

Modèle de comportement évolutif pour grave-émulsion, basé sur les décompositions spectrales des modèles de Boyce et Huet

Lambert Marion^a, Jean-Michel Piau^b, Vincent Gaudefroy^c, Anne Millien^d,
Frédéric Dubois^e, Christophe Petit^f, François Chaignon^g

- a. USIRF, 9 rue de Berri, 75008 PARIS, France, marion.lambert@etu.unilim.fr
b. LUNAM université IFSTTAR, Route de Bouaye, CS4, 44344 Bouguenais, France, Tel :
(0033) +(0)240845672, vincent.gaudefroy@ifsttar.fr
c. LUNAM université IFSTTAR, Route de Bouaye, CS4, 44344 Bouguenais, France, jean-
michel.piau@ifsttar.fr
d. GC2D, Centre Universitaire de Génie Civil Département Génie Civil, Université de
Limoges, Boulevard Jacques Derche, 19300 Egletons, France, christophe.petit@unilim.fr
e. GC2D, Centre Universitaire de Génie Civil Département Génie Civil, Université de
Limoges, Boulevard Jacques Derche, 19300 Egletons, France, anne.millien@unilim.fr
f. GC2D, Centre Universitaire de Génie Civil Département Génie Civil, Université de
Limoges, Boulevard Jacques Derche, 19300 Egletons, France, frederic.dubois@unilim.fr
g. USIRF, 9 rue de Berri, 75008 PARIS, France, francois.chaignon@colas.com

Résumé :

Dans un contexte politique où les enjeux énergétiques et environnementaux deviennent de plus en plus forts, la communauté routière souhaite favoriser des techniques plus économes en énergie et plus respectueuses de l'environnement. Parmi celles-ci, l'enrobé bitumineux à l'émulsion de bitume apparaît comme une technique à déployer plus largement sur les réseaux routiers. En effet, cette technique utilise de l'émulsion de bitume qui, comparée aux enrobés à chaud, nécessite moins d'énergie et limite les rejets de GES lors de sa fabrication. Toutefois, la formulation du mélange ainsi que les approches des performances d'une chaussée intégrant une couche d'enrobé à l'émulsion restent empiriques et sont basées sur des savoir-faire locaux. Ceci qui entrave le développement de cette technique.

En règle générale, la première étape pour dimensionner une chaussée consiste à connaître le comportement mécanique réversible de chacune des couches qui la composent afin de déterminer les champs de contrainte et de déformation de la chaussée au passage des charges roulantes. Dans un deuxième temps, ces valeurs sont comparées aux seuils des critères de durabilité mécanique de ces matériaux.

Le modèle pour enrobé à chaud utilisé jusqu'à présent pour dimensionner les enrobés à l'émulsion est inadéquat car le modèle pour enrobé ne prend pas en compte l'évolution de ce matériau de son état frais à son état mûri. Ce manque de connaissance peut expliquer pourquoi dimensionner une couche

d'enrobé à l'émulsion est si complexe et explique le fait que ce matériau ne soit pratiquement pas utilisé dans les chaussées à fort trafic.

La première partie de cet article présente un modèle évolutif pour enrobé à l'émulsion qui prend en compte l'évolution de son état frais à son état mûri en utilisant les modèles de Boyce et de Huet. Ce modèle pour enrobé à l'émulsion est réalisé à partir de la décomposition spectrale des deux modèles puis par leur juxtaposition. L'évolution du comportement mécanique de ce matériau est due à la viscosité du modèle de Huet qui est considérée comme dépendant non seulement de la température mais aussi du vieillissement du matériau. La deuxième partie de cet article montre la réponse en déformation de ce modèle à la simulation de différents types de contraintes.

Abstract:

In a political context in which energy and environmental stakes become increasingly strong, road engineering evolves to saving energy and environmentally friendly practices. Among those, cold mixes treated with bitumen emulsion appear as suitable techniques. However cold mix design as well as design of pavement including cold mix asphalt (CMA) layers are empirical and based on local competences. According to this background, the transposition of established local rules from one place to another and their application to medium or heavy traffic pavements are not easy and limit the development of this environmentally friendly solution.

As a rule, to design a pavement, the first step is to know the reversible mechanical behaviour of each material which composes the pavement structure in order to determine stress and strain generated by heavy weight traffic. In a second step, these values must be compared with the mechanical durability of materials.

