



Direction Post-Graduation & Recherche Scientifique

Soutenance de Magister

Option : Matériaux - Structures

MEKSEN Amine

Ingénieur d'Etat en Travaux Publics
Diplômée de l'Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics

Intitulé

**Modélisation par la Méthodes des Plans d'Expériences du
Module de Rigidité d'un Enrobé Bitumineux Modifié**

Soutenu publiquement le 03/09/2015 devant le Jury composé de :

M. HADID	Professeur, ENSTP	Président
M. Bensaïbi	Professeur, ENSTP	Directeur de mémoire
M. MORSLI	Professeur, ENP	Examineur
M. TAKI	MCA, ENSTP	Examineur
M. Bensaïbi	Consultant, Cosider	Invité

Remerciements

En premier lieu je tiens à exprimer toute ma gratitude à mon directeur de thèse le Professeur Mahmoud Bensaïbi qui a bien voulu m'encadrer pour la réalisation de ce travail, et qui a été présent tout au long de ce projet, me fournissant tous les moyens nécessaires pour le mener à bien.

Mes vifs remerciements vont également à tous les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail, et pour le temps qu'ils ont consacré à la lecture de ce mémoire. Je les remercie par avance pour les remarques et les conseils qu'ils voudront bien me prodiguer pour l'enrichissement de ce travail.

Je remercie sincèrement monsieur Bensaïbi Mohammed pour les précieuses connaissances sur les enrobés bitumeux qu'il a eu la gentillesse de me transmettre.

Que monsieur Sitayeb Said et tous mes anciens collègues de Cosider trouvent ici, l'expression de ma plus sincère reconnaissance pour leur présence et leur aide durant la période que j'ai passée au sein de leur laboratoire.

Ma reconnaissance à monsieur Senhaji et à l'équipe du Laboratoire Central des Travaux Publics (LCTP), qui m'ont accueilli et aidé pour la confection des éprouvettes d'essai est incommensurable. Ce travail n'aurait pu aboutir sans une réalisation parfaite des échantillons.

Les matériaux utilisés pour la réalisation des éprouvettes m'ont été gracieusement fournis par le sympathique personnel de l'Entreprise de Viabilisation de Sidi Moussa (EVSM). Je voudrais ici, leur exprimer mes sincères remerciements.

Enfin, ma gratitude va aussi à ma famille et à mes amis sur qui j'ai toujours pu compter.

الخليط البيتوميني المعدل بإضافة plastomer مقاومة للتشويه. وهذا ما يجعل استخدامها مرغوبا فيه في تحقيق الأرصفة حياة طويلة.

دراسة سلوك هذا الخليط البيتوميني المعدل تتطلب عددا كبيرا من التجارب، ونقترح في هذا العمل نموذج رياضي لدراسة خصائص معامل صلابة الخليط وفقا لمعايير تعتبر الأكثر تأثيرا. هذا يرجع إلى إقامة علاقة رياضية تحدد عن طريق الحساب، ونتائج تجارب خصائصه اعتمادا على معايير معينة. ولذا فإن نموذج يساعد على تجنب العديد من التجارب التجريبية، مما يؤدي توفير في التكلفة والوقت.

لتطوير هذا النموذج، ومع ذلك، فمن الضروري إجراء عدد من التجارب. تم تحقيق خطة تجريبية Box - Behknen للحد من هذا العدد، وبالتالي الحصول على أقصى قدر من المعلومات بإجراء الحد الأدنى من التجارب.

سيتم تقديم نموذج رياضي من شكل متعدد الحدود من الدرجة الثانية لمعامل صلابة بثلاثة متغيرات و هي كمية البيتومين، كمية المضاف ودرجة الحرارة الإنتاج وتفاعلاتها

الكلمات المفتاحية

الخليط البيتوميني ذو معامل عالي، البوليمر، تصميم التجارب، النماذج التجريبية، رصيف الأسفلت

Résumé

Les enrobés bitumineux modifiés par l'ajout d'un polymère ont une résistance à l'orniérage et à la fatigue élevés. Ceci rend leur utilisation souhaitable dans la réalisation de chaussées à longue durée de vie.

L'étude du comportement de ces enrobés nécessitant un nombre d'expériences important, nous proposons dans ce travail un modèle mathématique permettant d'étudier le module de rigidité d'un enrobé modifié en fonction des paramètres jugés les plus influents. Cela consiste à établir une relation mathématique qui permet de déterminer par le calcul, des résultats des variations de ses caractéristiques en fonction de paramètres donnés. La modélisation va donc permettre d'éviter nombre d'essais expérimentaux, entraînant ainsi des économies en coût et en temps.

Pour développer le modèle, il est toutefois nécessaire de réaliser un certain nombre d'expériences. Nous avons réalisé un plan d'expériences de Box Behknen afin de réduire ce nombre 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 en fonction de la teneur en liant, du pourcentage d'additif et de la température de fabrication.

Un modèle mathématique du module de rigidité sous forme de polynôme du second ordre à trois variables avec leurs interactions sera proposé.

Mots clés

Enrobés à module élevé, polymères, plan d'expériences, modélisation expérimentale, chaussée bitumineuse.

Abstract

The modified bituminous mixtures obtained by adding a polymer have a high resistance to rutting and fatigue. This makes their use desirable in achieving long life pavements.

Studying the behavior of these mixtures requires a large number of experiments, we propose in this work a mathematical model to study the stiffness modulus of modified asphalt according to the most influential parameters. This is to establish a mathematical relationship that determines by calculation, the results of changes in its characteristics depending on given parameters. The model will therefore help to avoid many experimental trials, thereby resulting savings in cost and time.

To develop the model, however, it is necessary to perform a certain number of experiments. A Box-Behnken experimental design was used to reduce this number and thus obtain maximum information by performing a minimum of experiments.

The aim of the 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.

A second order polynomial model of the stiffness modulus with three variables and their interactions will be offered.

Key words

High modulus asphalt, polymers, experimental design, experimental modelisation, bituminous pavement

Table des matières

Liste des figures	9
Liste des tableaux	11
Introduction générale.....	12
Chapitre 1.....	15
Etude bibliographique	15
1.1 Introduction	15
1.2 Les additifs dans le bitume	15
1.3 Revue d'études sur les enrobés modifiés par ajout de polymères	18
1.4 Compatibilité bitume-polymère	20
1.5 Classification des enrobés à modules élevés	21
1.6 Constituants des EME.....	22
1.6.1 Les granulats	22
1.6.2 Le liant	23
1.7 Caractéristiques des enrobés à module élevé	24
1.7.1 Formulation d'un BBME	24
1.7.2 Epreuve de formulation des enrobés à module élevé.....	25
1.8 Domaine d'emploi et conditions de mise en œuvre des EME	26
1.9 Durabilité des chaussées en EME.....	27
1.10 Modélisation par plans d'expériences.....	28
1.11 Conclusion	28
Chapitre 2.....	30
Généralités sur les chaussées	30
2.1 Introduction	30
2.2 Caractéristiques géométriques des routes	30
2.2.1 Tracé en plan.....	30
2.2.2 Profil en long.....	31
2.2.3 Profil en travers	31
2.3 Constitution d'une chaussée	32
2.3.1 Couche de forme	33
2.3.2 Couche d'assise.....	33
2.3.3 Couche de surface	33
2.4 Types de structures de chaussées	33
2.4.1 Les chaussées souples	34

2.4.2 Les chaussées bitumineuses épaisses	34
2.4.3 Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques	34
2.4.4 Les chaussées à structure mixte	34
2.4.5 Les chaussées à structure inverse	34
2.4.6 Les chaussées en béton de ciment	34
2.5 Dégradations des chaussées	35
2.5.1 Dégradations d'arrachement	36
2.5.2 Mouvements de matériaux	36
2.5.3 Déformations.....	36
2.5.4 Fissures	36
2.6 Enrobés bitumineux	36
2.7 Constituants d'un mélange d'enrobés bitumineux.....	37
2.8 Mise en œuvre	38
2.8.1 Enrobés bitumineux à chaud	38
2.8.2 Enrobés bitumineux à froid.....	38
2.8.3 Enrobés bitumineux tièdes	38
2.9 Comportement des enrobés bitumineux.....	39
2.10 Essais sur les enrobés bitumineux.....	40
2.10.1 Essai Marshall.....	40
2.10.2 Essai Duriez	40
2.10.3 Essai à la presse à cisaillement giratoire.....	41
2.10.4 Essai d'orniérage.....	42
2.10.5 Essais du module complexe	42
2.10.6 Essai de fatigue	42
2.11 Conclusion	43
Chapitre 3.....	45
Méthodes expérimentales et plans d'expériences	45
3.1 Introduction	45
3.2 Modélisation	45
3.2.1 Régression linéaire multiple.....	46
3.2.2 Modèle polynomial	46
3.2.3 Variables centrées réduite	47
3.3 Domaine d'étude	47
3.4 Plans d'expériences.....	48
3.4.1 Définition	48
3.4.2 Conception d'un plan d'expériences.....	49
3.5 Interprétation des résultats.....	49
3.6 Types de plans d'expériences.....	50
3.6.1 Les plans factoriels à deux niveaux par facteur	50

3.6.2 Plan factoriel complet	50
3.6.3 Plans factoriels fractionnaires	51
3.7 Construction d'un plan factoriel fractionnaire.....	51
3.8 Hypothèses d'interprétation des plans fractionnaires	52
3.8.1 Plans pour surfaces de réponse	52
3.8.2 Plan factoriel complet 3^k	52
3.8.3 Plan composite centré	53
3.8.4 Plan de Doehlert.....	53
3.8.5 Plan de Box-Behnken.....	54
3.9 Conclusion	54
Chapitre 4.....	56
Expérimentation et interprétation des résultats.....	56
4.1 Introduction	56
4.2 Essais sur le bitume	56
4.2.1 Préparation des échantillons.....	56
4.2.2 Essai de pénétrabilité	56
4.2.3 Essai de ramollissement	57
4.2.2 Résultats	58
4.3 Essais sur l'enrobé	58
4.3.1 Plan d'expériences	58
4.3.2 Matériaux utilisés.....	60
4.3.2.1 Provenance des matériaux.....	60
4.3.2.2 Caractéristiques mécaniques	61
4.3.2.3 Analyse Granulométrique	61
4.3.2.4 Confection des éprouvettes	62
4.4 Détermination du module de rigidité.....	63
4.5 Etablissement du modèle.....	67
4.6 Comparaison avec un modèle antérieur	72
4.6.1 Matériaux utilisés.....	72
4.6.2 Modèle développé	73
4.6.3 Comparaison	73
4.8 Conclusion	74
Conclusion générale	76
Références bibliographiques	78

Liste des figures

Figure 1.1 : Image au microscope de bitumes modifiés à différents dosages de SBS	17
Figure 1.2: Image au microscope de bitumes modifiés à différents dosages d'EVA	17
Figure 1.3 Résistance à la fatigue pour différents dosages en matériaux recyclés	19
Figure 1.4 : Résultats d'essai d'orniérage pour différents dosages en matériaux recyclés	19
Figure 1.5: A gauche système compatible avec 4% de SBS. A droite système incompatible avec 4% de SBS [Becker et al, 2001].	20
Figure 1.6: Courbes granulométriques d'EME [De Backer et al, 2007].....	22
Figure 1.7: Pyramide schématisant les niveaux de l'épreuve de formulation.....	26
Figure 1.8: Chaussée durable type [Lee et al, 2006]	27
Figure:2.1 Tracé en plan d'une route [Visa, 2008]	31
Figure 2.2: Profil en long d'une route [Visa, 2008]	31
Figure 2.3: Profil en travers type d'une chaussée [Visa, 2008]	31
Figure 2.4: les différentes couches d'une chaussée [Visa, 2008]	32
Figure2.5: Types de chaussées [Larino, 2001].....	35
Figure 2.6: (a) Eprouvette d'enrobé bitumineux, (b) Coupe d'un enrobé bitumineux.....	37
Figure 2.7: Comportement de l'enrobé en fonction de l'amplitude de déformation et du nombre de cycles de chargement [Di Benedetto, 1987].....	39
Figure 2.8: Dispositif pour la réalisation de l'essai Marshall.....	40
Figure 2.9: Dispositif pour la réalisation de l'essai Duriez.....	41
Figure 2.11: Dispositif d'essai d'orniérage.....	42
Figure 2.12: Dispositif pour la réalisation de l'essai de fatigue.....	43
Figure 3.1 : Schéma d'une expérimentation	46
Figure 3.2: Domaine de variations d'un facteur codé entre +1 et -1	47
Figure 3.3: Points expérimentaux dans un domaine d'étude	48
Figure 3.4: Représentation graphique du plan complet [Govaerts, 2010].....	52
Figure 3.5: construction d'un plan composite centré [Govaerts, 2010].....	53
Figure 3.6: Représentation graphique du plan de Doehlert [Govaerts, 2010].....	53
Figure 3.7: Extension d'un plan de Doehlert [Govaerts, 2010].....	53
Figure 3.8: Représentation graphique du plan de Box-Behnken [Govaerts, 2010].....	54
Figure 4.1: Dispositif d'essai de pénétrabilité.....	57
Figure 4.2: Dispositif d'essai de ramollissement	57
Figure 4.3: Granulats utilisés pour la confection des éprouvettes.....	61
Figure 4.4: Courbe granulométrique de la formulation.....	62
Figure 4.5: Confection des éprouvettes (De gauche à droite : échantillonnage, incorporation du bitume liquide et malaxage).	63
Figure 4.6: Compactage d'une éprouvette Figure 4.7: Eprouvette démoulée.....	63
Figure 4.8: Principe de l'essai de traction indirecte.....	64
Figure4.9: Essai Nottingham Universal Figure 4.10: Ecran de contrôle du NU	64
Figure 4.11: Exemple d'un résultat de mesure d'une éprouvette	65

Figure 4.12: Surface de réponse pour une température de 170°C.....	69
Figure 4.13: Surface de réponse pour une température de 180°C.....	69
Figure 4.14: Surface de réponse pour une température de 190°C.....	69
Figure 4.15: Surface de réponse pour une teneur en liant de 4.5 %	70
Figure 4.16: Surface de réponse pour une teneur en liant de 5.5 %	70
Figure 4.17: Surface de réponse pour une teneur en liant de 6.5 %	70
Figure 4.18: Surface de réponse pour une teneur en additif de 0.2%.....	71
Figure 4.19: Surface de réponse pour une teneur en additif de 0.5%.....	71
Figure 4.20: Surface de réponse pour une teneur en additif de 0.8%.....	71
Figure 4.21: Courbe granulométrique des fractions granulaires	72
Figure 4.22: A gauche modèle linéaire, à droite modèle quadratique.....	74

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Pourcentage de vides des BBME	21
Tableau 1.2: Performances mécaniques des BBME.....	22
Tableau 1.3: Valeurs du module de richesse préconisées pour les BBME	23
Tableau 2.1: Types de comportement des enrobés [Di Benedetto, 1987].....	39
Tableau 3.1: Exemple de plan d'expériences.....	48
Tableau 3.2: Nombre d'essais en fonction du nombre de facteurs	50
Tableau 3.3: Plan d'expériences 2^3	51
Tableau 4.1: Résultats des essais sur bitume.....	58
Tableau 4.2: Facteurs du plan d'expériences.....	58
Tableau 4.3: plan d'expériences retenu	59
Tableau 4.4: Niveaux des facteurs.....	60
Tableau 4.5: Provenance des matériaux	60
Tableau 4.6: Caractéristiques mécaniques des granulats.....	61
Tableau 4.7: Pourcentages pondéraux des fractions.....	61
Tableau 4.8: Poids des constituants de chaque gâchée de trois éprouvettes	62
Tableau 4.9: Résultats des essais.....	66
Tableau 4.10: provenance des matériaux	72
Tableau 4.11: Caractéristiques mécaniques des granulats.....	72
Tableau 4.12: Domaine d'expériences	73

Introduction générale

Introduction générale

La route est un élément déterminant dans le développement d'un pays. En effet, la mauvaise qualité des routes raréfie les investissements et nuit au développement de la région en question. Le réseau routier nécessite un entretien régulier entraînant parfois le remplacement des chaussées dégradées. L'allongement de la durée de vie des chaussées qui permet des économies substantielles est donc devenu une préoccupation majeure du secteur routier.

Les dégradations principales que subit une chaussée sont l'orniérage et les fissures de fatigue, afin d'y remédier un nouveau type d'enrobé à été développé, l'enrobé à module élevé (EME), obtenu en utilisant un bitume de grade dur, il permet d'améliorer considérablement les caractéristiques mécanique de la chaussée et donc prolonger sa durée de vie.

Dans les pays où le bitume de grade dur n'est pas disponible les enrobés à module élevé sont obtenus en modifiant le bitume classique par ajout d'additifs. L'Algérie qui a commencé à utiliser ces enrobés à module élevé lors de la réalisation de l'autoroute est-ouest commence à se doter des équipements nécessaires à la caractérisation de ces enrobés à hautes performances. Néanmoins les connaissances sur le sujet restent faibles du au retour d'expérience encore inexistant. C'est dans ce contexte que se situe le présent travail.

Dans le but d'étudier le module de rigidité d'un enrobé modifié en fonction des paramètres jugés les plus influents, Nous nous proposons de le modéliser. Cela 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 modélisation va donc permettre de limiter la réalisation d'essais expérimentaux, permettant des économies en coût et en temps.

Pour développer le modèle, il est toutefois nécessaire de réaliser des expériences. Pour en minimiser le nombre, nous avons réalisé un plan d'expériences. Il existe différents procédés pour mettre au point un plan d'expériences. Les plus exploités sont : les plans factoriels, simples et permettant de mettre en évidence l'interaction entre les facteurs assez rapidement et les plans à surfaces de réponses lorsque le modèle n'est pas linéaire.

Le but de ce travail est de parvenir à une modélisation du module de rigidité d'un enrobé modifié en fonction des paramètres jugés les plus influents, par une approche expérimentale.

Cette procédure expérimentale sera optimisée en utilisant la méthode des plans d'expériences qui permet de réduire considérablement le nombre d'essais nécessaires à l'élaboration du modèle tout en gardant une faible marge d'erreur.

L'enrobé modifié à modéliser est un béton bitumineux 0/14 obtenu en utilisant l'additif PR Plast SAHARA qui est un plastomère gavé à l'huile. Une série d'essais a été réalisée au sein du laboratoire central des matériaux chez Cosider en faisant varier la teneur en liant, le pourcentage d'additifs, et la température de fabrication suivant le plan d'expérience préalablement conçu. Les éprouvettes testées à cet effet ont été confectionnées au sein du Laboratoire Central des Travaux Publics.

