
Prédiction des propriétés viscoélastiques des enrobés bitumineux

Approches micromécaniques et expérimentales

Rabeb Cherif¹, Anissa Eddhahak², Thomas Gabet³,
Ferhat Hammoum³, Jamel Neji¹

1. Laboratoire de matériaux, d'optimisation et d'énergie pour la durabilité, École nationale d'ingénieurs de Tunis, BP 37, Le Belvédère, 1002, Tunis, Tunisie
rabebcherif90@gmail.com, jamel.neji@enit.rnu.tn
2. PIMM, CNRS UMR 8006, arts et métiers ParisTech, 151, boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris, France
anissa.eddhahak@ensam.eu
3. IFSTTAR, MAST, MIT, route de Bouaye CS4, 44344 Bouguenais cedex, France
thomas.gabet@ifsttar.fr, ferhat.hammoum@ifsttar.fr

RÉSUMÉ. Les enrobés bitumineux sont des mélanges de granulats et de bitume utilisés dans la construction de la majorité des réseaux routiers. Afin de préserver et garantir la durabilité des infrastructures routières, l'évaluation de la qualité et des performances de ces matériaux est indispensable. À ce titre, plusieurs recherches se sont focalisées sur le développement des modèles prédictifs, souvent empiriques, permettant de déduire les propriétés viscoélastiques d'un enrobé à partir de la connaissance des propriétés de ses constituants (bitume et/ou granulat). Dans ce contexte, nous proposons un modèle d'homogénéisation basé sur le schéma auto-cohérent généralisé (ACG) pour prédire le module complexe d'un enrobé à partir des propriétés de ses composants. Dans le but de valider le modèle proposé, plusieurs types d'enrobés (chauds et tièdes) fabriqués au laboratoire ont été testés, permettant ainsi la confrontation Expérience/Modélisation. Les résultats ont montré que l'on pouvait modéliser plusieurs types d'enrobés pour des températures inférieures à 20 °C. Cependant, au-delà de cette température, la précision du modèle diminue. Par ailleurs, la comparaison du modèle micromécanique aux autres modèles rhéologiques de la littérature a montré que le modèle proposé peut être tout aussi pertinent en termes de prédictions que les modèles rhéologiques considérés.

ABSTRACT. The asphalt mixtures are composed of aggregates and asphalt used in the construction of the majority of roads. In order to ensure the sustainability of the infrastructures, the evaluation of the quality and the performances of these materials are essential. In this context, several researches have been focused on the development of predictive models, often empirical ones, in order to deduce the viscoelastic properties of an asphalt mixture based on the properties of its constituents (binder and/or aggregate). In this context, we suggest a homogenization model based on the generalized self-consistent scheme (GSC) to predict the complex module of the asphalt concrete from the properties of its components. In the aim of the approach validation, different types of mixtures (hot and warm) made in the laboratory were tested. The results showed

that one can predict the complex modulus of the different types of asphalt concretes for temperatures less than 20 °C. However, beyond this temperature, the precision of the model decreases. Besides, the comparison of the micromechanical model with the rheologic models in literature showed that the suggested model can be also relevant in terms of predictions as the considered models.

MOTS CLÉS : enrobé bitumineux, viscoélastique, homogénéisation, ACG, module complexe.

KEYWORDS: asphalt mixture, viscoelastic, homogenization, GSC, complex module.

DOI: 10.3166/rcma.2017.00012 © 2017 Lavoisier

Extended abstract

The evaluation of the quality and the performances of the asphalt mixtures are essential in order to ensure the sustainability of the infrastructures. In fact, the complex modulus test is one of the fundamental properties to check the viscoelastic performance of the asphalt mixtures. However, the laboratory measurement of complex modulus is a much time-consuming task, which requires carrying experiments at many scenarios of temperatures and frequencies solicitation, and trained staff to operate it, as well.

In this context, many researchers have been oriented to the determination of the viscoelastic properties, and notably the complex modulus, of asphalt mixture by using predictive approaches, empirical (Pouget *et al.*, 2012, 2010; Bari et Witczak, 2006; Al-Khateeb *et al.*, 2006; Christensen *et al.*, 2003; Andrei *et al.*, 1999) or micromechanical ones (Eddhahak-Ouni *et al.*, 2015; Vu, 2014; Yin *et al.*, 2008).