Usual model setting for hot mix asphalt is not adequate for CMA mechanical behaviour and no law was established which takes account both fresh and aged state. This lack of knowledge can explain why the pavement design for CMA is difficult and not in use for heavy traffic road.

The paper presents in the first part an evolutive constitutive model for CMA that integrates the evolution of the material from its fresh to cured state using Boyce and Huet models and enables correlating the reversible component of strain with stress. The CMA model is realised from the spectral decomposition of both models and then by their juxtaposition. The mechanical behaviour evolution of the CMA is accounted by the viscosity of the Huet model which is considered as depending not only on temperature but also on the aging of the material. The second part shows the stress strain response of this model by simulating different types of stress taking.

Mots clefs : enrobé à froid, comportement mécanique, émulsion de bitume

1 Introduction

Dans un contexte politique où les enjeux énergétiques et environnementaux deviennent de plus en plus forts, la communauté routière souhaite favoriser des techniques plus économes en énergie et plus respectueuses de l'environnement [4]. Parmi celles-ci, l'enrobé bitumineux à l'émulsion de bitume (GE = grave-émulsion) apparaît comme une technique à développer. En effet, cette technique utilise de l'émulsion de bitume qui, comparées aux enrobés à chaud, nécessitent moins d'énergie et limitent les rejets de GES pour être fabriquée.

Toutefois, la formulation du mélange ainsi que les performances d'une chaussée intégrant une couche d'enrobé à l'émulsion restent empiriques et sont basés sur des savoir faire locaux [9]. Ils ne permettent pas facilement la transposition des règles établies d'une région à une autre ce qui entrave le développement de cette technique plus respectueuse de l'environnement. De plus, les acteurs de ce projet, industriels et académiques, souhaitent accompagner la démarche actuelle française pour favoriser le recours aux techniques routières durables à l'émulsion et voir leur domaine d'application s'élargir à des classes de trafics plus élevées que celles habituellement réservées à ce type de matériau.

Les matériaux à l'émulsion de bitume présentent un caractère fortement évolutif, en raison de l'utilisation de l'émulsion (mélange d'eau et de bitume) comme liant [5] [8] [10]. En laboratoire, une rupture de l'émulsion ainsi qu'un départ d'eau sont tous deux observés lors du compactage [12]. In situ, le comportement du matériau évolue d'un comportement souple, de matériau granulaire faiblement lié, à celui nettement plus rigide d'un enrobé. Cette phase de mûrissement est plus ou moins longue et l'évolution de son comportement passe par une cinétique mal connue et généralement non maîtrisée [7].

Cet article présente un modèle générique vieillissant d'une grave émulsion, basé sur la juxtaposition entre élasticité non linéaire et viscoélasticité. Pour cette « fusion », deux modèles bien connus seront utilisés à travers une fonction de mûrissement :

- le modèle de Boyce [1] (qui traduit le comportement de matériaux granulaires non liés et qui correspond à l'état frais de l'enrobé à l'émulsion),
- le modèle de Huet [6] (qui traduit le comportement thermo-viscoélastique d'un enrobé à chaud et qui correspond à l'état mûri du matériau)

Parallèlement à ce travail de modélisation, une campagne expérimentale a été lancée pour caractériser le comportement mécanique de l'enrobé à l'émulsion de son état frais à son état mûri. Il s'agit du suivi du module complexe oedométrique du matériau à différents stade de mûrissement. Les échantillons sont placés en mûrissement à différentes conditions de température et d'hygrométrie puis sortis à intervalle régulier pour être testés en condition oedométrique (compression axiale à déformation radiale nulle) sous chargement dynamique. Les tests sont effectués pour trois températures d'essais (différentes des températures de mûrissement), à trois contraintes axiales ainsi qu'à cinq fréquences distinctes. Le calage des paramètres du modèle et de la fonction de mûrissement utilisant ces données expérimentales fera l'objet d'une prochaine publication.

2 Développement d'un modèle tenant compte du comportement réversible et vieillissant des enrobés à l'émulsion

Le dimensionnement des chaussées s'appuie dans un premier temps sur le calcul des champs de contraintes et déformations se développant dans les différentes couches de matériau, au passage des charges roulantes. Cette étape requiert une bonne description du comportement des matériaux et notamment de leur composante réversible, à travers la formulation de lois de comportement adéquates et la détermination expérimentale des paramètres numériques intervenant dans leurs expressions. La seconde étape de dimensionnement consiste à comparer les valeurs de contrainte et déformation obtenues, aux critères de durabilité mécanique des matériaux. Un dimensionnement est recevable si le risque d'apparition de désordres prononcés (fissures de fatigue, déformations permanentes...) sur la durée de vie projetée de l'ouvrage est suffisamment faible.

