

UNIVERSITE DE SAAD DAHLAB DE BLIDA

Faculté des Sciences de l'ingénieur

Département de Génie Civil

MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : construction

**AMÉLIORATION DE MODULE DE RIGIDITÉ DES ENROBÉ
BITUMINEUX PAR L'AJOUT D'UN ADDITIF**

Par

Imane HARIZI

Devant le jury composé de :

S. Kenai	Professeur, U. de Blida	Président
B. Menadi	Maitre de conférences A, U. de Blida	Examineur
M. Haddid	Maitre de conférences A, E.N.S.T.P, Alger	Examineur
M.MORSLI	Maitre de conférences A, E.N.P d'Alger	Rapporteur
M.BENSAIBI	Professeur, U.de Blida	Co-Rapporteur

Blida, 12 Février 2012

ملخص

ان الطرقات البيتومينية تخضع لتشوهات كبيرة تسببها الحمولات المتنقلة و الظروف المناخية, هذه التشوهات إن تجاوزت القيمة القصوى المقبولة يمكن أن تحدث خسائر معتبرة أو تؤدي إلى انهيار الطريق . لأجل ذلك فان استخدام المواد البيتومينية المعدلة يحسن مقاومتها ضد هذه التشوهات.

هذا العمل يدخل في حيز هذا لإطار و يهدف إلى دراسة مواد البيتومين أجريت عليها تعديلات و ذلك بإضافة معدل من نوع PR PLAST SAHARA من اجل تعيين معامل صلابتها. لهذا الغرض استعملنا خطة تجريبية تستعمل جداول تاجوشي للحد من عدد التجارب.

قمنا أيضا باقتراح نموذج رياضي لمعامل الصلابة.

الكلمات الدالة: الطرق البيتومينية, مواد البيتومين, مواد البيتومين عالية المعامل , خطة تجريبية, جداول تاجوشي, معامل صلابة.

ABSTRACT

Uneven roads surface can be observed on bituminous pavements. This is due to moving loads and climate conditions. If the observed deformations exceed the elastic limit, important damages can occurred. So modified bituminous (BBME) can be used to improve their rut resistance. To do this, a modified BBME by addition of the SAHARA PR PLAST has been studied to determine its stiffness modulus. For this purpose an experimental design using the Taguchi tables was used to reduce the number of tests. A mathematical model of this module was proposed also.

KEYWORDS: bituminous pavement, asphalt, modified bituminous with high modulus, experimental design, Taguchi tables, stiffness modulus.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ici toute ma gratitude à madame Morsli Meriem, Maître de conférences à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, qui m'a encadré et guidé dans ce travail, conseillé et encouragé sans jamais ménager ses efforts tant intellectuel que moral. Son soutien était permanent;

Je tiens aussi à exprimer ma profonde reconnaissance et mes remerciements les plus sincères à mon co-encadreur Pr. Bensaïbi Mahmoud pour son aide, sa disponibilité permanente, son encouragement et sa patience.

Ma gratitude s'adresse à Monsieur Bensaïbi Mohamed, directeur du département Produit Noir au Laboratoire Central des Travaux Publics (LCPC) d'Alger, mon maître de stage. Son accueil et sa confiance ont rendu ce stage possible et intéressant. Je le remercie aussi pour son amabilité, sa patience et le soutien technique qu'il m'a apporté tout au long de ce travail.

J'en profite aussi pour saluer très, très chaleureusement toute l'équipe du laboratoire du département produit noir au LCPC d'Alger, qui m'ont apporté leur aide et leur soutien dans la réalisation de mes essais.

Que tous les membres du jury trouvent ici l'expression de mon profond respect, et mes sincères remerciements pour avoir accepté de juger ce travail.

Je tiens aussi à adresser mes sincères remerciements aux enseignants de Département de Génie Civil, pour leurs collaborations à ma formation.

Enfin je remercie toute ma famille et en premier lieu mes parents pour leur soutien tout au long de ces années d'étude.

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUE ET TABLEAUX

Figure 1.1	Chaussée souples.	16
Figure 1.2	Fonctionnement de chaussée souple.	16
Figure 1.3	Faïençage à mailles larges.	17
Figure 1.4	État avancé du faïençage.	17
Figure 1.5	Chaussée bitumineuse épaisse.	17
Figure 1.6	Chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques.	18
Figure 1.7	Chaussée à structure mixte.	18
Figure 1.8	Chaussée à structure inverse.	19
Figure 1.9	Chaussée en béton de ciment.	19
Figure 1.10	Les différentes couches constituant la chaussée.	23
Figure 1.11	Ingrédient à réunir pour un bon dimensionnement par approche mécanique.	28
Figure 1.12	Différentes étapes d'un dimensionnement par modèle mécanique.	31
Figure 1.13	Influence de l'épaisseur de la couche de surface sur la déformation Verticales au de dessus de la couche de base et de plate-forme support (Ekdahl, 1999).	33
Figure 1.14	Schématisation des sollicitations induites par le trafic (Di Benedetto, 1998).	34
Figure 1.15	Schématisation des sollicitations induites par la température.	36
Figure 1.16	Déformation de la couche de surface en fonction de la vitesse de circulation et de la température de la couche de surface (Ekdahl, 1999) sous une charge d'essieu de 11,5 tonnes (selon Perret et al.2001).	37
Figure 1.17	Influence de variation saisonnière sur la déformation (White, 1999).	37
Figure 1.18	Influence de la vitesse de circulation sur la déformation longitudinale dessous de la couche de surface (Brown, 1997).	38
Figure 1.19	Ornière à grand rayon.	39
Figure 1.20	Ornière à petit rayon.	39
Figure 1.21	Orniérage à petit rayon dans la chaussée routière.	40
Figure 1.22	Orniérage à grand rayon dans la chaussée routière.	40
Figure 1.23	Affaissements de chaussée.	40
Figure 1.24	Affaissements de rives.	40
Figure 1.25	Gonfle.	40
Figure 1.26	Bourrelet transversal.	40
Figure 1.27	Fissures transversales.	42
Figure 1.28	Fissures longitudinales.	42
Figure 1.29	Fissures d'adaptation.	42
Figure 1.30	Fissuration des joints.	42
Figure 1.31	Fissuration en étoile.	42
Figure 1.32	Faïençage.	42
Figure 1.33	Faïençage circulaire.	43
Figure 1.34	Faïençage dans les bandes de Roulement.	43
Figure 1.35	Nid de poule.	44
Figure 1.36	Désenrobage - plumage – Enrobés.	44

