

---

# Modélisation thermomécanique du comportement des enrobés bitumineux à l'émulsion de bitume

**Lambert Marion<sup>1,2,3</sup>, Jean-Michel Piau<sup>1</sup>, Vincent Gaudefroy<sup>1</sup>, Anne Millien<sup>2</sup>, Frédéric Dubois<sup>2</sup>, Christophe Petit<sup>2</sup>, François Chaignon<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> LUNAM université IFSTTAR, département MAST, MIT, Route de Bouaye, CS4, 44344 Bouguenais, France, Tel : (0033) +(0)240845986, marion.lambert@ifsttar.fr

<sup>2</sup> Université de Limoges, GEMH, 19300 Egletons, France

<sup>3</sup> USIRF, 75008 Paris, France

---

*RÉSUMÉ. Dans le contexte politique actuel, il apparaît nécessaire de favoriser les techniques économes en énergie et plus respectueuses de l'environnement. Parmi ces solutions, l'utilisation d'enrobés à l'émulsion de bitume se révèle prometteuse. Pourtant la fabrication et la conception d'une chaussée incorporant des couches structurantes d'enrobés à l'émulsion, reposent encore sur des concepts empiriques et des compétences locales qui tendent à en limiter l'utilisation et le développement. Dans le cas des enrobés à l'émulsion, aucune loi de comportement n'a été établie à ce jour. Pour dimensionner une chaussée routière, il est nécessaire de connaître la réponse mécanique réversible de chaque couche qui la compose en fonction des sollicitations liées au passage de charges roulantes et ensuite de la comparer aux critères actuels de durabilité mécanique. Cet article présente un nouveau modèle de comportement mécanique pour des mélanges granulaires structurants traités à l'émulsion de bitume. Ce modèle intègre la capacité du mélange à se rigidifier dans le temps en prenant en compte son évolution depuis l'état frais (modèle de Boyce) jusqu'à l'état durci (modèle de Huet).*

*ABSTRACT. Given the current political context, it's necessary to promote saving energy and protecting the environment. Among these practices, the use of cold mixes treated with bitumen emulsion has proven to be a suitable technique. Cold mix design however, as well as the design of pavements including cold mix asphalt (CMA) layers, is highly empirical and based on local skills which tend to limit the development of this technique. In the case of CMA, no mechanical behaviour law has been established. As a rule, the first step in designing a pavement consists of knowing the reversible mechanical behaviour of each component material to determine the stresses and strains generated by heavy lorry traffic then these values must be compared with the mechanical durability. This law presents an evaluative constitutive model for CMA that integrates material evolution from its fresh to cured state using Boyce-Huet models and enables correlating the reversible component of strain with stress.*

*MOTS-CLÉS : émulsion de bitume, comportement mécanique, enrobés à froid.*

*KEY WORDS: emulsified bitumen, mechanical behaviour, cold mix asphalt.*

---

## 1. Introduction

Il existe une préoccupation croissante de la communauté routière française pour promouvoir et développer des solutions techniques plus respectueuses de l'environnement [GOYER 12] comme les enrobés à l'émulsion. En effet, ces techniques utilisent de l'émulsion de bitume qui, comparées aux enrobés à chaud, nécessitent moins d'énergie et limitent les rejets de GES pour être fabriquées.

La connaissance, la formulation et les performances de ces matériaux s'appuient sur des savoir-faire locaux [SERFASS 11]. Ils ne permettent pas facilement la transposition des règles établies d'une région à une autre ce qui entrave le déploiement de la technique à l'échelle nationale. De plus, les acteurs de ce projet, industriels et académiques, souhaitent accompagner la démarche actuelle française pour favoriser le recours aux techniques routières durables.

Les matériaux à l'émulsion de bitume présentent un caractère fortement évolutif, du fait de l'utilisation de l'émulsion (mélange d'eau et de bitume) [HORNYCH 09] [SERFASS 04] [REDELIUS 16]. En laboratoire, on observe un phénomène de rupture de l'émulsion, qui conduit à un départ d'eau [WENDLING 16]. Cette rupture est fortement liée à la formulation de l'émulsion, qui doit être adaptée en particulier aux granulats et agrégats utilisés. Sur chaussée, le matériau continue à évoluer en passant par une cinétique mal connue [SALOMON 06] et généralement non maîtrisée d'un comportement souple, de type matériau granulaire faiblement lié, à celui nettement plus rigide d'un enrobé bitumineux, au cours d'une phase appelée « de mûrissement » plus ou moins longue. Il en résulte dans le même temps de fortes modifications qualitatives et quantitatives du comportement des chaussées sous trafic.