Le modèle présenté ci-après vise à décrire dans le cadre de cette démarche le comportement relativement complexe (viscoélastique non linéaire) et évolutif des enrobés à l'émulsion, utilisés en technique routière, pour lesquels il n'existe pas encore de loi de comportement établie. On ne s'intéresse ici qu'à la composante réversible de la relation contrainte/déformation.

Le modèle proposé traduit le caractère évolutif des enrobés à l'émulsion dont le comportement varie d'un matériau granulaire non lié, à l'état frais, à celui d'un matériau viscoélastique tel qu'un enrobé à chaud, à l'état mûri. Pour décrire cette transition, on prend pour point de départ les modèles de Boyce et de Huet. Le modèle élastique non linéaire (ENL) rigidifiant de Boyce caractérise le comportement d'un matériau granulaire non lié alors que le modèle viscoélastique (VE) de Huet est communément utilisé pour caractériser le comportement des enrobés à chaud.

2.1 Modèle de Boyce : rappels

La loi de Boyce résulte d'une généralisation non-linéaire de la loi de Hooke, basée sur une dépendance du module de compressibilité K_B et du module de cisaillement G_B en fonction des contraintes. En utilisant la convention de signe et les notations usuelles de la MMC, le modèle s'écrit sous la forme :

$$\varepsilon_{vol} = -\frac{p}{K_B} \quad (1)$$

$$\varepsilon_q = \frac{q}{3 G_B} \quad (2)$$

$$\text{avec : } K_B = K_a \frac{\left(\frac{p}{Pa}\right)^{1-n}}{1-\gamma\left(\frac{q}{p}\right)^2} \quad (3)$$

$$\text{et : } G_B = G_a \left(\frac{p}{Pa}\right)^{1-n} \quad (4)$$

où p est la pression moyenne (> 0 en compression), q est la contrainte déviatorique, ε_{vol} est la déformation volumique (< 0 en contraction), ε_q est la déformation déviatorique, Pa , K_a , G_a , sont des paramètres positifs de dimension égale à celle d'une pression ou d'un module d'élasticité ; γ est positif et sans dimension. n est un exposant compris entre 0 et 1. On notera que le modèle de Boyce rend avant tout compte à travers la contrainte $p > 0$ du comportement unilatéral des matériaux granulaires non liés, qui ne peuvent développer que des contraintes de compression.

2.2 Modèle de Huet : rappels

Le modèle de Huet est un modèle de type viscoélastique linéaire, qui peut être représenté en 1D par un ressort E_∞ et deux amortisseurs paraboliques d'exposant h et k , placés en série (figure 1).

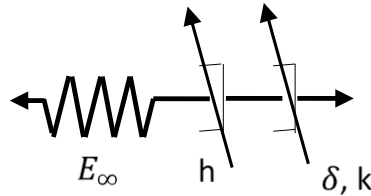


Figure 1 - Représentation 1D du modèle de Huet

Le module complexe ($E_H^*(\omega)$) et la fonction de fluage ($F_H(t)$) 1D du modèle de Huet s'écrivent sous la forme :

$$E_H^*(\omega) = \frac{E_\infty}{1 + \delta(i\omega a(\theta))^{-k} + (i\omega a(\theta))^{-h}} \quad (5)$$

$$F_H(t) = \frac{1}{E_\infty} \left(1 + \frac{\delta}{\Gamma(k+1)} \left(\frac{t}{a(\theta)}\right)^k + \frac{1}{\Gamma(h+1)} \left(\frac{t}{a(\theta)}\right)^h \right) \quad (6)$$

où E_∞ a la dimension d'un module, les exposants h , k sont des réels compris entre 0 et 1 et δ un réel positif permettant d'ajuster le poids relatif des deux amortisseurs. Γ est la fonction d'Euler. La fonction $a(\theta)$ qui a la dimension d'un temps permet quant à elle de rendre compte de la dépendance à la température θ de la viscosité des enrobés bitumineux (fonction de type exponentielle, décroissante). Ce modèle est souvent étendu au cas tensoriel par l'intermédiaire d'un « coefficient de Poisson » réel et constant.