Figure 1.37	Pelade de l'enrobé (niveau 3).	44
Figure 1.38	Pelade de l'enrobé (niveau 2).	44
Figure 1.39	Ressuage.	45
Figure 1.40	Remontée de fines.	45
Figure 1.41	Réparations multiples.	45
Figure 1.42	Désordres divers.	45
Figure 2.1	Coupe d'un matériau bitumineux.	50
Figure 2.2	Prélèvement sur chantier d'un matériau bitumineux.	50
Figure 2.3	Réalisation des enrobés à chaud sur chantier.	51
Figure 2.4	Teste de température d'un enrobé tiède sur chantier.	52
Figure 2.5	Réalisation des enrobés tiède sur Chantier.	52
Figure 2.6	Réalisation d'un enrobé bitumineux à froid sur chantier.	53
Figure 2.7	Comportement "type" des bétons bitumineux, (ϵ) déformation – (N) Nombre de chargements.	54
Figure 2.8	Schématisation de la structure colloïdale d'un bitume routier (d'après Brule, 1978).	57
Figure 2.9	Classes de comportement des bitumes en fonction de $ \epsilon $ et T.	61
Figure 2.10	Influence de la forme des granulats [Vanelstraete et Francken, 1994].	64
Figure 2.11	Influence de la nature du liant [Vanelstraete et Francken, 1994].	65
Figure 2.12	Influence de la teneur en liant au niveau d'ornièrè.	65
Figure 2.13	Propriétés internes en fonction de la teneur en liant.	66
Figure 2.14	Angle de mouillage à l'interface liquide-solide.	68
Figure 2.15	Presse à cisaillement giratoire mlpc type 2.	72
Figure 2.16	Essai de fatigue sur éprouvettes trapézoïdales.	73
Figure 2.17	Essai de Traction Compression direct.	75
Figure 2.18	Ecran de contrôle de l'essai Traction Compression direct.	75
Figure 2.19	Essai de module complexe par flexion en deux points sous chargement Sinusoïdale.	76
Figure 2.20	Déformation d'une éprouvette - Essai de traction indirecte NAT-.	77
Figure 2.21	Evolution de l'effort de déformation en fonction du temps.	78
Figure 2.22	Représentation du module complexe.	79
Figure 2.23	Contrainte en tension-compression cyclique de forme sinusoïdale appliquée sur un enrobé et la déformation mesurée.	80
Figure 3.1	PR PLAST Module.	85
Figure 3.2	PR PLAST S.	85
Figure 3.3	PR PLAST SAHARA	86
Figure 3.4	PR Phone: Additif anti – bruit.	86
Figure 3.5	Résumé des niveaux de l'épreuve de formulation.	89
Figure 4.1	Courbes granulométriques des fractions granulaires de BBME modifié 0/14.	97
Figure 4.2	Courbe granulométriques du mélange BBSG 0/14.	99
Figure 4.3	Principe de l'essai Marshall	106
Figure 4.4	Stabilité Marshall des nouvelles teneurs en liant de BBSG 0/14.	109
Figure 4.5	Un essai en chaque région du domaine d'après Pillet (1992).	101
Figure 5.1	Appareil de NAT	112
Figure 5.2	Forme de l'impulsion de chargement, indiquant le temps de montée et la valeur crête de charge	113
Figure 5.3	Essai NAT (CTTP)	115
Figure 5.4	Ecran de contrôle du NAT	115

Figure 5.5	Influence de la teneur en liant sur le module d'un BBME modifié 0/14 (Température de fabrication et le pourcentage d'additif sont Fixés)	120
Figure 5.6	Influence de la température de fabrication sur le module d'un BBME modifié 0/14 (teneur en liant et le pourcentage d'additif fixés)	121
Figure 5.7	Influence de pourcentage d'additif sur le module d'un BBME modifié 0/14 (teneur en liant et température de fabrication fixés)	122
Tableau 1.1	Principal origine des déformations des chaussées bitumineuses	46
Tableau 1.2	Principal origine des fissures des chaussées bitumineuses	47
Tableau 1.3	Principal origine des arrachements des chaussées bitumineuses	47
Tableau 1.4	Principal origine des arrachements des chaussées bitumineuses	48
Tableau 2.1	Méthodes d'essais normalisés pour la détermination du module Complexe des enrobés	74
Tableau 3.1	Epaisseurs d'utilisation par couche pour BBME	91
Tableau 3.2	Valeurs du module de richesse des BBME	91
Tableau 3.3	Performances mécaniques des BBME	92
Tableau 3.4	Pourcentage de vides des BBME	93
Tableau 4.1	Provenance des matériaux utilisés	95
Tableau 4.2	Caractéristiques chimiques des granulats	96
Tableau 4.3	Caractéristiques mécaniques des granulats	97
Tableau 4.4	Caractéristiques du bitume du mélange de BBSG 0/14	98
Tableau 4.5	Pourcentages pondéraux des différentes classes	99
Tableau 4.6	Ensemble des facteurs retenu dans la formulation de BBME modifié	101
Tableau 4.7	Surface spécifique du mélange BBME modifié	101
Tableau 4.8	Valeurs de module de richesse et teneurs en liant du plan d'expérience	102
Tableau 4.9	Table de Taguchi L ₁₆ (2 ¹⁵)	103
Tableau 4.10	Les valeurs du plan d'expérience de BBME modifié	104
Tableau 4.11	Résultats d'essais Marshall sur le BBSG 0/14	106
Tableau 4.12	Résultats de compacité de BBSG 0/14	107
Tableau 4.13	Résultats des essais sur le BBME modifié 0/14 selon le plan d'expérience	108
Tableau 4.14	Caractéristiques mécaniques des mélanges d'enrobé bitumineux BBSG 0/14	109
Tableau 4.15	Résultats d'essais des nouvelles teneurs en liant pour BBME modifié	110
Tableau 5.1	Module de rigidité correspondant pour chaque essai du NAT	115
Tableau 5.2	Résultats d'essai NAT sur le BBME modifié 0/14	116
Tableau 5.3	Résultats du calcul	119
Tableau 5.4	Caractéristiques du bitume du mélange de BBME modifié 0/14.	118
Tableau 5.5	Pourcentages pondéraux des différentes classes	119
Tableau 5.6	Résultats d'essais Marshall sur BBSG 0/14.	121
Tableau 5.7	Résultats de compacité de BBSG 0/14.	122
Tableau 5.8	Résultats d'essai du plan d'expérience de BBME modifié 0/14 selon le plan d'expérience.	123
Tableau 5.9	Caractéristiques mécaniques des mélanges d'enrobé bitumineux BBSG 0/14.	124
Tableau 5.10	Résultats d'essai des nouvelles teneurs en liant pour BBME modifié 0/14.	125
Tableau 5.11	Module de rigidité correspondant pour chaque essai du NAT.	126
Tableau 5.12	Résultats d'essai NAT sur le BBME modifié 0/14.	128
Tableau 5.13	Résultats du calcul.	131