This paper presents the results of a homogenization model developed by the authors in a previous work (Eddhahak-Ouni *et al.*, 2015) and a comparison with the experimental data. This model is based on the generalized self-consistent scheme (GSC) to predict the complex module of the asphalt concrete based on the properties of its components: binder, aggregate, filler, air void. In the aim of the approach validation, six types of mixtures were tested, four hot-mix asphalt (HMA1, HMA2, HMA3 and HMA4) and two warm-mix asphalt (WMA1 and WMA2). The results showed that one can predict the complex modulus of the different types of asphalt concretes for temperatures less than 20 °C. However, beyond this temperature, the precision of the model decreases.

In the aim of improving the results at high temperatures, the proposed model was compared with three rheological models of the literature; 2S2P1D (Pouget *et al.*, 2012, 2010), Hirsh (Christensen *et al.*, 2003) et Al-Khateeb (Al-Khateeb *et al.*, 2006). Besides, the comparison of the micromechanical model with the rheological models in literature showed that the suggested model can be also relevant in terms of predictions as the considered models.

1. Introduction

Un enrobé est un mélange de granulats et de bitume qui constitue le plus souvent les couches supérieures d'une chaussée. La majorité des routes en Tunisie sont revêtues

d'enrobés bitumineux. En outre, ce matériau a des propriétés assez complexes du fait du comportement viscoélastique du bitume qui le constitue. Pour garantir la durabilité des infrastructures, les performances des enrobés doivent être évaluées, ce qui nécessite un grand nombre d'essais expérimentaux. En particulier, la mesure du module complexe au laboratoire est coûteuse et peut durer plusieurs jours.

Dans ce contexte, plusieurs recherches se sont focalisées sur le développement des modèles plus rationnels permettant de prédire le module complexe d'un enrobé à partir des propriétés de ses constituants.

Certains modèles sont disponibles dans la littérature, parmi lesquels sont ceux empiriques ou rhéologiques (Pouget *et al.*, 2012, 2010 ; Bari et Witczak, 2006 ; Al-Khateeb *et al.*, 2006 ; Christensen *et al.*, 2003 ; Andrei *et al.*, 1999) et d'autres basés sur des approches micromécaniques d'homogénéisation (Eddhahak-Ouni *et al.*, 2015 ; Vu, 2014 ; Yin *et al.*, 2008).

Ce travail propose un modèle micromécanique basé sur le schéma auto-cohérent généralisé (ACG) permettant de prédire le module complexe du béton bitumineux. Dans le but de valider ce modèle, différents types d'enrobés ont été testés et les modules complexes expérimentaux ont été comparés avec ceux obtenus numériquement. Le modèle proposé a été comparé à d'autres modèles empiriques connus de la littérature (Pouget *et al.*, 2012, 2010 ; Al-Khateeb *et al.*, 2006 ; Christensen *et al.*, 2003) et la comparaison a montré qu'il est aussi pertinent en termes de prédiction que les modèles rhéologiques considérés.

2. Présentation des modèles

Cette partie est consacrée à la présentation des modèles prédictifs, à savoir le modèle d'homogénéisation développé dans les travaux antérieurs des auteurs (Eddhahak-Ouni *et al.*, 2015) et les modèles rhéologiques qui seront considérés pour la comparaison. Ces modèles ont tous pour objectif de prédire le comportement d'un enrobé bitumineux à partir de la connaissance des propriétés de ses constituants. Le modèle micromécanique proposé se distingue par sa prise en compte de la microstructure induite par le processus de fabrication, en plus des propriétés des constituants, pour la prédiction des propriétés équivalentes du matériau hétérogène. À noter que l'effet « microstructure » ne fait pas l'objet de la présente étude.

2.1. Modèle micromécanique

L'enrobé bitumineux peut être modélisé comme étant un matériau multiphasique constitué d'une phase inclusionnaire que représentent les granulats, d'une phase matrice donnée par le mastic (mélange « bitume + fines ») et d'une phase poreuse qui représente le vide intergranulaire (figure 1). Dans cette étude, le schéma auto-cohérent généralisé (Hervé et Zaoui, 1993 ; Christensen et Lo, 1979) a été retenu pour décrire le comportement équivalent du matériau hétérogène.

