

MODÉLISATION PAR LA MÉTHODE DES PLANS D'EXPÉRIENCES DU MODULE DE RIGIDITÉ D'UN ENROBÉ BITUMINEUX MODIFIÉ PAR AJOUT DE POLYMÈRES

MODELING OF THE STIFFNESS MODULUS OF A POLYMER MODIFIED ASPHALT VIA THE EXPERIMENTAL DESIGN METHOD

AMINE MEKSEN¹ ET MAHMOUD BENSAIBI²

1- Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics, Alger, Algérie, email: amine7my@hotmail.fr

2- Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics, Alger, Algérie, email: bensaibim@yahoo.co.uk

Date de réception : 07/04/2016 / Date d'acceptation : 29/08/2016 / Date de publication : 30/01/2017

RÉSUMÉ

La modification d'enrobés bitumineux par l'ajout de polymères se révèle être une méthode prometteuse pour améliorer la résistance des routes à l'orniérage et à la fatigue. Ceci permettra de réaliser des chaussées à plus longue durée de vie. Dans le but d'étudier le comportement de ces enrobés, nous proposons de réaliser un modèle mathématique du module de rigidité d'un enrobé modifié en fonction des paramètres jugés les plus influents. Cela permettra de prévoir par le calcul, le module de rigidité d'un enrobé modifié en fonction de paramètres donnés. Nous avons utilisé la méthode des plans d'expériences afin de minimiser le nombre d'essais nécessaire à l'élaboration du modèle et ainsi obtenir un maximum d'information en effectuant un minimum d'expériences. Ce travail a donc permis de modéliser par plan d'expériences le module de rigidité d'un enrobé modifié par ajout du plastomère PR Plast SAHARA afin d'observer ses variations en fonction de sa teneur en liant, de son taux d'additif et de sa température de fabrication.

Mots clés : Enrobés bitumineux modifiés, Polymères, Plans d'expériences, Module de rigidité, Nottingham Asphalt Tester.

ABSTRACT

Asphalt modification by polymer addition has shown to be a promising technique to improve the resistance to rutting and fatigue which allows the construction of long-life pavements. In order to study the behavior of modified asphalt we propose modeling its stiffness modulus depending on the most influential parameters. This is to establish a mathematical relationship that predicts by calculation the stiffness modulus of modified asphalt according to given parameters. The experimental design method was used to optimize the experimentation and minimize the number of trials required to develop the model. The aim of this work is to model using an experimental design the stiffness modulus of a modified asphalt by addition of plastomer PR Plast Sahara according to the binder content, the additive percentage and the production temperature..

Keywords: Modified asphalt, Polymers, Experimental designs, Stiffness modulus, Nottingham Asphalt Tester.

1. INTRODUCTION

Les dégradations principales que subit une chaussée sont l'orniérage et les fissures de fatigue. L'utilisation des enrobés modifiés par ajout de polymères est un moyen de réduire ces endommagements et par conséquent d'améliorer la qualité de service de la chaussée et augmenter sa durée de vie [1] [2] [3]. Des études ont montré que la contribution du module de rigidité du liant à la résistance à l'orniérage d'un enrobé est d'environ 50% et que les enrobés modifiés aux styrène-butadiène-styrène (SBS) et aux styrène-butadiène-rubber (SBR) étaient significativement plus résistants à la fatigue et à l'orniérage, mais que la granulométrie de l'enrobé avait peu d'influence sur ces caractéristiques, pourvu que la courbe granulométrique soit comprise dans le fuseau de référence [4] [5].

L'amélioration du bitume par ajout de polymères se révèle donc un moyen de réduire significativement ces endommagements et par conséquent d'améliorer la qualité de service de la chaussée et prolonger sa durée de vie.

Les deux types de polymères ajoutés au bitume sont [6]:

Les élastomères ;

Les plastomères.

L'élastomère absorbe les fractions de pétrole du bitume et gonfle jusqu'à neuf fois son volume initial. A une concentration appropriée, une phase continue de polymère est formée à travers le bitume et modifie de manière significative ses propriétés. Son comportement dans le domaine élastique est amélioré par une grande résistance aux déformations [7] [8]. L'élastomère le plus utilisé est le SBS (Styrène-Butadiène-Styrène). D'après de nombreux auteurs, il s'agit du polymère le plus adapté à la modification du bitume [9].

Les plastomères sont une classe de polymères linéaires dérivés de l'éthylène. Ils agissent différemment des élastomères : ils augmentent la viscosité et la rigidité du bitume en formant des structures en réseaux rigides résistants aux déformations. Un plastomère, sous l'action d'une contrainte, peut subir une déformation élastique accompagnée d'une déformation plastique. Les plastomères les plus utilisés dans la modification du bitume sont les EVA (Éthylène acétate de vinyle) [10].