TABLE DES MATIERES

RÉSUMÉ	1
REMERCIEMENT	4
TABLE DES MATIERES	5
LISTES DES ILLUSTRATUIN, GRAPHIQUES ET TABLEAUX	8
INTRODUCTION	11
1. ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE	14
1.1. Introduction	14
1.2. Définition des chaussées	15
1.3. Différents types de chaussées classiques	15
1.3.1. Chaussées souples	15
1.3.2. Chaussées bitumineuses épaisses	17
1.3.3. Chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques	17
1.3.4. Chaussées à structure mixte	18
1.3.5. Chaussées à structure inverse	18
1.3.6. Chaussées en béton de ciment	19
1.4. Constitution des structures de chaussée	19
1.4.1. Couche de surface	20
1.4.2. Couche d'assises	21
1.4.3. Couche de forme	21
1.4.4. Sol support	22
1.4.5. L'accotement	22
1.4.6. Fossé	22
1.5. Dimensionnement des chaussées bitumineuses	23
1.5.1. Facteurs pris en compte dans le dimensionnement	23
1.5.2. Dimensionnement des chaussées bitumineuses	25
1.6. Dégradation des chaussées bitumineuse	32
1.6.1. Facteurs de dégradation des chaussées	32
1.6.2. Principaux modes de dégradation des chaussées bitumineuse	38
1.6.3. Désordres : principales origines	46
1.7. Conclusion	49
2. LES ENROBÉS BITUMINEUX	50
2.1. Introduction	50
2.2. Définition d'enrobés bitumineux	50
2.3. Différentes familles d'enrobés bitumineux	51
2.3.1. Les enrobés bitumineux à chaud	51
2.3.2. Les enrobés bitumineux tièdes	51
2.3.3. Les enrobés bitumineux à froid	52
2.4. Comportement des enrobés bitumineux	53
2.5. Constituants du mélange d'enrobés bitumineux	55

2.5.1.	Granulats	55
2.5.2.	Bitume	56
2.5.2.1.	Composition chimique et structure de bitume	56
2.5.2.2.	Différentes familles de Bitume	57
2.5.2.3.	Classe de comportement des bitumes purs	60
2.5.2.4.	Propriétés rhéologiques des liants bitumineux	61
2.6.	Formulation des enrobés bitumineux	62
2.6.1.	Paramètres influencent sur la formulation des enrobés bitumineux	62
2.6.2.	Méthode de Formulation des enrobés bitumineux	67
2.7.	Caractéristiques du mélange bitumineux	68
2.7.1.	Liaison bitume – granulats	68
2.7.2.	Structure des enrobés bitumineux	69
2.8.	Propriétés Mécaniques des enrobés bitumineux	70
2.8.1.	Les essais non homogènes	70
2.8.2.	Les essais homogènes	72
2.9.	Module complexe des enrobés bitumineux	78
2.10.	Conclusion	82
3.	LES ENROBÉ BITUMINEUX A MODULE ÉLEVÉ	83
3.1.	Introduction	83
3.2.	Définition des enrobés bitumineux à module élevé (BBME)	83
3.3.	Classes des enrobés à module élevé	84
3.4.	Dispositions pour parvenir aux objectifs	84
3.5.	Constituants du mélange d'enrobés bitumineux à module élevé(BBME)	84
3.5.1.	Granulats	85
3.5.2.	Bitume	85
3.5.3.	Additif	85
3.6.	Caractéristiques des enrobés bitumineux à module élevé(BBME)	89
3.6.1.	L'épreuve de formulation	89
3.6.2.	Performances de béton bitumineux à module élevé (BBME)	91
3.7.	Domain d'emploi des enrobés bitumineux à module élevé (BBME)	93
3.8.	Précautions d'usage	94
3.9.	Conclusion	94
4.	MATERIAUX ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES	95
4.1.	Introduction	95
4.2.	Caractérisation des matériaux utilisés	95
4.2.1.	Provenance des matériaux	95
4.2.2.	Caractéristiques des granulats	96
4.2.3.	Bitume	98
4.2.4.	PR PLAST SAHARA	98
4.3.	Formulation d'enrobé bitumineux BBSG 0/14	99
4.3.1.	Courbe granulométrique du mélange	99
4.3.2.	Détermination de la quantité d'essais à réaliser- Plan d'expérience	100
4.3.2.1.	Objectif et problématique	100
4.3.2.2.	Choix des paramètres	100
4.3.2.3.	Construction du plan d'expérience	102
4.4.	Préparation du mélange bitumineux	104