Le mémoire est organisé comme suit :

Le premier chapitre est une étude bibliographique concernant les enrobés modifiés et en particulier les enrobés à module élevé. Le chapitre deux est une introduction dans le domaine de la chaussée, sa composition et les différents types d'endommagements qu'elle subit. Le troisième chapitre traite de la théorie des plans d'expériences et des notions mathématiques permettant d'aboutir à un modèle. La méthodologie de conception des différents plans y sera aussi décrite. Le chapitre quatre contient une description de toute la partie expérimentale, ce qui comprend la conception du plan d'expérience, la confection des éprouvettes et la réalisation des essais et enfin l'interprétation des résultats obtenus du modèle.

Une conclusion générale clôt le mémoire, récapitulant le travail accompli et citant les perspectives à venir.

Chapitre 1

Etude bibliographique

Chapitre 1

Etude bibliographique

1.1 Introduction

Afin de minimiser les endommagements dus au trafic et au climat, une nouvelle génération d'enrobés a vu le jour. Ces enrobés à hautes performances permettent de réduire de façon significative les épaisseurs des couches de chaussée et présentent une meilleure tenue à l'orniérage et à la fatigue.

Dans les pays du Maghreb où le climat chaud est un facteur important de dégradation de la chaussée, l'utilisation de ces enrobés à module élevé a augmenté significativement ces dernières années, cependant la technique reste récente et de ce fait les études sur le sujet sont peu nombreuses.

L'utilisation des enrobés bitumineux améliorés par ajout d'additifs a débuté en Europe au début des années 1930. La méthode se développa car dans les pays européens les entrepreneurs qui fournissaient des garanties préféraient réaliser des chaussées dont les coûts d'entretiens seraient bas même lorsque les coûts initiaux étaient plus élevés.

Ce chapitre est une étude bibliographique concernant les enrobés modifiés il traitera aussi de la classification, de la caractérisation des enrobés à module élevé ainsi que de leur formulation, seront aussi explicités leur domaines d'emploi et leur conditions de mise en œuvre.

1.2 Les additifs dans le bitume

Le rôle de l'additif est d'améliorer les caractéristiques de l'enrobé. Il en existe de nombreux types. Ils sont compatibles avec tous les grades de bitume et peuvent être incorporés dans le bitume ou introduits dans le mélange lors du malaxage. Les additifs sont utilisés pour améliorer la tenue à l'orniérage, la résistance à la dissolution au Kérosène, ainsi que l'augmentation du module de rigidité, et des additifs antibruit etc.

Les études de Radziszewski [Radziszewski, 2007] ont montré que la contribution du module de rigidité du liant à la résistance à l'orniérage d'un enrobé est d'environ 50%. C'est pour cela que l'amélioration du bitume par ajout de polymères se révèle être une bonne méthode pour lutter contre l'endommagement des chaussées.

Les deux types de polymères ajoutés au bitume sont: [Brovelli, 2015]:

- Les élastomères
- Les plastomères

a) Les élastomères

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 [Sengoz, 2007]. Parmi les élastomères on peut citer le caoutchouc, qui mélangé à un enrobé améliore sa résistance à l'orniérage et à la fissuration.

Cependant, il peut poser des problèmes de compatibilité et nécessite de hautes températures et un temps de malaxage plus important. 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 [Becker and al, 2001].

b) Les plastomères

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) [Alatas, 2013]. Leur utilisation reste cependant limitée car de part leur nature de plastomère ils ne permettent pas d'amélioration significative du comportement élastique d'un enrobé.

On peut observer sur les figures suivantes (Figure 1.1 et figure 1.2) des images de bitumes modifiés à différents dosages d'élastomères et de polymères fluorescents sous microscope.

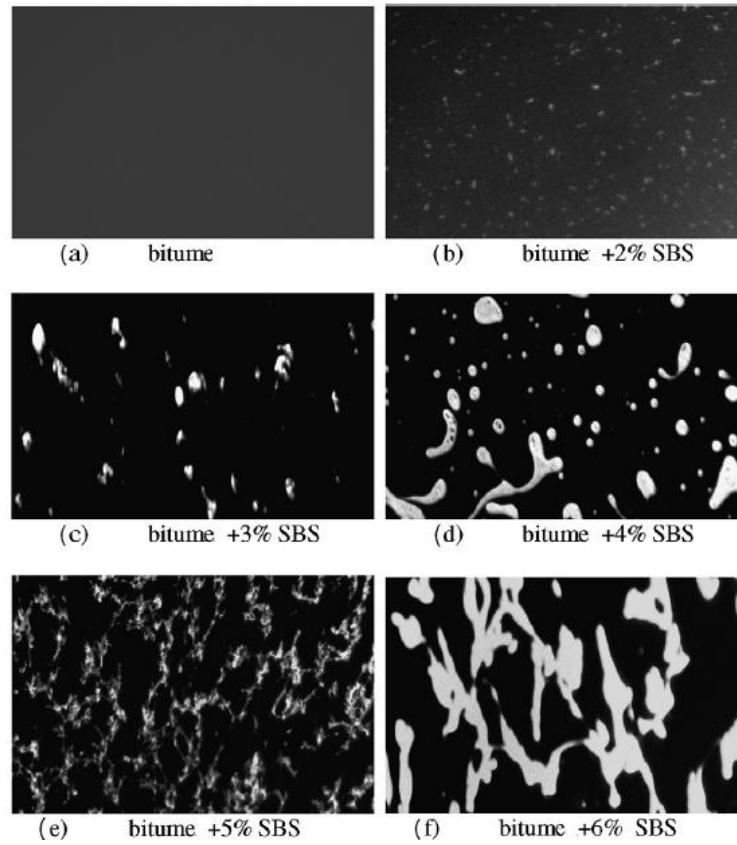


Figure 1.1 : Image au microscope de bitumes modifiés à différents dosages de SBS [Sengoz, 2007]

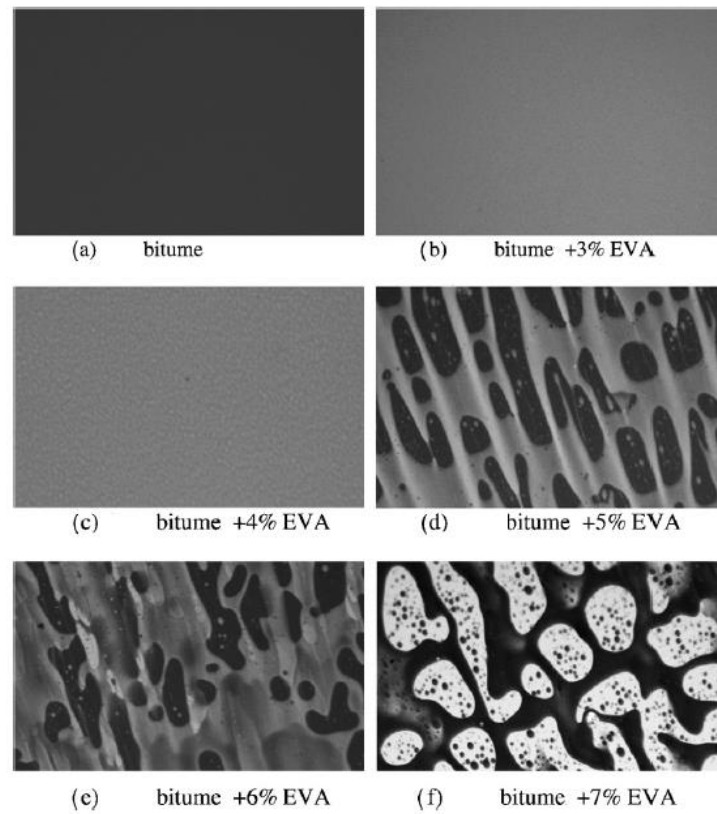


Figure 1.2: Image au microscope de bitumes modifiés à différents dosages d'EVA [Sengoz, 2007]

1.3 Revue d'études concernant les enrobés modifiés par ajout de polymères

Les polymères sont des molécules liées sous forme de chaînes. Ceci leur procure une grande résistance couplée à de la flexibilité, et en fait donc un additif de choix pour l'amélioration des performances du bitume.

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. Une équipe de chercheurs vénézuéliens ont étudié le comportement du bitume modifié pour trois différents pourcentages de polymères: dosage faible, dosage moyen de 5% et dosage important de plus de 7%. [Becker et al, 2001]

- Dosées faiblement, c'est-à-dire à moins de 4%, les polymères sont répartis dans la matrice continue de bitume. Pour des températures avoisinant les 60° 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 autour de 5% de polymère présente des microstructures dans lesquelles les deux phases sont liées. Ils sont instables et dépendent fortement de la température.
- En présence de plus de 7% 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.

Dans une étude réalisée en 2001 pour le ministère de l'Ohio des Transports, Sargand et Kim ont cherché à évaluer l'influence de la granulométrie d'un enrobé et de la modification par ajout de polymères sur la résistance à l'orniérage et à la fatigue [Sargand et kim, 2001]. Ils ont comparé à cet effet la résistance à la fatigue et à l'orniérage de trois enrobés. Le premier non modifié, le deuxième modifié par ajout de SBS et le troisième enrobé modifié par ajout de SBR, et cela pour des squelettes granulaires différents. Les résultats ont montré que les enrobés modifiés aux SBS et SBR étaient significativement plus résistants à la fatigue et à l'orniérage, mais que la granulométrie de l'enrobé n'influeait en rien sur ces caractéristiques.

Kim et Sholar ont étudié l'effet du polymère SBS sur des enrobés bitumineux réalisé avec différents pourcentages de matériaux recyclés [Kim et al, 2009]. Des essais au laboratoire ont été effectués sur les enrobés modifiés afin de mesurer la résistance à l'orniérage et à la fatigue.

Des enrobés aux pourcentages de matériaux recyclé de 15%, 25%, 35% et 100% ainsi qu'une éprouvette de contrôle sans matériaux recyclés ont subi les essais d'orniérage et de fatigue par traction indirecte. Les deux figures suivantes (Figure 1.3 et figure 1.4) montrent les résultats des mesures.

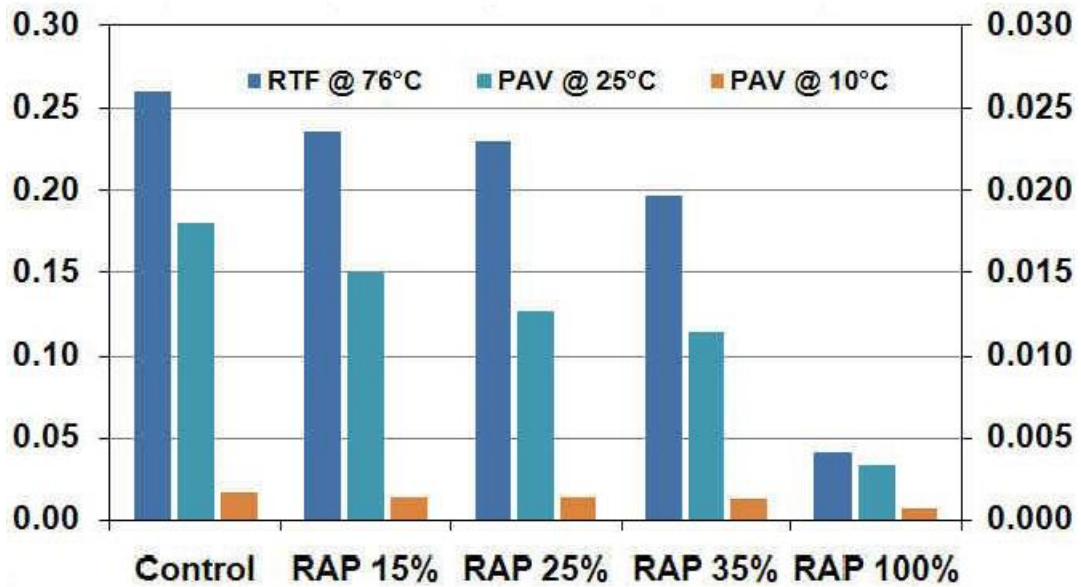


Figure 1.3 Resistance à la fatigue pour différents dosages en matériaux recyclés [Kim and al, 2009]

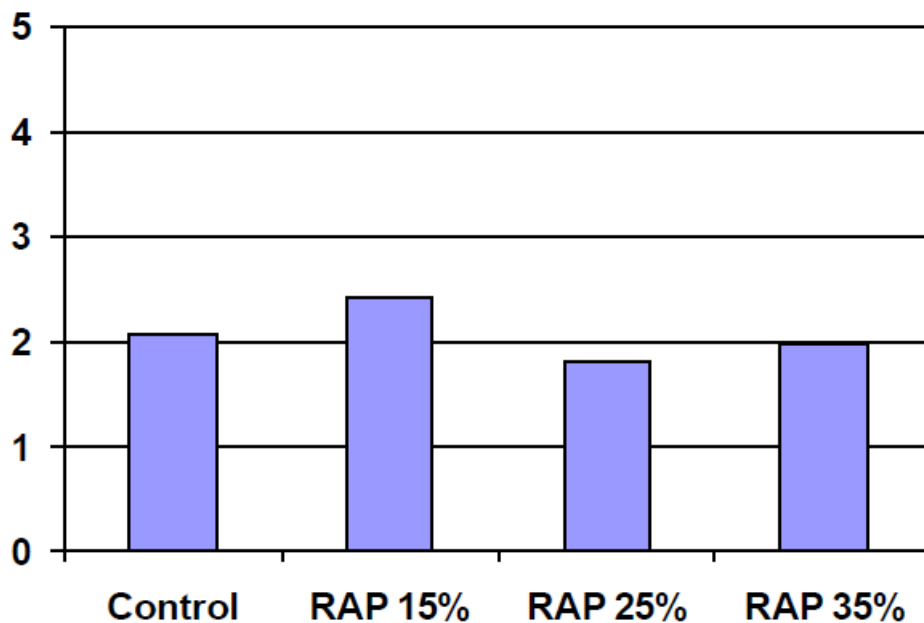


Figure 1.4 : Résultats d'essai d'orniérage pour différents dosages en matériaux recyclés [Kim and al, 2009]

Les résultats ont montré que la résistance à l'orniérage et à la fatigue de toutes les éprouvettes étaient sensiblement les mêmes, exceptée l'éprouvette à 100% de matériaux recyclés qui donnait des résistances faibles. Les chercheurs ont conclu qu'un enrobé modifié à l'aide du polymère SBS avait de bonnes caractéristiques mécaniques, indépendamment du pourcentage de matériaux recyclés.

1.4 Compatibilité bitume-polymère

Les polymères ont différents degrés de compatibilités avec les bitumes, de très compatible à incompatibles. Les mélanges compatibles fusionnent parfaitement et forment une phase homogène, les mélanges moins compatibles nécessitent un traitement mécanique à haute température ou encore chimique, et enfin les mélanges incompatibles donnent des phases séparées sans cohésion ni ductilité.

La compatibilité bitume-polymère dépend des facteurs suivants :

- La concentration et la taille des asphaltènes du bitume
- La concentration et la taille des molécules du polymère
- La quantité d'huiles aromatiques du bitume
- La différence des densités et masses moléculaires

Les problèmes de compatibilité ont un impact direct sur les propriétés de l'enrobé modifié, afin d'y remédier plusieurs approches ont été étudiées, tel l'ajout d'anti oxydants, la vulcanisation au soufre ou encore l'utilisation de polymères qui réagissent chimiquement avec le bitume [Zhu et al, 2014].

La figure 1.5 montre la différence entre un système compatible et un système incompatible.

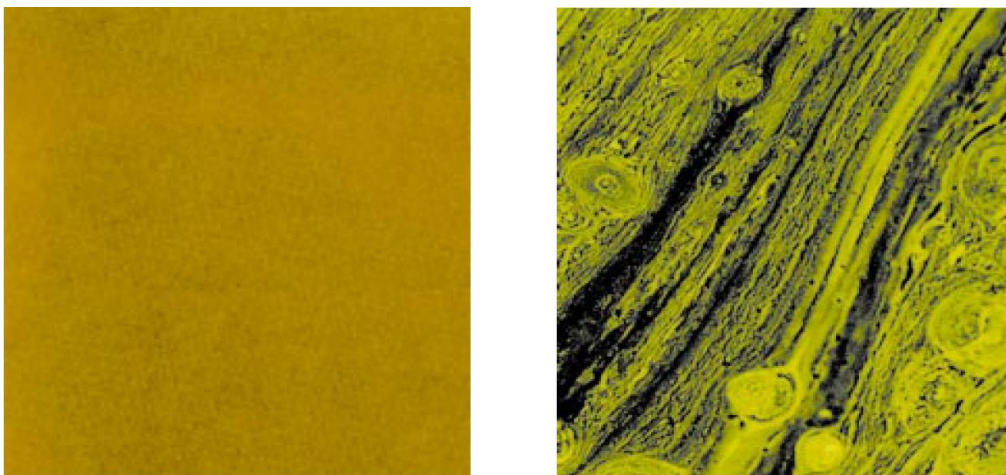


Figure 1.5: A gauche système compatible avec 4% de SBS. A droite système incompatible avec 4% de SBS [Becker et al, 2001].

1.5 Classification des enrobés à modules élevés

Un enrobé à module élevé est un mélange de granulats et de sable enrobés de bitume de grade dur ou de bitume classique amélioré à l'aide d'additifs. Les enrobés à module élevé peuvent être utilisés en couche de base, en couche de roulement ou dans les deux.

Le terme *enrobé à module élevé* (EME) est généralement employé lorsque l'enrobé modifié est destiné aux couches d'assise. Pour les couches de roulement et de liaison, le terme *béton bitumineux à module élevé* (BBME) est utilisé et c'est à lui que cette étude s'intéresse.

En fonction des dimensions maximales des granulats, on distingue deux types de bétons bitumineux à module élevé:

- Béton bitumineux à module élevé 0/10 mm (BBME 0/10)
- Béton bitumineux à module élevé 0/14 mm (BBME 0/14)

Ces deux bétons sont caractérisés dans le Tableau 1.1.

Tableau 1.1: Pourcentage de vides des BBME

Essai à la presse à cisaillement giratoire	BBME 0/10		BBME 0/14	
	Min	Max	Min	Max
A 10 girations	11	-	11	-
A 60 girations	5	10	-	-
A 80 girations	-	-	4	9

Chaque type peut se situer dans trois classes de performances: classe 1, 2 ou 3 [NF P 98-141].

