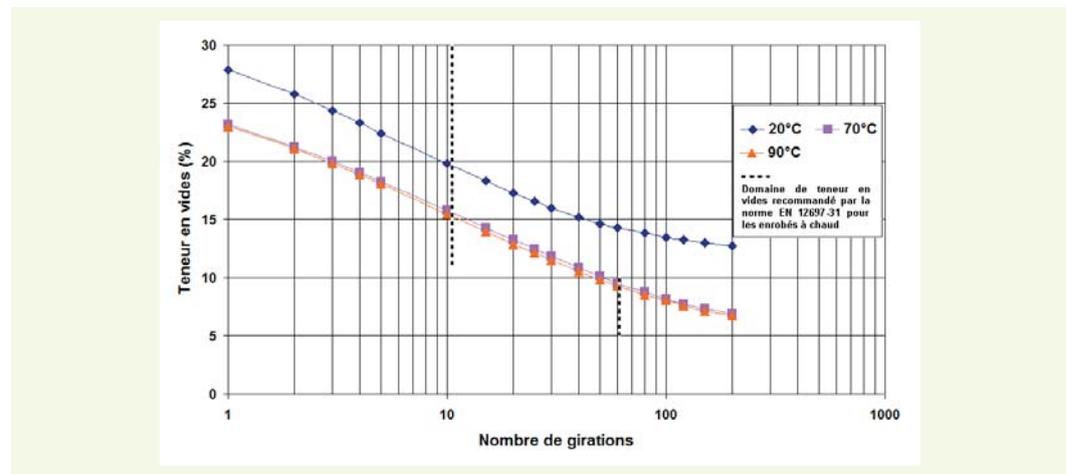
granulats sont mélangés. Ce phénomène a une conséquence sur l'enrobage des plus gros granulats par le bitume restant durant le processus de malaxage.

■ Maniabilité

Le matériau fabriqué présente une bonne aptitude au compactage lorsque la température des granulats est comprise entre 70 et 90 °C (**figure 7**). Les lignes verticales en pointillés sur la **figure 7** définissent les teneurs en vides recommandées à 10 et 60 girations pour un enrobé à chaud. Les meilleurs résultats sont obtenus avec une teneur en vides de 7 % à 200 girations pour une teneur en liant de 5,6 % ext. Les mélanges fabriqués à 20 °C sont trop « raides » pour être compactés avec le matériel de compactage classique utilisé dans l'industrie. En effet, à température ambiante, la forte viscosité du bitume nécessite une forte énergie de compactage. De même, pour une teneur en liant de 3,5 % ext, la maniabilité du matériau diminue : la teneur en vide est de 10 à 12 % à 200 girations car la faible épaisseur du film de bitume entre les granulats limite le réarrangement des granulats entre eux.

figure 7

Maniabilité à 20, 70 et 90 °C (température des granulats) pour le bitume naphthénique 35/50 (humidité initiale des granulats : 5 %, teneur en liant : 5,6 % ext).



En revanche, il est difficile de corréliser la compacité finale et la quantité d'eau évacuée du mélange lors du compactage, pour une teneur initiale en eau équivalente. Il est possible que certains résultats soient altérés par l'engorgement du système de récupération de l'eau dû à la présence de fines dans le mélange.