4.4.1. Préparation des granulats	104
4.4.2. Malaxage du mélange bitumineux	105
4.4.3. Compactage des moules	105
4.5. Essais effectuée sur l'enrobé bitumineux BBSG 0/14	105
4.5.1. Essai Marshall	106
4.5.2. Compacité et % vide	107
4.6. Formulation du BBME modifié 0/14	107
4.7. Détermination des nouvelles teneurs en liant	108
4.8. Résultats des essais du plan d'expérience	110
4.9. Conclusion	111
5. ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS	112
5.1. Introduction	112
5.2. Description de l'appareil utilise (NAT)	112
5.3. Mode opératoire	114
5.4. Modèle mathématiques	117
5.5. Incertitude sur le modèle mathématique	117
5.6. Domain de validité du modèle proposé	118
5.7. Calcul du module de rigidité pour l'ensemble des essais	119
5.8. Poids des différents facteurs	119
5.9. Conclusion	123
CONCLUSION	124
LISTE DESSYMBOLS ET ABREVIATIONS	126
ANNEXE A	127
ANNEXE B	132
ANNEXE C	134
ANNEXE D	135
ANNEXE E	140
REFERENCES	154

INTRODUCTION

Dans la plupart des pays, le réseau routier constitue l'un des patrimoines communs les plus importants et appartient essentiellement à l'Etat. Les administrations routières doivent entretenir, exploiter, améliorer, remplacer et préserver ce patrimoine tout en gérant avec soin les ressources financières et humaines qui doivent servir à réaliser ces objectifs. Environ 50 % de leur budget routier est essentiellement affecté à l'entretien et à la remise en état des routes existantes. Le maintien de revêtements sûrs, confortables et durables sur les autoroutes et routes principales à fort trafic représente depuis longtemps un défi majeur pour les maîtres d'ouvrage et les équipes opérationnelles, qui gèrent la construction et l'entretien des routes.

Dans les années 80, les techniciens français ont développé et mis en œuvre des bétons bitumineux à hautes performances désignés sous le nom normatif d'Enrobé à Module Elevé et de Béton Bitumineux à Module Elevé –EME et BBME – Le but recherché était d'avoir une gamme d'enrobés à très haute tenue à l'orniérage et à la fatigue.

Ces nouveaux matériaux sont essentiellement fabriqués avec un bitume nouvelle génération, de grade très dur, lorsque le bitume en question fait défaut, une autre technique innovante permet, par l'ajout d'additifs particuliers, de fabriquer ces mêmes types d'enrobés éprouvés, agréés et mis en œuvre dans de nombreux pays dont le Maroc et la Tunisie; ces additifs au comportement spécial permettent une amélioration considérable des caractéristiques et performances des enrobés avec, dans le cadre de certaines applications, l'obtention de modules très élevés. Ils sont compatibles avec tous les grades de bitume et, par ailleurs, ces additifs peuvent palier certaines carences du bitume utilisé.

Ces produits, largement développés en Europe, au Canada et aux USA depuis plus de 20 ans ont été introduits en Algérie, lors de la réalisation de l'autoroute EST-OUEST. A ce stade, ce sont les laboratoires étrangers qui ont procédé à la formulation et la mise en œuvre de ces enrobés. Leur généralisation sur l'ensemble du territoire fera nécessairement

appel aux compétences nationales afin d'adapter ces techniques aux conditions locales – matériaux, climat - en vue d'une normalisation future.

Le présent travail se veut une familiarisation avec quelques techniques routières innovantes, le travail de laboratoire, les plans d'expérience et l'approche analytique. La technique routière retenue est celle de l'amélioration d'un enrobé par incorporation d'additif.

Le travail envisagé dans ce mémoire vise deux objectifs, combinant une approche expérimentale et une approche analytique.

En premier, il s'agit d'élaborer une méthodologie de formulation couplée avec des essais de performance permettant d'obtenir la formulation optimale d'un enrobé conventionnel.

En second, il s'agit de proposer une méthode de formulation se basant sur une approche pondérale et sur un modèle analytique, capable de prévoir les performances des enrobés bitumineux en fonction du taux d'ajout d'additif, de la température de fabrication et de la teneur en liant. Pour ce faire on s'est dotée d'un plan expérimental efficace basé sur une approche utilisant les plans d'expériences.

L'enrobé à améliorer est un Béton Bitumineux Semi Grenu 0/14 classique (BBSG 0/14) auquel on a ensuite incorporé des granulats plastiques 0/2 mm destinées à réduire l'orniérage sous l'effet de la température extrême. L'additif est introduit à différents taux pondéraux de : 0,1% 0,3% ; 0,6% ; 0,9%. Les performances ont été testées, pour chaque taux, à différentes teneurs en liant : 4.55%, 4.40%, 4.70% et 4.85% et à deux températures de fabrication (170 °C et 200°C).

Le mémoire s'articule comme suit :

Après une introduction concernant la problématique adressée et les objectifs visés, une étude bibliographique sur les chaussées bitumineuses, leurs constituants, les dégradations qu'elles subissent et leurs causes est présentée dans le premier chapitre. Dans un second chapitre, on a développé les enrobés bitumineux conventionnels ainsi que les différents essais permettant de les caractériser. Dans le chapitre trois, on a présenté l'état de l'art de

Enrobés à Modules Elevés et des Bétons Bitumineux à Module Elevé, leurs formulations et les essais de caractérisation. Le chapitre quatre donne la théorie des plans d'expériences ainsi que la table de Taguchi à la base du travail effectué ; Cette méthodologie permet de déterminer en un minimum d'essais, et avec un maximum de précision l'influence de multiples paramètres sur une ou plusieurs réponses. Les résultats trouvés et les analyses développées sont présentés dans le chapitre cinq après identification et caractérisation des matériaux utilisés dans les différentes formulations.

Enfin une conclusion générale termine le manuscrit, mettant en exergue les principaux résultats obtenus, les enseignements tirés et les perspectives du travail.

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. Introduction

La construction d'une chaussée répond principalement aux besoins de la circulation, tout en assurant la sécurité et le confort des usagers. Une chaussée se présente sous forme empilement de couche, qui ont chacune une composition bien définie en fonction de leur rôle dans la structure de la chaussée.

Les structures de chaussées routières sont soumises, en service, à des sollicitations très complexes. La circulation automobile et le climat ont une influence importante sur le comportement des matériaux de chaussées. Dans certains pays tels que l'Algérie, les chaussées subissent de grandes amplitudes thermiques et sont donc soumises au phénomène de fissuration thermique. En particulier au sud ou la transaharienne et les routes construites ces dernières années pour relier les différents centres urbains du sud, sont soumises à des fluctuations importantes de la température (le jour de l'ordre de + de 50°C et la nuit de l'ordre de - 10°C). Ces dernières années, ce phénomène s'est en plus aggravé par l'intensification des charges supportées par les structures de chaussées, cette intensification étant due en particulier à l'accroissement du trafic Poids Lourds et le changement climatique.