Ces classes de performances sont fonction des propriétés suivantes :

- Indice de vide
- Tenue à l'eau
- Résistance à l'orniérage
- Module de rigidité
- Résistance à la fatigue

Les classes de performance sont résumées dans le Tableau 1.2.

Tableau 1.2: Performances mécaniques des BBME

Essai sur BBME	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Essai Duriez	≥ 0.8	≥ 0.8	≥ 0.8
Essai d'orniérage	$\leq 10\%$	$\leq 7.5\%$	$\leq 5\%$
Essai du module complexe (MPa)	≥ 9000	≥ 12000	≥ 12000
Essai de traction directe (MPa)	≥ 9000	≥ 12000	≥ 12000
Essai de fatigue	110 μ def	100 μ def	100 μ def

1.6 Constituants des EME

Le choix des constituants se base davantage sur les performances des EME plutôt que sur des exigences propres au bitume et aux granulats. Ceux-ci doivent toutefois avoir au moins les caractéristiques mécaniques minimales préconisées par la norme [NF P 98-140].

1.6.1 Les granulats

Les BBME présentent en général une courbe granulométrique continue, semblable à celle des enrobés classiques. Le pourcentage de granulats est déterminé en fonction des objectifs recherchés et du contexte propre au chantier. On distingue deux types de squelettes granulaires en fonction des pourcentages pondéraux: les squelettes sableux et les squelettes pierreux (Figure 1.6).

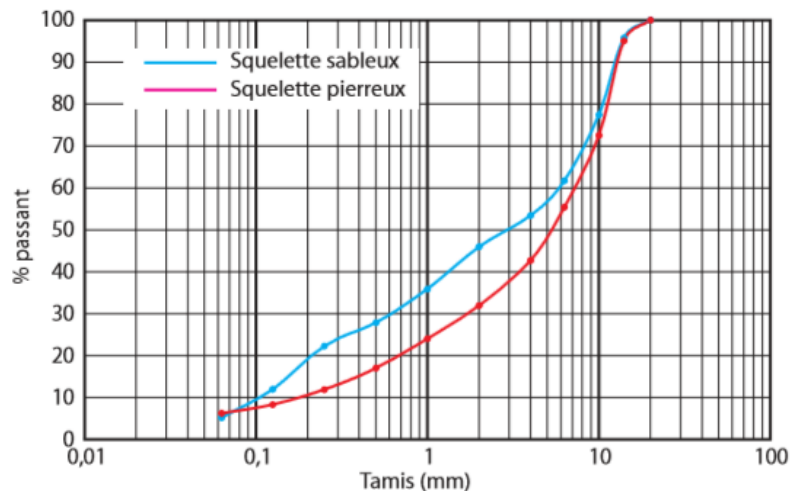


Figure 1.6: Courbes granulométriques d'EME [De Backer et al, 2007]

Ces courbes ont été obtenues en faisant la moyenne des courbes granulométriques des études françaises sur les EME.

Une étude Belge a montré en utilisant les essais de presse à cisaillement giratoire (**PCG**) et d'orniérage, que les EME à squelette sableux sont plus facilement compactables et qu'ils présentent sensiblement la même tenue à l'orniérage que les mélanges à squelette pierreux [De Backer.C et al, 2007].

1.6.2 Le liant

Les EME ont originalement été développées en utilisant des bitumes de grades durs (10/20, 15/25 ou 20/30) afin d'éviter le problème d'orniérage [Geng.H et al. 2013]. Cependant, aucune caractéristique des liants n'est imposée par les normes. Les EME peuvent aussi être obtenus en utilisant du bitume de grade classique (35/50), modifié par ajout d'additifs pour le durcir. Cette solution convient particulièrement aux pays du Maghreb où les bitumes durs ne sont pas disponibles.

Les EME et les BBME ont des teneurs en liant assez élevées par rapport aux enrobés classiques. Cette teneur élevée s'explique par le fait qu'un liant dur est souvent la cause de fissuration pour un enrobé. Afin de remédier à cette fissuration un film épais de bitume, traduit par un module de richesse élevé est préconisé (Tableau 1.3).

Tableau 1.3: Valeurs du module de richesse préconisées pour les BBME

Type de BBME	Module de richesse
BBME 0/10	3.5
BBME 0/14	3.3

Le fait d'être plus riche en liant rend l'enrobé plus maniable et plus structurant à épaisseur égale. Ceci, couplé à ses performances mécaniques élevées (module de rigidité élevé, résistance à l'orniérage et à la fatigue), permet de réduire les épaisseurs des couches de chaussées (Tableau 1.4).

Tableau 1.4: Epaisseurs de couches des BBME

Type de BBME	Epaisseur moyenne d'utilisation (cm)	Epaisseur moyenne en tout point (cm)
BBME 0/10	5 à 7	4
BBME 0/14	6 à 9	5

1.7 Caractéristiques des enrobés à module élevé

Les EME se distinguent des enrobés classiques par leurs performances plus élevées ainsi que leur formulation particulière. On peut résumer leurs caractéristiques dans les points suivants :

- Teneur en liant plus élevée que dans les enrobés classiques
- Basse pénétrabilité du liant
- Faible indice des vides
- Module de rigidité très élevé
- Résistance à l'orniérage et à la fatigue
- Meilleure imperméabilité
- Température de malaxage plus élevée

1.7.1 Formulation d'un BBME

Les moyens de formulation sont différents d'un pays à l'autre en fonction des réglementations. La formulation des EME en France par exemple, se fait selon une méthode basée sur la mesure de la granularité [Delorme, 2006].

Une estimation de la surface spécifique des granulats Σ est établie à l'aide de la formule empirique suivante:

$$100 \cdot \Sigma = 0,25 \cdot G + 2,3 \cdot S + 12 \cdot s + 135 \cdot f \quad (1.1)$$

où:

G est la fraction de la masse (en %) des granulats restant sur le tamis de 6,3 mm.

S est la fraction de la masse des granulats passant au tamis de 6,3 mm, et celle restant sur le tamis de 0,315 mm (en %).

s est la fraction (en %) de la masse des granulats passant au tamis de 0,315 mm et restant sur le tamis de 0,080 mm.

f est la fraction de la masse (en %) des granulats passant au tamis de 0,080 mm

La teneur TL en liant est fonction de cette surface spécifique:

$$TL = K \cdot \alpha \cdot \sqrt[5]{\Sigma} \quad (1.2)$$

avec:

K un coefficient décrivant l'épaisseur du film de bitume autour des granulats, il est appelé Module de richesse. Selon le type de mélange, une valeur minimale est établie pour celui-ci

α un coefficient correcteur dépendant de la masse volumique des granulats (ρ). Il est calculé par la formule 1.3.

$$\alpha = 2,65 / \rho \sqrt[5]{\Sigma} \quad (1.3)$$

1.7.2 Epreuve de formulation des enrobés à module élevé

L'épreuve de formulation est une série d'essais auxquelles est soumis un enrobé afin de juger de ses performances et de conclure s'il convient de l'utiliser pour un projet donné.

L'étude de formulation est répartie en quatre niveaux d'essais, plus un niveau 0 qui correspond à une description des matériaux utilisés. Le niveau de l'étude dépend du type d'enrobé, des sollicitations prévues et de l'importance du projet. Les enrobés courants nécessitent une étude de niveau 2, alors que l'étude d'un EME est de niveau 3 ou 4, selon les exigences [NF EN 13108-20].

Niveau 0

Il correspond aux enrobés destinés aux zones non ou peu circulées. C'est une description de l'enrobé, à savoir une courbe granulométrique et une teneur en liant.

Niveau 1

L'enrobé est soumis à l'essai de la presse à cisaillement giratoire et à l'essai de tenue à l'eau. Ce niveau peut être suffisant pour des chaussées peu sollicitées.

Niveau 2

Ce niveau comporte les essais du niveau 1, plus un essai d'orniérage. C'est le niveau pour les chaussées ordinaires.

Niveau 3

Ce niveau comporte les essais du niveau 2, plus un essai du module de rigidité. L'étude de niveau 3 est spécifiée pour les chantiers importants, et est nécessaire dans le cas d'utilisations de grave bitume de classe 4, d'EME et de BBME.

Niveau 4

Ce niveau comporte tout les essais précédents, plus l'essai de fatigue. Il n'est atteint que pour les chantiers très importants, où la durée de vie de la chaussée doit être relativement longue.

La figure 1.7 schématise les niveaux de l'épreuve de formulation.

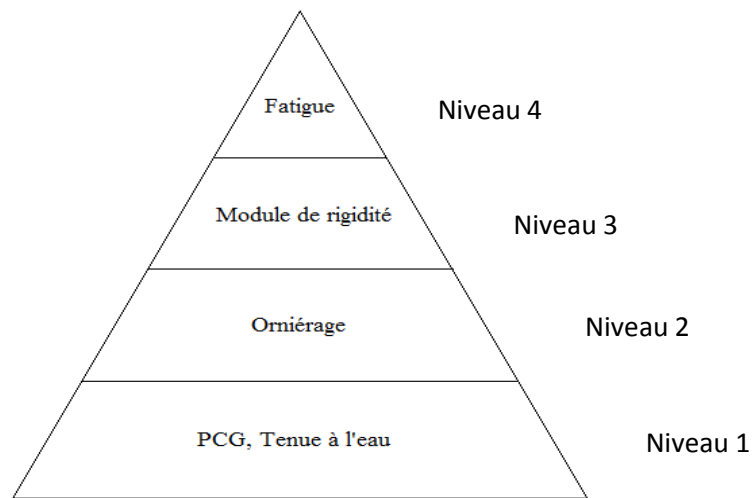


Figure 1.7: Pyramide schématisant les niveaux de l'épreuve de formulation

1. 8 Domaine d'emploi et conditions de mise en œuvre des EME

La principale caractéristique des EME est la résistance à l'orniérage, ce qui en fait une solution pour les cas suivants [Lu, 1995] :

- Fort trafic lourd canalisé
- Réfection partielle de voie lente d'autoroute
- Renforcement de chaussée
- Réduction des surépaisseurs
- Pistes et zones de circulations des aéroports

L'usage des EME doit toutefois être accompagné de certaines précautions afin d'assurer un bon comportement de la chaussée tel que:

- Performances de l'EME conformes aux spécifications de la norme [NF P 98-141].
- Support de capacité portante suffisante pour assurer une restitution satisfaisante durant le compactage.
- Respect des épaisseurs de la couche en tout point.

1.9 Durabilité des chaussées en EME

Les chaussées durables ont conventionnellement une espérance de vie d'au moins 40 ans. Elles sont obtenues soit par augmentation de l'épaisseur des couches, soit par augmentation du module de rigidité (utilisation des EME). De manière générale l'utilisation d'enrobés à module élevé est la solution la plus économique et la plus écologique car elle nécessite moins de matériaux non renouvelables. Le principe des chaussées durables est de minimiser le potentiel d'endommagement [Lee.H.J.et al.2006]. Cette durabilité est une conséquence directe de plusieurs paramètres qui seront résumés en ces quelques points:

- La résistance à la fatigue des EME est très élevée par rapport à des mélanges classiques suite à une augmentation de la teneur en liant. De ce fait, une augmentation de la durée de vie en fatigue est attendue.
- Une bonne adhésion entre les pierres et le bitume: plus l'adhésion est bonne, plus la résistance à la fatigue est élevée.
- Les EME sont caractérisés par des tenues à l'eau élevées qui leurs confèrent une excellente durabilité.

La figure 1.8 représente les dimensions d'une chaussée durable type.

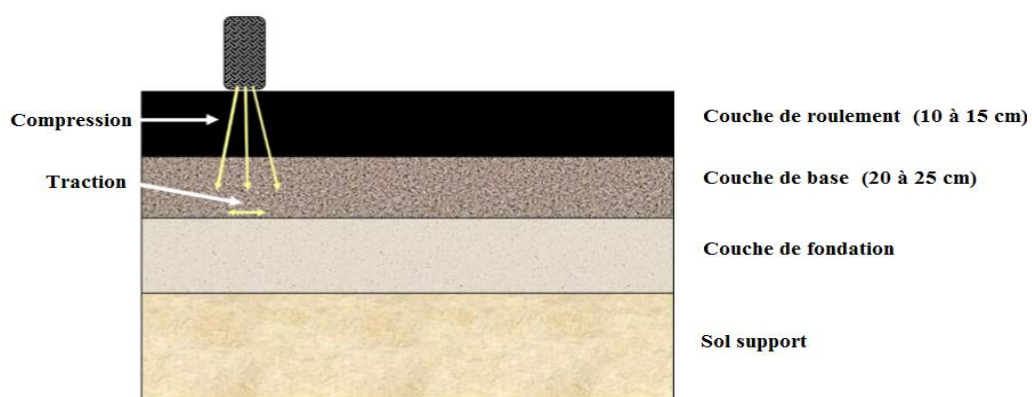


Figure 1.8: Chaussée durable type [Lee et al, 2006]

1.10 Modélisation par plans d'expériences

Dans le but d'identifier les paramètres les plus influents sur le module de rigidité d'un enrobé modifié par ajout de l'additif PR Plast Sahara, un travail de caractérisation du module de rigidité d'un enrobé modifié à été réalisé par Harizi en 2012 [Harizi et al, 2012]. Un modèle mathématique de premier ordre, sans interaction des paramètres à été développé après la réalisation d'un plan d'expérience.

Les paramètres qui ont été jugés les plus influents sur le module de rigidité de l'enrobé sont :

- La teneur en liant,
- Le pourcentage d'additif
- La température de fabrication.

Pour notre étude nous garderons les mêmes paramètres ou facteurs, mais nous opterons pour un modèle polynomial du second ordre avec interactions entre les paramètres. Une étude comparative entre les deux modèles sera présentée dans le chapitre résultats et interprétations.

1.11 Conclusion

Face à l'accroissement de l'agressivité du trafic, amplifiée par les conditions climatiques des pays du Maghreb, les enrobés modifiés par ajout de polymères s'imposent comme la solution pour des chaussées plus résistantes à l'endommagement et donc plus durables. En plus d'augmenter la rigidité et donc la résistance à l'orniérage, les polymères améliorent également la résistance à la fissuration. La combinaison de ces deux propriétés offre une chaussée ayant une portance plus élevée et une durée de vie plus longue. Une autre approche peut aussi se traduire par des épaisseurs de couches moins importantes. Ceci permet d'obtenir une durée de vie égale à celle d'un enrobé classique et ce, dans le but de réaliser des économies sur les matériaux non renouvelables, tels les granulats et le bitume, en plus des gains sur le transport et le stockage des matériaux. La contrepartie de cette amélioration est le cout supplémentaire qui croit avec la teneur en polymères. Afin d'être une technique rentable le dosage en polymère doit faire l'objet d'une attention particulière en optimisant son dosage avec des considérations techniques et économiques.

La modélisation du module de rigidité d'un enrobé modifié en fonction des paramètres que sont la teneur en additif, la teneur en liant et la température de fabrication est un moyen de prévoir le comportement d'un enrobé modifié en fonction de ces paramètres pendant sa formulation.

Chapitre 2

Généralités sur les chaussées

Chapitre 2

Généralités sur les chaussées

2.1 Introduction

Le réseau routier d'un pays constitue l'un de ses plus importants patrimoines. De part l'importance des chaussées pour l'économie d'un pays, de nombreux travaux de recherche sont réalisés afin d'augmenter leurs durées de vies et de minimiser les endommagements dus au trafic et au climat. En effet il ne suffit pas de réaliser des routes mais il faut aussi les entretenir. Le budget d'entretien pourrait devenir conséquent si le réseau est important et vétuste. Il convient donc d'utiliser des matériaux permettant d'augmenter la durée de vie d'une chaussée.

Ce chapitre est une introduction au domaine de la route. En premier seront présentés les caractéristiques géométriques des chaussées ainsi que leur constitution. Ensuite seront décrits les différents types d'endommagement dont elles font l'objet. Enfin il sera fait mention des enrobés bitumineux et des essais utilisés pour leur caractérisation.

2.2 Caractéristiques géométriques des routes

La géométrie d'une route est fondamentalement caractérisée par trois notions:

- Le tracé en plan
- Le profil en long
- Le profil en travers

2. 2.1 Tracé en plan

C'est la projection horizontale sur un repère cartésien_topographique de l'ensemble des points définissant le tracé de la route. Il met en évidence les longueurs des sections rectilignes et la valeur des rayons de courbure dans les virages comme le montre la figure ci dessous.

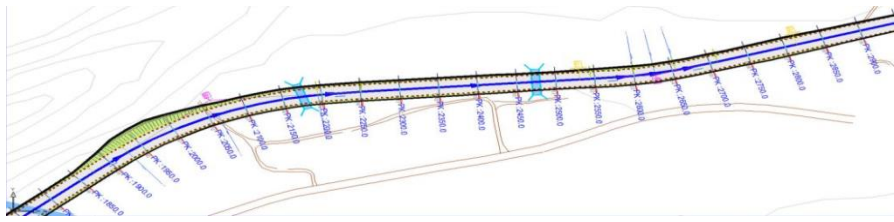


Figure:2.1 Tracé en plan d'une route [Visa, 2008]

2.2.2 Profil en long

C'est la projection verticale dans le sens de l'axe de la route de l'ensemble des points constituant celle-ci. Il indique la valeur des pentes et des rampes ainsi que les rayons des sommets des côtes et des pointes bas comme l'indique la figure 2.2.

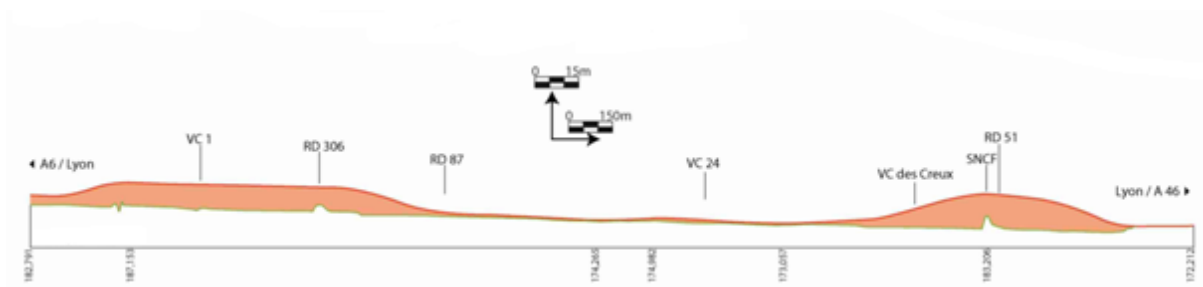


Figure 2.2: Profil en long d'une route [Visa, 2008]

2.2.3 Profil en travers

C'est la coupe transversale de la chaussée et de ses dépendances. L'échelle de représentation est de l'ordre de 1/100 à 1/200. La figure suivante (figure 2.8) est un schéma représentatif d'un profil en travers type.