Cet article vise à développer un modèle générique vieillissant d'une grave émulsion, basé sur la « fusion » entre le modèle de Boyce [BOYCE 80] (qui traduit le comportement de matériaux granulaires non liés au très jeune âge) et le modèle de Huet [HUET 63] (qui traduit le comportement thermo-viscoélastique d'un matériau bitumineux) à travers une variable scalaire de mûrissement.

## 2. Modèle de comportement 1D pour enrobé à l'émulsion

### 2.1. Principe du modèle basé sur les décompositions spectrales des lois de fluage (VE) et des lois d'élasticité non linéaire (ENL)

Dans le cadre 1D auquel nous nous limitons ici, nous nous proposons d'assoir le modèle sur les deux lois « génériques » :

$$|\sigma| = E_s |\varepsilon|^\alpha \quad \text{ou encore en compression } \sigma = -E_s (-\varepsilon)^\alpha \quad \text{avec } \alpha > 1 \quad \text{pour la partie ENL} \quad [1]$$

$$F(t) = B \left( \frac{t}{a(\theta, \text{âge})} \right)^\beta \quad \text{avec } 0 < \beta < 1 \quad \text{pour la partie VE} \quad [2]$$

L'équation (1) est une loi inspirée de la loi de Boyce avec  $\alpha = \frac{1}{n}$ . La seconde est une simplification du modèle de Huet par l'utilisation d'un unique amortisseur parabolique, qui à ce stade est considéré suffisant pour rendre compte du comportement viscoélastique de l'enrobé à l'émulsion. On peut supposer que la valeur  $\beta$  est proche de l'exposant  $h$  de Huet, qui représente le comportement pour des enrobés à chaud pour des valeurs de module relativement faibles (à basse fréquence ou à haute température). Dans le modèle de Huet, la fonction  $a(\theta)$  tient compte de la sensibilité de la viscosité du liant bitumineux à la température. Plus  $a(\theta)$  est grand, plus le liant de l'enrobé à chaud est rigide. Dans le modèle pour l'enrobé à l'émulsion, cette fonction est également supposée rendre compte de son mûrissement et notée en tant que  $a(\theta, \text{âge})$ . En diminuant avec la température, cette fonction augmente avec le mûrissement. La variable mûrissement est elle-même considérée comme une fonction réelle, principalement en fonction du temps et de l'historique de la température et de l'humidité [VALENTIN 14] auquel le matériau est soumis pendant sa durée de vie. Cet aspect n'est pas détaillé ici.

Pour réaliser la « fusion continue » de ces deux lois, nous allons commencer par appliquer à chacune d'entre elles la notion de décomposition spectrale en éléments placés en série. Nous utiliserons pour ce faire, une même variable adimensionnelle  $l$  variant de 0 à  $+\infty$  permettant d'indexer les éléments spectraux des deux séries.

### 2.2. 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 constituées d'un ressort et d'une butée en compression (figure 1). Le ressort est pris constant sur l'ensemble des éléments, égal à la valeur  $E_s$  de l'équation (1) qui a la dimension d'un module. Les ouvertures  $b(l) > 0$  des

butées sont fonction du « numéro d'élément »  $l$  et dépendent de la loi ENL  $\sigma(\varepsilon)$  considérée. Cette fonction peut être supposée sans restriction, monotone décroissante (figure 2).

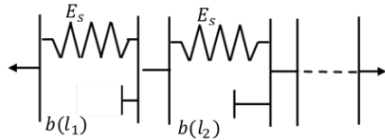


Figure 1. Spectre en série pour ENL.

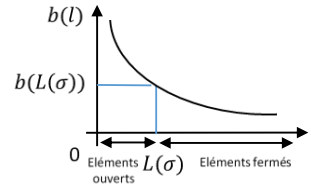


Figure 2. Evolution de la variable  $b(l)$ .

Sous un état de compression donné, le spectre présente deux parties : l'ensemble d'éléments ouverts pour  $l$  compris entre 0 et  $L(\sigma)$  et l'ensemble d'éléments fermés pour  $l$  compris entre  $L(\sigma)$  et  $+\infty$ . La valeur  $L(\sigma)$  est solution de l'équation implicite :

$$b(L(\sigma)) = -\frac{\sigma}{E_s} \quad [3]$$

La représentation générale de la fonction  $b(l)$  en fonction de la loi ENL  $\sigma(\varepsilon)$  (équation (1)) qui satisfasse l'inégalité  $\alpha > 1$  s'écrit sous la forme :

$$b(l) = \frac{1}{(\alpha l)^{\alpha-1}} \quad [4]$$

### 2.3. Représentation de la loi de fluage sous forme spectrale

Ce type de représentation est classique. Il s'appuie sur la mise en série d'éléments de Kelvin-Voigt d'élasticité constante (module  $E$ ) et de viscosité  $\eta(l)$  fonction de  $l$  (figure 3).