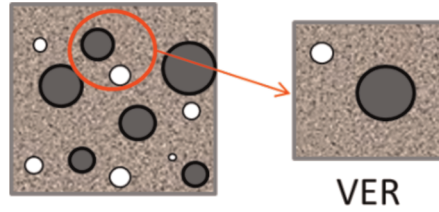


Figure 1. Modélisation schématique de l'enrobé bitumineux

Les phases sont caractérisées par leurs modules de cisaillement μ_i , leurs modules de compressibilités k_i et leurs fractions volumiques f_i dans le mélange.

L'homogénéisation du problème global noté « GP » peut être réalisée en considérant simultanément deux sous-problèmes notés « SP1 » et « SP2 » associés respectivement à l'inclusion rigide (les granulats) et les vides soumis à la même déformation E_0 à l'infini comme le montre la figure 2. Ainsi, toute la difficulté réside dans la résolution d'un problème de localisation global qui permet de trouver le tenseur reliant les propriétés macroscopiques de l'enrobé aux propriétés microscopiques.

Ainsi, le module complexe homogénéisé noté μ^{hom} peut être obtenu tel que :

$$\mu^{\text{hom}} = \langle \mu : A \rangle = \sum f_i \mu_i : \langle A_i \rangle, \quad (1)$$

où μ^{hom} est le tenseur de rigidité homogénéisé de 4^e ordre, A_i est le tenseur de localisation de déformations de 4^e ordre associé au sous problème P_i ($i = 1$ ou 2).

Dans le cas du problème général, le tenseur de localisation des déformations noté L relie la déformation microscopique ε et celles macroscopique E imposée à l'infini :

$$\varepsilon_i(x) = \langle L_i(x) \rangle : E. \quad (2)$$

Le tenseur de localisation des déformations du problème global est lié au problème secondaire par la relation suivante :

$$\langle L_i(x) \rangle = \langle A_i \rangle : \left(\sum f_i \langle A_i \rangle \right)^{-1}. \quad (3)$$

Dans le cas linéaire et isotrope, le tenseur de rigidité est donné par :

$$C = 3k I^{\text{sph}} + 2\mu I^{\text{dev}}, \quad (4)$$

où I^{sph} et I^{dev} sont respectivement les opérateurs sphériques et déviatoriques.

Une fois les tenseurs de localisation des problèmes auxiliaires déterminés, on peut déduire le tenseur de localisation du problème global. Enfin, nous obtenons par la suite

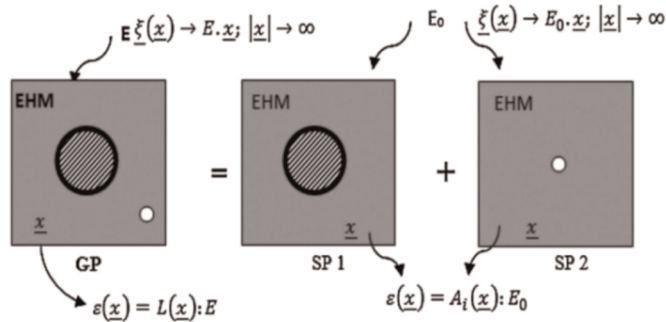


Figure 2. Schéma du problème global d'homogénéisation « GP » (Eddhahak-Ouni et al., 2015)

les modules de compressibilité et de cisaillement homogénéisés :

$$\begin{cases} K^{hom} = (f_a k_a A_a^{sph} + f_m k_m A_m^{sph} + f_p k_p A_p^{sph}) : (f_a A_a^{sph} + f_m A_m^{sph} + f_p A_p^{sph})^{-1} \\ \mu^{hom} = (f_a \mu_a A_a^{dev} + f_m \mu_m A_m^{dev} + f_p \mu_p A_p^{dev}) : (f_a A_a^{dev} + f_m A_m^{dev} + f_p A_p^{dev})^{-1} \end{cases} \quad (5)$$

Par la suite, et en supposant que le comportement est linéaire et isotrope, on peut déduire la norme du module complexe :

$$E^{hom} = \frac{9 k^{hom} \mu^{hom}}{3 k^{hom} + \mu^{hom}} \quad (6)$$

La figure 3 présente un digramme simplifié du modèle micro-macro résumant les différentes données du problème en passant par le schéma auto-cohérent généralisé afin d'obtenir le module complexe équivalent de l'enrobé bitumineux.

