

Caractérisation expérimentale et modélisation multi-échelle des propriétés viscoélastiques linéaires des bétons bitumineux vieillis

Akoûté Bernus Kouevidjin¹, Saännibè Ciryle Somé¹, Jean-François Barthélémy¹, Virginie Mouillet², Jean-Christophe Molinengo², Ferhat Hammoum³

¹ Cerema, Univ Gustave Eiffel, UMR MCD, F-77171 Sourdun, France

² Cerema, Univ Gustave Eiffel, UMR MCD, F-13100 Aix-en-Provence, France

³ Université Gustave Eiffel, Laboratoire MIT, Route de Bouaye - CS 5004 - 44344 Bouguenais

Corresponding author : C. Somé (e-mail : ciryle.some@cerema.fr)

ABSTRACT

La procédure de vieillissement RILEM, permettant de simuler en laboratoire et en peu de temps le vieillissement qui se produit habituellement entre 5 et 10 ans dans les revêtements bitumineux in-situ, est utilisée pour préparer des échantillons d'enrobés bitumineux (EB) vieillis. Quatre durées de vieillissement accéléré (0, 3, 6 et 9 jours) sont considérées pour simuler le vieillissement à long terme (VLT). Les bitumes des EB vieillis sont extraits, puis caractérisés. Leur module de cisaillement $|G^*|$ et leur angle de phase φ sont mesurés sur une plage de températures allant de -20°C à 80°C et sous différentes fréquences, puis calibrés avec le modèle de 2S2P1D. Les paramètres de ce dernier sont utilisés comme données d'entrée dans un modèle multi-échelle. Ce modèle repose sur trois échelles : l'échelle du mastic (bitume + charges inférieures à $63\ \mu\text{m}$), l'échelle du mortier (mastic + sable inférieur à $1\ \text{mm}$) et l'échelle EB (mortier + gros granulats de 1 à $10\ \text{mm}$ enrobés de mastic bitumineux mince). Sa mise en œuvre combine le schéma de Mori-Tanaka (adapté à un milieu matriciel/inclusif) à l'échelle du mastic et du mortier et le schéma auto-cohérent (adapté à un milieu désordonné) à l'échelle de l'EB avec un contact possible entre les granulats grossiers nécessaire pour bien prédire les modules de l'EB à haute température et basse fréquence. Sur la base des propriétés rhéologiques du bitume et des granulats et des fractions volumiques des matériaux constitutifs, le modèle multi-échelle permet de prédire les modules de rigidité ($|E^*|$) et l'angle de phase de l'EB à chaque niveau de vieillissement. Les prédictions du modèle multi-échelle concordent avec les mesures sur une large gamme de températures et de fréquences.

Keywords

Mélange bitumineux, Vieillissement thermo-oxydatif, Module de rigidité complexe, Modélisation multi-échelle

I. INTRODUCTION

La mise au point de modèles permettant de prédire les propriétés viscoélastiques des bétons bitumineux permettant de réduire le nombre d'essais à réaliser constitue un enjeu pour le formulateur d'enrobé. Depuis quelques années plusieurs modèles de prédiction du module complexe des enrobés sont proposés (Shu & Huang 2008, Zhu et al. 2011, Pichler et al. 2012, Alam & Hammoum 2015, Cherif et al. 2021). (Zhu et al. 2011) ont proposé un modèle permettant de prédire le module élastique de enrobés bien que ceux-

ci ne puissent être considérés comme des matériaux élastiques) en considérant un collage imparfait entre les granulats et la couche de mastic bitumineux qui les entourent. Le collage imparfait de l'interface est modélisé par un ressort dont la raideur est un paramètre d'ajustement qui permet au modèle de coïncider avec les mesures expérimentales. (Pichler et al. 2012) ont utilisé le modèle auto-cohérent pour prédire la complaisance des enrobés tout en montrant que le modèle de Mori-Tanaka utilisé par d'autres auteurs n'est pas adapté aux enrobés. Quant à (Cherif et al. 2021), ils ont utilisé le modèle auto-cohérent pour prédire le module complexe des enrobés incorporant des agrégats d'enrobé. Cependant, dans la plupart de ces travaux, la comparaison entre le modèle et les données expérimentales se limite souvent à une plage étroite de températures et de fréquences. De plus, ces modèles ne prennent pas en compte le contact granulaire induit par le compactage. Récemment, un modèle de prédiction combinant un schéma Mori-Tanaka à l'échelle du mastic et du mortier et un schéma auto-cohérent généralisé à l'échelle de l'enrobé en prenant en compte le contact entre les granulats a été proposé (Somé et al. 2022) et testé sur des enrobés à chaud et tièdes à base de bitume 50/70. Ce modèle permet de prédire à la fois le module complexe $|E^*|$ et l'angle de phase ϕ contrairement aux travaux précédents. Cependant, sa fiabilité mérite d'être vérifiée en le confrontant à un grand nombre de données expérimentales. Dans cet article, nous nous proposons de tester la validité du modèle récemment développé non seulement sur des sables enrobés 0/2, et 0/4 mais aussi sur des enrobés de couche de surface de chaussées à base de bitume 35/50 ayant subis 4 et 8 heures de vieillissement à court terme. La méthode de vieillissement dite RILEM a été choisie pour simuler en laboratoire dans un délai raisonnable le vieillissement (à court et à long terme (0, 3, 6 et 9 jours)) qui se produit au fil des années sur une structure de chaussée réelle (de la Roche et al. 2009).

II. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

A. Matériaux

Les mélanges utilisés sont constitués d'un bitume de classe 35/50 (CEN EN 12591), dont les propriétés de pénétrabilité à l'aiguille (CEN EN 1426) et de température de ramollissement (CEN EN 1427) sont respectivement de $42 \times 0,1$ mm et $53, 2$ °C, et des granulats de porphyre qui proviennent de la carrière de Pont de Colonne (en France) pour lesquels les propriétés de résistance à l'usure et à la fragmentation respectivement appelées valeur Microdeval et valeur Los Angeles sont de 17 % et 8 %. Trois types de bétons bitumineux ont été retenus dans cette étude : un BBSG 0/10, utilisé pour les couches de roulement et de liaison et deux sables enrobés appelés mortiers E02 et E04. Les courbes granulométriques des mélanges sont représentées sur la figure 1.

B. Procédure de vieillissement du mélange bitumineux

Les enrobés sont fabriqués à 165 °C. Après le malaxage, le mélange foisonné est vieilli selon la procédure RILEM décrite dans Somé et al. (2022). L'enrobé bitumineux de référence est fabriqué puis compacté immédiatement sans vieillissement thermo-oxydatif autre que celui induit par la fabrication à 165 °C. Il est désigné par T0 (ou V0). Pour simuler le vieillissement selon la procédure RILEM, les enrobés fabriqués sont soumis à un vieillissement à court terme de 4 heures à 135 °C suivi d'un vieillissement à long terme de 3, 6 et 9 jours à 85 °C. Ces enrobés sont désignés par T3, T6, T9. Une procédure de vieillissement à court terme plus sévère de 8 heures à 135 °C a été appliqués aux enrobés désignés par V3, V6, V9 tout en conservant la même température et durées de vieillissement à long terme (3, 6 et 9 jours à 85 °C). Une petite quantité de mélanges foisonnés a été prélevée à la fin de la procédure de vieillissement sur les enrobés V0-V9 afin de

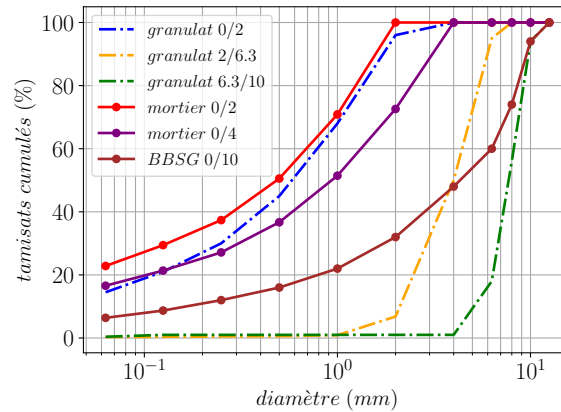


FIGURE 1. Courbe de recomposition granulométrique du squelette granulaire

recupérer le liant pour des caractérisations rhéologiques. Pour les mêmes raisons, des blocs d'enrobés ont également été récupérés après compactage sur les enrobés T0-T9. La procédure d'extraction est décrite dans Somé et al. (2022). Les bitumes vieillis récupérés dans les mélanges (T0 à T9, V0 à V9), désignés par B(T0) à B(T9), B(V0) à B(V9), sont testés avec un rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR). Il est à noter que les formules de référence T0 et V0 sont des BBSG 0/10 classiques (sans vieillissement). Le bitume B(T0) étant extrait des blocs de plaques compactées T0, tandis que B(V0) du mélange foisonné V0, nous conservons T0 et V0 dans cette étude pour des raisons de clarté. Des sables enrobés 0/2 et 0/4 ont été également fabriqués selon mêmes condition que les enrobés de référence T0 et V0 mais sans vieillissement.

III. Essais rhéologiques

A. Essai de module complexe par flexion deux points

À la fin du processus de vieillissement, les mélanges foisonnés sont immédiatement compactés selon la norme CEN EN 12697-33. Les plaques bitumineuses fabriquées sont ensuite sciées en éprouvettes prismatiques de dimensions $4 \times 4 \times 12$ cm (voir figure 2) et soumises à des mesures de module complexe conformément à la norme EN 12697-26 en faisant varier la température de -15 °C à 50 °C pour T0 à T9 et de -20 °C à 50 °C pour V0 à V9, et la fréquence de 3 Hz à 40 Hz. Les isothermes de $|E^*|$ et φ sont ensuite utilisées pour construire les courbes maîtresses.

B. Essai au rhéomètre à cisaillement dynamique

Le rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR) est utilisé pour caractériser le comportement viscoélastique des liants bitumineux récupérés, selon la norme CEN EN 14770. Après contrôle du respect du domaine linéaire de sollicitation, la réponse des échantillons soumis à une contrainte sinusoïdale est enregistrée suivant les conditions opératoires (températures, fréquences et contraintes imposées) indiquées dans le Tableau 1.