Les enjeux économiques sont importants, tant au niveau du dimensionnement (couches de plus en plus minces plus en plus moins coûteuse ...etc ;) que de l'entretien de la chaussée (investissements plus durables dans le temps). Un bon dimensionnement repose sur une bonne connaissance de champs de contraintes et déformations des matériaux soumise à divers sollicitation.

Il est donc nécessaire d'effectuer des études sur les matériaux constituant les chaussées. Ceci permettra de comprendre les causes des différentes dégradations de ces dernières et de là à augmenter la durée de leur vie.

1.2. Définition des chaussées

Nous distinguons deux définitions des chaussées :

- Au sens géométriques : une chaussée est définie comme étant la surface aménagée de la route sur laquelle circulent les véhicules.
- Au sens structurel : une chaussée est l'ensemble des couches de matériaux superposées et mises en œuvre de façon à permettre la reprise des charges extérieures.

La chaussée doit permettre la circulation des véhicules dans des conditions de confort et de sécurité voulues. Cet aspect se traduit, sur le plan mécanique, par le comportement des différentes couches composant la structure de la chaussée ou «Corps de chaussée» [1].

1.3. Différents types de chaussées classiques

Suivant leur mode de fonctionnement lui-même lié aux matériaux mis en œuvre, on distingue 6 grandes catégories de chaussées [2]:

- 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.

Nous allons décrire chacune de ces catégories.

1.3.1. Chaussées souples

Les chaussées souples comportent une couverture bitumineuse mince (moins de 15 cm), parfois réduite à un simple enduit superficiel, reposant sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités. L'épaisseur globale de la chaussée est comprise entre 30 et 60 cm (Figure 1.1).

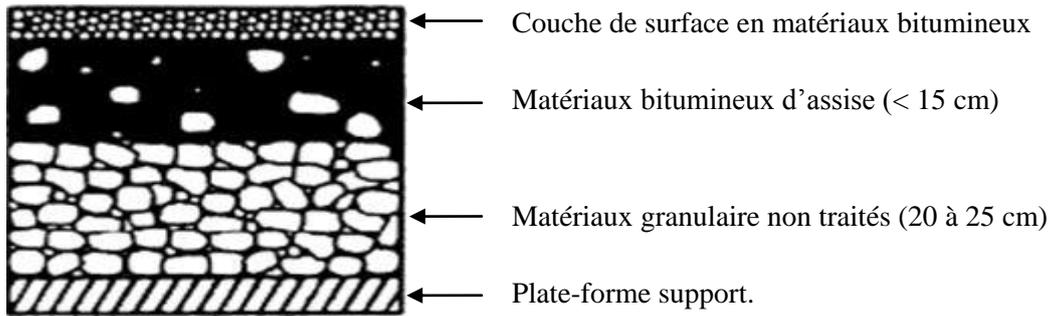


Figure 1.1 : Chaussée souples [2].

Le principe de fonctionnement de ces chaussées est schématisé sur la Figure 1.2.

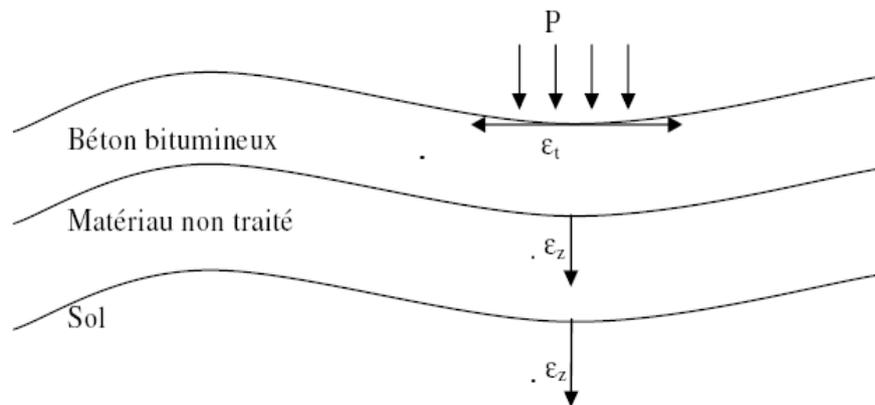


Figure 1.2 : Fonctionnement de chaussée souple [2].

Les matériaux granulaires qui constituent l'assise de la chaussée ont un module de rigidité relativement faible. Comme la couverture bitumineuse est mince, les efforts verticaux sont transmis au support avec une faible diffusion. Les contraintes verticales élevées engendrent par leur répartition des déformations plastiques qui se répercutent en déformations à la surface de la chaussée. La couverture bitumineuse subit à la base des efforts répétés de traction-flexion.

L'évolution les plus fréquentes des chaussées souples se manifeste d'abord par l'apparition de déformations de type orniérage et affaissements qui détériorent les qualités des profils en travers et en long. Les sollicitations répétées de flexion alternée dans la couverture bitumineuse entraînent une détérioration par fatigue, sous la forme de fissures d'abord isolées, puis évoluant peu à peu vers le faïençage.

Les Figures 1.3 et 1.4 présentent des cas réel de ces différentes détériorations.



Figure 1.3 : Faïençage à mailles larges [1]. Figure 1.4 : État avancé du faïençage [1].

1.3.2. Les chaussées bitumineuses épaisses

Les chaussées bitumineuses épaisses comportent une couche de roulement bitumineuse sur un corps de chaussée en matériaux bitumineux disposés en une ou deux, voire trois couches, dont l'épaisseur totale est comprise entre 15 et 40 cm (Figure 1.5).