Dans la suite, on présentera trois modèles rhéologiques qui seront considérés pour l'évaluation de la pertinence du modèle d'homogénéisation présenté.

2.2. Modèle de Hirsch

Le modèle de Hirsch est basé sur la loi de mélanges des matériaux composites (Christensen *et al.*, 2003). Cette loi de mélange a été développée par Hirsch vers les années 1960. La disposition des différentes phases du matériau est considérée selon des schémas en parallèle ou en série.

Ce modèle permet ainsi la prédiction du module d'un matériau composite par une loi en série ou en parallèle, selon l'équation suivante :

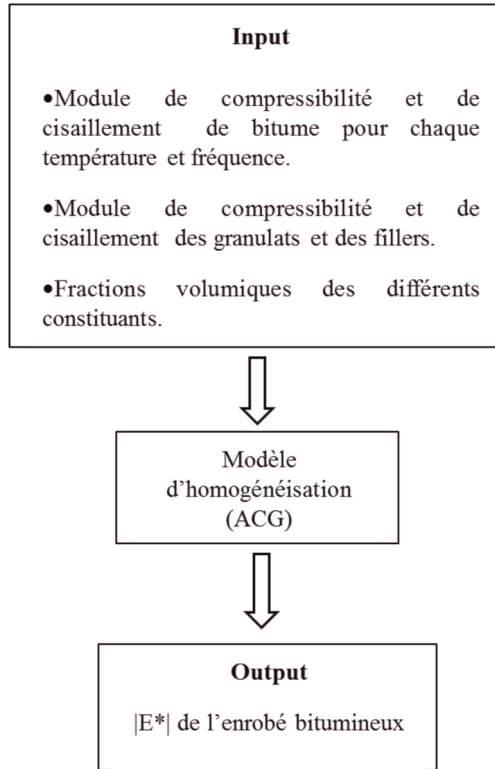


Figure 3. Étapes du modèle micromécanique proposé

$$|E^*|_m = P_c \left[4\,200\,000 \left(1 - \frac{VMA}{100} \right) + 3|G^*|_b \left(\frac{VFA * VMA}{10\,000} \right) \right] + \frac{(1 - P_c)}{\frac{(1 - \frac{VMA}{100})}{4\,200\,000} + \left(\frac{VMA}{3|G^*|_b VFA} \right)}, \quad (7)$$

avec :

$$P_c = \frac{\left[20 + \frac{33|G^*|_b VFA}{VMA} \right]^{0,58}}{650 + \left(\frac{3|G^*|_b VFA}{VMA} \right)}, \quad (8)$$

$$VMA = \frac{100 - MVA_b x (100 - T_b)}{MVA_g}, \quad (9)$$

$$VFA = \frac{VMA - V}{VMA} \times 100, \quad (10)$$

où :

- $|E^*|_m$: le module complexe de l'enrobé ;
- $|G^*|_b$: le module de cisaillement de bitume ;
- MVA_b : la masse volumique apparente de bitume ;
- MVA_g : la masse volumique apparente des granulats ;
- V : pourcentage de vide ;
- T_b : teneur en bitume.

2.3. Modèle d'Al-Khateeb

Le modèle d'Al-Khateeb est un modèle basé sur le modèle de Hirsch. Il permet de prédire la norme de module complexe de l'enrobé selon la relation suivante (Al-Khateeb *et al.*, 2006) :

$$|E^*|_m = 3 \left[\frac{100 - VMA}{100} \right] \left[\frac{90 + 10\,000 * \left(\frac{|G^*|_b}{VMA} \right)^{0,66}}{1\,100 + \left(900 * \frac{|G^*|_b}{VMA} \right)^{0,66}} \right] |G^*|_g, \quad (11)$$

où :

- $|E^*|_m$: le module complexe de l'enrobé ;
- $|G^*|_b$: le module de cisaillement de bitume ;
- $|G^*|_g$: le module de cisaillement de bitume à l'infini.