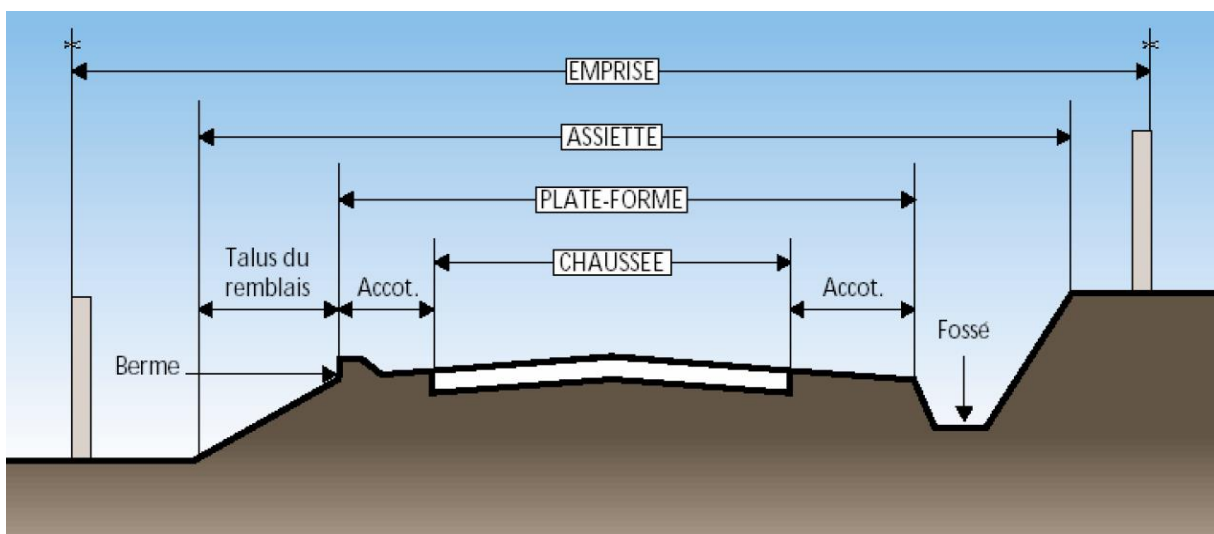


Figure 2.3: Profil en travers type d'une chaussée [Visa, 2008]

Dans ce qui suit nous définissons les différentes parties mentionnées dans la figure 2.3.

- L'emprise: partie du terrain qui appartient à la collectivité et affectée à la route.
- L'assiette: surface du terrain réellement occupée par la route.
- Chaussée: surface aménagée de la route sur laquelle circulent les véhicules.
- Accotements: zones latérales de la plate-forme qui bordent extérieurement la chaussée.
- Plate-forme : surface de la route qui comprend la chaussée et les accotements.

2.3 Constitution d'une chaussée

Une chaussée est une structure multicouche constituée de deux parties principales qui sont les couches d'assise et la couche de surface, plus une couche de forme dans certains cas (Figure 2.4).

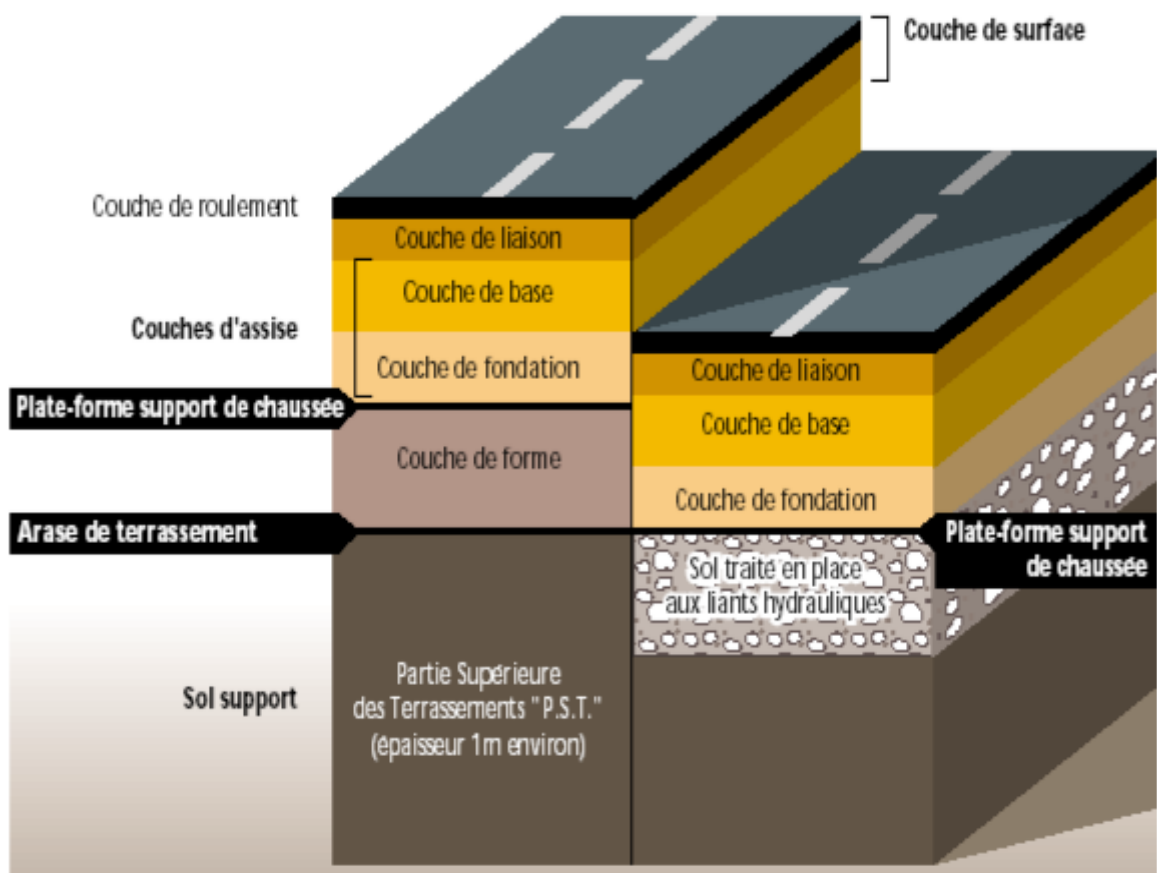


Figure 2.4: les différentes couches d'une chaussée [Visa, 2008]

2.3.1 Couche de forme

La couche de forme a une double fonction. Pendant les travaux, elle assure la protection du sol-support, permet la qualité du nivellement ainsi que la circulation des engins. En service, elle permet d'homogénéiser les caractéristiques mécaniques des matériaux constituant le sol ou le remblai

La couche de forme a pour rôle de permettre le déplacement provisoire des engins de construction, le compactage de la couche de fondation ainsi que la satisfaction des exigences de nivellement de la plate-forme support de chaussée.

2.3.2 Couche d'assise

La couche de fondation et la couche de base forment les couches d'assise. Elles apportent à la chaussée la résistance mécanique aux charges verticales induites par le trafic, et répartissent les pressions sur la plate-forme support afin de maintenir les déformations à un niveau acceptable. Les couches d'assise sont le plus souvent constituées de graves non traitées mais elles peuvent aussi être faites de graves et sables traités aux liants hydrauliques ou hydrocarbonés.

2.3.3 Couche de surface

Elle est composée d'une couche de roulement et éventuellement d'une couche de liaison entre la couche de roulement et les couches d'assise. Cette couche subit directement les agressions du trafic et du climat, et doit être étanche afin de protéger la structure de chaussée. Selon le trafic prévu les matériaux utilisés pour réaliser les couches de surface peuvent être les enduits superficiels ou les enrobés hydrocarbonés à chaud.

2.4 Types de structures de chaussées

Les chaussées sont classées en six familles, selon les matériaux les constituant et leurs modes de fonctionnement [Larino, 2001].

- Les chaussées souples
- Les chaussées bitumineuses épaisses
- Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques
- Les chaussées à structure mixte
- Les chaussées à structure inverse

➤ Les chaussées en béton de ciment

2.4.1 Les chaussées souples

Ces structures comportent une couverture bitumineuse mince, parfois réduite à un enduit, utilisée pour les chaussées à très faible trafic. Elle repose sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités. L'épaisseur globale de la chaussée est généralement comprise entre 30 et 60 cm.

2.4.2 Les chaussées bitumineuses épaisses

Ces structures se composent d'une couche de roulement bitumineuse sur un corps de chaussée en matériaux traités aux liants hydrocarbonés, disposé en une ou deux couches. L'épaisseur des couches d'assise est le plus souvent comprise entre 15 et 40 cm.

2.4.3 Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques

Appelées communément semi-rigides, ces structures comportent une couche de surface bitumineuse sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques, disposés en une ou deux couches dont l'épaisseur totale est de l'ordre de 20 à 50 cm.

2.4.4 Les chaussées à structure mixte

Les chaussées à structure mixte comportent une couche de surface sur une couche de base en matériaux bitumineux sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques. Ces structures sont qualifiées de mixtes car les matériaux bitumineux représentent la moitié de l'épaisseur totale de la chaussée.

2.4.5 Les chaussées à structure inverse

Ces structures sont formées de couches bitumineuses, d'une quinzaine de centimètres d'épaisseur totale, sur une couche de grave non traitée reposant elle-même sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques. L'épaisseur totale varie entre 60 et 80 cm.

2.4.6 Les chaussées en béton de ciment

Ces structures comportent une couche de béton de ciment de 15 à 40 cm d'épaisseur qui sert de couche de roulement, éventuellement recouverte d'une couche mince en matériaux bitumineux. La couche de béton repose, soit sur une couche de fondation en matériaux traités, soit sur une couche drainante en grave non traitée. La dalle de béton peut être continue avec un renforcement longitudinal si elle est armée, ou discontinue, avec ou sans élément de liaison aux joints.

Ces chaussées sont représentées dans la figure 2.5.

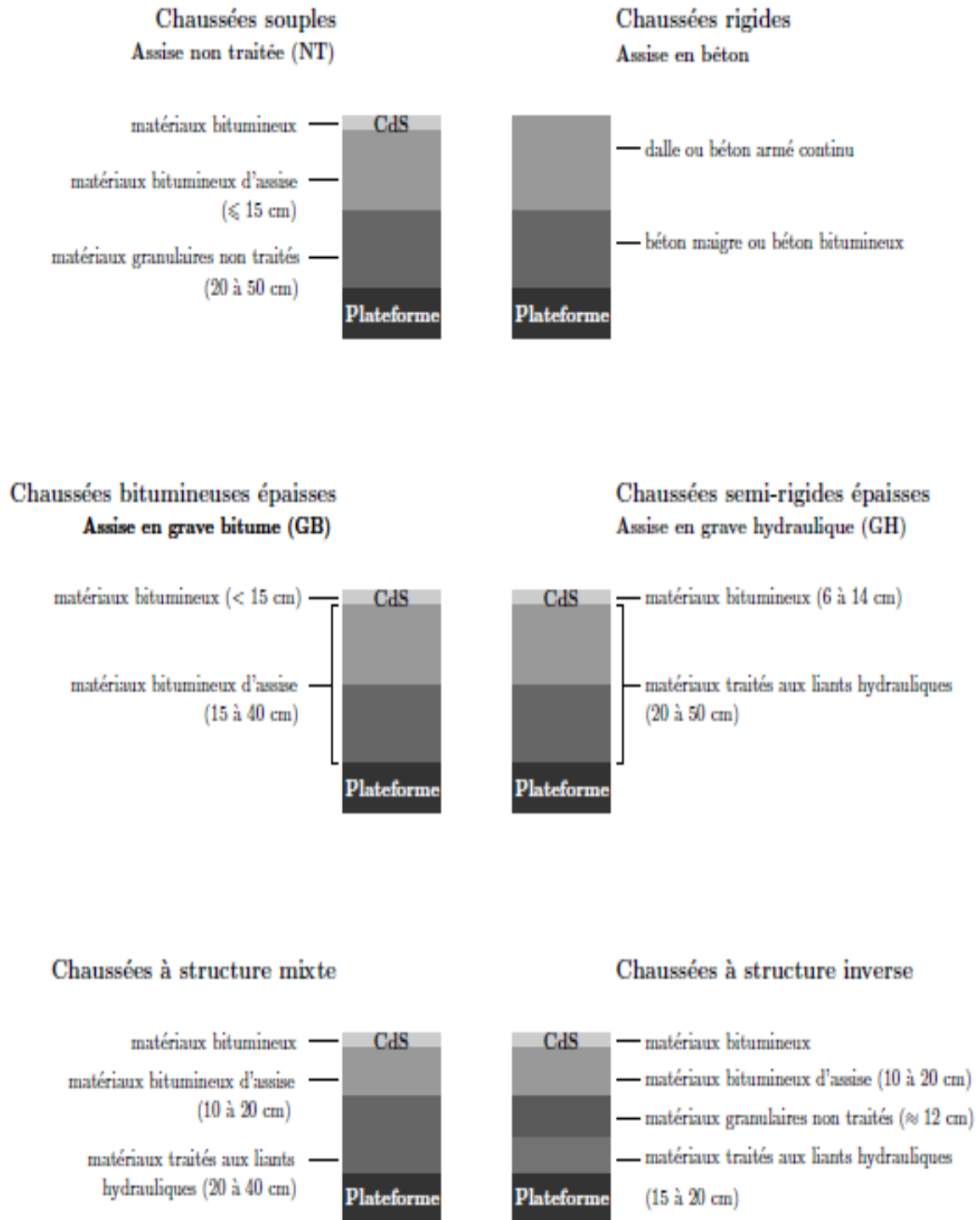


Figure 2.5: Types de chaussées [Larino, 2001]

2.5 Dégradations des chaussées

Le catalogue des dégradations de surface des chaussées du Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées LCPC (1998) classe les dégradations des chaussées en 4 familles [Larino, 2001].

2.5.1 Dégradations d'arrachement

Ces dégradations concernent la couche de surface. Elles sont dues à l'usure de la couche de surface, à l'arrachement des gravillons du revêtement, à l'arrachement localisé de matériaux de la couche de surface, au détachement de gravillons de la couche de surface ou alors au décollement du liant autour des granulats dans la couche de surface.

2.5.2 Mouvements de matériaux

Ces dégradations sont causées par des remontées du liant à la surface de la chaussée, par l'enfoncement de gravillons dans l'enrobé en période chaude, par les remontées des éléments fins à la surface de chaussée, ou par l'éjection de l'eau à la surface lors du passage des véhicules lourds à cause de la présence de cavités sous la couche de surface.

2.5.3 Déformations

Elles sont dues en général au sous dimensionnement, à la diminution de la portance du sol ou encore le phénomène de gel-dégel. Les différents types de déformations sont l'orniérage, l'affaissement, le gonflement, le bourrelet, le décalage de joint de dalle ou de bord de fissure, le flambement et les déformations de forme de tôle ondulée.

2.5.4 Fissures

On peut distinguer les fissures longitudinales, transversales, les fissures d'adaptation aux mouvements de terrain, les fissures de joint ainsi que le faïençage.

Les fissures avec l'orniérage sont les problèmes les plus courants en ce qui concerne les chaussées. Elles ont des causes diverses tels la fatigue, le décollement de la couche de roulement ou le sous-dimensionnement.

2.6 Enrobés bitumineux

Les enrobés bitumineux sont un mélange uniforme de granulats enrobés de bitume selon des proportions bien définies pouvant être enrichi par des fines si nécessaire.

Chaque type d'enrobés est défini selon la nature et le dosage de ses constituants, par ses performances, par son procédé de fabrication et par la couche de la chaussée à laquelle il est destiné. Les figures ci-dessous montrent des échantillons d'enrobés bitumineux confectionnés au sein du laboratoire central des matériaux de COSIDER.



Figure 2.6: (a) Eprouvette d'enrobé bitumineux, (b) Coupe d'un enrobé bitumineux.

2.7 Constituants d'un mélange d'enrobés bitumineux

Les enrobés sont généralement composés de 95% de granulats et de 5% de bitume. Les variations de ces pourcentages constituent les différents mélanges d'enrobés. Des ajouts de composés peuvent être introduits tels que des additifs dans le bitume ou des fibres et des matériaux recyclés dans le mélange.

Granulats

Le squelette granulaire d'un enrobé bitumineux est composé de gravillons, de sables et de fines.

Gravillons

Ils constituent l'ossature du mélange et à ce titre ils doivent présenter une bonne résistance aux chocs et à l'usure. Leur forme conditionne les caractéristiques de surface de la couche de roulement, leur angularité doit donc être prise en considération. De plus leur nature minéralogique influe sur l'adhésivité bitume-granulat et donc sur la formulation du mélange.

Sables

Les enrobés contiennent généralement du sable concassé 0/3 ou 0/4. La teneur en fines du sable est l'un des paramètres les plus importants de la formulation, si elle est faible un apport en fillers sera nécessaire. Les teneurs en fines recherchées pour les sables d'enrobés se situent entre 6% et 9%.

Bitume

Le bitume est un produit hydrocarboné résultant de la distillation du pétrole. Il est caractérisé principalement par sa pénétrabilité et sa température de ramollissement. Le bitume enrobe le squelette granulaire et confère la cohésion et l'imperméabilité des enrobés. Il contribue également à la rigidité et à la résistance à l'orniérage. C'est un matériau viscoélastique. Son module d'élasticité dépend de différents facteurs tels que: la durée et la vitesse d'application d'une charge, l'amplitude de la sollicitation d'une charge et surtout la température.

2.8 Mise en œuvre

Selon le mode de fabrication et de mise en œuvre, les enrobés sont classés en trois familles.

2.8.1 Enrobés bitumineux à chaud

Le bitume est mélangé aux granulats à des températures avoisinant les 180°C afin que le malaxage soit réussi. Le mélange est ensuite appliqué à 150°C. La simplicité de sa mise en place et ses performances en font le type d'enrobés le plus utilisé pour le revêtement des chaussées, malgré la grande consommation d'énergie nécessaire à sa fabrication et les risques de brûlures qu'il peut présenter lors de la mise en place [Brosseaud, 2008].