2.3 Lois génériques « élastique non linéaire » et « viscoélastique » utilisées pour illustrer la construction du modèle de GE

Afin d'illustrer le principe de construction du modèle proposé pour GE, nous nous limitons ici au cas 1D non tensoriel en considérant par ailleurs les « approximations » suivantes des modèles de Boyce (équation 7) et Huet (équation 8) :

$$|\sigma| = E_s |\varepsilon|^\alpha \quad (7)$$

$$F(t) = B \left(\frac{t}{A(\theta, t_{\hat{a}ge})} \right)^\beta \quad (8)$$

L'équation (7) peut être déduite du modèle de Boyce en considérant la relation entre pression moyenne et déformation volumique dans le cas d'un chargement de pression isotrope. En effet, à partir des équations (1) et (3), on obtient :

$$p = P_a \left(\frac{K_a}{P_a} \right)^{\frac{1}{n}} (-\varepsilon_{vol})^{\frac{1}{n}} \quad (9)$$

qui est semblable à l'équation (7) après un changement de notation et avec $\alpha = \frac{1}{n}$, donc $\alpha > 1$ et avec $E_s = P_a \left(\frac{K_a}{P_a} \right)^{\frac{1}{n}}$ ayant la dimension d'un module élastique.

L'équation (8) peut être considérée comme une simplification de la fonction de fluage du modèle de Huet, assimilée à celle d'un unique amortisseur parabolique avec $0 < \beta < 1$. On peut supposer que la valeur β est proche de l'exposant h du modèle de Huet, représentatif du comportement des enrobés à chaud pour des valeurs de module relativement faibles (à basse fréquence ou à haute température).

La fonction $a(\theta)$ est par ailleurs étendue à deux variables, $A(\theta, t_{\text{âge}})$ de façon à rendre compte de la dépendance de la viscosité du matériau non seulement en fonction de la température mais aussi en fonction de l'âge du matériau et de son mûrissement depuis sa date de fabrication t_{fab} : $t_{\text{âge}} = t - t_{fab}$. En particulier, le choix d'une fonction $A(\theta, t_{\text{âge}})$ croissante avec $t_{\text{âge}}$, à partir d'une valeur initiale nulle, va permettre d'assurer la transition entre un comportement du matériau purement ENL au jeune âge à un comportement essentiellement VE à long terme. Sans restreindre le modèle, B peut être pris égal à $\frac{1}{E_s}$, en changeant simplement $A(\theta, t_{\text{âge}})$ par une constante multiplicative.

2.4 Décomposition spectrale des deux lois génériques ENL et VE

Le modèle évolutif proposé ici dérive de la « juxtaposition » des deux équations (7) et (8), en attribuant de plus en plus de poids avec le temps au comportement viscoélastique. Pour réaliser la « fusion » des équations (7) et (8) sans doubler les composantes élastiques contenues dans chacune d'entre elles, les deux lois sont préalablement décomposées en séries spectrales. La même variable réelle adimensionnelle l , allant de 0 à $+\infty$, est utilisée pour indexer les éléments spectraux des deux séries. En désignant $\varepsilon_l(\sigma, l)$ comme la déformation d'un seul élément, la déformation obtenue pour un tel spectre peut être exprimée comme suit :

$$\varepsilon(\sigma) = \int_0^{+\infty} \varepsilon_l(\sigma, l) dl \quad (10)$$

2.4.1 Description de la loi ENL par spectre d'éléments « ressort + butée »

La décomposition spectrale de la loi ENL est basée sur la mise en série d'éléments à deux branches constitués d'un ressort et d'une butée en compression (figure 2). La constante de raideur des ressorts est prise constant sur l'ensemble des éléments, égal à la valeur E_s de l'équation (7). Le caractère raidissant de la loi avec la contrainte ou la déformation est obtenu par la fermeture successive des butées sous une contrainte de compression croissante. L'ouverture des butées au repos est représentée par la valeur $b(l) > 0$, fonction du « numéro d'élément » l . Cette fonction peut être choisie décroissante (figure 3), sans restriction. La loi de comportement pour un seul élément est alors donnée par :

$$\sigma = E_s \varepsilon_l \text{ si } \varepsilon_l(\sigma, l) \geq -b(l) \quad (11)$$

$$\sigma \leq E_s \varepsilon_l \text{ si } \varepsilon_l(\sigma, l) = -b(l) \quad (12)$$