Le comportement rhéologique du mélange bitume-polymère est d'un grand intérêt car en dépend la performance de la chaussée. En effet, de part leur poids moléculaire élevé, la formation d'un système uniforme au sein de la matrice de bitume peu s'avérer compliqué et poser des problèmes de compatibilité. Becker a démontré que le mélange bitume-polymères se comporte différemment selon qu'il soit faiblement, moyennement ou fortement dosé en polymères [11] [12].

Dosées faiblement, les polymères sont répartis dans la matrice continue de bitume. Pour des températures élevées le module de rigidité du polymère étant plus important que celui du bitume, il en résulte une amélioration de la résistance à l'orniérage et en ce qui concerne les basses températures le module de rigidité du polymère est plus bas que celui du bitume et l'empêche donc de se fissurer.

Le bitume dosé moyennement de polymère, présente des microstructures dans lesquelles les deux phases sont liées. Ils sont instables et dépendent fortement de la température.

En présence de grandes quantités d'additif, le polymère devient la phase continue du mélange à la place du bitume qui y est dispersé. Le mélange prend les caractéristiques du polymère plastifié par

les huiles du bitume et ne peut être utilisé dans la confection de chaussée [13].

Le but de notre étude est d'établir un modèle mathématique permettant de quantifier le module de rigidité d'un enrobé bitumineux modifié par ajout de PR Plast SAHARA qui est un mélange de polyoléfines pré-gavé au bitume.

2. OBJECTIF ET MÉTHODOLOGIE

Dans le but d'étudier les caractéristiques d'un enrobé modifié en fonction des paramètres jugés les plus influents, nous nous proposons de le modéliser. Ceci consiste à établir une relation mathématique qui permet de déterminer par le calcul, des résultats de ses caractéristiques (sorties) qui varient en fonction de paramètres donnés (entrées). La figure 1 schématise le principe de la modélisation.

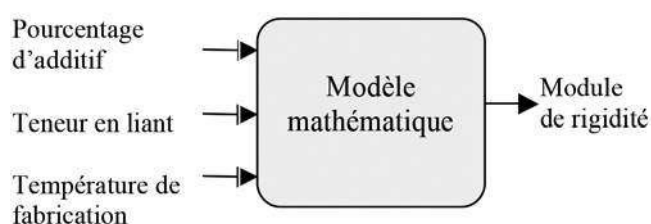


Figure 1: Modélisation du module de rigidité
Figure 1: Modelling of the stiffness modulus

Pour développer le modèle, des essais de mesure du module de rigidité seront réalisés au Nottingham Asphalt Tester. Afin d'en minimiser le nombre, nous avons utilisé la méthode des plans d'expériences.

2.1. Plan d'expériences

Un plan d'expériences est une suite ordonnée d'essais d'une expérimentation, chacune permettant d'acquérir de nouvelles informations en faisant varier un ou plusieurs paramètres et ce, en réalisant le moins d'essais possible [14].

Les étapes d'une étude par plans d'expériences sont les suivantes :

- Choix des paramètres représentatifs du phénomène à étudier (réponses) ;
- Détermination des facteurs potentiellement influents sur ces réponses ;
- Choix du domaine d'étude des facteurs ;
- Détermination des expériences à réaliser ainsi que leur ordre d'exécution ;
- Analyse de l'influence des facteurs et de leurs interactions ;
- Etablissement d'un modèle mathématique.

Le plan choisi pour la suite du travail est un plan de Box-Behnken. Ce plan ne peut être utilisé qu'à partir de trois facteurs et s'avère être économiquement avantageux pour l'élaboration de modèles quadratiques [15]. La figure 2 montre un plan de Box-Behnken à trois facteurs. Le cube représente l'espace expérimental et les points rouges représentent les essais expérimentaux qui sont répartis à égale distance du centre du domaine d'étude.

Les plans de Box-Behnken possèdent la propriété de séquentialité et répondent au critère d'isovariance par rotation (l'erreur de prévision des réponses est la même pour tous les points).

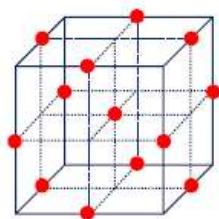


Figure 2: Représentation graphique du plan de Box-Behnken

Figure 2: Graphic representation of the Box-Behnken design

Dans un travail précédent, Harizi et al. ont permis l'identification des paramètres les plus influents sur le module de rigidité [16]. Le tableau 1 énumère les facteurs influents.