2.8.2 Enrobés bitumineux à froid

Les enrobés coulés à froid ne sont utilisés que dans les chaussées à faible trafic, ou encore pour reboucher les trous des chaussées endommagées. Ils sont constitués d'un mélange de granulats de petites dimensions et d'émulsions de bitume ou de cut-back (bitume + solvant). Ils sont appliqués en très faibles épaisseur, ils possèdent les meilleurs avantages écologiques car leur mise en œuvre consomme moins d'énergie et réduit les émissions gazeuses.

Ce type d'enrobés impose une longue période d'attente avant l'ouverture à la circulation correspondant au temps d'évaporation du solvant ou de l'eau [Le Bec, 2012].

2.8.3 Enrobés bitumineux tièdes

Les enrobés tièdes sont produits à des températures variant entre 80°C et 130°C, inférieures de 20 à 30°C par rapport aux enrobés à chaud conventionnels. Cette baisse de température minimise les nuisances environnementales en diminuant la consommation énergétique et en réduisant les émissions gazeuses.

Les enrobés tièdes sont obtenus en ajoutant un additif moussant. Les méthodes de mise en œuvre des enrobés tièdes sont similaires à celles des enrobés à chaud conventionnelles [Brosseaud, 2008].

2.9 Comportement des enrobés bitumineux

Les enrobés ont un comportement complexe qui dépend de l'amplitude de la déformation, du nombre de cycles N , et de la température. La figure 2.12 représente le type de comportement de l'enrobé en fonction de l'amplitude de déformation et du nombre de cycles de chargement. Les domaines correspondent à des ordres de grandeur car leurs frontières varient en fonction de la température ainsi que du type d'enrobé.

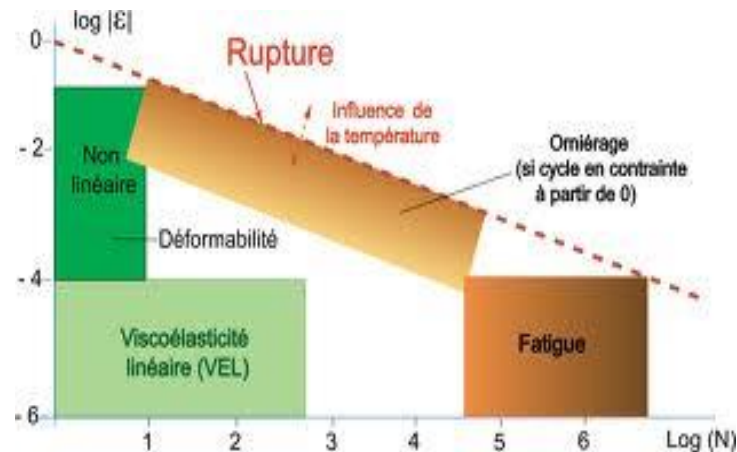


Figure 2.7: Comportement de l'enrobé en fonction de l'amplitude de déformation et du nombre de cycles de chargement [Di Benedetto, 1987]

Les quatre principaux types de comportement sont présentés dans le tableau 2.1:

Tableau 2.1: Types de comportement des enrobés [Di Benedetto, 1987]

Comportement	Conditions
Viscoélastique linéaire	Faibles déformations et nombre de cycles peu élevé
Plastique non linéaire	Déformations importantes et nombre de cycles peu élevé
Fatigue	Faibles déformations et nombre de cycles élevé
Orniérage	Accumulation de déformations irréversibles

Afin d'être utilisé comme matériaux de chaussée, l'enrobé doit répondre à certains critères qui peuvent sembler contradictoires. Il doit être suffisamment rigide aux températures élevées afin d'éviter le phénomène d'orniérage, et suffisamment souple aux basses températures afin d'éviter l'endommagement par fissuration dû au gradient thermique ou à

la fatigue. C'est pourquoi la modification du bitume par ajout de polymères doit être envisagée selon la nature du climat et du trafic afin d'améliorer la résistance à l'endommagement de la chaussée.

2.10 Essais sur les enrobés bitumineux

Afin de caractériser les enrobés, des essais normalisés sont réalisés en laboratoire. Les essais les plus utilisés dans les études de formulations et le contrôle sont les suivants. Les figures suivantes sont des photos prises au sein du laboratoire central des matériaux de COSIDER.

2.10.1 Essai Marshall

Bien qu'il ne soit plus préconisé dans les nouveaux essais de formulation, la méthode Marshall demeure très utilisée pour sa simplicité et sa fiabilité. Le but de l'essai est de déterminer deux grandeurs liées à la caractérisation empirique de l'orniérage, à savoir la stabilité Marshall et le fluage Marshall. Ces grandeurs sont déterminées par écrasement diamétral d'éprouvettes cylindriques, de diamètre égal à 100mm et d'épaisseur égale à 63mm, préalablement compactées par impact (Figure 2.8) [NF EN 12697-34].



Figure 2.8: Dispositif pour la réalisation de l'essai Marshall

2.10.2 Essai Duriez

L'essai Duriez (Figure 2.9) est un essai de compression simple ayant pour but de déterminer la tenue à l'eau d'un enrobé. Les éprouvettes cylindriques compactées statiquement sont divisées en deux groupes. Les éprouvettes d'un groupe sont stockées à l'air libre, pendant que les éprouvettes du second groupe sont stockées en immersion. La température de stockage des deux groupes est de 18°C. La tenue à l'eau est le rapport entre la résistance à la compression avec et sans immersion [NF P 98-251-1].



Figure 2.9: Dispositif pour la réalisation de l'essai Duriez

2.10.3 Essai à la presse à cisaillement giratoire

La presse à cisaillement giratoire (Figure 2.10) permet un compactage sous l'action combiné d'un piston exerçant une pression constante, et d'un moule incliné décrivant un mouvement giratoire à une température fixée en fonction du type de bitume utilisé.

Le but de cet essai est la détermination de l'indice des vides d'un enrobé en fonction du nombre de girations lors du compactage. Ceci permet d'estimer la maniabilité de l'enrobé [NF EN 12697-31].



Figure 2.15: Presse à cisaillement giratoire.

2.10.4 Essai d'orniérage

L'essai (décrit par la figure 2.11) consiste à mesurer les profondeurs d'ornières après les passages répétés de pneumatiques à 60°C sur des plaques d'enrobés préalablement compactées au compacteur de plaques [NF EN 12697-33]. La profondeur d'ornière est notée en fonction du nombre de passage du pneumatique à 1000, 3000, 10000, 30000 et 100000 cycles [NF EN 12697-22].



Figure 2.10: Dispositif d'essai d'orniérage

2.10.5 Essais du module complexe

Le module complexe d'un enrobé est déterminé à petites déformations afin de caractériser le comportement viscoélastique linéaire de l'enrobé. Il existe plusieurs méthodes pour déterminer le module complexe des enrobés. On peut citer l'essai de compression, les essais de flexion, l'essai de traction directe et l'essai de traction indirecte, qui sera utilisé dans ce mémoire et détaillé dans le chapitre «expérimentations et résultats ».

2.10.6 Essai de fatigue

Cet essai (décrit dans la figure 12) est pratiqué sur des éprouvettes trapézoïdales encastrées à la base et sollicitées en tête par un déplacement d'amplitude constante et de fréquence 25 Hz à une température de 10°C. Le but de l'essai est de déterminer l'amplitude de rupture pour un million de cycles. Il est à noter que le critère de rupture correspond à une réduction du module de rigidité de 50% [NF EN 12697-24].



Figure 2.11: Dispositif pour la réalisation de l'essai de fatigue.

2.11 Conclusion

Les routes sont des ouvrages de grande nécessité. Leur réalisation et leur entretien nécessitent des moyens financiers et matériels très importants. C'est pourquoi la conception d'une chaussée doit avoir droit à une étude particulière. En effet, l'endommagement d'une chaussée est dépendant des modes de comportement des couches qui la composent. Les différentes couches d'une chaussée ont des modes de comportement différents. L'enrobé constituant la couche de base travaille en traction et doit posséder une bonne résistance à la tension et à la fatigue. En couche de roulement, les enrobés doivent principalement résister à l'orniérage, à l'arrachement et au retrait thermique. Enfin les déformations permanentes, principalement sous la forme d'ornières sont les principaux dommages que connaît la couche de roulement compromettant les propriétés de service de la chaussée. L'application des enrobés appropriés tels que les enrobés à module élevé et la modification du liant sont des méthodes efficaces pour remédier à ces problèmes.

Dans ce mémoire nous nous intéresserons à la couche de roulement. Nous étudierons à cet effet le module de rigidité de différentes formulations de bétons bitumineux 0/14 modifiés en les soumettant à l'essai de traction indirecte.

Chapitre 3

Méthodes expérimentales et plans d'expériences

Chapitre 3

Méthodes expérimentales et plans d'expériences

3.1 Introduction

La méthode expérimentale est une démarche scientifique qui consiste à tester par des expériences répétées, la validité d'une hypothèse. Un plan d'expérimentation est une suite ordonnée d'essais d'une expérimentation, chacune permettant d'acquérir de nouvelles informations en faisant varier un ou plusieurs paramètres dans le but d'obtenir des résultats confirmant une hypothèse.

L'optimisation des performances est obtenue en réalisant le moins d'essais possible pour la meilleure précision [Linder Richard, 2005]. Le choix des mesures à effectuer est déterminé par des modèles spécifiques, plus ou moins complexes, élaborés par une théorie, dite théorie des plans expérimentaux.

Ce chapitre comporte un rappel des concepts mathématiques utilisés suivi de la théorie des plans d'expériences ainsi que la description des plans d'expériences les plus exploités.

3.2 Modélisation

Une expérimentation consiste à modifier des paramètres pour étudier leurs effets sur le fonctionnement d'un système. La modélisation consiste à établir une relation mathématique entre les données en entrée (paramètres influents) et les résultats en sortie. La figure suivante schématise un exemple représentant le modèle d'un système soumis à des facteurs contrôlables et des facteurs non contrôlables. Les facteurs contrôlables dépendent directement du choix de l'opérateur. Les facteurs non contrôlables varient indépendamment du choix de l'opérateur.

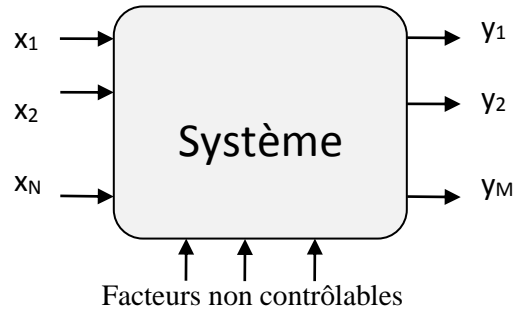


Figure 3.1 : Schéma d'une expérimentation

Les facteurs d'entrée $x_1, x_2 \dots x_N$, sont les paramètres dont on cherche à analyser l'influence. Les sorties $y_1, y_2 \dots y_M$, appelées réponses, sont les grandeurs mesurées à chaque essai. Il s'agit donc d'exprimer les y_j ($j=1 \dots M$), en fonction des x_i ($i = 1 \dots N$).

Un problème de modélisation revient en général à déterminer une fonction F telle que :

$$Y_i = F(x_1, x_2, \dots, x_N)$$

Il sera alors possible de connaître les réponses du système pour des entrées données, sans effectuer d'expériences.

3.2.1 Régression linéaire multiple

Dans le cas où les entrées x_i sont indépendantes, le modèle peut être décrit par une matrice ligne A telle que:

$$\begin{pmatrix} Y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ y_N \end{pmatrix} = [A] \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_N \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

$A = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ \dots \ a_N]$ où les a_i sont les coefficients du modèle.

Les réponses y_i s'écriront alors:

$$y_i = a_0 + a_1.x_1 + a_2.x_2 + \dots + a_N.x_N \quad (3.2)$$

La régression est dite linéaire car elle impose une fonction linéaire comme résultat. Le modèle de régression linéaire est souvent estimé par la méthode des moindres carrés.

3.2.2 Modèle polynomial

Dans le cas où les entrées ne sont pas indépendantes, la sortie y_i s'écrit:

$$\begin{aligned} y_i = & a_0 + a_1.x_1 + a_2.x_2 + \dots + \\ & + a_{1,2}.x_1x_2 + a_{1,3}.x_1x_3 + a_{1,4}.x_1x_4 \dots \\ & + a_{1,2,3}.x_1x_2x_3 + a_{1,2,3}.x_1x_2x_4 + a_{1,2,4}.x_1x_3x_4 \dots \end{aligned} \quad (3.3)$$

Chaque terme de la somme est un produit de facteurs principaux. Rechercher une relation affine entre les variables X et Y revient à rechercher une courbe qui s'ajuste le mieux possible à ce nuage de points. Parmi toutes les courbes possibles, on retient celle qui rend minimale la somme des carrés des écarts des valeurs mesurées Y à la courbe postulée. La somme des carrés des écarts est appelée résidu. Le principe des moindres carrés consiste à choisir les coefficients du polynôme postulé qui minimisent ce résidu.

La qualité du modèle dépend en grande partie du choix des variables et du degré du polynôme. Lorsque sa structure est imposée par l'utilisateur, le modèle est dit *postulé*. Le modèle *non postulé* est au contraire entièrement dirigé par les données, aussi bien sa structure mathématique que ses coefficients.

3.2. 3 Variables centrées réduite

La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée *niveau*. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas, la borne supérieure est le niveau haut

Remplacer les variables naturelles par les variables codées, sans dimension va permettre d'avoir pour chaque facteur le même domaine de variation et pouvoir ainsi comparer entre eux les effets des facteurs. En attribuant la valeur -1 au niveau bas d'un facteur et la valeur +1 au niveau haut, l'origine ainsi que l'unité des mesures changent. On parle alors de variables codées ou de variables centrées réduites. Le changement d'origine et d'échelle se fait par la formule :

$$X_c = \frac{x - x_0}{pas} \quad (3.4)$$

x_0 étant la valeur centrale.

3.3 Domaine d'étude

Le domaine d'étude est le domaine de variations du facteur considéré. La figure 3.2 illustre les représentations d'un domaine d'étude dans les cas d'un seul facteur.

Figure 3.2: Domaine de variations d'un facteur codé entre +1 et -1

Dans le cas de l'étude des variations de deux facteurs, le regroupement des domaines respectifs est représenté comme l'illustre la figure 3.3.

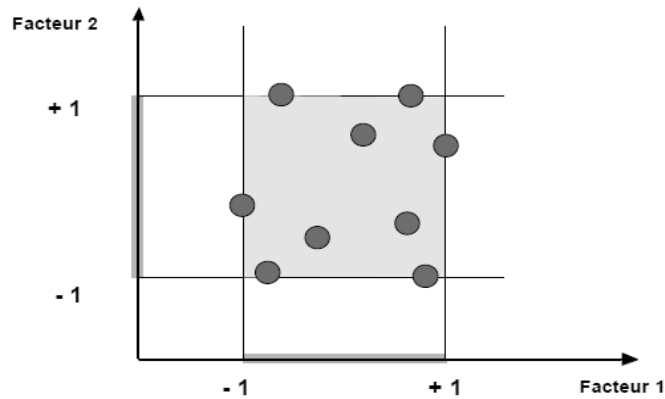


Figure 3.3: Points expérimentaux dans un domaine d'étude

Les points représentent les valeurs des deux facteurs choisis pour réaliser les expérimentations

3.4 Plans d'expériences

Les plans d'expériences sont utilisés pour réduire le nombre d'expériences à réaliser et ainsi un gain de temps et d'argent.

3.4.1 Définition

On appelle plan d'expériences la suite ordonnée d'essais d'une expérimentation en contrôlant un ou plusieurs facteurs d'entrée afin d'élaborer ou de valider un modèle avec la plus grande précision possible pour un nombre d'essais minimal.

La conception d'un plan d'expériences passe par le choix du nombre et de l'emplacement des points d'expériences. Ces choix sont déterminés par les propriétés mathématiques et statistiques qui relient la réponse aux facteurs. afin de réduire l'erreur expérimentale tout en minimisant le nombre d'essais [Goupy et Creighton , 2006].

Les plans d'expériences sont habituellement représentés par des tableaux aussi appelés *matrices d'expériences*, un exemple est donné par le tableau 3.1.

Tableau 3.1 Exemple de plan d'expériences

Essai n°	Facteur 1	Facteur 2	Réponse
1	-1	-1	Y1
2	+1	-1	Y2
3	-1	+1	Y3
4	+1	+1	Y4

La première colonne indique les noms ou les numéros des essais, les colonnes suivantes les niveaux à donner aux facteurs et la dernière colonne les réponses mesurées.

Les principales préoccupations de l'expérimentateur sont donc:

- Réaliser le moins d'expériences possibles.
- Déterminer les optimums
- Obtenir la meilleure précision.
- Etablir la modélisation du système étudié

3.4.2 Conception d'un plan d'expériences

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

- Choix des réponses représentatives du phénomène.
- Détermination des facteurs potentiellement influant 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.

3.5 Interprétation des résultats

Les plans d'expériences utilisent le modèle polynomial qui relie la réponse y aux facteurs $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$. L'ordre du polynôme est déterminé à l'avance, il s'agit d'un *modèle postulé*.

$$y = a_0 + a_1.x_1 + a_2.x_2 + \dots + a_n.x_n + \sum_{i,j \neq 1}^n a_{ij}.x_i . x_j + \sum_{i,j,k \neq 1}^n a_{ijk}.x_i . x_j . x_k + \dots \quad (3.5)$$

Où a_0 est la réponse au centre du domaine d'étude, $a_1, a_2 \dots$ sont les coefficients du polynôme correspondants aux facteurs x_1, x_2, \dots et les coefficients de type a_{ij} correspondent aux interactions. Ces coefficients sont calculés par régression multi polynomiale basée le plus souvent sur le critère d'optimisation des moindres carrés.

La première étape de l'interprétation est de déterminer quels sont les facteurs où les interactions qui ont une influence statistiquement significative sur la réponse étudiée, plus la valeur absolue du coefficient est élevée, plus le terme correspondant sera influant sur la réponse étudiée. Le modèle est ensuite établi à l'aide de ces coefficients. L'intérêt de modéliser la réponse par un polynôme est de pouvoir calculer toutes les réponses du domaine d'étude sans être obligé de faire les expériences [Goupy et Creighton, 2006].

3.6 Types de plans d'expériences

Il existe plusieurs types de plans d'expériences qui diffèrent par le nombre de facteurs et de leurs niveaux ainsi que leur répartition dans le domaine d'étude. Les plans les plus utilisés seront rappelés ci-après [Franco. J, 2008].