■ Essai de compression directe et de résistance à l'eau

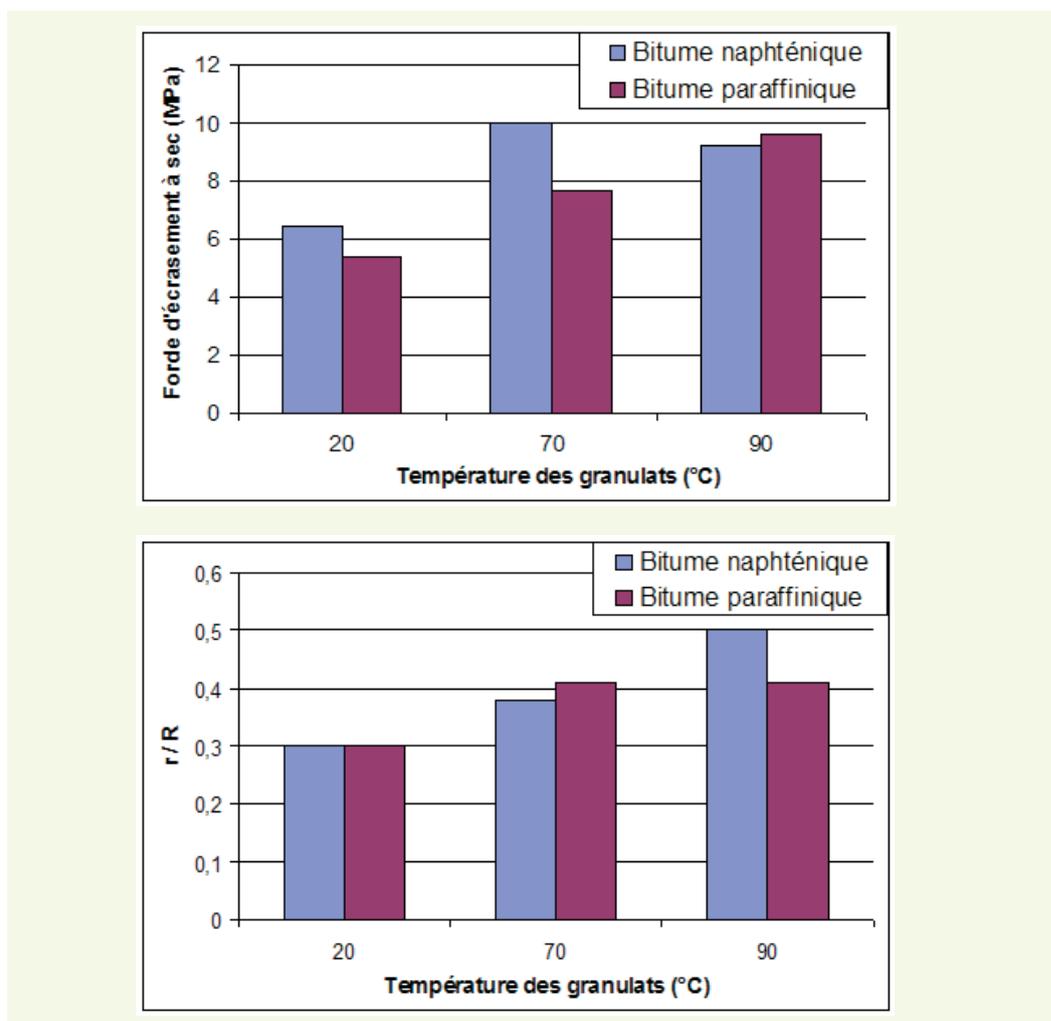
Les meilleurs résultats ont été obtenus à partir des mêmes paramètres de fabrication (90 °C et humidité initiale de 5 %). Dans ces conditions, les valeurs moyennes de R et r/R sont respectivement égales à 9 MPa et 0,50 (**figure 8**). L'augmentation de la température des granulats facilite le compactage des éprouvettes. Ces matériaux compactés présentent une surface plus fermée, plus résistante à l'eau. Toutefois, les performances des enrobés traités à la mousse de bitume sont inférieures à celles des enrobés à chaud. Pour un BBSG 0/10, la valeur r/R obtenue doit être supérieure à 0,75 (norme NF EN 12697-12). Dans le cas d'un enrobé à froid à l'émulsion de bitume, avec un mode de conservation utilisé différent (plusieurs jours de maturation selon la norme NF P98-251-4), la valeur de r/R doit être supérieure à 0,55. Au regard des spécifications pour les enrobés à chaud, les valeurs de r/R sont faibles alors que les résultats des essais Duriez obtenus pour le mélange traité à la mousse de bitume sont équivalents à ceux des mélanges à froid. Une teneur en eau de 5 % permet d'optimiser le mélange et d'aboutir à un compromis satisfaisant, tant du point de vue de la qualité d'enrobage, de la maniabilité que des performances mécaniques.

figure 8

Effet de la température des granulats pour les deux bitumes étudiés.

a : Évolution de la résistance à l'écrasement à sec.

b : Évolution du rapport « Duriez » r/R..



a
b

Deux autres matériaux ont été fabriqués avec des granulats à 20 °C et 90 °C et une teneur en liant (bitume d'origine naphaténiq) de 4,33 % ext. L'ensemble des résultats des essais Duriez ont été reportés dans le **tableau 1**.

tableau 1

Résultats des essais « Duriez » pour l'enrobé semi-tiède incorporant des granulats contenant 5 % d'eau.