Tableau 1 : Facteurs du plan d'expériences

Table 1 : Experimental Design Factors

Facteur	Type
Teneur en liant	Quantitatif
Taux d'additif	Quantitatif
Température de fabrication	Quantitatif

Le module de rigidité E sera exprimé par un polynôme du second degré avec interactions entre les paramètres dont la forme est donnée par l'équation (1).

$$E = c_0 + c_1L^2 + c_2L + c_3A^2 + c_4A + c_5T^2 + c_6T + c_7LA + c_8LT + c_9AT \quad (1)$$

où L est la teneur en liant, A , la teneur en additif, T , la température de fabrication, et c_i , les coefficients à déterminer ($i = 1 \dots 9$).

3. EXPÉRIMENTATION

3.1. Matériaux utilisés et leur provenance

Le matériau confectionné est un béton bitumineux modifié 0/14. Il est composé de granulats, de sable concassé 0/3 et de graviers des fractions 3/8, 8/15 enrobés de bitume 35/50 en plus de l'additif PR PLAST SAHARA de granulométrie 0/2. Ce dernier est fabriqué à partir de plastomère pré-gavé à l'huile dont le rôle est d'améliorer le module de rigidité et la tenue à l'orniérage. Les matériaux proviennent de la carrière de Keddara en Algérie.

3.2. Confection des éprouvettes

Les pourcentages pondéraux arrêtés pour la confection des éprouvettes sont répertoriés dans le tableau suivant:

Tableau 2 : Pourcentages pondéraux des fractions

Table 2: Fractions weight percentages

Fraction	Pourcentage pondéral
8\15	33%
3\8	25%
0\3	42%

Le pourcentage pondéral de chaque fraction a été choisi de sorte

que le squelette granulaire s'inscrive dans le fuseau de référence. La figure 3 représente la courbe granulaire ainsi obtenue.

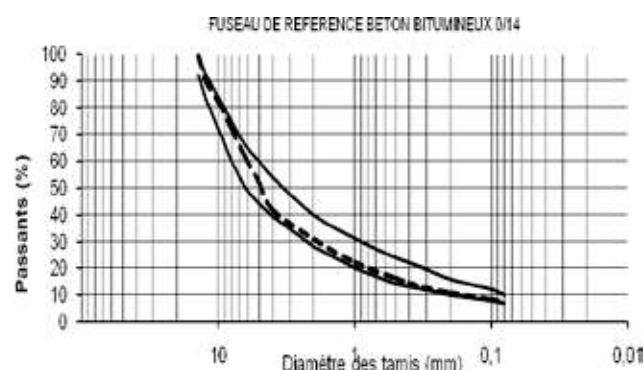


Figure 3: Courbe granulométrique de la formulation

Figure 3: Aggregates grading curve

Les éprouvettes destinées aux essais sont des éprouvettes cylindriques de diamètre 100 mm et d'épaisseurs de 65 mm en moyenne. Elles ont été confectionnées pour des teneurs en liant, en additif et des températures différentes selon le plan d'expérience.

3.3. Caractérisation

Le module de rigidité des enrobés bitumineux est déterminé par le Nottingham Asphalt Tester qui permet un essai de traction indirecte. Cet appareil utilise des échantillons cylindriques prélevés de la chaussée par carottage, ou bien préparés en laboratoire. Ces échantillons sont soumis de façon répétée à une charge verticale de compression, provoquant une déformation horizontale d'où est déduit le module de rigidité.

4. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

Les résultats de l'essai sont présentés dans le tableau suivant:

Tableau 3 : Plan d'expériences retenu et résultats des essais

Table 3: Experimental design and test results

Essai	Teneur en liant	Taux d'additif	Température	Module de rigidité
1	4.5%	0.2%	180° C	7891
2	6.5%	0.2%	180° C	4431
3	4.5%	0.8%	180° C	6036
4	6.5%	0.8%	180° C	6380
5	4.5%	0.5%	170° C	5840
6	4.5%	0.5%	190° C	6434
7	6.5%	0.5%	170° C	7138
8	6.5%	0.5%	190° C	6687
9	5.5%	0.2%	190° C	7583
10	5.5%	0.8%	170° C	10538
11	5.5%	0.2%	170° C	6875
12	5.5%	0.8%	190° C	6450
13	5.5%	0.5%	180° C	8990
14	5.5%	0.5%	180° C	8591
15	5.5%	0.5%	180° C	8326

Pour chaque essai, trois éprouvettes ont été réalisées et c'est la moyenne des résultats qui servira aux calculs. Une valeur aberrante pourra aussi être éliminée si elle est éloignée des deux autres. L'utilisation de ce plan a permis l'établissement du modèle après 45 essais au lieu de 81.