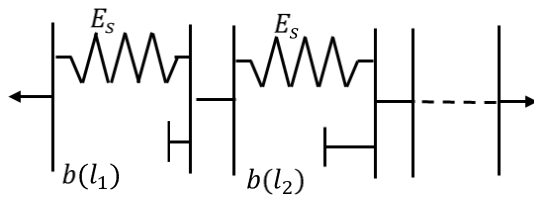
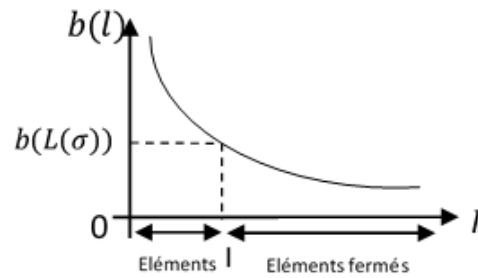


Figure 2 - Décomposition spectrale pour ENL

Figure 3 - Ouverture de butée $b(l)$ -
Eléments fermés /ouverts pour une
valeur donnée de $\sigma < 0$

La fonction $b(l)$ peut être calculée pour toute loi élastique non linéaire $\sigma(\varepsilon)$ donnée (calcul non explicité ici). La fonction suivante est obtenue dans le cas de l'équation (7) :

$$b(l) = \frac{1}{(\alpha l)^{\frac{\alpha}{\alpha-1}}} \quad (13)$$

2.4.2 Décomposition spectrale de la loi de fluage en éléments de Kelvin-Voigt

Ce mode de représentation est classique. Il s'appuie sur la mise en série d'éléments de Kelvin-Voigt, dont l'élasticité peut être choisie constante (module E) et la viscosité $\eta(l)$ croissante en fonction de l (figure 4).

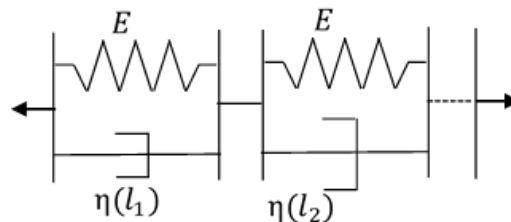


Figure 4 - Spectre de fluage viscoélastique

La fonction de fluage associée à un tel spectre est alors donnée par :

$$F(t) = \frac{1}{E} \int_0^{+\infty} \left(1 - e^{\frac{-t}{A(\theta, \text{tâge}) \zeta(l)}} \right) dl \quad (14)$$

ce qui permet de déduire la fonction $\eta(l)$ de $F(t)$ (calcul non explicité ici).

Dans le cas de l'équation (8), avec $B = \frac{1}{E_s}$, on obtient : $\eta(l) = E_s A(\theta, \text{tâge}) \zeta(l)$,

$$\zeta(l) = (\Gamma(1 - \beta))^{\frac{1}{\beta}} l^{\frac{1}{\beta}} \quad (15)$$

2.4.3 Juxtaposition des lois génériques ENL et VE par série spectrale d'éléments à 3 branches

La « fusion » des lois de comportement (7) et (8) peut alors s'opérer par la mise en série d'éléments à 3 branches « ressort + amortisseur + butée », tel qu'illustré sur la figure 5. Au niveau d'un élément, les ressorts des spectres ENL et VE sont fusionnés en un seul ressort, de valeur égale à E_s .

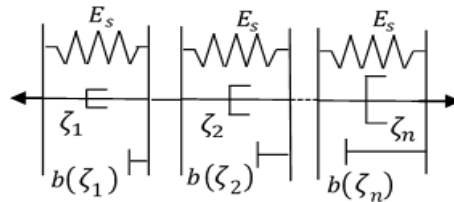


Figure 5 - Spectre à trois branches

Par ailleurs la variable l peut être remplacée par la variable ζ (équation (15)) pour simplifier la représentation spectrale et caractériser celui-ci par la seule fonction $b(\zeta)$:

$$b(\zeta) = \left(\frac{\alpha}{\Gamma(1-\beta)} \right)^{\frac{\alpha}{\alpha-1}} \left(\frac{1}{\zeta} \right)^{\frac{\beta\alpha}{\alpha-1}} \quad (16)$$

En se basant sur les valeurs typiques des exposants α et β , soit 1,4 pour α (valeur de l'exposant de Boyce pour les matériaux granulaires) et 0,6 pour β (valeur de l'exposant h dans le modèle de Huet pour les enrobés à chaud), l'exposant $\frac{\beta\alpha}{\alpha-1}$ est plus grand que 1, ce qui rend $b(\zeta)$ décroissante de $+\infty$ à 0 pour ζ variant de 0 à $+\infty$.