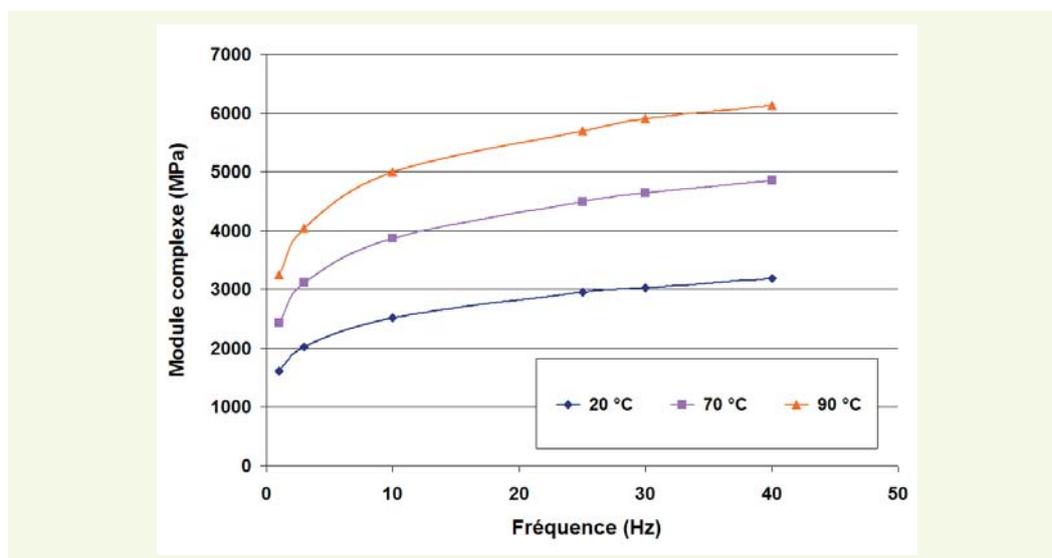
Température des granulats (°C)	Origine du bitume	Teneur en liant (% ext)	R (MPa)	r (MPa)	r/R	Masse volumique (g / cm ³)
20 °C	naphaténiq	4,35	5,75	1,67	0,29	2,39
90 °C	naphaténiq	4,31	9,35	3,44	0,37	2,38
20 °C	naphaténiq	5,76	6,45	1,95	0,30	2,40
70 °C	naphaténiq	5,36	9,97	3,75	0,38	2,48
90 °C	naphaténiq	Valeur non disponible	9,24	4,62	0,50	2,49
20 °C	paraffiniq	5,67	5,36	1,63	0,30	2,38
70 °C	paraffiniq	5,54	7,66	3,08	0,41	2,47
90 °C	paraffiniq	5,41	9,58	3,92	0,41	2,47

■ Résultats des mesures de module complexe

La **figure 9** présente l'évolution du module complexe de l'enrobé en fonction de la fréquence de sollicitation pour différentes températures de granulats. Les essais de module complexe ont été réalisés à 15 °C sur les formules optimisées (teneur en liant de 5,6 % ext avec un bitume naphaténiq ; **tableau 2**).

figure 9

Évolution du module complexe en fonction de la fréquence de sollicitation à 15 °C, pour différentes températures de granulats (teneur en liant 5,6 % ext).



Les résultats montrent que l'augmentation de la température de mélange permet d'obtenir un module complexe plus élevé. Il a été vu précédemment que le compactage s'améliorait avec la température, conduisant ainsi à un accroissement de la cohésion. De plus, la teneur en eau résiduelle est plus faible, ce qui améliore encore les performances mécaniques de l'enrobé.