IV. Analyse des résultats expérimentaux



FIGURE 2. Aperçu des échantillons de mortiers et d'enrobés bitumineux

TABLEAU 1. Températures et fréquences d'essai

B(T0); B(T3); B(T6); B(T9)	Températures (°C)	10 - 80
	Fréquences (Hz)	0,681 - 21,54
B(V0); B(V3); B(V6); B(V9)	Températures (°C)	-20 - 80
	Fréquences (Hz)	0,01 - 10
B(T0)-B(T9); B(V0)-B(V9)	Contraintes (kPa)	13 (à 10 °C) - 0.5 (à 80 °C)

A. Construction des courbes maîtresses et calibration du modèle rhéologique

Les isothermes obtenus expérimentalement sont exploitées selon la procédure décrite dans Chailleux et al. (2006) pour obtenir les courbes maîtresses de module ($|E^*(\omega)|$) et d'angle de phase ($\varphi^*(\omega)$) à la température de référence $\theta_{ref} = 20^\circ\text{C}$. Ensuite, les modèles 2S2P (aussi connu sous le nom de modèle de Huet et Sayegh pour les enrobés) et 1S2P1D (utilisé ici pour les bitumes), qui sont des cas particuliers du modèle généralisé 2S2P1D proposé par (Olard & Benedetto 2003), ont été calibrés sur les courbes maîtresses de module complexe et d'angles de phase respectivement des enrobés et des bitumes extraits. Ce modèle généralisé est constitué d'un ressort de raideur E_0 en parallèle avec : un ressort de raideur E_∞ lui-même en série avec deux éléments permettant de rendre compte du fluage parabolique des enrobés (de paramètres k, δ, τ d'une part et h, τ d'autre part) aussi en série avec un amortisseur linéaire décrivant la viscosité des bitumes (de paramètre β, τ). Ceux-ci sont par ailleurs supposés viscoélastiques linéaires non vieillissants et isotropes. Les expressions des modules complexes des modèles 2S2P et 1S2P1D s'écrivent comme suit :

$$\begin{aligned}
 E^*(i\omega) &= E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta (i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}} && \text{pour 2S2P} \\
 E^*(i\omega) &= \frac{E_\infty}{1 + \delta (i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\tau\beta)^{-1}} && \text{pour 1S2P1D}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Les paramètres des modèles sont identifiés pour toutes les durées de vieillissement et pour les deux mortiers à une température de référence $\theta_{ref} = 20^\circ\text{C}$ en utilisant un script Python. Les paramètres du 1S2P1D identifiés sur les bitumes extraits (tableau 2) serviront de données d'entrée au modèle multi-échelle.

B. Discussion

Les courbes maîtresses de module complexe et d'angle de phase pour différents niveaux de vieillissement sont présentées sur les figures 3 pour une température de référence de 20°C .

TABLEAU 2. Paramètres du modèle 1S2P1D pour les bitumes à $\theta_{ref} = 20^\circ\text{C}$

Bitume	E_∞ (MPa)	δ	τ (s)	k	h	β
B(T0)	$7,52 \times 10^2$	4,53	$5,90 \times 10^{-3}$	0,35	0,68	$2,94 \times 10^1$
B(T3)	$8,06 \times 10^2$	5,16	$1,72 \times 10^{-2}$	0,3	0,64	$1,32 \times 10^2$
B(T6)	$8,03 \times 10^2$	5,31	$2,42 \times 10^{-2}$	0,28	0,61	$2,71 \times 10^2$
B(T9)	$9,26 \times 10^2$	5,66	$2,26 \times 10^{-2}$	0,28	0,62	$2,54 \times 10^2$
B(V0)	$2,00 \times 10^3$	5,10	$1,75 \times 10^{-4}$	0,26	0,62	$1,62 \times 10^2$
B(V3)	$2,36 \times 10^3$	7,06	$9,48 \times 10^{-4}$	0,23	0,59	$8,0 \times 10^2$
B(V6)	$2,19 \times 10^3$	6,52	$9,60 \times 10^{-4}$	0,23	0,57	$9,83 \times 10^2$
B(V9)	$2,59 \times 10^3$	7,34	$1,30 \times 10^{-3}$	0,23	0,57	$1,27 \times 10^3$

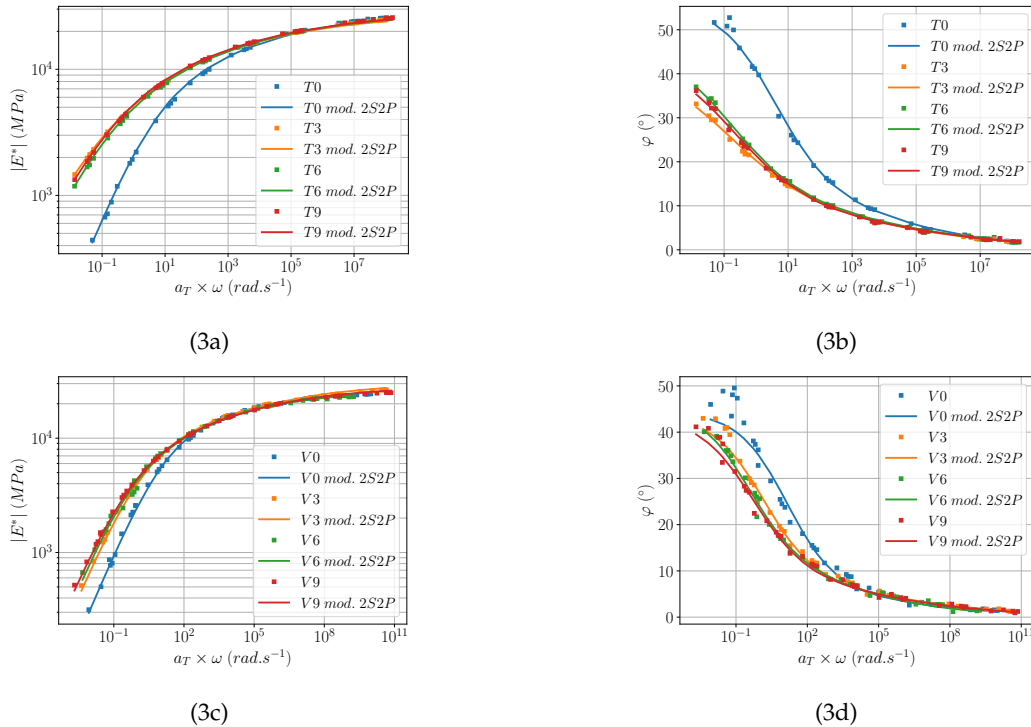


FIGURE 3. Courbes maîtresses du module complexe et de l'angle de phase des EB à $\theta_{ref}=20^\circ\text{C}$