A partir du calcul des déformations élémentaires $\varepsilon_\zeta(\zeta, t)$ à contrainte $\sigma(t)$ imposée, la déformation totale $\varepsilon(t)$ de la série est donnée par :

$$\varepsilon(t) = \frac{\beta}{\Gamma(1-\beta)} \int_0^{+\infty} \frac{\varepsilon_\zeta(\zeta, t)}{\zeta^{1-\beta}} d\zeta \quad (17)$$

Le calcul de cette intégrale peut être réalisé en trois étapes, à savoir :

- une discrétisation du temps en intervalles réguliers Δt définissant les instants $t_i = i \Delta t$;
- pour chaque pas de temps $[t_i, t_{i+1}]$ et pour tout élément du spectre, le calcul incrémentiel de $\varepsilon_\zeta(\zeta, t_{i+1})$ connaissant la contrainte et la valeur de déformation de $\varepsilon_\zeta(\zeta, t_i)$ au temps t_i ;
- le calcul numérique de l'intégrale en ζ par la méthode des trapèzes, donnant la réponse de déformation totale $\varepsilon(t_{i+1})$.

Le même algorithme peut être utilisé à peu de modifications près pour calculer la contrainte $\sigma(t)$ à partir d'un historique de déformation imposée. Les exemples de calcul présentés dans la partie suivante illustrent la réponse du modèle pour un certain nombre de cas de charges.

2.5 Modélisation du mûrissement

Nous proposons en première approche de représenter la fonction $A(\theta, t_{\hat{a}ge})$ sous la forme factorisée :

$$A(\theta, t_{\hat{a}ge}) = a(\theta)v(t_{\hat{a}ge}) \quad (18)$$

où $a(\theta)$ est la fonction de « translation en température » du liant bitumineux de l'émulsion et $v(t_{\hat{a}ge})$ la fonction de mûrissement à proprement parler, égale à 0 à l'origine et croissante avec $t_{\hat{a}ge}$.

Les nombreux travaux et essais réalisés sur les matériaux bitumineux montrent que la fonction $a(\theta)$ prend la forme d'une exponentielle décroissante avec la température et peut être représentée par exemple par la loi Williams-Landel-Ferry [3]. La détermination de ses paramètres est classique et peut être effectuée soit sur le liant, soit sur la grave-émulsion elle-même à partir de mesures de module complexe réalisées à différentes températures d'essai. Dans le cas d'essais réalisés sur la grave-émulsion, il convient de réaliser ces mesures à un même stade de mûrissement, c'est-à-dire dans un laps de temps relativement bref (quelques jours) par rapport au temps caractéristique d'évolution de la fonction $v(t_{\hat{a}ge})$ [2].

Quant à $v(t_{\hat{a}ge})$, il s'agit *a priori* d'une fonctionnelle, essentiellement fonction, à matériau donné, des historiques de température $t_{\hat{a}ge} \rightarrow T(t_{\hat{a}ge})$ et d'humidité $t_{\hat{a}ge} \rightarrow W(t_{\hat{a}ge})$ vues par la grave-émulsion depuis sa fabrication [11].

Nous nous proposons toutefois dans un premier temps de ne tenir compte que du premier effet et de modéliser la cinétique de mûrissement des graves-émulsion à travers l'équation du premier ordre suivant :

$$v(0) = 0$$

$$\frac{dv}{d(\hat{a}ge)} = f(v) \underbrace{e^{\frac{-K}{RT(\hat{a}ge)}}}_{\text{loi d'Arrhénius}} \quad (19)$$

qui rend compte à travers la loi d'Arrhenius d'une accélération du phénomène avec la température (absolue). Parmi les objectifs de la campagne d'essais en cours à l'IFSTTAR, l'un d'entre eux sera de tester la validité de cette équation et de déterminer la valeur de la constante K ainsi que la fonction $f(v)$.