En conclusion, les effets de la température des granulats et de la teneur en eau mis en évidence au travers de l'essai de module complexe sont cohérents avec les résultats obtenus à partir des essais PCG et de Duriez (tableau 1). Les valeurs de module complexe mesurées pour les échantillons traités à la mousse de bitume restent néanmoins légèrement inférieures à celles d'un enrobé à chaud (le module complexe d'un BBSG 0/10 de classe 1 doit être supérieur à 5 400 MPa à 15 °C - 10 Hz, selon la norme NF EN 13108-1).

tableau 2

Principales caractéristiques des mélanges semi-tièdes et à chaud réalisés avec un bitume naphénique de classe 50/70.

	Enrobé à chaud de référence	Enrobé tiède avec des granulats à 20 °C	Enrobé tiède avec des granulats à 70 °C	Enrobé tiède avec des granulats à 90 °C
Température du mélange après malaxage (°C)	160	28	47	70
Teneur en eau résiduelle (%)	0	4,48	4,31	4,17
Teneur en vide après 60 girations à la PCG (%)	9,3	14	10,9	9
« Duriez » R (MPa)	11,7	5,36	7,66	9,58
« Duriez » r (MPa)	11,6	1,63	3,08	3,82
« Duriez » r/R	0,98	0,3	0,41	0,41
Module complexe à 15 °C-10 Hz (MPa)	> 5 400 (référence)	2 520	3 875	5 000

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette étude a mis en évidence le net avantage de l'augmentation de la température des granulats pour l'élaboration de matériaux performants traités à la mousse de bitume : amélioration de la qualité de l'enrobage, meilleur compactage, augmentation du rapport Duriez. En conséquence, les performances mécaniques s'en trouvent améliorées.

La température des granulats, inférieure à 100 °C, ne change pas d'une manière significative l'humidité initiale des granulats. Cette teneur en eau initiale des granulats influe fortement sur la qualité de l'enrobage. Dans ce procédé, l'eau permet de disperser le bitume dans le mélange et d'obtenir un matériau homogène. En revanche, elle limite la cohésion du bitume sur les granulats. En effet, la forte présence d'eau résiduelle – de l'ordre de 4 % dans cette étude – conduit à des performances mécaniques du matériau qui restent inférieures à celles des enrobés à chaud, particulièrement pour l'essai Duriez et le module complexe. Pour tirer pleinement profit des économies d'énergie liées aux enrobés tièdes ou semi-tièdes, le procédé doit être amélioré pour atteindre les performances des enrobés à chaud. Toutefois, les performances mesurées sont intéressantes pour la fabrication des enrobés traités à la mousse.

Les propriétés mécaniques des enrobés obtenus à partir des bitumes paraffinique et naphthénique sont similaires, excepté pour la résistance à l'eau qui est plus élevée dans le cas du bitume naphthénique. Toutefois, la capacité à mousser de ces bitumes dépend de leur origine et de leur composition. Cette observation renforce les constats obtenus lors d'une précédente étude [7]. Cela indique que la caractérisation actuelle de la moussabilité est insuffisante pour déterminer précisément la capacité d'enrobage d'un bitume.

Le procédé étudié de traitement à la mousse de granulats semi-tièdes (< 100 °C) et humides permet d'accroître l'enrobage des granulats avec des performances comprises entre celles des enrobés à chaud et celles des enrobés à froid. Dans le cas d'un recyclage en place, les procédés utilisant soit des granulats froids traités à la mousse de bitume soit du bitume émulsifié sont compétitifs. De plus, en centrale d'enrobage, il est possible de réchauffer les granulats et ensuite d'obtenir de meilleures performances. Dans ce cas, les granulats enrobés à la mousse de bitume sont élaborés à plus basse température que les enrobés à chaud, permettant ainsi de réaliser une économie de combustible en centrale d'enrobage.

D'autres voies peuvent être étudiées pour réduire les températures de malaxage et atteindre les performances des enrobés à chaud, telles que le procédé de fabrication EBT® ou LEA® à 95 °C environ qui n'utilise pas de bitume moussé mais seulement du bitume chaud (avec des additifs) émulsionné durant le malaxage au contact des granulats semi-tièdes et partiellement secs [10].