3.6.1 Les plans factoriels à deux niveaux par facteur

Les modèles issus de ces plans sont des modèles linéaires avec ou sans interactions. Ces plans sont les plus employés car ils permettent le criblage de nombreux facteurs et sont suffisants pour des modélisations simples.

3.6.2 Plan factoriel complet

On fait référence aux plans factoriels complets par la dénomination 2^k , k étant le nombre de facteurs. Cette dénomination indique aussi le nombre d'essais que contient le plan, en effet comme son nom l'indique le plan factoriel complet contient toutes les combinaisons d'essais possibles. Ce qui fait que le nombre d'essais augmente de façon exponentielle avec l'augmentation du nombre de facteurs comme le montre le tableau ci-dessous :

Tableau 3.2 : Nombre d'essais en fonction du nombre de facteurs

Nombre de facteurs	Nombre d'essais
2	4
3	8
4	16
5	32
6	64
7	128

Le plan factoriel complet est construit selon la règle suivante :

- Colonne du 1er facteur: alternance de -1 et +1
- Colonne du 2e facteur: alternance de -1 et +1 de 2 en 2
- Colonne du 3e facteur: alternance de -1 et +1 de 4 en 4
- Colonne du 4e facteur: alternance de -1 et +1 de 8 en 8

Et ainsi de suite pour un nombre plus élevé de facteurs.

Tableau 3.3: Plan d'expériences 2^3

N° essai	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3
1	1	1	1
2	-1	1	1
3	1	-1	1
4	-1	-1	1
5	1	1	-1
6	-1	1	-1
7	1	-1	-1
8	-1	-1	-1

Afin d'éviter de réaliser toutes les expériences d'un plan a plusieurs facteurs on a recours aux plans factoriels fractionnaires.

3.6.3 Plans factoriels fractionnaires

Les plans fractionnaires ont été conçus pour remédier à l'augmentation rapide du nombre d'essais dans les plans complets. Ils sont obtenus en sélectionnant une fraction des essais d'un plan complet selon des considérations mathématiques.

Un plan factoriel fractionnaire a pour dénomination 2^{k-p} , ce qui indique qu'il est issu d'un plan complet 2^k . L'interprétation des résultats dépend essentiellement du choix de p . Plus le nombre p augmente, plus la charge expérimentale va diminuer mais au détriment de la qualité des informations tirées du plan.

3.7 Construction d'un plan factoriel fractionnaire

Pour avoir autant d'inconnues que d'équations les matrices des effets (matrice contenant les coefficients du modèle) doivent comporter autant de lignes que de colonnes. Cependant dans le cas des plans fractionnaires il y a plus de colonnes que de lignes, on s'arrange donc pour que les colonnes possèdent des niveaux identiques deux à deux pour $p = 1$ ou quatre à quatre pour $p = 2$...etc. De cette manière les coefficients à déterminer sont groupés en *aliases* ou *contrastes*.

Le plan est donc construit en donnant à p facteurs les niveaux des interactions des autres facteurs.

Afin d'interpréter les résultats d'un tel modèle il convient de se familiariser avec quelques hypothèses qui sont valables dans la grande majorité des cas.

3.8 Hypothèses d'interprétation des plans fractionnaires

- ⇒ Hypothèse 1: les interactions d'ordre égal ou supérieur à 3 peuvent être négligées.
- ⇒ Hypothèse 2: Les termes aliasés dans un contraste faible sont eux-mêmes négligeables.
- ⇒ Hypothèse 3: Si deux effets de facteurs sont négligeables, leur interaction l'est aussi.
- ⇒ Hypothèse 4: Si deux effets de facteurs sont forts, leur interaction peut l'être aussi.
- ⇒ Hypothèse 5: une interaction comportant deux facteurs dont l'un a un effet négligeable, est généralement une interaction négligeable.

Ces hypothèses sont très souvent vérifiées mais il arrive parfois qu'elles ne le soient pas. Dans ces cas la il incombe à l'expérimentateur d'en adopter d'autres en fonction du problème traité et des risques encourus.

3.8.1 Plans pour surfaces de réponse

Dans les cas où il est nécessaire d'avoir une bonne modélisation des phénomènes étudiés, les plans à deux niveaux ne sont pas suffisants, il faut passer aux plans pour surfaces de réponses qui permettent l'obtention de modèles polynomiaux du second degré. Ce sont des plans à trois niveaux par facteur au moins.

3.8.2 Plan factoriel complet 3^k

Le principe est le même que pour le plan factoriel complet à deux niveaux, il est précis mais très coûteux du fait que le nombre d'essais croît encore plus rapidement (figure 3.4).

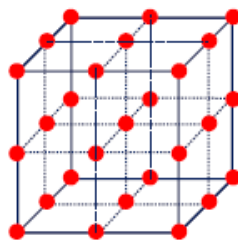


Figure 3.4: Représentation graphique du plan complet [Govaerts, 2010]

3.8.3 Plan composite centré

Un plan composite est constitué d'un plan factoriel complet ou fractionnaire complété par des points centraux pour vérifier la validité du modèle linéaire et enfin des points dans les axes pour établir un modèle du second ordre si la linéarité n'est pas vérifiée. Le nombre d'expériences des plans composites augmente rapidement avec le nombre de facteurs étudiés ceci est dû à la matrice factorielle qui le compose (figure 3.5).

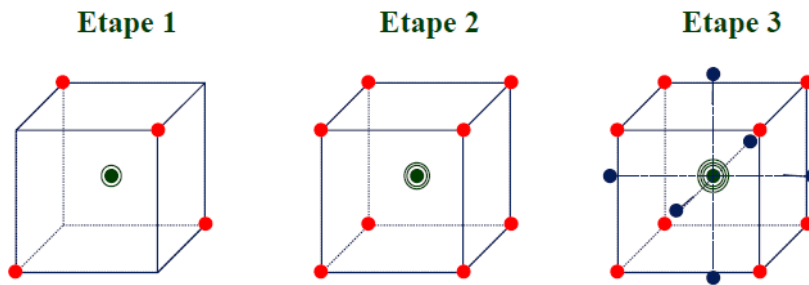


Figure 3.5: construction d'un plan composite centré [Govaerts, 2010]

3.8.4 Plan de Doehlert

C'est un plan formé de n_0 essais au centre du domaine, et de k^2+k essais répartis sur une sphère de rayon 1 (figure 3.6).

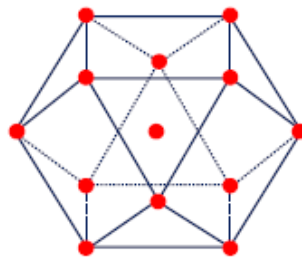


Figure 3.6: Représentation graphique du plan de Doehlert [Govaerts, 2010]

Comme les points sont régulièrement répartis, il est possible d'élargir le domaine de ce plan en ajoutant des points qui seront aussi régulièrement répartis (figure 3.7).

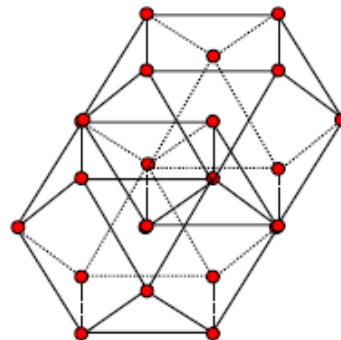


Figure 3.7: Extension d'un plan de Doehlert [Govaerts, 2010]

Ce plan permet également l'introduction de nouveaux facteurs en ajoutant de nouvelles expériences qui viendront s'ajouter à celles déjà réalisées et qui ne seront pas perdues (propriété de séquentialité).

3.8.5 Plan de Box-Behnken

Ces plans permettent d'établir directement des modèles du second degré. Tous les facteurs ont trois niveaux +1, 0 et -1. Ces plans sont faciles à mettre en œuvre et possèdent la propriété de séquentialité (figure 3.8).

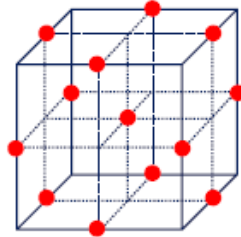


Figure 3.8: Représentation graphique du plan de Box-Behnken [Govaerts, 2010]

Les points expérimentaux sont répartis au milieu des arêtes et au centre des faces d'un cube afin de les répartir à égale distance du centre du domaine d'étude. Ces points se retrouvent donc sur une sphère. Des points sont ajoutés au centre du domaine.

Les plans de Box-Behnken répondent au critère d'isovariance par rotation (l'erreur de prévision des réponses est la même pour tous les points). C'est sur ce plan que s'est porté notre choix pour la suite de ce travail.

3.9 Conclusion

Dans ce chapitre, les notions mathématiques essentielles ont été rappelées. A savoir, la modélisation d'un système et la méthode des moindres carrés. L'intérêt de la théorie des plans d'expériences a été mis en évidence et enfin les plans d'expériences les plus utilisés ainsi que leurs propriétés ont été présentés. Pour la suite de ce travail nous établirons un modèle caractérisant les enrobés à module élevé, une série d'expérience suivant le plan de Box-Behnken sera réalisé à cet effet.

Chapitre 4

Expérimentation et interprétation des résultats

Chapitre 4

Expérimentation et interprétation des résultats

4.1 Introduction

Le présent chapitre décrit la procédure expérimentale réalisée dans ce travail, depuis la conception du plan d'expérience, jusqu'à la réalisation des essais et l'élaboration du modèle mathématique.

Des essais d'identification de bitume ont aussi été réalisés avant et après incorporation de l'additif PR Plast Sahara.

Les campagnes d'essais de mesure du module de rigidité ainsi que les essais d'identification du bitume ont été réalisées au sein du Laboratoire central des matériaux de Cosider.

4.2 Essais sur le bitume

Afin d'avoir une première estimation sur l'effet du PR Plast Sahara sur le bitume des essais de pénétrabilité et de ramollissement ont été réalisés sur le bitume avant et après l'ajout de l'additif. Le bitume utilisé est un bitume de grade traditionnel 35/50.

4.2.1 Préparation des échantillons

Deux récipients contenant 100 grammes de bitumes sont préparés, le premier est chauffé à 100°C pendant 30 minutes. Alors que le second contient 15 g d'additif en plus des 100g de bitume. Il est porté à une température de 170°C qui est la température recommandée pour l'utilisation de l'additif. Au bout de 3 heures, durée ayant été nécessaire à l'homogénéisation du mélange il est malaxé à l'aide d'une tige. Les deux échantillons sont ensuite versés dans les godets normalisés pour l'essai de pénétrabilité et dans les anneaux pour l'essai de ramollissement.

4.2.2 Essai de pénétrabilité

L'essai de pénétrabilité (Figure 4.1) consiste à mesurer la pénétration d'une aiguille de référence dans un échantillon d'essai conditionné à la température de 25 °C pour une

charge de 100 g, appliquée pendant 5 secondes. La pénétrabilité d'un bitume est la profondeur à laquelle s'enfonce l'aiguille [NF EN 1426].



Figure 4.1: Dispositif d'essai de pénétrabilité

4.2.3 Essai de ramollissement

Deux disques horizontaux de bitume, moulés dans des anneaux de laiton à épaulement, sont chauffés dans un bain liquide avec un taux d'élévation de la température contrôlé, alors que chacun soutient une bille d'acier (Figure 4.2). La température de ramollissement est la moyenne des températures auxquelles les deux disques se ramollissent suffisamment pour permettre à chaque bille, enveloppée de liant bitumineux, de descendre d'une hauteur de $25,0 \text{ mm} \pm 0,4 \text{ mm}$ [NF EN 1427].



Figure 4.2: Dispositif d'essai de ramollissement

4.2.2 Résultats

Les résultats des essais sont consignés dans le tableau suivant :

Tableau 4.1: Résultats des essais sur bitume

Essai	Bitume pur	Bitume + additif
Pénétrabilité (1/10mm)	41	16
Ramollissement (°C)	54	77

Il apparait bien que l'additif a amélioré les caractéristiques de pénétrabilité de 41 à 16 (1/10mm) et de ramollissement de 54°C à 77°C du bitume le faisant passer au grade 20/30 qui est utilisé pour la fabrication des EME.

4.3 Essais sur l'enrobé

La première étape de l'étude expérimentale est l'élaboration d'un plan d'expériences afin de réduire le nombre d'échantillons à confectionner et d'essais à réaliser. De plus, le plan d'expérience permet de mieux organiser et structurer l'expérimentation. Les granulats destinés à la confection des enrobés sont soumis à l'analyse granulométrique afin de déterminer les pourcentages pondéraux des granulats pour la formulation. Les éprouvettes sont ensuite confectionnées suivant cette formulation en fonction des différents dosages en liant du plan d'expériences. Enfin, les essais sont réalisés et les résultats notés.

4.3.1 Plan d'expériences

La conception d'un modèle commence par l'identification des paramètres influents. Cette identification peut se faire soit par une batterie d'essais dits 'de criblage' ou bien en se référant à des travaux de recherche précédents et à l'expérience des opérateurs du domaine. C'est ainsi que nous avons déterminé les trois paramètres, présentés dans le Tableau 4.2, que sont la teneur en liant bitumineux, le taux d'additif et la température de fabrication [Harizi, 2012].

Tableau 4.2: Facteurs du plan d'expériences

Facteur	Type	Nombre de niveaux
Teneur en liant	Quantitatif	3
Taux d'additif	Quantitatif	3
Température de fabrication	Quantitatif	3

Le module de rigidité M est calculé par le modèle postulé exprimé par la formule (2). C'est un modèle polynomial du second degré, avec des interactions du second ordre.

$$M = c_0 + c_1L^2 + c_2L + c_3A^2 + c_4A + c_5T^2 + c_6T + c_7LA + c_8LT + c_9AT \quad (4.1)$$

Où

L : Teneur en liant

A : Teneur en additif

T : Température de fabrication

c_i : Coefficients à déterminer

Afin de déterminer les coefficients d'un modèle du second degré, un plan à surface de réponses est nécessaire. Nous avons opté pour le plan de Box-Behnken pour sa simplicité et sa propriété d'iso-variance (§ chapitre 2). Le plan retenu est présenté dans le Tableau 4.3.

Tableau 4.3: plan d'expériences retenu

Essai	Teneur en liant	Taux d'additif	Température
A	-	-	0
B	+	-	0
C	-	+	0
D	+	+	0
E	-	0	-
F	-	0	+
G	+	0	-
H	+	0	+
I	0	-	+
J	0	+	-
K	0	-	-
L	0	+	+
M	0	0	0
N	0	0	0
O	0	0	0

Les niveaux ont été choisis pour couvrir un domaine d'expériences correspondant aux valeurs des facteurs couramment utilisées dans la réalisation des chaussées (Tableau 4.4).

Tableau 4.4: Niveaux des facteurs

Niveau -1	4.5 %	0.2 %	170° C
Niveau 0	5.5 %	0.5 %	180° C
Niveau 1	6.5 %	0.8 %	190° C

Pour chaque essai, trois éprouvettes sont réalisées afin de déterminer la moyenne des résultats et d'en éliminer une si elle donne une valeur éloignée des deux autres.

L'utilisation de ce plan a permis l'établissement du modèle au bout de 45 essais au lieu de 81(45% d'éprouvettes en moins) ce qui fait 50 kg de matériaux de moins à transporter. Cela représente aussi dans notre cas un gain de temps d'une semaine pendant laquelle du matériel n'aurait pu être utilisé pour autre chose ainsi que des opérateurs réquisitionnés.

4.3.2 Matériaux utilisés

L'enrobé modifié confectionné est un béton bitumineux 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.

4.3.2.1 Provenance des matériaux

Les granulats utilisés pour la confection des éprouvettes ont été fournis par l'Entreprise de Viabilisation de Sidi Moussa (**EVSM**) et le bitume par le Laboratoire Central des Travaux Publics (**LCTP**) (Figure 4.3).

Tableau 4.5: Provenance des matériaux

Matériaux	Provenance
Sable 0/3	ENOF Keddara
Gravier 3/8	ENOF Keddara
Gravier 8/15	ENOF Keddara
Bitume 35/50	Naftal



Figure 4.3: Granulats utilisés pour la confection des éprouvettes

4.3.2.2 Caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques mécaniques moyennes des fractions de granulats sont représentées dans le tableau suivant (tableau 4.6).

Tableau 4.6: Caractéristiques mécaniques des granulats

Coefficient d'aplatissement	17 %
Propreté superficielle	1 .05 %
Équivalent de sable à 10 % de fines	63 %
Valeur au Bleu de méthylène	0.92 %
Los Angeles	22 %
Micro Deval Humide	18.50 %

4.3.2.3 Analyse Granulométrique

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

Tableau 4.7: Pourcentages pondéraux des fractions

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

Le pourcentage pondéral de chaque fraction a été choisi pour que le squelette granulaire s'inscrive dans le fuseau de référence. La figure suivante représente la courbe granulaire ainsi obtenue.

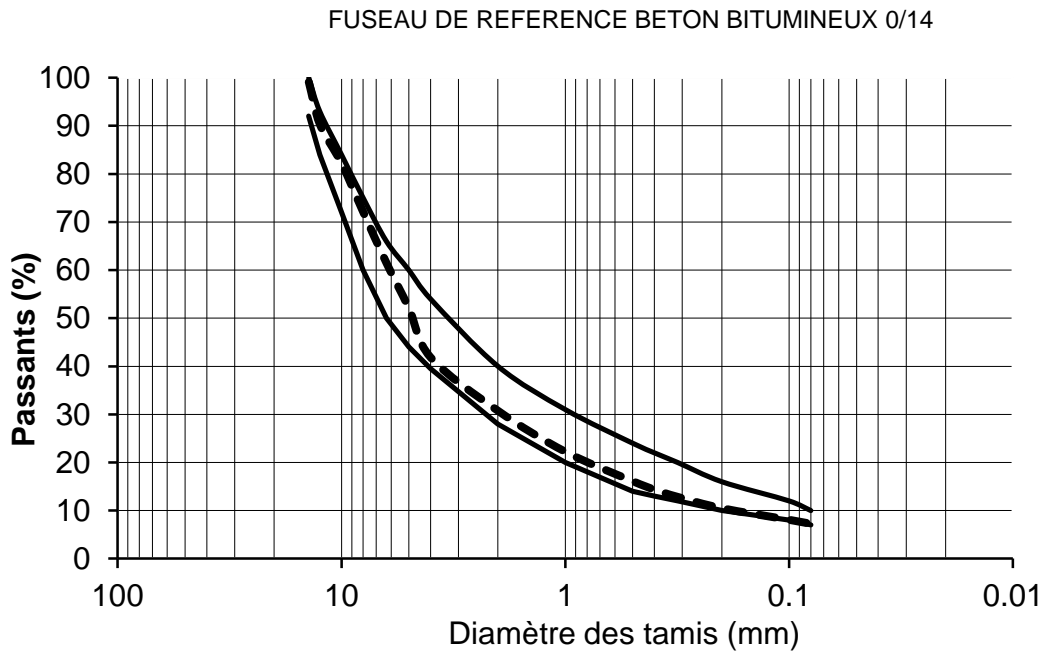


Figure 4.4: Courbe granulométrique de la formulation

4.3.2.4 Confection des éprouvettes

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 au LCTP.