2.4. Modèle 2S2PID

Ce modèle a été développé par Di Benedetto *et al.* selon l'équation (12) :

$$E^*(\omega, T) = E_{0, \text{mix}} + [E^*(10^\alpha \omega, T) - E_{0, \text{binder}}] \times \left[\frac{E_{00, \text{mix}} - E_{0, \text{mix}}}{E_{00, \text{binder}} - E_{0, \text{binder}}} \right], \quad (12)$$

où :

- E^*_{mix} : le module complexe de l'enrobé ;
- E^*_{binder} : le module complexe de bitume ;
- $E^*_{0, \text{mix}}$: valeurs asymptotiques minimales du module complexe de l'enrobé ;
- $E^*_{0, \text{binder}}$: valeurs asymptotiques minimales du module complexe bitume ;
- $E^*_{00\text{mix}}$: valeurs asymptotiques maximales du module complexe de l'enrobé ;
- $E^*_{00, \text{binder}}$: valeurs asymptotiques maximales du module complexe du bitume.

Le paramètre supplémentaire α dépend de la formulation d'enrobé et du vieillissement durant l'enrobage (Pouget *et al.*, 2012, 2010).

$$\tau_{0, \text{mix}} = 10^\alpha \tau_{0, \text{binder}}. \quad (13)$$

3. Matériaux testés

Afin de valider le modèle micromécanique, différents types d'enrobés ont été fabriqués et testés au laboratoire permettant ainsi la confrontation Expérience/Modélisation.

Six types d'enrobés ont été testés, quatre fabriqués avec une technique de malaxage à chaud (HMA1, HMA2, HMA3 et HMA4) et deux fabriqués avec une technique tiède (WMA1 et WMA2) définis ainsi :

- HMA1 : enrobé français ; BBSG 0/10, contenant 50 % de fraisâts (Lopes *et al.*, 2014) ;
- HMA2 : enrobé français ; BBSG 0/10 (Lopes *et al.*, 2014) ;
- HMA3 : enrobé français ; BBSG 0/14, contenant 15 % de fraisâts ;
- HMA4 : enrobé français ; BBSG 0/14 (Alam, 2015) ;
- WMA1 : enrobé français ; BBSG 0/10, contenant 50 % de fraisâts (Lopes *et al.*, 2014) ;
- WMA2 : enrobé français ; BBSG 0/10 (Lopes *et al.*, 2014).

Les essais expérimentaux ont été réalisés à l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR-Nantes) dans le cadre des travaux de recherche (Lopes *et al.*, 2014 ; Alam, 2015).

4. Résultats et discussion

La figure 4 présente la comparaison entre le module complexe expérimental et celui obtenu par le modèle d'homogénéisation proposé dans le cas des six enrobés testés au laboratoire. Les résultats montrent que le modèle donne une bonne prédiction du module complexe pour les différents types d'enrobés étudiés.

La comparaison des courbes maîtresses expérimentales et numériques présentées sur la figure 5 montre que le modèle d'homogénéisation donne des résultats très proches des résultats expérimentaux.

Sur la figure 6, nous comparons les modules complexes numériques avec les modules expérimentaux dans le cas de l'enrobé HMA3. On peut constater d'après les courbes présentées que les résultats sont en bonne concordance pour les températures inférieures à 20 °C pour toute la gamme de fréquences allant de 1 Hz à 40 Hz. Cependant, à partir de 20 °C la précision du modèle diminue.

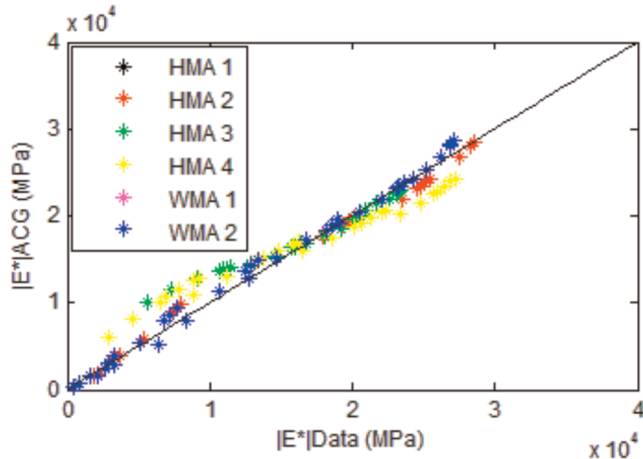


Figure 4. Module complexe $|E^*|$ donné par l'expérience et le modèle micro-macro à $T = 15^\circ\text{C}$