REMERCIEMENTS

Les auteurs expriment leurs remerciements à l'ensemble des participants de cette étude et plus particulièrement à Alain Beghin (aujourd'hui à la direction technique du Groupe MALET), Stéphane Bouron, Olivier Burban, René Guilloux, Bernard Guieysse et Cédric Petiteau du LCPC.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 OLARD F., LE NOAN C., HUON P., Les enrobés à basse température : E.B.T.®. Une nouvelle génération d'enrobés dans la gamme des produits routiers Appia, *Revue Générale des Routes et des Aérodrômes*, **846**, 2006, pp. 85-91.
- 2 OLARD F., ANTOINE J.-P., HÉRITIER B., ROMIER A., MARTINEAU Y., LEA® (Low Energy Asphalt) : a New Generation of Half-Warm Asphalts, *International Conference on Advanced Characterisation of Pavement and Soil Engineering Materials*, Athens, 2007, pp. 1371-1381.
- 3 BONVALLET J., La mousse de bitume, une technique émergente, probablement incontournable, *Revue Générale de Routes et des Aérodrômes*, **789**, 2000, pp. 74-78.
- 4 BOSSÉ J., La grave mousse®, premier bilan d'un projet innovant, *Revue Générale des Routes et des Aérodrômes*, **713**, 1993, pp. 66-68.
- 5 BOSSÉ J., LE BOURLOT F., SOLIMAN S., Grave-mousse®, premier chantier, *Revue Générale des Routes et des Aérodrômes*, **702**, 1992, pp. 56-58.
- 6 JENKINS K.J., Characterisation of foamed bitumen, *7th Conference on Asphalt Pavement for South Africa*, Victoria Falls, 1999, pp. 1-18.
- 7 SUCH C., La moussabilité des bitumes, *Revue Générale des Routes et des Aérodrômes*, **812**, 2002, pp. 71-76.
- 8 CAZACLIU B., PETICILA M., GUIEYSSE B., *Fabrication des graves traitées à la mousse de bitume*, Rapport de recherche LCPC, 2001, 84 pages.
- 9 LCPC - SETRA, *French design manual for pavement structures*, 1997, 248 pages.
- 10 ROMIER A., AUDÉON M., DAVID J., MARTINEAU Y., OLARD F., Low-Energy Asphalt (LEA®) with the performance of hot-mix asphalt, *Transp. Res. Rec.*, n° 1962, 2006, pp. 101-112.

Quelques enseignements tirés de la conférence CONSEC'07 : Durabilité des structures en béton et robustesse vis-à-vis des actions accidentelles



Diaporama d'accueil CONSEC'07 - F. Toutlemonde

La présente synthèse a pour objectif de mettre en perspective les principaux apports des communications présentées à la 5^e conférence internationale « Concrete under Severe Conditions » (CONSEC'07), organisée par le LCPC avec l'appui de Ponts Formation Édition à Tours (France) du 4 au 6 juin 2007. Les conférences CONSEC ont pour thème les structures en béton soumises à des conditions sévères en termes d'environnement ou de chargement, ou à des combinaisons de charges et d'expositions extrêmes. Les conférences CONSEC précédentes ont eu lieu à l'initiative des Professeurs Koji Sakai, Odd E Gjorv et Nemkumar Banthia qui constituent le Directoire des conférences CONSEC, à Sapporo au Japon (1995), à Tromsø en Norvège (1998), à Vancouver au Canada (2001), puis à Séoul en Corée (2004) sous la présidence du Professeur Byung Hwan Oh. L'objectif de l'édition 2007, préparée par F. Toutlemonde, a été de présenter et publier l'état des recherches et avancées récentes sur ces sujets importants, et de poursuivre aussi largement que possible le transfert des connaissances et des avancées techniques dans le domaine du béton. Les contributions comprennent le suivi du comportement de structures existantes, les enseignements issus d'expérimentations représentatives en laboratoire, des études de cas permettant d'appliquer des modélisations avancées dans le domaine du béton et du couplage entre les mécanismes de dégradation de la durabilité et la résistance des structures, l'application des bétons à (ultra-) hautes performances dans des projets avec spécifications (ultra-)sévères d'environnement, de chargement ou de durée de vie, des innovations de conception et des propositions d'amélioration des codes et de la normalisation.