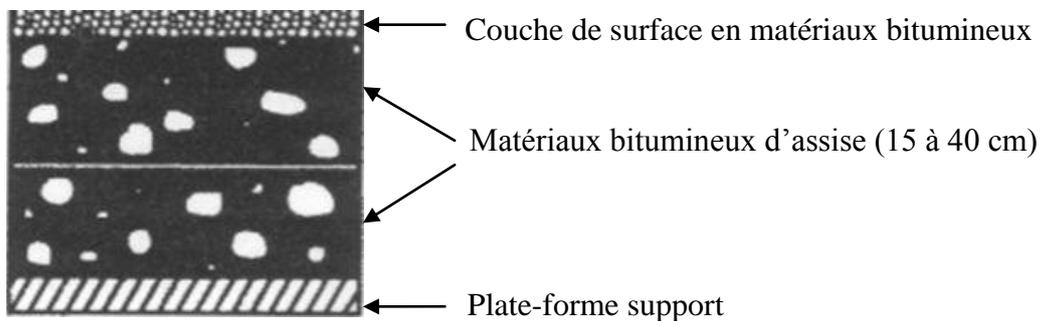


Figure 1.5 : Chaussée bitumineuse épaisse [2].

1.3.3. Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques

Ces structures comportent une couverture bitumineuse mince (moins de 15cm), parfois réduite à un simple enduit superficiel, reposant sur une ou plusieurs couches traitées aux liants hydrauliques. L'épaisseur globale de la chaussée est comprise entre 30 et 60 cm (Figure 1.6).

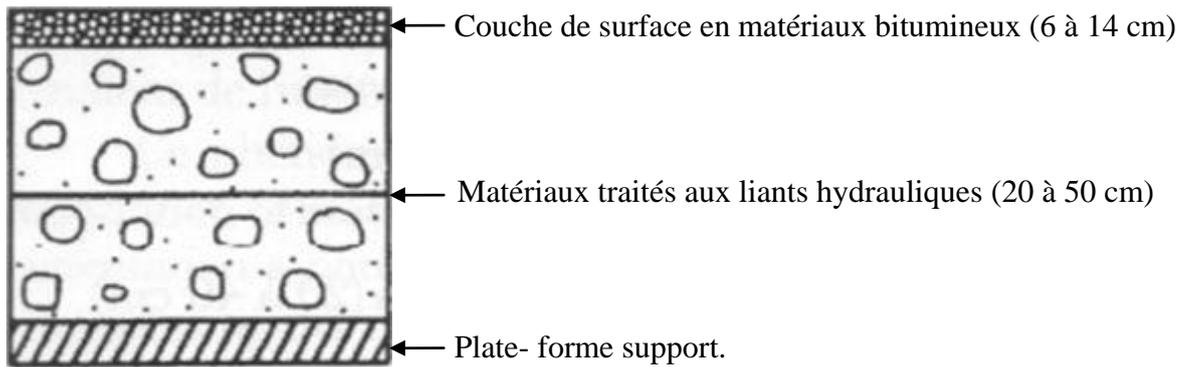


Figure 1.6 : Chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques [2].

1.3.4. Les chaussées à structure mixte

Les chaussées à structure mixte comportent une couche de surface et une couche de base (10 à 20cm) en matériaux bitumineux sur une couche de matériaux traitée aux liants hydrauliques (20 à 40cm). Les matériaux bitumineux représentent environ la moitié de l'épaisseur totale de la chaussée. La Figure 1.7 présente une coupe de ces différentes couches.

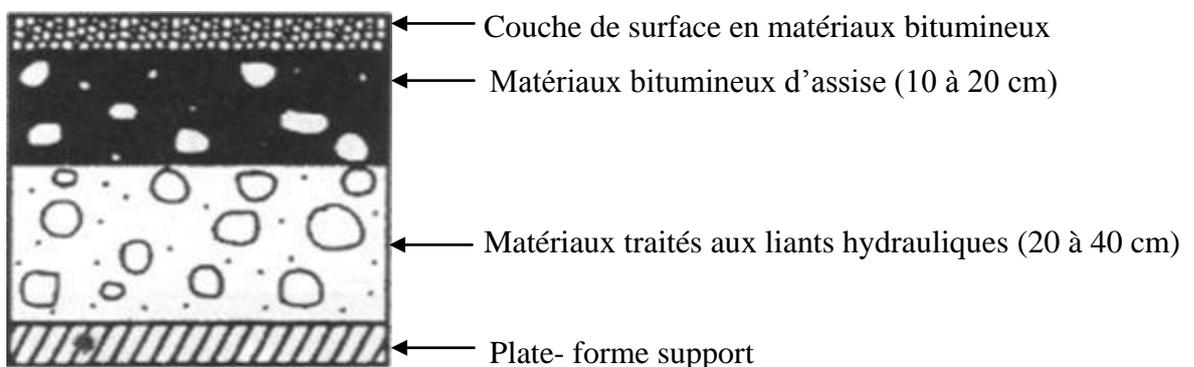


Figure 1.7 : Chaussée à structure mixte [2].

1.3.5. Les chaussées à structure inverse

Par rapport aux structures mixtes, les structures inverses comportent une couche supplémentaire de matériaux granulaires entre la couche de fondation (traitée aux liants hydrauliques) et les couches supérieures bitumineuses.

Cette couche de matériaux granulaires a pour rôle d'éviter la remontée des fissures de la couche de fondation (Figure 1.8).

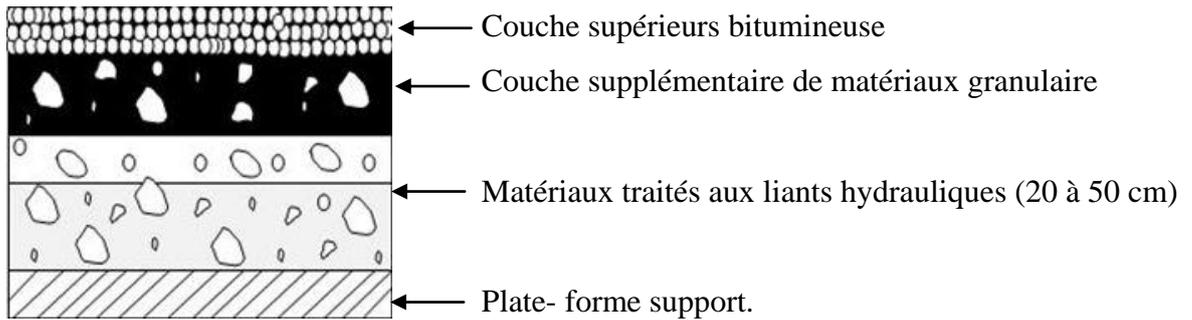


Figure 1.8 : Chaussée à structure inverse [2].