La tendance générale est similaire pour tous les mélanges évalués. Les EB (T3-T9) présentent un module de rigidité de l'ordre de 33% à 36% plus élevé que le matériau de référence T0 tandis que cette augmentation est de l'ordre de 12% à 14% entre les matériaux vieillis (V3-V9) par rapport l'EB V0 (voir figure 3a et 3c). De plus, les enrobés vieillis (T3-T9, V3-V9) présentent des valeurs de module complexe globalement similaires. Ces augmentations de modules entraînent une diminution des angles de phase, comme le montrent les figures 3b et 3d. On retrouve les mêmes observations concernant l'évolution des modules et des angles de phase des bitumes extraits des mélanges (voir Figures 4a à 4d). Les propriétés des bitumes vieillis (B(T3)-B(T9), B(V3)-B(V9)) augmentent par contre progressivement à la différence de celles des mélanges dont ils sont extraits.

Les figures 5a et 5b montrent une augmentation du module de rigidité et une diminution de l'angle de phase entre le mortier 0/2 et le mortier 0/4. Ces variations peuvent s'expliquer par une proportion moins importante du bitume dans le mortier 0/4.

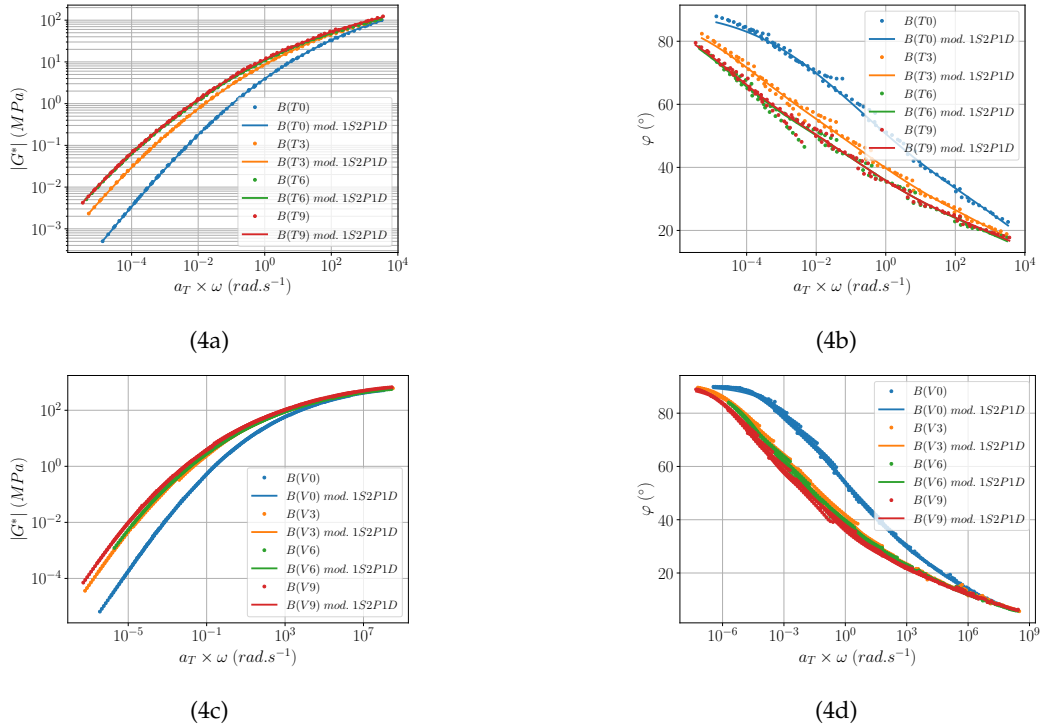


FIGURE 4. Courbes maîtresses du module complexe et de l’angle de phase des bitumes à $\theta_{ref}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$

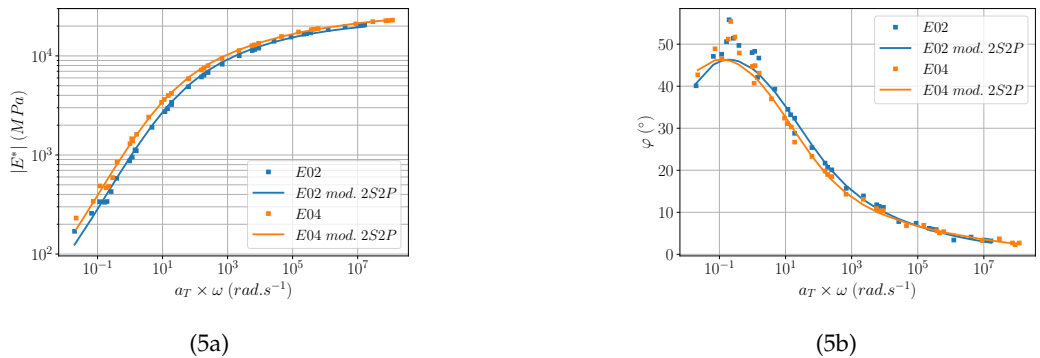


FIGURE 5. Courbes maîtresses du module complexe et de l’angle de phase des mortiers à $\theta_{ref}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$