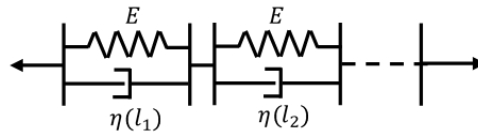


Figure 3. Spectre de viscoélasticité.

La fonction de fluage associées à ce spectre s'écrit sous la forme :

$$F(t) = \frac{1}{E} \int_0^{+\infty} \left( 1 - e^{\frac{-t}{a(\theta, \hat{a}ge) \zeta(l)}} \right) dl \quad [5]$$

Avec  $\eta(l) = E a(\theta, \hat{a}ge) \zeta(l)$ .

Le calcul général de  $\zeta(l)$  associé à l'équation générique (2) et à la loi de fluage (5) s'écrit sous la forme :

$$\zeta(l) = \left( \frac{\Gamma(1 - \beta)}{E B} \right)^{\frac{1}{\beta}} l^{\frac{1}{\beta}} \quad [6]$$

### 2.4. « Fusion » VE + ENL par spectre d'éléments à 3 branches

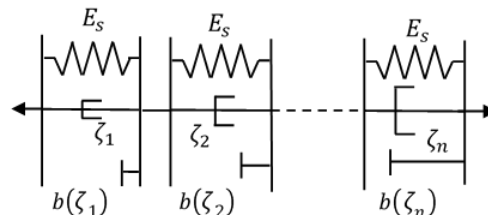


Figure 4. Spectre à trois branches.

Le modèle à 3 branches résulte comme illustré sur la figure 4 de la « superposition » des deux spectres d'élasticité non linéaire et viscoélastique obtenus précédemment. Les ressorts des deux spectres ont été « fusionnés » et pris égaux au module  $E_s$  de la loi d'élasticité non linéaire prise en modèle, ce qui présente l'avantage de minimiser le nombre de paramètres à introduire. Par ailleurs, pour simplifier la représentation

spectrale, on substitue à la variable  $l$  de numération des éléments, la variable de temps caractéristique  $\zeta$  en éliminant  $l$  entre les équations 4 et 6. Le spectre est alors caractérisé par la fonction  $b(\zeta)$  :

$$b(\zeta) = \left( \frac{E_s B \alpha}{\Gamma(1 - \beta)} \right)^{\frac{\alpha}{\alpha-1}} \left( \frac{1}{\zeta} \right)^{\frac{\beta\alpha}{\alpha-1}} \quad [7]$$

En se basant sur des valeurs typiques des exposants  $\alpha$  et  $\beta$  de l'ordre respectivement de 1.4 (exposant de Boyce pour une grave non traité) et 0.6 (exposant du côté des faibles valeurs de module pour le modèle de Huet appliqué aux enrobés à chaud), on supposera dans cette équation, l'exposant  $\frac{\beta\alpha}{\alpha-1}$  supérieur à 1 qui rend  $b(\zeta)$  monotone, décroissant de  $+\infty$  à 0 lorsque  $\zeta$  varie de 0 à  $+\infty$ . En notant,  $\varepsilon(\zeta, t)$  la « déformation élémentaire » de l'élément d'indice  $\zeta$ , la déformation totale  $\varepsilon(t)$  du spectre s'écrit alors :

$$\varepsilon(t) = \frac{E_s B \beta}{\Gamma(1 - \beta)} \int_0^{+\infty} \frac{\varepsilon(\zeta, t)}{\zeta^{1-\beta}} d\tau \quad [8]$$

### 3. Validation du modèle de comportement 1D

Plusieurs historiques de contrainte en compression de 0.8 MPa maximum ont été programmés sur Visual basic pour en extraire la réponse en déformation (figure 6 et 7). Comme décrit sous l'équation (7), nous nous baserons sur les valeurs typiques de l'exposant  $\beta = 0,6$  et l'exposant  $\alpha = 1,4$ . Nous avons calé le paramètre  $E_s$  en imposant une déformation  $\varepsilon = 10^{-3}$  pour 0,8 MPa de contrainte imposée, qui représente une déformation moyenne pour une GNT sous cette contrainte. Le calage du paramètre  $a$  permet de faire varier le poids de la viscosité dans le modèle.

#### 3.1. Etude de la réponse du modèle de comportement 1D sous diverses sollicitations

Ici le paramètre  $a$  a été calculé pour obtenir un module sécant en viscoélasticité égal à 800 MPa à 0,02 secondes. La déformation résultant du modèle pour l'enrobé à l'émulsion est représentée par la courbe continue (en vert sur la figure 6). Nous avons superposé à cette courbe les déformations calculées par des modèles ENL et VE « génériques » (équations (1) et (2)).