4.1. Etablissement du modèle

Les coefficients du modèle ont été calculés par l'exploitation de la méthode des moindres carrés. La formule (1) devient donc :

$$E = 8635 - 1894L^2 - 195L - 557A^2 + 320A - 217T^2 - 404T + 950LA - 261LT - 1199AT \quad (2)$$

Les coefficients les plus élevés correspondent aux paramètres les plus influents. Dans ce cas il s'agit de la teneur en liant (1894), de l'interaction liant/additif (950) et de l'interaction additif/température (1199). Le coefficient de détermination qui représente la précision du modèle est de 0.83.

La surface de réponse pour une valeur de température fixe (Fig.4) montre clairement que la teneur en liant optimale est de 5.5 %. En effet pour des valeurs faibles de liant, les granulats ne sont pas assez enrobés, ce qui conduit à une faible adhésivité et un grand indice de vide. De plus, une quantité excessive de liant pose aussi problème en limitant les efforts de contact entre agrégats. Ceci conduit la matrice de bitume à assurer la résistance aux déformations faisant ainsi chuter le module de rigidité de l'enrobé.

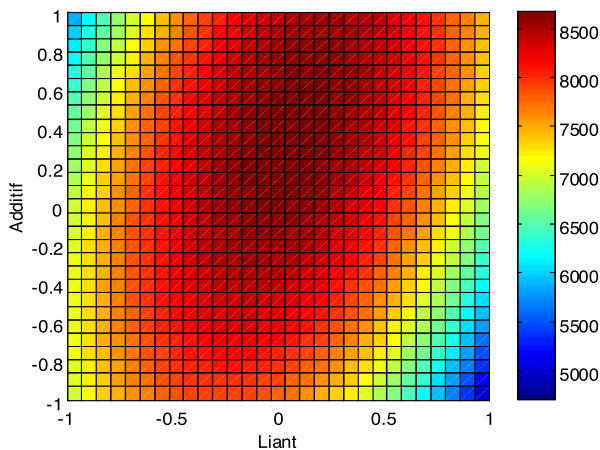


Figure 4 : Surface de réponse pour une valeur de température 180°C
Figure 4 : Response surface for a temperature of 180°C

La surface de réponse pour une teneur en liant fixe (Fig. 5) permet d'observer l'interaction entre le pourcentage d'additif et la température de fabrication. Les valeurs maximales du module de rigidité sont atteintes pour des pourcentages d'additifs élevés et des températures basses. Il est donc à supposer que les températures élevées font non seulement perdre à l'additif ses propriétés rigidifiantes mais le transforment à tel point qu'il fait chuter le module de rigidité de l'enrobé.

La surface de réponse pour un pourcentage d'additif fixe (Fig. 6) exprime l'interaction entre la teneur en liant et la température de fabrication. Cette interaction est faible car le domaine de variation de la température reste en dessous des températures qui risquent d'endommager le bitume, celles-ci se situant autour des 200°C.

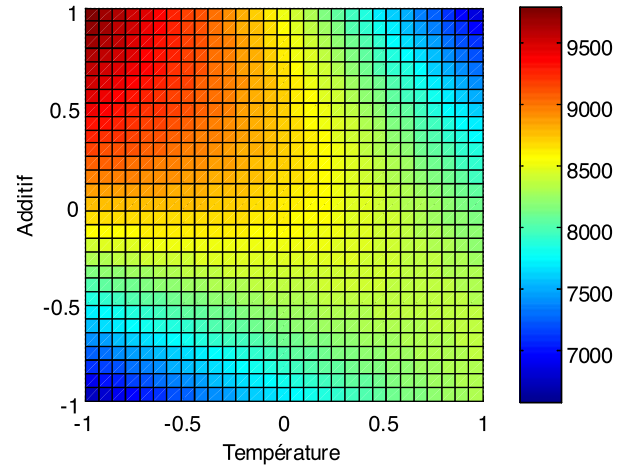


Figure 5 : Surface de réponse pour une teneur en liant de 5.5%
Figure 5 : Response surface for a binder content of 5.5%