Les éprouvettes sont confectionnées par gâchées de trois. Les granulats, l'additif et le bitume. Elles sont pesées puis placées dans l'étuve à la température choisie.

Le poids de chaque fraction nécessaire à la confection d'une gâchée de trois éprouvettes est calculé en fonction du pourcentage pondéral déterminé par la formulation comme le montre le tableau ci-dessous :

Tableau 4.8: Poids des constituants de chaque gâchée de trois éprouvettes

Fraction	% Pondéral	Poids des granulats en grammes
8\15	33%	1188
3\8	25%	900
0\3	42%	1512

Après quatre heures, l'enrobé est malaxé puis compacté dans des moules préalablement chauffés. Une fois refroidies les éprouvettes sont démoulées à l'aide de la presse hydraulique (Figures 4.5 et 4.6).



Figure 4.5: Confection des éprouvettes (De gauche à droite : échantillonnage, incorporation du bitume liquide et malaxage).



Figure 4.6: Compactage d'une éprouvette. Figure 4.7: Eprouvette démoulée.

4.4 Détermination du module de rigidité

Le module de rigidité des enrobés bitumineux est déterminé par un essai de traction indirecte à l'aide de l'appareil Nottingham Universal. 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 P provoquant une traction perpendiculaire à la direction du chargement (Figure 4.8).

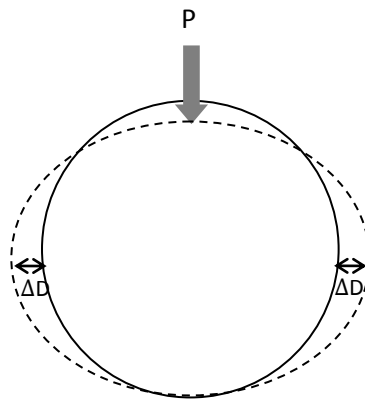


Figure 4.8: Principe de l'essai de traction indirecte.

De la déformation D mesurée, le module d'élasticité E est déduit par la formule (3) :

$$E = \frac{P(\vartheta + 0.27)}{\Delta D \cdot e} \quad (4.2)$$

P: Effort vertical appliqué

ν : Coefficient de poisson (les valeurs utilisées sont 0.35 à 20°C et 0.25 à 10°C°)

ΔD : Variation du diamètre

e : Epaisseur de l'éprouvette

Lorsqu'elle atteint la température de l'essai (15°C), l'éprouvette est soumise à cinq pulsations de conditionnement afin de stabiliser l'appareil. Dix pulsations d'essai sont ensuite réalisées à une fréquence imposée avec mesure du module élastique à chaque pulsation. Le module obtenu est la moyenne de ces 10 valeurs. L'éprouvette est ensuite tournée de 90° et son module est de nouveau calculé, l'écart entre les modules moyens de chaque diamètre ne doit pas dépasser 20%.

L'appareillage de l'essai Nottingham Universal et son écran de contrôle sont représentés respectivement par les figures 4.9 et 4.10. Un exemple de résultat de mesure est représenté dans la figure 4.11.

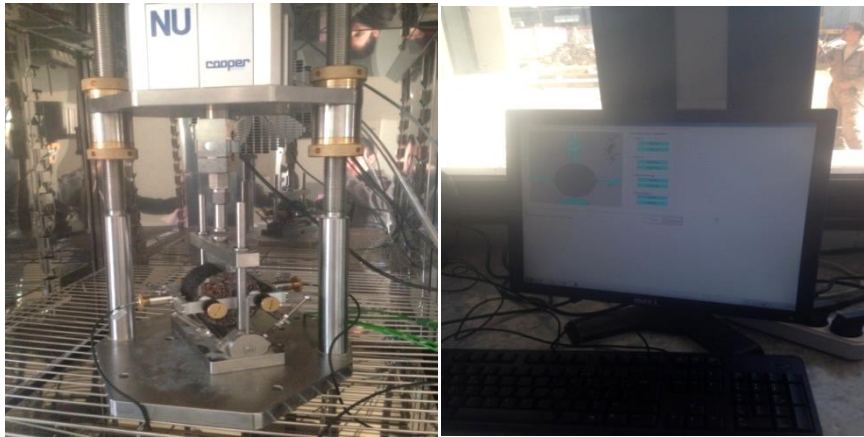
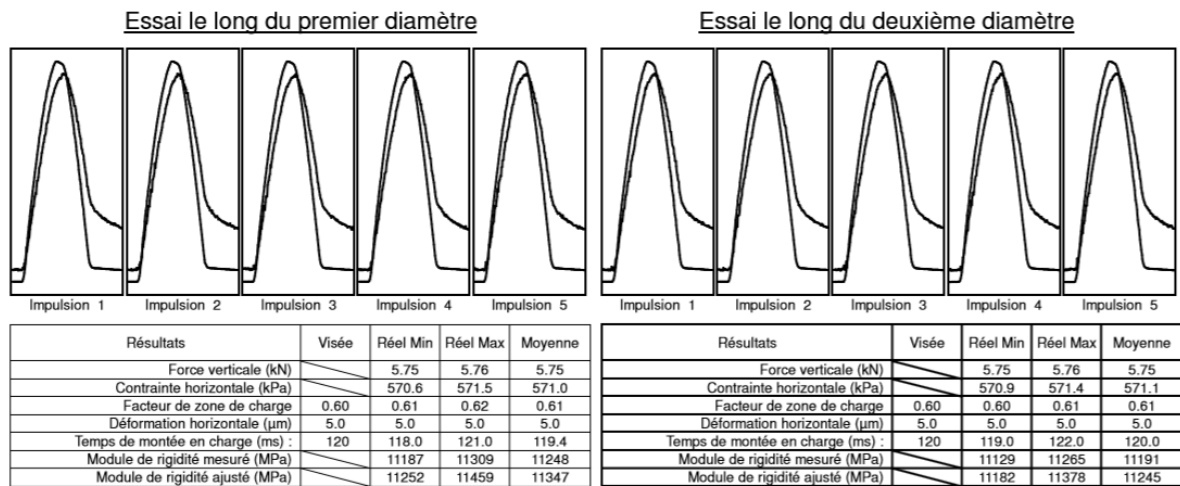


Figure 4.9: Essai Nottingham Universal Figure 4.10: Ecran de contrôle du NU



Moyenne des deux essais

Temps de montée en charge (ms) :	119.7
Déformation horizontale (µm) :	5.0
Déformation horizontale (%) :	0.0050
Module de rigidité mesuré (MPa) :	11220
Module de rigidité ajusté (MPa) :	11296

Figure 4.11: Exemple d'un résultat de mesure d'une éprouvette

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

Tableau 4.9: Résultats des essais

Essai	Teneur en liant	Taux d'additif	Température	Réponse
A	-	-	0	7891
B	+	-	0	4431
C	-	+	0	6036
D	+	+	0	6380
E	-	0	-	5840
F	-	0	+	6434
G	+	0	-	7138
H	+	0	+	6687
I	0	-	+	7583
J	0	+	-	10538
K	0	-	-	6875
L	0	+	+	6450
M	0	0	0	8990
N	0	0	0	8591
O	0	0	0	8326

Facteur	Niveau -1	Niveau 0	Niveau +1
Teneur en Liant (%)	4.5	5.5	6.5
Pourcentage d'additif (%)	0.2	0.5	0.8
Température (C°)	170	180	190

A noter que les valeurs retenues de chaque essai sont les moyennes des modules de trois éprouvettes.

4.5 Etablissement du modèle

Il est important de rappeler que ce modèle n'est valable que pour des constituants et une granulométrie similaire à celle des éprouvettes réalisées. Il est restreint aux bornes du domaine expérimental, à savoir pour une teneur en liant comprise entre 4.5% et 6.5%, un taux d'additif entre 0.2% et 0.8%, et une température de fabrication entre 170°C et 190°C.

Un programme informatique développé à l'aide de l'environnement de programmation MATLAB [Matlab documentation] a permis en utilisant la méthode des moindres carrés, de déterminer les coefficients du système d'équations du second degré à plusieurs variables permettant ainsi l'obtention du modèle.

L'algorithme implémenté peut se résumer comme suit:

- *Lecture du plan d'expériences (tableau 4.8) sous forme de matrice dont:
Les lignes sont les plans des essais
Les colonnes sont les différents paramètres*
- *Création d'un vecteur $C=[c_1, c_2, \dots, c_9]$*
- *Calcul des coefficients C_i ($i=1 \dots 9$) d'un polynôme du second degré en fonction des paramètres L , A et T .*
- *Optimisation du vecteur C par une méthode de régression polynomiale.*

Les coefficients obtenus sont:

$$C_0=8635$$

$$C_1= -1894$$

$$C_2= -195$$

$$C_3= -557$$

$$C_4=320$$

$$C_5= -217$$

$$C_6= -404$$

$$C_7=950$$

$$C_8= -261$$

$$C_9= -1199$$

En remplaçant ces valeurs dans le modèle postulé :

$$M = c_0 + c_1L^2 + c_2L + c_3A^2 + c_4A + c_5T^2 + c_6T + c_7LA + c_8LT + c_9AT \quad (4.3)$$

On obtient :

$$M = 8635 - 1894L^2 - 195L - 557A^2 + 320A - 217T^2 - 404T + 950LA - 261LT - 1199AT \quad (4.4)$$

Les coefficients les plus élevés correspondent aux paramètres les plus influents. Dans ce cas il s'agit des coefficients C_1 , C_7 et C_9 . Il est donc déduit que 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.

Les différentes surfaces de réponses sont représentées en fixant la valeur d'un paramètre et en représentant la réponse en fonction des deux paramètres restants.

Les surfaces de réponses seront présentées par série de trois figures correspondantes aux trois niveaux du paramètre fixé.

Pour la première série de figures (4.12, 4.13 et 4.14) le paramètre fixé est la température.

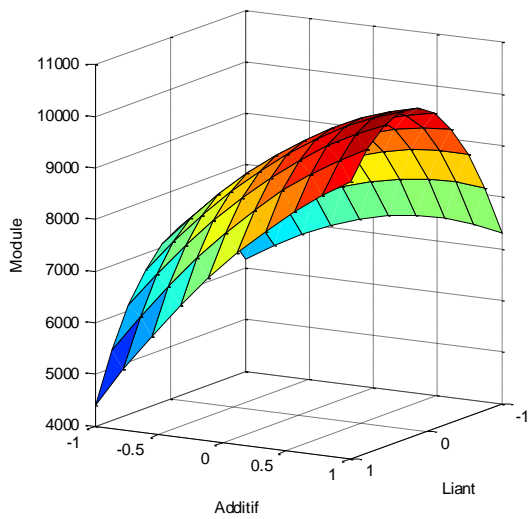


Figure 4.12: Surface de réponse pour une température de 170°C

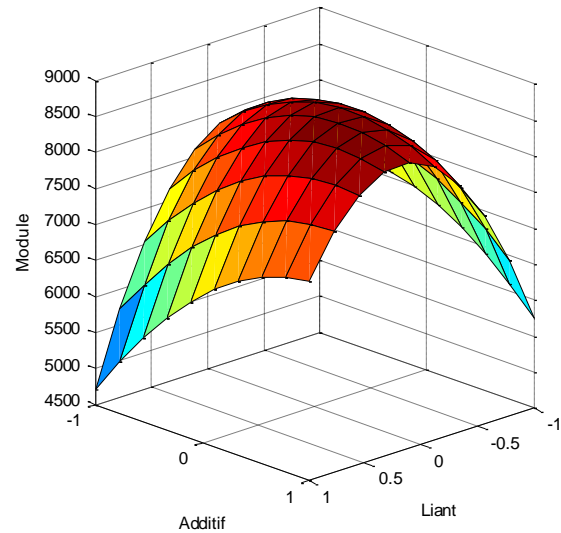


Figure 4.13: Surface de réponse pour une température de 180°C

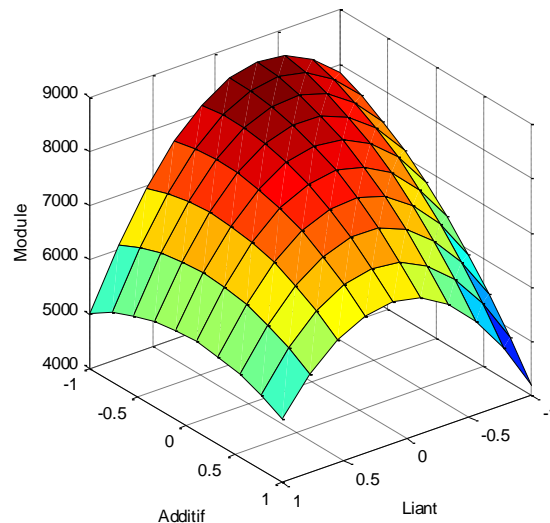


Figure 4.14: Surface de réponse pour une température de 190°C

Les surfaces de réponse pour une valeur de température fixe montrent 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 ce qui fait chuter le module de rigidité de l'enrobé.

L'effet de l'additif dépend quant à lui de la température de fabrication et de la teneur en liant. Il perd son effet rigidifiant avec l'augmentation de la température jusqu'à avoir l'effet inverse pour la température maximale. Son effet est aussi considérablement amoindri pour une teneur en liant élevée.

La série de figures (4.15, 4.16 et 4.17) suivante représente les surfaces de réponse pour une teneur en liant fixée.

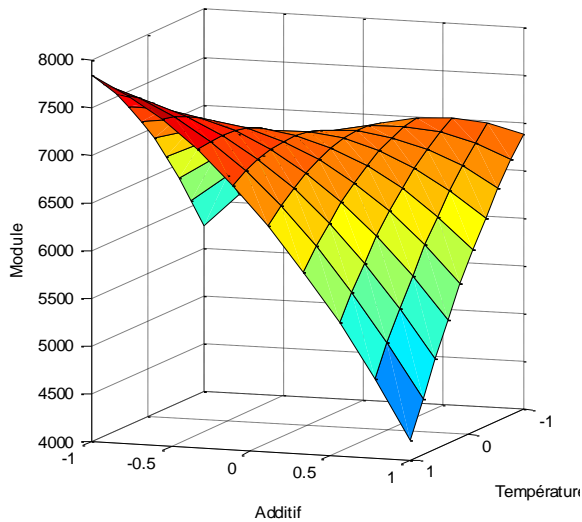


Figure 4.15: Surface de réponse pour une teneur en liant de 4.5%

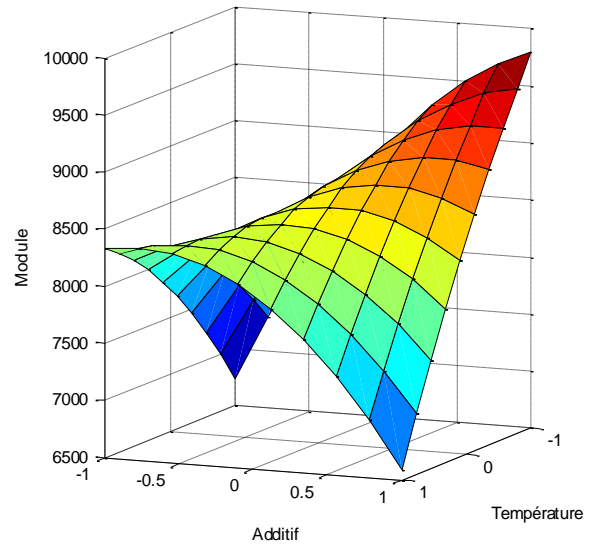


Figure 4.16: Surface de réponse pour teneur en liant de 5.5%

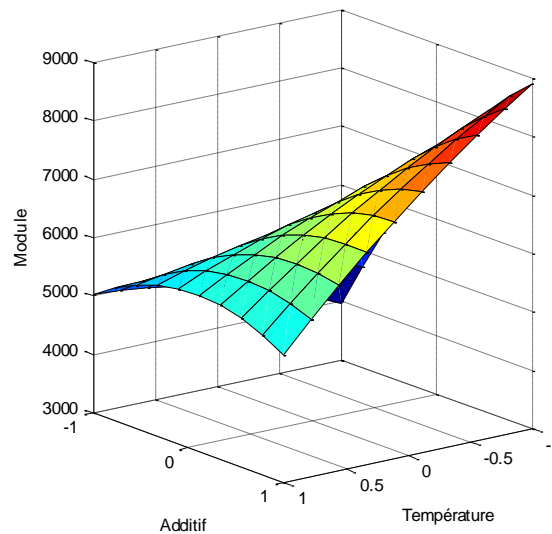


Figure 4.17: Surface de réponse pour une teneur en liant de 6.5%

Les courbes de surfaces pour une teneur en liant fixe permettent de mieux observer l'interaction entre la température de fabrication et le pourcentage d'additif. 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 série de figures (4.18, 4.19 et 4.20) suivante représente les surfaces de réponse pour un pourcentage d'additif fixé.