3. Illustration de la réponse théorique du modèle spectral à trois branches

Le codage du modèle spectral à 3 branches a été réalisé (sous Visual Basic) afin d'examiner sa réponse, à évolution de contrainte ou déformation données, ainsi qu'à valeur A fixée. Les exemples de calcul présentés ci-après ont été réalisés pour $\beta = 0,6$ et $\alpha = 1,4$. Le module E_s a été fixé de façon à obtenir dans l'équation (7) une déformation $\varepsilon = 10^{-3}$ pour une contrainte de 0,8 MPa, correspondant aux ordres de grandeur attendus pour une GNT. Le choix de la valeur de A permet de faire varier l'importance de la viscosité dans le modèle.

3.1 Exemples de réponses du modèle à différentes sollicitations

Les figures 6 et 7 illustrent la réponse du modèle au cours d'un essai de fluage d'une part et pour un chargement de type sinusoïdal, pouvant simuler le passage d'une roue en surface de chaussée d'autre part (cf. courbes de contraintes et échelles à droite des graphiques). La valeur de A été choisie pour ces deux calculs de façon à obtenir un module sécant en viscoélasticité (équation 8) égal à 800 MPa à 0,02 seconde. Les déformations du modèle pour GE sont figurées par les courbes continues. Pour comparaison, les déformations des modèles ENL et VE génériques sont représentées en pointillés.

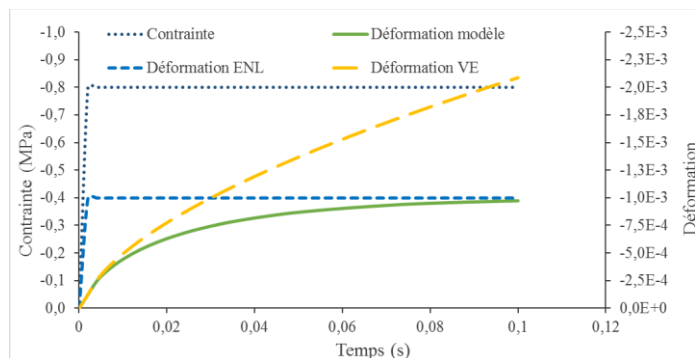


Figure 6 - Modélisation d'un essai de fluage.

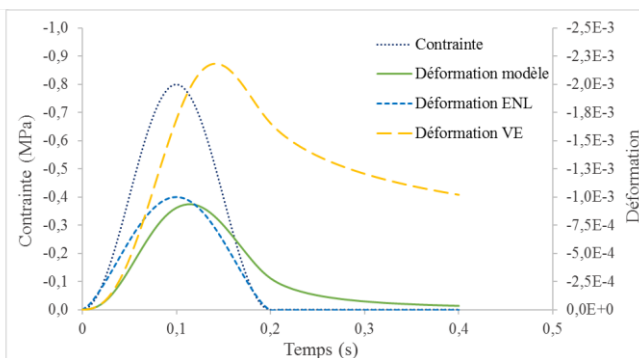


Figure 7 - Modélisation d'un passage de roue sur chaussée

Comme on pouvait s'y attendre, les déformations du modèle GE sont voisines à l'origine des courbes de déformation VE, mais tendent asymptotiquement pour les grandes valeurs de temps vers les réponses ENL. En chargement sinusoïdale, au cours de la décharge après passage de roue (figure 7), la courbe du modèle revient à zéro mais plus graduellement que la courbe ENL, qui retourne directement à zéro à 0,2 s en raison de la viscoélasticité.

3.2 Illustration de la réponse du modèle à différents stades de mûrissement

Un essai cyclique à (20°C, 1 Hz) de trois cycles à contrainte imposée a également été modélisé (en transitoire) pour 3 stades de mûrissement donnés.

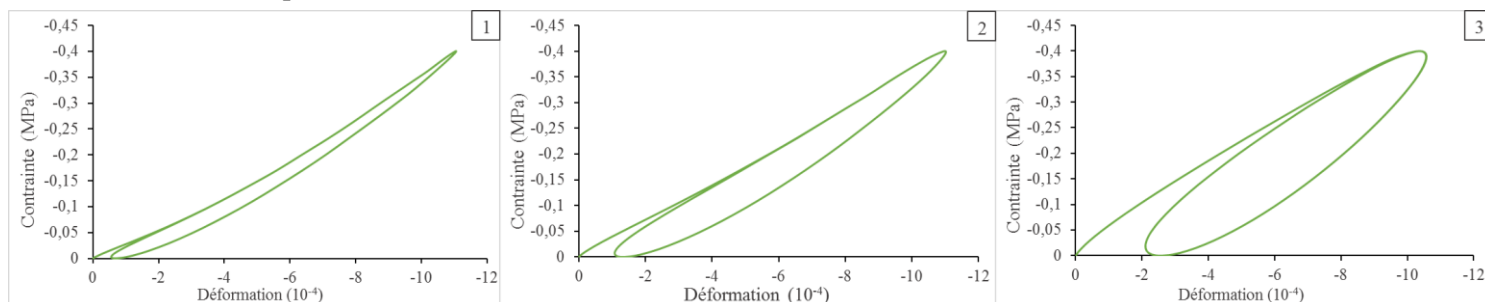


Figure 1 - Modélisation de trois cycles de chargement : 1. à l'état frais 2. à l'état jeune 3. à l'état mûri