V. Homogénéisation des propriétés rhéologiques des enrobés

A. Modélisation micromécanique

Les enrobés bitumineux sont des matériaux hétérogènes (voir figure 2) dont les propriétés viscoélastiques linéaires macroscopiques (module complexe et angle de phase) peuvent être homogénéisées à l’aide de la bibliothèque Extended Calculator of HOMogEnization Schemes (ECHOES) Barthélémy (2022) qui a été mise à profit avec succès dans des travaux antérieurs Barthélémy et al. (2016, 2019), Somé et al. (2022). L’approche micromécanique adoptée ici est basée sur la caractérisation multi-échelle de matériaux hétérogènes. Ainsi, un volume élémentaire représentatif (VER) est défini et une description simplifiée de la microstructure est proposée (figure 6). Enfin, le module complexe homogénéisé et l’angle de phase sont estimés,

et les résultats sont comparés aux données expérimentales.

Comme indiqué sur la figure 6, la microstructure à l'étude est supposée se composer de trois échelles.

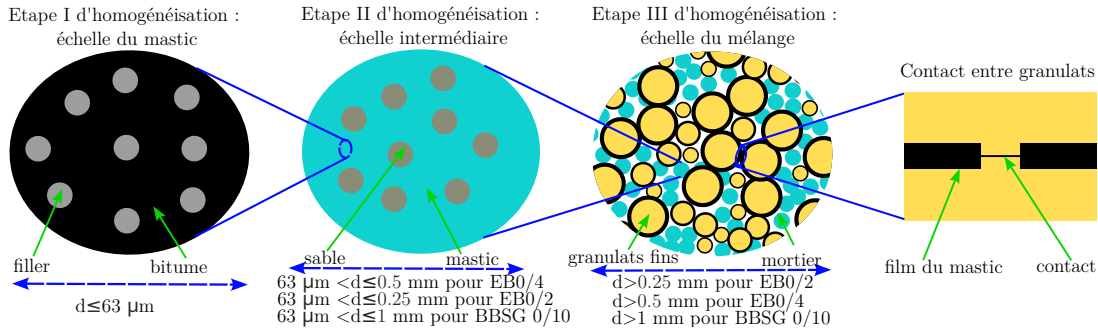


FIGURE 6. *v.e.r* des mortiers et enrobés

- Échelle microscopique (Étape I) [$\leq 6310^{-6}$ m]

Il s'agit de la première étape de description multi-échelle de la microstructure de l'EB. Cette étape suppose que les éléments fins (les fillers) de diamètre n'excédant pas $63 \mu\text{m}$ (représentés par des inclusions sphéroïdales de fraction volumique ϕ_f) de propriétés élastiques sont noyés dans une matrice homogène (ici le bitume, dont les propriétés viscoélastiques sont présentées dans la section 4), formant ainsi le mastic. Le schéma de Mori-Tanaka est utilisé pour estimer les propriétés viscoélastiques effectives de ce dernier et le tenseur de rigidité complexe homogénéisé¹ :

$$(\mathbb{C}_m^*)^{\text{hom}} = [(1 - \phi_f) \mathbb{C}_b^* + \phi_f \mathbb{C}_a \mathbb{T}_f^*] : [((1 - \phi_f) \mathbb{I} + \phi_f \mathbb{T}_f^*)^{-1}] \quad (2)$$

avec :

$$\mathbb{T}_f^* = [\mathbb{I} + \mathbb{P}_f^{*b} : (\mathbb{C}_a - \mathbb{C}_b^*)]^{-1} \quad (3)$$

où \mathbb{C}_b^* désigne le tenseur de rigidité complexe du bitume, \mathbb{C}_a le tenseur de rigidité élastique des fillers et \mathbb{P}_f^{*b} le tenseur de Hill.

- Échelle mésoscopique (Étape II)

Cette échelle correspond au mortier, comme le montre la figure 6. On suppose un milieu biphasique dont la phase matricielle a les mêmes propriétés viscoélastiques que le mastic homogénéisé (étape I) dans lequel sont noyés des granules sphériques. Les propriétés viscoélastiques homogénéisées sont dérivées en appliquant le schéma de Mori-Tanaka (équation (2)).

- Échelle macroscopique (Étape III)

C'est la dernière étape de description multi-échelle de la microstructure de l'EB étudiée. Celle-ci est supposée être constituée d'un arrangement de granules grossiers enrobés d'une couche composite et de mortiers. Pour mieux capturer les propriétés viscoélastiques macroscopiques à haute température et basse fréquence, le modèle de juxtaposition de la fine couche de fraction surfacique χ entourant les agrégats et des contacts intergranulaires proposé par Somé et al. (2022) est utilisé. Le contact est modélisé par un ressort linéaire reliant la contrainte de cisaillement locale au saut de déplacement tangentiel de raideur k_t (voir figure 6). Dans le domaine fréquentiel, le tenseur de rigidité complexe de l'interphase composite est donné par l'équation (4) Somé et al. (2022).

$$\mathbb{C}_{int}^* = \chi(\mathbb{C}_m^*)^{\text{hom}} + (1 - \chi)\mathbb{C}_c ; \quad \mathbb{C}_c = 3\kappa^a \mathbb{J} + 2\mu_{int} \mathbb{K} ; \quad \mu_{int} = e_m k_t \quad (4)$$

