

Modélisation du module de rigidité des mélanges bitumineux

Mustapha AMRANI^{1*}, Mohamed BARBACHI¹

¹Equipe Matériaux, Mécanique et Génie Civil, ENSA, Université Ibn Zohr, BP 1136 Agadir - Maroc

*Auteur correspondant : amrani.be.2p@gmail.com

Résumé

L'article présenté s'inscrit dans le cadre de la recherche de nouvelles approches théoriques relatives à la détermination du module de rigidité basées sur les résultats in situ. Le travail consiste à développer des nouvelles techniques de dimensionnement permettant d'obtenir des mélanges bitumineux à module de rigidité élevé présentant ainsi des performances mécaniques et rhéologique qui permettent de réduire les épaisseurs de mise en œuvre (éco-optimisation, moins polluant) et d'avoir une bonne résistance à l'orniérage, à la fatigue et aux fissurations thermiques (longévité accrue).

Dans ce cadre, nous avons effectués une exploitation des données de formulations correspondant aux essais de laboratoire pour optimiser de manière systématique le module de rigidité dans les mélanges bitumineux. L'objectif final étant de proposer des formules de prédiction fiables basées sur les facteurs les plus prépondérants, et d'autre part, de proposer des améliorations pour mieux maîtriser le comportement thermomécanique et rhéologique des enrobés et assurer ainsi une longue durabilité des chaussées.

Mots Clés : Essais de formulation, rhéologie du bitume, facteurs d'influence, module de rigidité, durabilité des chaussées, comportement thermomécanique.

1. Introduction

La composition des enrobés à module élevé est déterminée suite à une épreuve de formulation qui doit permettre d'obtenir les performances exigées dans le cahier de charges du projet concerné.

L'accord de mise en œuvre de mélanges bitumineux à module élevé est conditionné par la réalisation d'essais de formulation et par le respect des seuils de performance stipulé par les normes en vigueur. Ces performances ne sont donc valables que pour une composition bien définie et un compactage fixé. Or sur le terrain, les aléas de chantier ne permettent pas de garantir ces différents critères et entraînent parfois des écarts sur le dosage des constituants et la mise en œuvre du matériau, ce qui conduit à une importante diminution de la durée de vie de la chaussée.

2. Facteurs d'influence sur le module de rigidité

Suite à de nombreuses études réalisées sur le module de rigidité des mélanges bitumineux dans le domaine viscoélastique linéaire, on montre que celui-ci est directement influencé par :

❖ Facteurs liés à l'essai :

- Le niveau et la fréquence de sollicitation
- La température

❖ Facteurs liés à la composition

- La formulation

❖ Facteurs liés à la mise en œuvre

- La fatigue (vieillessement)

Le tableau de la figure 1 présente l'évolution du module de rigidité en fonction des différents paramètres.

Figure 1 : Evolution du module de rigidité

paramètre	paramètre	effet sur le Module
paramètres de l'essai		
température	↗	↘
Mise en œuvre		
vieillessement	↗	↘
composition		
teneur en liant	↗	↗ 5 à 6% ↘
% des fines	↗ ++	↗ 8 à 9% ↘
D	↗	↗
% des vides	↗	↗
pénétrabilité	↗	↗

3. Formules de prédiction du module de rigidité des enrobés

La réalisation des essais du module de rigidité des enrobés bitumineux lors de l'épreuve de formulation est longue et coûteuse. La recherche des formules fiables de prédiction de la valeur de ce module à partir des facteurs les plus influents apparaît comme solution très recommandée pour les ingénieurs de dimensionnement des structures de chaussées.

Plusieurs types de formules prévisionnelles ont donc été développés pour établir une relation empirique entre le module de rigidité et les différents constituants du

mélange. Citons, à titre d'exemple, les relations d'Heukelom et Klomp [1], d'Ugé et al. [2], de Francken et al. [3] [4] [5] et de Witczak et al. [6] [7].

Aussi séduisantes qu'elles puissent paraître ces formules, il convient de garder à l'esprit que Such et al. [8] ont récemment mis en évidence que les trois premières relations, appliquées à un sable enrobé, conduisent à des erreurs importantes.

A noter également que les formules d'Heukelom et Klomp [1], d'Ugé et al. [2], de Francken et al. [3] [4] [5] et de Witczak et al. [6] [7] ne tiennent pas compte de la taille (D_{max}), de la forme (coefficient d'aplatissement), ni de la rugosité des granulats définis uniquement par leur volume. Cela revient notamment à négliger le frottement interne du mastic et les granulats.

D'autre part, Dongre et al. [9] ont prouvé que le modèle Witczak et al [6] [7] surestime le module pour les échantillons testés à des valeurs inférieures à 125 000 psi.

4. Essais de formulation

Les propriétés recherchées pour un matériau bitumineux dépendent de la couche dans laquelle il est employé de manière à répondre aux objectifs suivants ;

- Aptés à être mis correctement en œuvre sur chantier
- Aptés à résister aux sollicitations liées au reste de la construction de l'ouvrage (module suffisant)
- Aptés à satisfaire les exigences de durabilité structurelles ou de qualité d'usage des chaussées, spécifiées par les cahiers de charge.