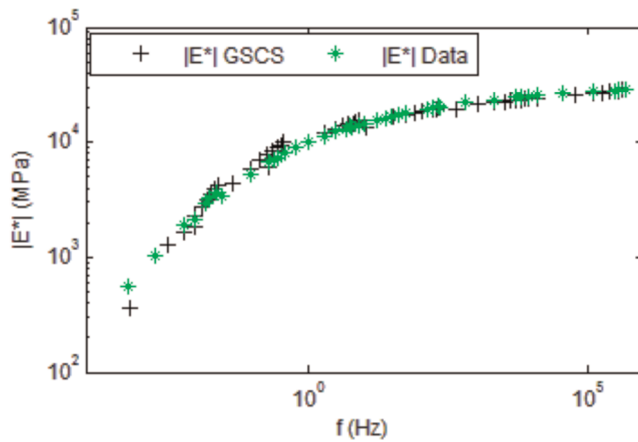


Figure 5. Courbes maîtresses expérimentale et numérique de l'enrobé HMA1 à $T = 15^\circ\text{C}$

La figure 7 illustre les résultats de comparaison des courbes maîtresses expérimentales avec les courbes maîtresses obtenues numériquement. On remarque que tous les modèles présentent des tendances similaires avec des approximations plutôt satisfaisantes dans l'ensemble. Par ailleurs, le modèle d'homogénéisation semble aussi pertinent en termes de prédiction que les modèles rhéologiques considérés.

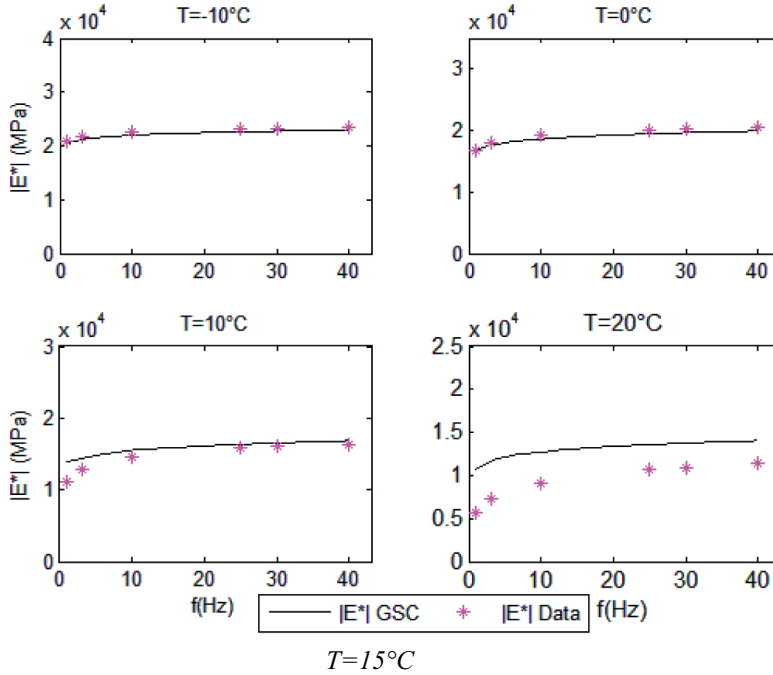


Figure 6. Comparaison du module complexe expérimental et numérique à différentes températures (cas HMA3)