1. On rappelle qu'en viscoélasticité linéaire non- vieillissante le théorème de correspondance permet d'appliquer les relations usuelles élastiques aux transformées de Laplace-Carson des tenseurs et que les raideurs complexes fréquentielles sont obtenues en prenant $p = i\omega$ comme paramètre de Laplace.

où e_m désigne l'épaisseur de la fine couche et est reliée au diamètre d des granulats par la formule suivante Somé et al. (2022) :

$$e_m = \alpha \left(\frac{d}{d_0} \right)^\beta \tag{5}$$

où α, β sont des constantes et d_0 est pris unitaire pour des raisons d'homogénéité dimensionnelle. Dans ce cas particulier d'un VER contenant des motifs morphologiques représentatifs (MRP) Herve & Zaoui (1993), Barthélémy et al. (2019), le tenseur de rigidité complexe homogénéisé s'écrit :

$$\mathbb{C}^{*hom} = \left[\phi_p \mathbb{b}_p + \phi_{mo} \mathbb{b}_{mo}^* + \sum_{i=1}^{n_a} \phi_i \mathbb{b}_i^* \right] : \left[\phi_p \mathbb{c}_p + \phi_{mo} \mathbb{c}_{mo}^* + \sum_{i=1}^{n_a} \phi_i \mathbb{c}_i^* \right]^{-1} \tag{6}$$

Les indices p, mo et i font respectivement référence aux pores sphériques, aux inclusions sphériques (destinés à représenter le mortier homogénéisé, obtenu à l'étape II, à une échelle où celui-ci apparaît homogène) et aux MRP. Les tenseurs de concentration \mathbb{c}^* et \mathbb{b}^* sont déduits en appliquant un schéma auto-cohérent.

B. Données d'entrée du modèle

Les paramètres viscoélastiques du modèle 1S2P1D identifiés à partir des résultats de module complexe des bitumes extraits sont utilisés pour définir le tenseur \mathbb{C}_b^* en supposant un module isostatique constant $k_b = 2,5$ GPa Somé et al. (2022). Le module de Young des agrégats, sables et fines est $E_a = 95$ GPa avec un coefficient de Poisson $\nu_a = 0,17$ Somé et al. (2022). En plus de ces données, les fractions volumiques ϕ_i de chaque constituant par rapport au volume total du mélange sont données dans le tableau 3. Les

TABLEAU 3. Fractions volumiques ϕ des constituants

mortier 0/2	Constituants	bitume	filler	sable	0,25/1	1/2	vide		
	ϕ	21,2%	17,7%	10,3%	17,4%	33,2%	0,2%		
mortier 0/4	Constituants	bitume	filler	sable	0,5/1	1/2	2/4	vide	
	ϕ	18,3%	13,3%	8%	13,6%	14,4%	30,4%	2%	
BBSG 0/10	Constituants	bitume	filler	sable	1/2	2/4	4/6,3	6,3/10	vide
	ϕ	11,9%	5,8%	9,9%	8,4%	9,3%	14,1%	35,1%	5,5%

paramètres de contact $X = (\chi, \alpha, \beta, k_t)$ sont difficiles à obtenir par expérience. Nous proposons dans cette étude de les obtenir par méthode inverse en déployant une technique d'optimisation multi-objective pour les enrobés vieillis et mono-objective pour les mortiers grâce au module Nlopt Steven (2021). Cela a consisté à minimiser, au sens des moindres carrés, le carré de la distance entre les modules complexes homogénéisés et expérimentaux selon la formule (7).

$$\underset{X \in \mathbb{R}^4}{Min} \left(\frac{1}{n_{V_j, T_j}} \sum_{j=1}^{n_{V_j, T_j}} \sum_{k=0}^N \varpi_k \left| 1 - \frac{E_j^{*hom}}{E_j^*} (i\omega_k; X) \right|^2 \right) \tag{7}$$

où n_{V_j, T_j}, ϖ désignent respectivement le nombre de fonctions objectives (ici $n_{V_j, T_j} = 8$ pour le BBSG 0/10) et le coefficient de pondération ($\varpi_{k+1} = \log \frac{\omega_{k+1}}{\omega_k}$). Les paramètres optimaux au sens des moindres carrés sont donnés dans le tableau 4.

TABLEAU 4. Paramètres de contact optimisés

	χ	α	β	k_t
mortier 0/2	$9,861 \times 10^{-1}$	$7,933 \times 10^{-3}$	1,065	$6,1 \times 10^3$
mortier 0/4	$9,999 \times 10^{-1}$	$2,911 \times 10^{-2}$	4,947	$6,1 \times 10^3$
BBSG 0/10	$9,998 \times 10^{-1}$	$1,76 \times 10^{-1}$	1×10^{-1}	$6,1 \times 10^3$

C. Comparaison entre modèle multi-échelle et résultats expérimentaux : cas des mélanges vieilliss

La figure 7 montre une comparaison entre le modèle multi-échelle et les données expérimentales pour les mélanges T0 à T9 et V0 à V9. Les résultats du modèle sont, pour un jeu unique de paramètres de contact X (donné dans le tableau 4), globalement proches des résultats expérimentaux. On peut observer qu'à basse fréquence, le modèle prédit une diminution des modules de rigidité et d'angle de phase comparables à ceux des données expérimentales en présence des paramètres de contact. En revanche, en l'absence de ces paramètres, on peut voir sur la figure 7 que l'angle de phase homogénéisé des enrobés tend asymptotiquement vers celui des bitumes (comportement de la fine couche de mastic entourant les granulats). Ainsi, la prise en compte des paramètres de contact permet à nouveau de tenir compte de la faible rigidité des enrobés à haute et basse température, comme dans Somé et al. (2022).