1.3.6. Les chaussées en béton de ciment

La chaussée est constituée par une couche de fondation en grave ciment d'environ 15cm d'épaisseur, surmontée par une dalle de béton de 25cm d'épaisseur environ. Des joints transversaux sont effectués tous les 4 à 5m pour éviter une fissuration anarchique du béton, ainsi que des joints longitudinaux (Figure 1.9).

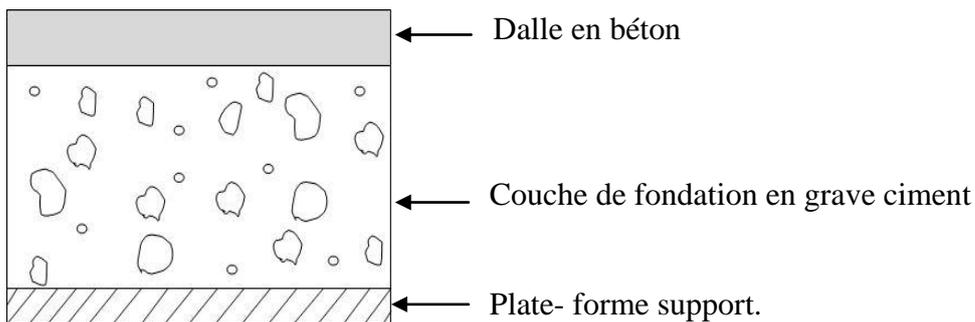


Figure 1.9 : Chaussée en béton de ciment [2].

Dans notre travail nous nous intéresserons uniquement aux *chaussées bitumineuses épaisses*.

1.4. Constitution des structures de chaussée

Rappelons que le rôle d'une chaussée est de reporter sur le sol support, en les répartissant convenablement, les efforts dus au trafic. La chaussée doit avoir une épaisseur (Figure 1.10) telle que la pression verticale transmise au sol soit suffisamment faible afin que celui-ci puisse la supporter sans dégradation.

Comme la pression dans la couche granulaire décroît régulièrement en profondeur, on peut constituer une chaussée par la superposition de couches de caractéristiques mécaniques croissantes. En principe une chaussée peut avoir en ordre les couches suivantes [3]:

1.4.1. Couches de surface

Elles sont les couches les plus sollicitées puisqu'elles doivent résister non seulement aux intempéries mais aussi au frottement des pneumatiques. La fonction d'étanchéité des couches de surface est essentielle car elle permet de protéger la structure de chaussée des infiltrations d'eau, de sels de déverglaçage et des divers polluants répandus en surface.

Les couches de surface sont constituées de deux couches suivantes :

- la couche de roulement est la couche supérieure de la structure routière sur laquelle s'exerce directement les agressions conjuguées du trafic et du climat. Elle attribue à la chaussée les caractéristiques suivantes : adhérence, drainabilité, uni, bruit de roulement.

- la couche de liaison (binder) est la couche intermédiaire entre la couche de roulement et la couche de base. Elle contribue à l'amélioration de l'uni de la chaussée et renforce la protection mécanique, thermique et hydraulique de l'assise par imperméabilisation. Elle supporte principalement les efforts tangentiels et assure un rôle primordial contre la formation d'ornières.

Les matériaux utilisés pour réaliser les couches de surface peuvent être classés en trois catégories :

- Les enduits superficiels ;
- Les enrobés hydrocarbonés à chaud ;
- Le béton de ciment.

1.4.2. Couches d'assises

Les couches d'assises jouent un rôle structurel : elles apportent à la chaussée une résistance mécanique suffisante pour lui permettre de supporter la charge verticale de trafic; elles ont également une fonction de répartition de la charge sur la plate-forme support afin de rendre les déformations à ce niveau, admissibles. Elles sont en général au nombre de deux : la couche de base et la couche de fondation.

- *la couche de base* : est située sous la couche de surface assurant une protection thermique de la plate-forme (couche de forme) et une capacité portante du revêtement. Elle est destinée à répartir les efforts dus aux charges verticales.
- *la couche de fondation* : est située sous la couche de base, destinée à répartir les efforts dus aux charges verticales sur le sol de fondation et à former le support du revêtement. Elle assure ensemble avec la couche de base la protection thermique de la plate-forme.

Les matériaux utilisés dans les assises de chaussées peuvent être classés selon quatre catégories :

- Les graves non traitées ;
- Les graves et sables traités aux liants hydrauliques ;
- Les graves et sables traités aux liants hydrocarbonés ;
- Le béton de ciment.

1.4.3. Couche de forme

La couche de forme est une structure constituée d'une ou plusieurs couches de matériaux ayant chacune une fonction distincte, ces matériaux rapportés (remblai) ou réalisée par un traitement spécial, elles sont destinées à améliorer les caractéristiques du terrain. Elle assure la protection du sol support et contribue à l'homogénéisation des caractéristiques portantes. C'est donc une couche de transition entre le sol support et la structure de chaussée.

Cette couche doit vérifier selon le catalogue de LCPC-SETRA (1994) et T.I, (1992) les critères suivants:

– *des critères à court terme* : Pendant la construction de la chaussée, elle doit pouvoir supporter les charges de trafic de chantier et de compactage des couches supérieures. Elle doit également être peu sensible aux intempéries.

– *des critères à long terme* : Elle participe au fonctionnement en service de la chaussée. La qualité de cette couche influe donc sur le dimensionnement des couches de chaussées : une meilleure plate-forme (couche de forme) autorise une chaussée moins épaisse, donc moins coûteuse. Dans cette phase, les intempéries ne doivent bien sur pas non plus pouvoir modifier le comportement de la chaussée.

Ces exigences sévères mènent à apporter une attention particulière au choix du sol de fondation.

1.4.4. Sol support

Le sol support est l'ensemble des matériaux en place, existant avant les terrassements ou à défaut le déblai, qui est l'ensemble des matériaux en place obtenu après excavation [4].

1.4.5. L'accotement

Est la plate-forme contiguë à la chaussée, renforcée ou non pour permettre l'immobilisation des véhicules [4].