La figure 7 montre les résultats obtenus pour 3 valeurs de A conduisant respectivement à des modules sécants de 500, 1000 et 1600 MPa à 0,02 seconde dans l'équation 8.

La figure 7-1 présente des boucles relativement fermées et de forme convexe, qui reflètent un comportement essentiellement de type ENL. La figure 7-3 présente une boucle plutôt ouverte et de forme elliptique, caractéristiques d'un comportement de type VE. La figure 7-2 présente un comportement intermédiaire.

4 Conclusion

Cet article décrit les principes de construction d'une loi de comportement pour GE rendant compte du caractère évolutif de ces matériaux. Le modèle obtenu permet de décrire le passage progressif des GE de l'état de matériau granulaire non lié, à celui d'enrobé bitumineux. Les simulations d'essais cycliques effectuées pour différents stades de mûrissement illustrent particulièrement bien la transition entre élasticité non linéaire rigidifiante et viscoélasticité. La campagne expérimentale lancée parallèlement à ce travail doit permettre de quantifier (à matériau donné) les valeurs manquantes des paramètres du modèle et notamment de préciser la loi de mûrissement $v(t_{\text{âge}})$. Le modèle fait par ailleurs l'objet de développements complémentaires afin de le tensorialiser.

Références

- [1] Boyce, J.R. (1980). A non-linear model for the elastic behaviour of granular materials under repeated loading, Int. Symposium on Soils under Cyclic and Transient Loading, Swansea, U.K. 285-294.
- [2] Doyle, T., McNally, C., Gibney, A., Tabakovic, A., (2013) Developing maturity methods for the assessment of cold-mix bituminous materials, Construction and building materials, 38, 524-529
- [3] Ferry, J.D., (1980) Viscoelastic Properties of Polymers, 3rd ed., John Wiley, New York.
- [4] Goyer, S., Dauvergne, M., Wendling, L., Fabre, J.C., de la Roche, C. & Gaudefroy, V. (2012). Environmental evaluation of gravel emulsion, Proceedings of International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction – Civil engineering and buildings, Nantes, France.
- [5] Hornych, P., Gaudefroy, V., Geffard, J.L. & Goyer, S. (2009) Study of the mechanical behaviour of gravel-emulsions using triaxial tests, Proceedings of the 7th International RILEM Symposium on Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials, Rhodes, Greece.
- [6] Huet, C. (1963). Comportement viscoélastique d'un matériau hydrocarboné. C.R. Acad. Sci. Paris 257, 1438-1442.
- [7] Salomon, D. R. (2006). Asphalt emulsion technology (Transportation Research Circular E-C102), Transportation Research Board.
- [8] Redelius, P., Östlund, J.A., & Soenen, H. (2016) Field experience of cold mix asphalt during 15 years, Road Materials and Pavement Design, 17:1, 223-242
- [9] Serfass, J.-P., De La Roche, C., Wendling, L., Gaudefroy, V. & Verhée, F. (2011) Emulsified asphalt mixes: Behaviour and design of grave-emulsion. Public private cooperation. Towards a complete design method. European roads review, N°19, RGRA, 1-4.
- [10] Serfass, J.-P., Poirier, J., Henrat, J., Carbonneau, X. (2004) Influence of curing on cold mix mechanical performance, Materials and Structures, Vol 37, 365-368

[11] Valentin, J. et al, (2014) Report on durability of cold-recycled mixes: moisture susceptibility, CEDR Call 2012: Recycling: Road construction in a post-fossil fuel society, CoRePaSol

[12] Wendling, L., Gaodefroy, V., Gaschet, J., Ollier, S. & Gallier, S. (2016) Evaluation of the compactability of bituminous emulsion mixes: experimental device and methodology, International Journal of Pavement Engineering, 17, 1, 71-80.