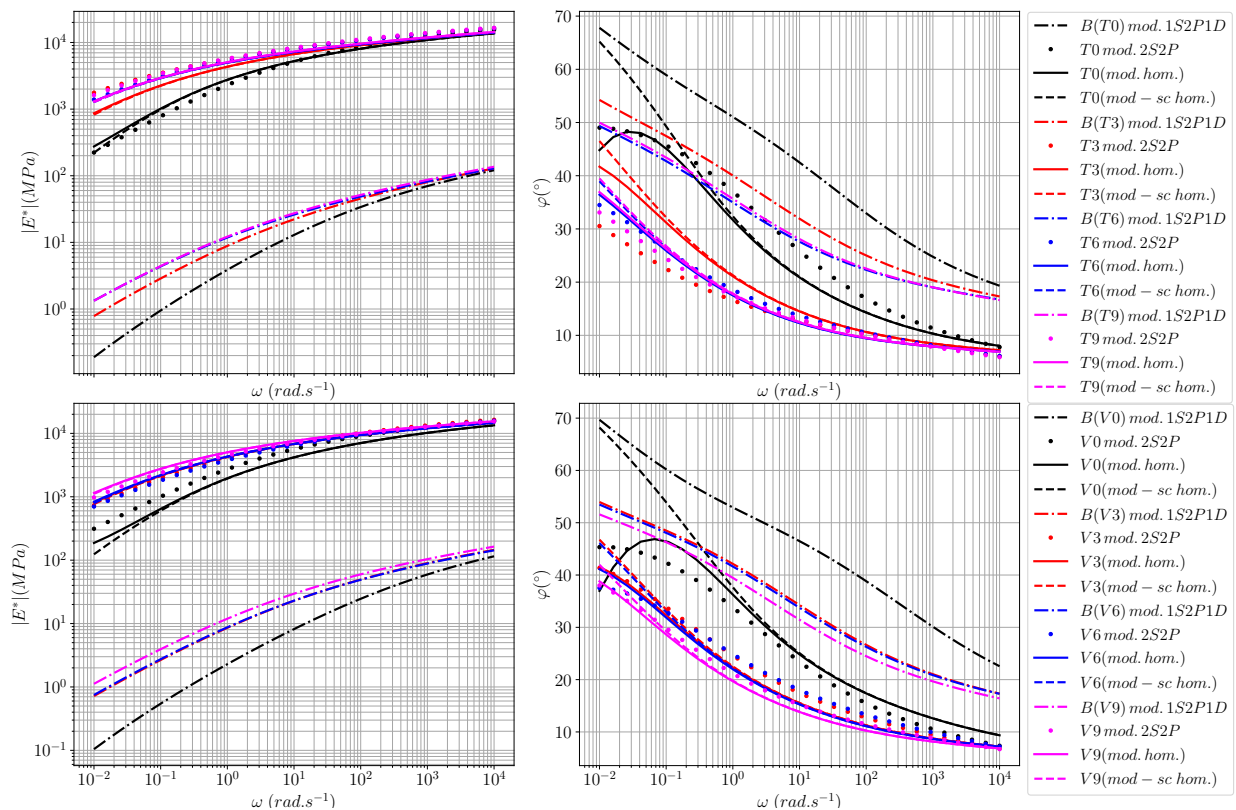


FIGURE 7. Comparaison entre le modèle multi-échelle avec prise en compte du contact entre granulats (mod. hom) et sans contact entre granulats (mod. sc hom) et les résultats expérimentaux calibrés avec le modèle 2S2P pour une température de référence $\theta_{ref}=20\text{ }^\circ\text{C}$

D. Comparaison entre modèle multi-échelle et résultats expérimentaux : cas des mortiers 0/2 et 0/4

La description multi-échelle de la microstructure du mortier est représentée sur la figure 6. La démarche d'homogénéisation présentée à la section 5.1 est à nouveau mise à profit. Les figures 8a et 8b montrent la comparaison des résultats de module complexe et d'angle de phase entre le modèle et les données expérimentales. De toute évidence, les prédictions des modèles établis suivent la tendance générale des résultats expérimentaux pour les trois mélanges. Les paramètres permettant d'obtenir ces tendances sont consignés dans le tableau 4. Il peut être confirmé que la prise en compte des paramètres de contact améliore significativement la prédiction des modules de rigidité et des angles de phase à basse fréquence.