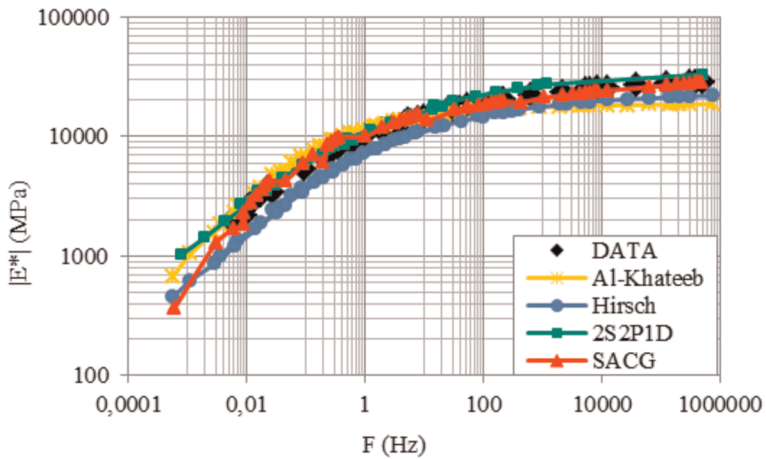


Figure 7. Courbes maîtresses issues de l'expérience et des modèles prédictifs

5. Conclusion

Dans cette étude, un modèle d'homogénéisation basé sur le schéma auto-cohérent généralisé a été proposé et testé sur différents types d'enrobés, afin de prédire le comportement effectif de l'enrobé à partir des propriétés de ses constituants. Le modèle proposé a été comparé à d'autres modèles rhéologiques de la littérature dans le but d'améliorer les résultats à hautes températures. Par ailleurs, la comparaison du modèle micromécanique avec des modèles rhéologiques prédictifs très connus a montré que le modèle proposé est très satisfaisant pour la prédiction du module complexe des enrobés bitumineux chauds et tièdes, et ce pour des températures inférieures à 20 °C. Des améliorations du modèle s'avèrent néanmoins nécessaires afin d'avoir de meilleures estimations du module équivalent à plus hautes températures.

Bibliographie

- Alam S.Y. (2015). *Détermination des propriétés mécaniques d'enrobés bitumineux à partir des caractéristiques des constituants*. Rapport de recherche, laboratoire central des Ponts et Chaussées, université de Marne la Vallée.
- Al-Khateeb G., Shenoy A., Gibson N., Harman T. (2006). A new simplistic model for dynamic modulus predictions of asphalt paving mixtures. *J. Assoc. Asph. Paving Technol.*, vol. 75, p. 1254-1293.
- Andrei D., Witzak M.W., Mirza M.W. (1999). *Development of a revised predictive model for the dynamic (complex) modulus of asphalt mixtures*. NCHRP 1-37A Interim Team Report University of Maryland.
- Bari J., Witzak M.W. (2006). Development of a new revised version of the Witzak E* predictive model for hot mix asphalt mixtures. *J. Assoc. Asph. Paving Technol.*, vol. 75, p. 381-423.
- Christensen R.M., Lo K.H. (1979). Solutions for effective shear properties in three phase sphere and cylinder models. *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 27, p. 315-330.
- Christensen D.W., Pellinen T., Bonaquist R.F. (2003). Hirsch model for estimating the modulus of asphalt concrete. *J. Assoc. Asph. Paving Technol.*, vol. 72, p. 97-121.
- Eddhahak-Ouni A., Vandamme M., Vu V.T. (2015). Micromechanical contribution for the prediction of the viscoelastic properties of high rate recycled asphalt and influence of the level blending. *Arch. Civil Mech. Eng.*, vol. 312.
- Hervé E., Zaoui A. (1993). N-Layered inclusion based micromechanical modeling. *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 31, p. 1-10.
- Lopes M., Gabet T., Bernucci L., Mouillet V., Brosseaud Y. (2014). Coupling WMA technique to a high rate of RAP, in laboratory. *Mater. Struct.*, doi: 10.1617/s11527-014- 0454-9.
- Pouget S., Sauzéat C., Di Benedetto H., Olard F. (2010). From the behavior of constituent materials to the calculation and design of orthotropic bridge structures. *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 11, n° 1, p. 111-144. doi: 10.1080/14680629.2010.9690329.

- Pouget S., Sauzéat C., Di Benedetto H., Olard F. (2012). Modeling of viscous bituminous wearing course materials on orthotropic steel deck. *Mater. Struct.*, vol. 45, p. 1115-1127, doi: 10.1617/s11527-011-9820-z.
- Vu V.T. (2014). *Modélisation multi-échelle du comportement viscoélastique de l'enrobé bitumineux à fort recyclage : approche numérique*. Rapport de recherche ESTP.
- Yin H.M., Buttlar W.G., Paulino G.H., Di Benedetto H. (2008). Assessment of existing micro-mechanical models for asphalt mastics considering viscoelastic effects. *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 9, n° 1, p. 31-57.