Dans ce cadre plusieurs essais de formulation ont été analysés dans le but de tirer des formules mathématiques de prédiction des valeurs du module en se focalisant surtout sur les facteurs clés (hors ceux qui sont liés à l'essai et ceux liés à la mise en œuvre) qui sont d'après l'expérience :

- Teneur en bitume
- Mastic (frottement interne, angularité des sables...)
- Masse volumique (% des vides)
- Pénétrabilité du bitume
- Teneur en fines
-

A notre connaissance, peu d'auteurs ont établi des relations de module complexe de l'enrobé en introduisant la masse volumique, retour élastique du bitume et le pouvoir rigidifiant des fines.

Nous présentons ci-dessous, le tableau 1 récapitulant les données de 8 formulations de béton bitumineux à module élevé BBME0/14 fabriqué à partir d'un bitume 20/30 modifié.

Le but de ce travail étant de classer les facteurs ayant plus d'influence sur les résultats des modules par rapport aux autres.

Tableau1 : résultats des formulations des enrobés à module élevé

n°	pouvoir rigidifiant	% des fines	% bitume	pénétrabilité /100	masse volumique	retour élastique	E*
1	13	0,0530	0,0520	0,34	2,332	83	12 298
2	15	0,0560	0,0550	0,28	2,382	89	11 142
3	12	0,0630	0,0570	0,27	2,409	75	12 415
4	13,5	0,0530	0,0540	0,25	2,314	89	13 952
5	13,5	0,0490	0,0540	0,28	2,314	89	12 440
6	11	0,0620	0,0530	0,27	2,5	90	14 533
7	11,5	0,0660	0,0560	0,30	2,452	94	12 170
8	12	0,0480	0,0550	0,20	2,425	79	12 855

5. Modèle mathématique

Une analyse de variance qui fait appel au concept de la régression linéaire à partir duquel il est théoriquement possible de prédire le module de rigidité connaissant sa teneur en liant, le pouvoir rigidifiant des fines, retour élastique, la masse volumique, teneur en fines et la pénétrabilité du bitume.

On suppose que les variables X_i (facteurs d'influence) sont indépendants, si on attribue à chaque facteur l'indice suivant :

X1 : pouvoir rigidifiant

X2 : % des fines

X3 : teneur en bitume

X4 : pénétrabilité du bitume

X5 : masse volumique du mélange

X6 : retour élastique

Après calcul, nous obtenons le modèle mathématique de prédiction selon la formule suivante :

$$E^* = C + A_1X_1 + A_2X_2 + A_3X_3 + A_4X_4 + A_5X_5 + A_6X_6$$

Avec :

$$C = 94485,24 ; A_1 = -453,54 ; A_2 = 208204,19 ;$$

$$A_3 = -786015,77 ; A_4 = -34937,53 ; A_5 = -14866,17$$

$$A_6 = 2,68$$

6. Conclusion

Les résultats formulés dans le tableau 1 conduisent aux conclusions suivantes :

- La formulation qui a donné lieu à la valeur maximale du module de rigidité est celle qui présente une teneur en bitume la plus faible et une teneur en fines élevée (sous entendu à un certain niveau à ne pas dépassé)
- Ceci s'aligne parfaitement avec l'équation de prédiction mentionnée ci-dessus

En agissant sur les facteurs classés en tête de liste, on obtient des résultats meilleurs avec de faibles incertitudes. La méthode consiste à déterminer les valeurs spécifiées inférieures V_{si} et supérieures V_{ss} de chaque constituant tout en respectant les contraintes relatives au niveau exigé (la tenue à l'eau, la compactibilité, l'orniérage et la fatigue le cas échéant).

Références

- [1] HEUKELOM, W., KLOMP, J.G., "Road design and dynamic loading", Proceedings AAPT, Vol. 33, 1964.
- [3]. FRANCKEN, L., VANELSTRAETE, A., "Relation between mix stiffness and binder complex modulus", The Rheology of Bituminous Binders, Eurobitume Workshop, 1995.
- [4]. FRANCKEN, L., VANELSTRAETE, A., "Complex moduli of bituminous binders and mixes. Interpretation and evaluation", 1st European Eurobitume and Euraspalt Congress, Strasbourg, 1996.
- [5]. FRANCKEN, L., VANELSTRAETE, A., LEONARD, D., PILATE, O., "New developments in the PRADO volumetric mix design", 6th international RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials, Zurich, avril 2003.
- [2] UGE, P., GEST, G., GRAVOIS, A., "Nouvelle méthode de calcul du module complexe des mélanges bitumineux", Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, N° spécial V, 1977, pp. 199-213.
- [6] WITCZAK, M.W., ANDREI, D., MIRZA, W., "Development of Revised Predictive Model for the Dynamic (Complex) Modulus of Asphalt Mixtures", Interteam Technical Report, NCHRP Project 1-37A, University of Maryland, March 1999.
- [7]. WITCZAK, M.W., PELLINEN, T.K., AC Mixture Response Comparison to Performance E^* and S_m Prediction Equation Methodology Results, Superpave Support and Performance Models Management, NCHRP 9-19, Task C – Simple Performance Test, WesTrack Experimental Site, July 2000
- [8] SUCH, C., HADRZYNSKI, F., RAMOND, G., "Sand Asphalt Rheology", Proc. Eurobitume Workshop, Luxembourg, paper 54, 1999.
- [9] R. Dongre, L. Myers, J. D'Angelo, C. Paugh, J. Gudimettla, Field evaluation of Witczak and Hirsch models for predicting dynamic modulus of Hot-Mix Asphalt, J. Assoc. Asphalt Paving Technol. Proc. Tech. Sess. 74 (2005).