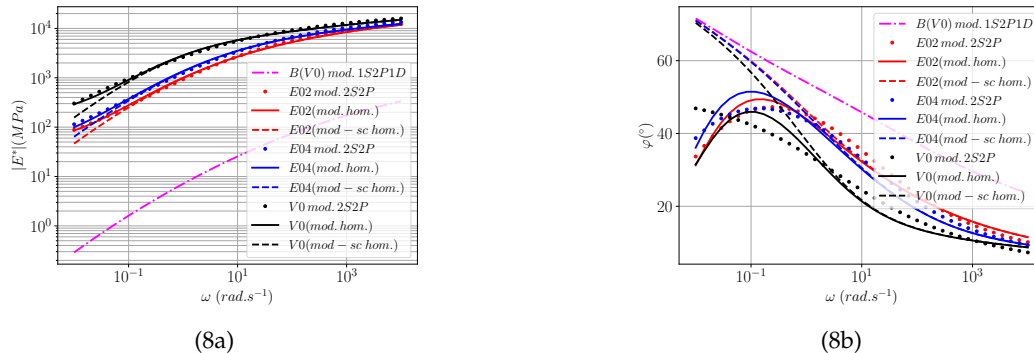


FIGURE 8. Comparaison entre le modèle multi-échelle avec prise en compte du contact entre granules (mod. hom) et sans contact entre granules (mod. sc hom) et les résultats expérimentaux obtenus pour l'EB V0 ainsi que les mortiers 0/2 et 0/4 calibrés avec le modèle 2S2P pour une température de référence $\theta_{ref}=20$ °C.

VI. CONCLUSION

La présente étude s'est focalisée sur la modélisation multi-échelle des propriétés des mélanges vieillissés à long terme par thermo-oxydation et de deux types de mortiers à partir de leurs constituants. Une fine description de leur microstructure a permis d'identifier une démarche d'homogénéisation combinant un schéma de Mori-Tanaka à l'échelle du mastic et du mortier et un schéma auto-cohérent généralisé à l'échelle du mélange, avec un possible contact intergranulaire. La pertinence du présent modèle multi-échelle est démontrée en le confrontant aux données expérimentales. Le modèle prédit relativement bien les propriétés viscoélastiques ($|E^*|$, φ) des mélanges vieillissés et des mortiers, même à basse fréquence (correspondant à des températures élevées par principe d'équivalence temps-température), grâce à un bon ajustement des paramètres de contact X . Le modèle d'homogénéisation mis en oeuvre pourrait à terme être utilisé pour optimiser les formules d'enrobés vis-à-vis du module complexe recherché, moyennant la connaissance préalable des paramètres de calibrations pour chaque type d'EB. Il a également été observé que le vieillissement entraîne une augmentation de la rigidité des bitumes et des enrobés correspondants, ce qui est un résultat bien connu de la littérature.

Il serait intéressant de reproduire cette étude en considérant le bitume comme un matériau hétérogène afin de mieux prendre en compte les modifications physico-chimiques à l'échelle des constituants du bitume au cours du processus thermo-oxydatif.

Références

- Alam, S. & Hammoum, F. (2015), 'Viscoelastic properties of asphalt concrete using micromechanical self-consistent model', *Archives of civil and mechanical engineering* **15**, 272–285.
- Barthélémy, J.-F. (2022), 'Echoes library (extended calculator of homogenization schemes)'.
URL: <https://jfbathelemy.github.io/echoes/>
- Barthélémy, J.-F., Giraud, A., Lavergne, F. & Sanahuja, J. (2016), 'The eshelby inclusion problem in ageing linear viscoelasticity', *International Journal of Solids and Structures* **97-98**, 530–542.
- Barthélémy, J.-F., Giraud, A., Sanahuja, J. & Sevostianov, I. (2019), 'Effective properties of ageing linear viscoelastic media with spheroidal inhomogeneities', *International Journal of Engineering Science* **144**, 103104.
- Chailleux, E., Ramond, G., Such, C. & de La Roche, C. (2006), 'A mathematical-based master-curve construction method applied to complex modulus of bituminous materials', *Road Materials and Pavement Design* **7**, 75–92.
- Cherif, R., Eddhahak, A., Gabet, T., Hammoum, F. & Nejia, J. (2021), 'Effect of the processing conditions on the viscoelastic properties of a high-RAP recycled asphalt mixture : micromechanical and experimental approaches', *International Journal of Pavement Engineering* **22**, 708–717.
- de la Roche, C., Van de Ven, W., Van den bergh, M., Gabet, T., Dubois, V., Grenfell, J. & Porot, L. (2009), 'Development of a laboratory bituminous mixtures ageing protocol', *RILEM Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials* pp. 331–345.
- Herve, E. & Zaoui, A. (1993), 'n-layered inclusion-based micromechanical modelling', *International Journal of Engineering Science* **31**(1), 1–10.
- Olard, F. & Benedetto, H. D. (2003), 'General 2S2P1D model and relation between the linear viscoelastic behaviours of bituminous binders and mixes', *Road Materials and Pavement Design* **4 Issue 2**, 185–224.
- Pichler, C., Lackner, R. & Aigner, E. (2012), 'Generalized self-consistent scheme for upscaling of viscoelastic properties of highly-filled matrix-inclusion composites - Application in the context of multiscale modeling of bituminous mixtures', *Composites : Part B* **43**, 457–464.
- Shu, X. & Huang, B. (2008), 'Micromechanics-based dynamic modulus prediction of polymeric asphalt concrete mixtures', *Composites : Part B* **39**, 704–713.
- Somé, S. C., Barthélémy, J.-F., Mouillet, V., Hammoum, F. & Liu, G. (2022), 'Effect of thermo-oxidative ageing on the rheological properties of bituminous binders and mixes : Experimental study and multi-scale modeling', *Construction and Building Materials* **344**, 128260.
- Steven, G. J. (2021), 'The nlopt nonlinear-optimization package'.
URL: <http://github.com/stevengj/nlopt>
- Zhu, X.-Y., Yang, Z.-X., Guo, X.-M. & Chen, W.-Q. (2011), 'Modulus prediction of asphalt concrete with imperfect bonding between aggregate-asphalt mastic', *Composites : Part B* **42**, 1404–1411.