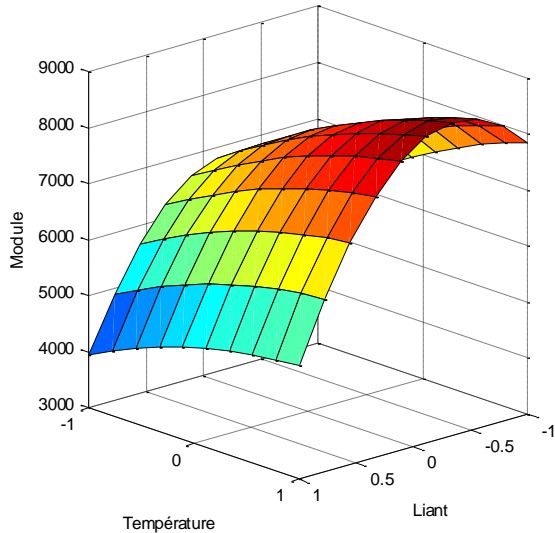


Figure 4.18: Surface de réponse pour une teneur en additif de 0.5%

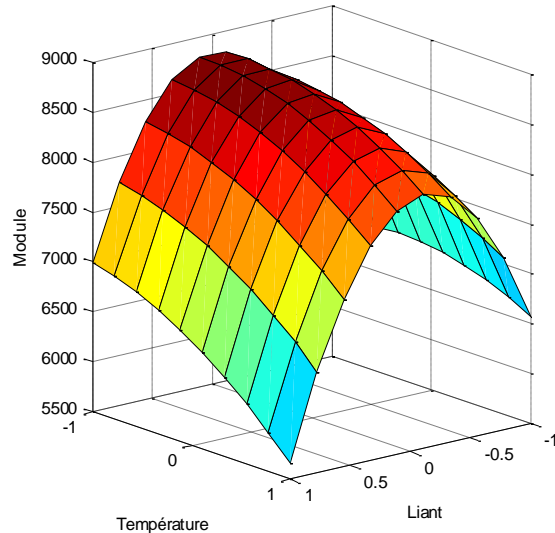


Figure 4.19: Surface de réponse pour une teneur en additif de 0.2%

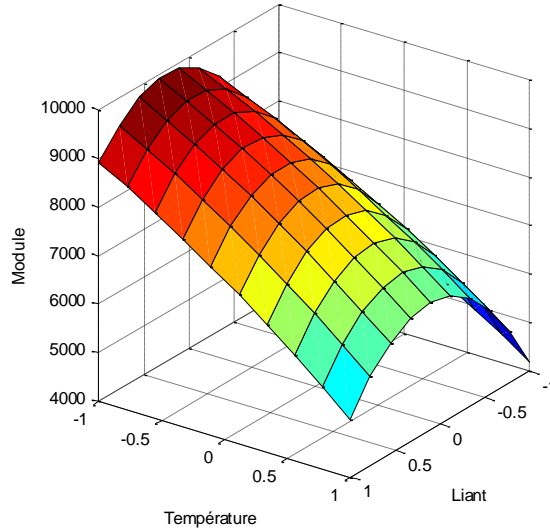


Figure 4.20: Surface de réponse pour une teneur en additif de 0.8%

Les surfaces de réponse pour un pourcentage d'additif fixe expriment l'interaction entre la teneur en liant et la température de fabrication. Pour la valeur minimale d'additif, on observe que 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. Pour des valeurs plus importantes d'additif l'augmentation de la température à un effet nuisible sur le module de rigidité de l'enrobé, cela est dû à l'interaction entre l'additif et la température.

4.6 Comparaison avec un modèle antérieur

Les résultats de cette étude seront comparés avec ceux du modèle développé par Harizi afin de voir les différences et l'apport d'un modèle polynomiale d'ordre 2 avec interactions entre les paramètres par rapport à un modèle linéaire sans interactions [Harizi et al, 2012].

4.6.1 Matériaux utilisés

L'enrobé conçu pour l'étude précédente à le squelette granulaire d'un béton bitumineux 0/14 comparable à celui de notre étude constitué de granulats ayant la même provenance et des caractéristiques mécaniques très proches.

Tableau 4.10: provenance des matériaux

Matériaux	Provenance
Sable 0/3	ENOF Keddara
Gravier 3/8	ENOF Keddara
Gravier 8/15	ENOF Keddara
Bitume 35/50	Naftal

Tableau 1.11: Caractéristiques mécaniques des granulats

Coefficient d'aplatissement	12.06 %
Propreté superficielle	6.9 %
Équivalent de sable à 10 % de fines	64.46 %
Valeur au Bleu de méthylène	1.25 %
Los Angeles	22.9 %
Micro Deval Humide	11.70 %

La figure 4.21 représente la courbe granulométrique de l'enrobé modifié.

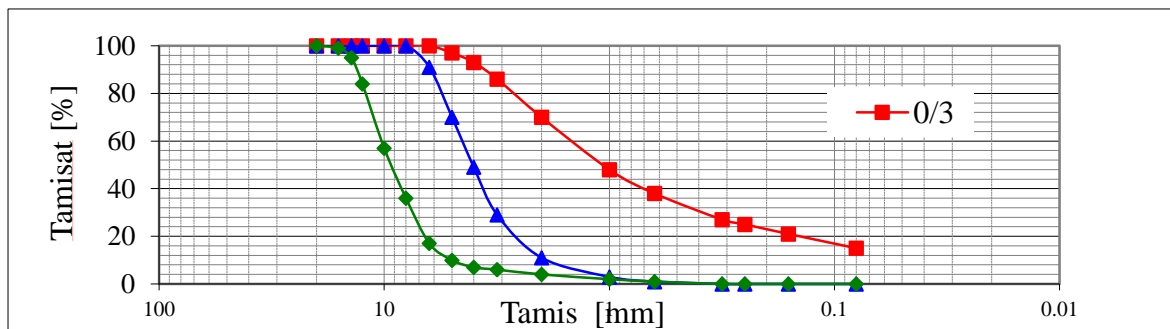


Figure 4.21: Courbe granulométrique des fractions granulaires

Le tableau suivant représente le domaine d'expérience considéré.

Tableau 4.12 : Domaine d'expériences

Facteur	Liant	Additif	Température
Niveau -1	4.4 %	0.1 %	170° C
Niveau 1	4.85 %	0.4 %	200° C

4.6.2 Modèle développé

En exploitant les résultats d'une série d'expérimentations, un modèle linéaire sans interactions entre les paramètres a été développé, et le module de rigidité E peut alors être calculé par la formule :

$$E = 3382.42 - 603.33 L + 7557.50 A + 56.75 T \quad (4.5)$$

Où L est la teneur en liant, T la température et A le pourcentage d'additif.

4.7 Comparaison entre les deux modèles

Le nouveau modèle prend en considération les interactions entre les paramètres, interactions dont les résultats ont montré qu'ils ont une grande influence sur le module de rigidité. Un modèle du second ordre est aussi plus précis et permet d'avoir un domaine d'expériences plus large. De plus l'influence du liant ne peut être modélisée avec précision qu'avec le modèle quadratique car elle présente un optimum au milieu de son domaine de variation.

La figure 4.22 montre les représentations graphiques des deux modèles.

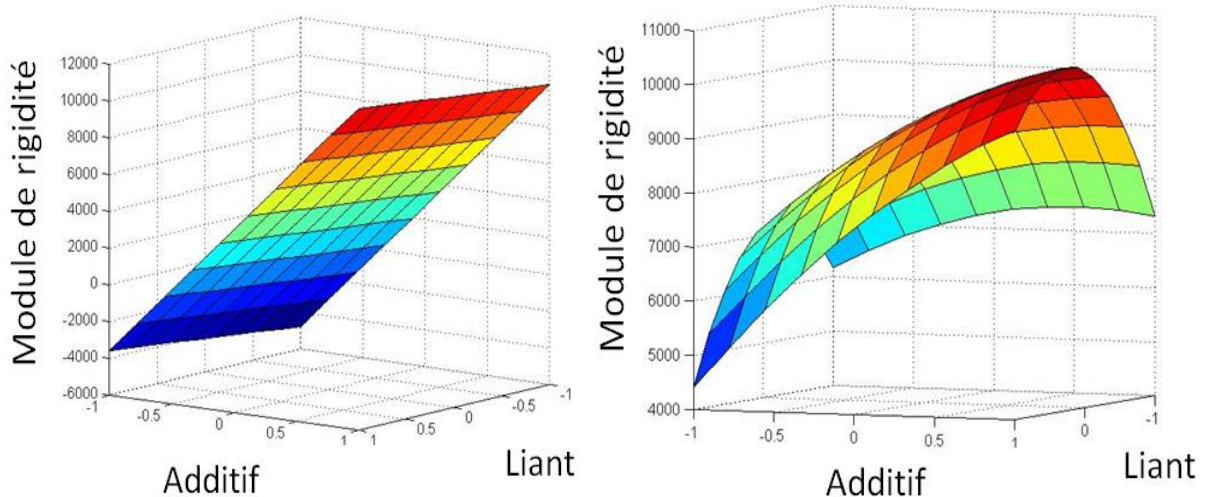


Figure 1.22: A gauche modèle linéaire, à droite modèle quadratique

4.8 Conclusion

Les expérimentations réalisées selon le plan de Box-Behnken ont conduit à l'élaboration d'un modèle mathématique reliant le module de rigidité d'un enrobé modifié à trois paramètres qui sont: La teneur en liant, le pourcentage d'additif et la température de fabrication. L'utilisation de ce plan d'expérience a permis de réduire le nombre d'essais nécessaires de moitié, ce qui constitue un gain de temps et d'énergie considérable. Les paramètres et interactions les plus influents sur le module de rigidité ont été identifiés.

Ainsi, il est apparu que la teneur en liant et les interactions teneur en liant/pourcentage d'additif et température de fabrication/pourcentage d'additif doivent bénéficier d'une attention particulière dans la formulation d'un enrobé modifié.

Le modèle permet de prévoir le module de rigidité de l'enrobé en déterminant les valeurs des trois paramètres étudiés, ou encore de déterminer leurs valeurs en fonction d'un module de rigidité souhaité. Le modèle n'est néanmoins valable que dans le domaine expérimental donné.

L'effet de l'additif PR Plast Sahara sur le bitume 35/50 a aussi été étudié en réalisant les essais de pénétrabilité et de ramollissement ce qui a permis d'observer l'effet rigidifiant de l'additif qui transforme le bitume classique en bitume de grade dur.

Conclusion générale

Conclusion générale

La modification d'un enrobé bitumineux est un moyen efficace pour prolonger la durée de vie d'une chaussée en améliorant ses propriétés mécaniques. Ce travail a donc été consacré à l'élaboration d'un modèle mathématique reliant le module de rigidité d'un enrobé modifié, aux paramètres les plus influents à savoir sa teneur en liant, le pourcentage d'additif incorporé et la température de fabrication.

Le modèle est un moyen d'étudier le module de rigidité d'un enrobé modifié en fonction des facteurs les plus influents et être une aide à la formulation.

On rappelle les étapes qui ont abouti à l'élaboration du modèle

- La conception d'un plan d'expérience de Box-Behnken.
- Une étude granulométrique des matériaux.
- Essais de pénétrabilité et de ramollissement sur le bitume avant et après incorporation de l'additif.
- Formulation d'un béton bitumineux à module élevé 0/14.
- Confection des éprouvettes avec différentes valeurs des paramètres à étudier conformément au plan d'expériences.
- Réalisation des essais de traction indirecte.
- Elaboration d'un programme de calcul basé sur la méthode des moindres carrées afin de déterminer les coefficients du modèle.
- Détermination des facteurs et leurs interactions les plus influentes.
- Représentation des résultats sous forme de surfaces de réponses.

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 basses

Cette étude pourra être 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. Une autre perspective serait l'obtention d'un modèle en utilisant des méthodes d'intelligence artificielle tels que réseaux de neurones au lieu des méthodes analytiques, et comparer les résultats avec la méthode des moindres carrés.

Références bibliographiques

Ahmedzade.P, Tigdemir.M, Kalyoncuoglu.S.F, *Laboratory investigation of the properties of asphalt concrete mixtures modified with TOP-SBS*, Construction and Building Materials 21, 626-633, 2007.

Airey.G.D, *Rheological properties of styrene-butadiene-styrene polymer modified road bitumens*, Fuel 82, 1709-1719, 2003.

Alatas. T, Yilmaz. M, *Effects of different polymers on mechanical properties of bituminous binders and hot mixtures*, 2013.

Ameri.M, Mansourian.A, Sheikhmotevali. A.H, *Investigating effects of ethylene vinyl acetate and gilsonite modifiers upon performance of base bitumen using Superpave tests methodology*. Construction and Building Materials, 2012.

Becker, Y, Mendez, M. P., & Rodriguez, Y. *Polymer modified asphalt*. In *Vision Tecnologica*. 2001.

Brosseaud.Y, Gaudefroy.V, *Les enrobés tièdes et semi-tièdes*. Les techniques de mise en œuvre des matériaux enrobés, LCPC, 2008.

Brovelli. C, *Using polymers to improve the rutting resistance of asphalt concrete*, 2015.

Corté. J.F, Brosseand. Y, Kerzreho. J.P, Spagnol. A, *Study of rutting of wearing courses on the LCPC test track*. International conference on asphalt pavements, Seattle, 1997.

Cortizo.M.S, Larsen.D.O,Bianchetto.H, Alessandrini.J.L, *Effect of the thermal degradation of SBS copolymers during the ageing of modified asphalts*, Polym Degrad Stab. 86:2, 275-282, 2004.

De Backer.C, *Enrobés à module élevé (EME): de la conception à la mise en œuvre*, Compte rendu de recherche, 2007.

Delorme. JL, *Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés à chaud*. LCPC, 2006.

Di Benedetto. H, *Modélisation du comportement des géomatériaux : Application aux enrobés Bitumineux et aux Bitumes*. Institut Polytechnique de Grenoble, 1987.

Di Benedetto. H, Partl. M.N, Francken.L, De La Roche Saint André.C, *Stiffness testing for bituminous mixtures*, Materials and Structures 34, 66-70, 2001.

Franco. J, *Planification d'expériences numériques en phase exploratoire pour la simulation des phénomènes complexes*, thèse Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2008.

Geng.H, Clopotel.S, Bahia.H.U, *Effects of high modulus asphalt binders on performance of typical pavement asphalt structures*, Construction and Building Materials, 2013.

Goupy. J et Creighton. L, *Introduction aux plans d'expériences*, Dunod, 2006.

Govaerts. B, *Plans d'expérience pour l'estimation de surfaces de réponse*, Université Catholique de Louvain, 2010.

Gupta.S, Veeraragavan.A, *Fatigue behaviour of polymer modified bituminous concrete mixtures*, Journal of the Indian Roads Congress (1-3) 548, 2009.

Habib.N.Z, Kamaruddin.I, Napiah.M, Tan.I.M, *Effect of mixing process on polypropylene modified bituminous concrete mix properties*, International Conference on Civil and Environmental Engineering ICCEE 2011, Bali, Indonesia, Oct. 26-28, 2011.

Haddadi.S, Ghorbel.E, Laradi.N, *Effects of the manufacturing process on the performances of the bituminous binders modified with EVA*, Construction and Building Materials 22, 1212-1219, 2008.

Harizi. I, *Amélioration de module de rigidité des enrobés bitumineux par l'ajout d'un additif*, mémoire de magister, Université Saad Dahlab, Blida, 2012.

Harizi.I, Morsli.M, Bensaïbi.M, *Laboratory Evaluation of the Stiffness Modulus of a Modified Bituminous Concrete with PR PLAST Sahara*, Journal of Civil Engineering and Architecture, 2013.

Hinishoglu.S, Aglu.E, *Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix*, Materials Letters 58, 267-271, 2004.

Hinislioglu.S, Aras.H.N, Bayrak.O.U, *Effects of high density polyethylene on the permanent deformation of asphalt concrete*, Indian Journal of Engineering and Material Sciences 12, 456-460, 2005.

Kim, S., Sholar, G., Byron, T., & 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.

Larino.T, *Autopsie d'une chaussée*, LCPC, Division ESAR, section AGR, 2001.

Le bec.S, *Les émulsions de bitume: formulation et fabrication selon leur usage*, formation technique sur l'utilisation des liants bitumineux en centrale et chantier,

2012.

Lee.H.J, Lee.J.H, Park.H.M, *Performance evaluation of high modulus asphalt mixtures for long life asphalt pavement*, Construction and Building Materials, 2007.

Linder Richard, *Les plans d'expériences. Un outil indispensable à l'expérimentateur*, Les Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 2005.

Lu. X, Isacsson. U, *Testing and appraisal of polymer modified road bitumens*-state of the art. Mater Struct, 28:139–59, 1995.

Neves.J, Correia.A.G, *Evaluation of the stiffness modulus of bituminous mixtures using laboratory tests (NAT) validate by field back-analysis*, 7th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields (BCRA'05), Trondheim, Norway, June 27-29, 2005.

Norme française NF EN 12697-22, *Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud, Partie 22 : Essai d'orniérage*.

Norme française NF EN 12697-24, *Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud, Partie 24 : Résistance à la fatigue*.

Norme française NF EN 12697-26, *Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud, Partie 26 : Module de rigidité*.

Norme française NF EN 12697-31, *Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud, Partie 31 : Confection d'éprouvettes à la presse à compactage giratoire*.

Norme française NF EN 1426, *Détermination de la pénétrabilité à l'aiguille*.

Norme française NF EN 1427, *Détermination de la température de ramollissement, méthode bille anneau*.

Norme française NF P 98-140, *Couches d'assises : Enrobés à module élevé (EME)*,1999.

Norme française NF P 98-141, *Enrobés hydrocarbonés couches de roulement et couches de liaison : bétons bitumineux à module élevé (bbme)*,1999.

Radziszewski.P, *Modified asphalt mixtures resistance to permanent deformations*, Journal of Civil Engineering and Management 13:4, 307-315, 2007.

Sargand.S, Kim.S, *Performance evaluation of polymer modified and unmodified Superpave mixes. In: Second International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control*, Auburn, AL, 2001.

Sanchez-Alonso. E , Vega-Zamanillo.A, Castro-Fresno.D, DelRio-Prat.M, *Evaluation of compactability and mechanical properties of bituminous mixes with warm*

additives, Construction and Building Materials 25, 2304-2311. 2011.

Sengoz. B, *Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen*, 2007.

Tayfur.S, Ozen.H, Aksoy.A, *Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers*, Construction and Building Materials 21, 328-337, 2007.

Triboulet. P, *Notions de bases sur les plans d'expériences*, cours, 2008.

Visa.F, *Caractéristiques des chaussées*, cours, 2008.

Vlachovicova.Z, Wkumbura.C, Stastana.J, Zanzotto.L, *Creep characteristics of asphalt modified by radial styrene-butadiene-styrene copolymer*, Constr. Build Mater, 21, 567-577, 2007.

Yildirim.Y, *Polymer modified asphalt binders*, Construction and Building Materials 21, 66-72, 2007.

Zhi.S, Gun.W.W, Hui.L.X, Bo.T, *Evaluation of fatigue crack behavior in asphalt concrete pavements with different polymer modifiers*, Construction and Building Materials 27, 117-125, 2012.

Zhu, J., Birgisson, B., & Kringos, N. *Polymer modification of bitumen: Advances and challenges*. European Polymer Journal, 54, 18-38, 2014.