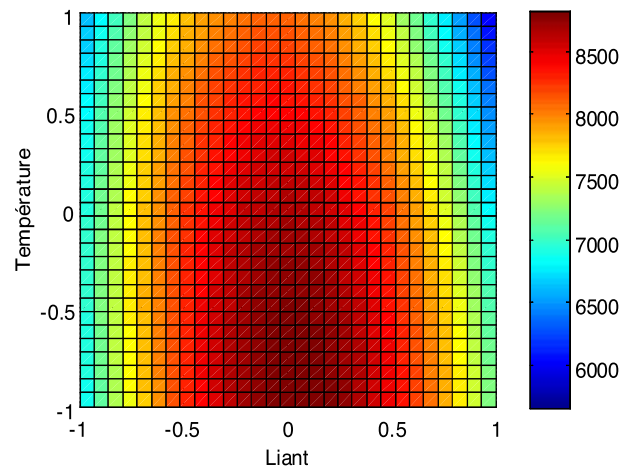


Figure 6 : Surface de réponse pour un taux d'additif de 0.5%
Figure 6 : Response surface for an additive content of 0.5%

5. CONCLUSIONS

Ce travail a été consacré à l'élaboration d'un modèle mathématique déterminant le module de rigidité d'un enrobé modifié, en fonction des paramètres les plus influents à savoir sa teneur en liant, le pourcentage d'additif incorporé et la température de fabrication. Le modèle n'est néanmoins valable que dans le domaine expérimental de l'étude.

L'utilisation de la méthode des plans d'expériences a permis de réduire le nombre d'essais nécessaires de moitié, ce qui permet un gain de temps et d'énergie considérable.

Le modèle ainsi obtenu a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Les paramètres les plus influents sur le module de rigidité d'un enrobé modifié sont la teneur en liant, l'interaction liant / additif et l'interaction additif / température ;
- La teneur en liant optimale est de 5.5 % ;
- Pour une température de fabrication élevée, l'additif produit l'effet inverse et fait chuter le module de rigidité ;
- Les valeurs maximales du module de rigidité sont atteintes pour des pourcentages d'additifs élevés et des températures de fabrication basses.

Cette étude sera complétée dans des travaux futurs en s'intéressant aux autres caractéristiques des enrobés, à savoir la résistance à l'orniérage et à la fatigue. Des plans d'expériences visant à les modéliser peuvent être développés de la même manière.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Lee, H. J., Lee, J. H., and Park, H. M., Performance evaluation of high modulus asphalt mixtures for long life asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 21(5), 1079-1087, 2007
- [2] Moreno-Navarro, et al. The use of additives for the improvement of the mechanical behavior of high modulus asphalt mixes. *Construction and Building Materials*, 70, 65-70, 2014
- [3] Dong, F., et al. Influence of SBS and asphalt on SBS dispersion and the performance of modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 62, 1-7, 2014.
- [4] Radziszewski, P. Modified asphalt mixtures resistance to permanent deformations. *Journal of Civil Engineering and Management*, 13(4), 307-315. 2007.
- [5] Sargand, S. M., and Kim, S. Performance evaluation of polymer modified and unmodified Superpave mixes. In 2nd Int Symp on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control. July 29-Aug 1, Auburn Alabama 2001.
- [6] Brovelli, C., et al. Using polymers to improve the rutting resistance of asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 77, 117-123, 2015.
- [7] Sengoz, B., and Isikyakar, G. Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 22(9), 1897-1905, 2008
- [8] Kim, S., Sholar, G., Byron, T., and Kim, J. Performance of polymer-modified asphalt mixture with reclaimed asphalt pavement. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2126), 109-114, 2009.
- [9] Liang, M., et al. Thermo-rheological behavior and compatibility of modified asphalt with various styrene-butadiene structures in SBS copolymers. *Materials & Design*, 88, 177-185, 2015.
- [10] Alataş, T., and Yilmaz, M. Effects of different polymers on mechanical properties of bituminous binders and hot mixtures. *Construction and Building Materials*, 42, 161-167, 2013.
- [11] Becker, Y., Mendez, M. P. and Rodriguez, Y. Polymer modified asphalt. In *Vision Tecnologica*, 9(1) 39-50. 2001.
- [12] Airey, G. D. Styrene butadiene styrene polymer modification of road bitumens. *Journal of Materials Science*, 39(3), 951-959. 2004.
- [13] Zhu, J., Birgisson, B., and Kringos, N. Polymer modification of bitumen: Advances and challenges. *European Polymer Journal*, 54, 18-38. 2014.
- [14] Goupy, J., and Creighton, L. Introduction aux plans d'expériences-3ème édition-Livre. Dunod. 2006.
- [15] Ferreira, S. C., et al. Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods. *Analytica chimica acta*, 597(2), 179-186. 2007.
- [16] Harizi, I., Morsli, M., and Bensaibi, M. Laboratory Evaluation of the Stiffness Modulus of a Modified Bituminous Concrete with PR PLAST Sahara. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 7(2), 132. 2013.