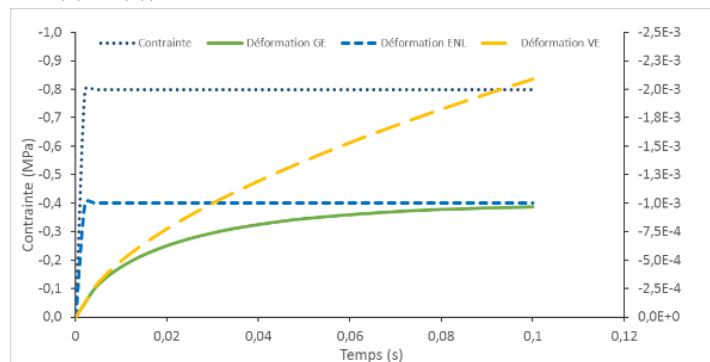


Figure 5. Modélisation d'un essai de fluage.

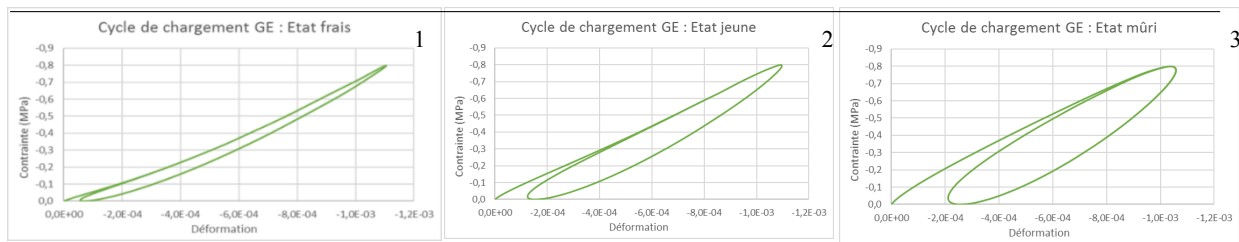
On observe aux temps courts, une réponse du modèle pour l'enrobé à l'émulsion identique à la réponse du modèle VE. Nous pouvons voir aux temps plus longs que la courbe de déformation du modèle tend asymptotiquement vers celle issu du modèle « ENL ».

#### 3.2. Application du modèle de comportement à différents stades de mûrissement

Un essai cyclique à 20°C, 1 Hz à contrainte imposée a été modélisé sur Visual Basic. Pour obtenir la figure 7, la valeur du paramètre viscoélastique  $a$  a été posé arbitrairement pour voir la variation du comportement du matériau, il a été calé afin d'avoir :

- un module sécant à 500 MPa à 0,02 secondes pour l'état frais
- un module sécant à 1000 MPa à 0,02 secondes pour l'état jeune
- un module sécant à 1600 MPa à 0,02 secondes pour l'état durci

La figure 7-1 présente des boucles relativement fermées et de forme convexe ce qui reflète un comportement essentiellement de type ENL. Alors que la figure 7-3 présente trois boucles plutôt ouvertes et de forme elliptique caractéristique d'un comportement de type VE. La figure 7-2 présente un comportement intermédiaire qui se situe entre le comportement ENL (figure 7-1) et le comportement VE (figure 7-3).



**Figure 6.** Modélisation de trois cycles de chargement : 1 - à l'état frais, 2 - à l'état jeune, 3 - à l'état durci

#### 4. Conclusion et perspectives

Cet article présente la nécessité de développer une loi de comportement pour enrobé à froid qui pour l'instant n'existe pas afin qu'il puisse être utilisé en tant que couche structurante. Nous développons dans cet article une loi de comportement pour l'enrobé à l'émulsion détaillé en 1D et programmé sous Visual Basic pour différentes sollicitations en contrainte. Les représentations théoriques du comportement des enrobés à l'émulsion montrent bien la rigidification du matériau ainsi que l'élargissement progressive des boucles dans la représentation contrainte déformation qui traduit, au cours du temps, une augmentation du poids de la viscosité dans le comportement mécanique de ces matériaux.

#### 5. Bibliographie

- [BOYCE 80] 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.
- [GOYER 12] 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.
- [HORNYCH 09] 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.
- [HUET 63] Huet, C. (1963). *Comportement viscoélastique d'un matériau hydrocarboné*. C.R. Acad. Sci. Paris 257, 1438-1442.
- [SALOMON 06] Salomon, D. R. (2006). *Asphalt emulsion technology* (Transportation Research Circular E-C102), Transportation Research Board.
- [REDELIUS 16] 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
- [SERFASS 11] 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.
- [SERFASS 03] 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
- [VALENTIN 14] 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
- [WENDLING 16] Wendling, L., Gaudefroy, 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.