1.4.6. Fossé

Est une partie de la route formant une tranchée ouverte dans le terrain servant à la récolte et l'évacuation des eaux de surface [4].

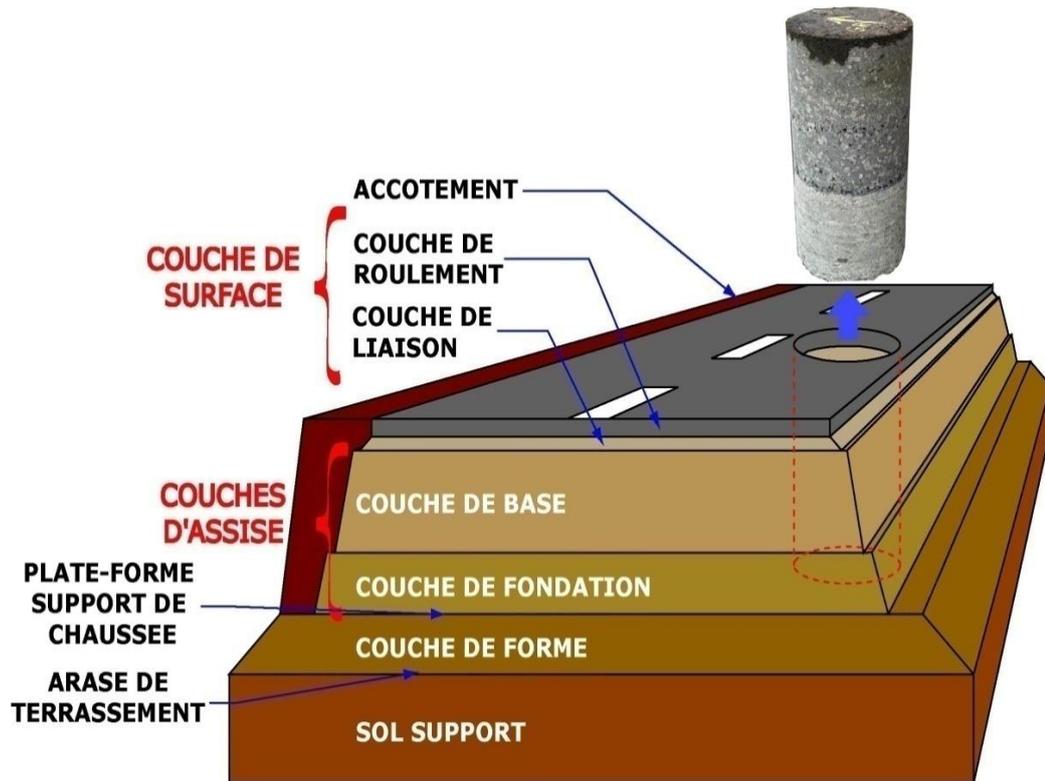


Figure 1.10 : Les différentes couches constituant la chaussée [4].

1.5. Dimensionnement des chaussées bitumineuses

L'objectif d'un dimensionnement de chaussée est de déterminer les matériaux et les épaisseurs des couches nécessaires pour que la structure soit capable de résister pendant une certaine durée et sous des conditions d'utilisation données. Plusieurs facteurs influent sur la tenue dans le temps de la chaussée, nous allons les préciser ci-dessus [2, 4].

1.5.1. Facteurs pris en compte dans le dimensionnement

La méthode de dimensionnement prend en considération les facteurs principaux suivants [2] :

1.5.1.1. Trafic

Les chaussées sont dimensionnées vis-à-vis du trafic poids lourds. La méthode de calcul implique la conversion, en un nombre cumulé NE de passages d'essieux de référence, du trafic réel constitué de combinaisons variables de véhicules ayant des charges à l'essieu et des configurations d'essieux différentes. En Algérie, l'essieu de référence est l'essieu isolé à roues jumelées de 130 kN.

1.5.1.2. L'environnement et les conditions climatiques

La température influence le comportement des différents types de chaussées :

- en ce qu'elle affecte les caractéristiques mécaniques des matériaux bitumineux,
- par les variations cycliques d'ouverture des fissures de retrait des matériaux traités aux liants hydrauliques,
- par les déformations de dalle dues aux gradients thermiques dans les chaussées rigides,
- par les chutes de portance affectant les sols gélifs en phase de dégel.

1.5.1.3. Plate-forme support

La caractérisation des sols supports, le choix des matériaux utilisables pour la couche de forme et leurs conditions de mise en œuvre sont ceux fixés en Algérie par le Catalogue de dimensionnement des chaussées neuves (2001).

1.5.1.4. Matériaux de chaussée

Un ensemble de normes codifie les différentes familles de matériaux de chaussée, définissant pour chacune d'elles des classes selon la qualité des constituants et certaines propriétés physiques et mécaniques des mélanges. La méthode de dimensionnement s'applique aux familles de matériaux ainsi définies. Le comportement en fatigue des matériaux est décrit à partir de résultats d'essais de laboratoire normalisés.

1.5.1.5. Qualité de la réalisation

Les dispositions de dimensionnement s'appliquent à des situations pour lesquelles les prescriptions et les règles de l'art concernant la fabrication et la mise en œuvre des matériaux sont respectées. Celles-ci permettent d'assurer l'homogénéité des compositions et des caractéristiques mécaniques. La réalisation reste cependant affectée de variations aléatoires d'épaisseur des couches. Le calcul de dimensionnement prend en compte cette dispersion en retenant des valeurs tirées d'observations sur des chantiers normalement conduits, et modulées selon la nature des méthodes de mise en œuvre et de contrôle utilisées.

1.5.2. Dimensionnement des chaussées bitumineuses

Le dimensionnement est en fait une démarche qui vérifie qu'une structure de chaussée établie supportera le trafic subi. Pour cela, on calcule à l'aide des méthodes les sollicitations les plus endommageantes, à savoir les déformations et les contraintes à la base ou au sommet des couches [4].

La méthode de dimensionnement prend non seulement les apports de la mécanique, pour le calcul des sollicitations et des déformations engendrées par la charge standard, mais aussi des éléments expérimentaux provenant des essais en laboratoire et des observations sur le terrain afin de déterminer les caractéristiques des matériaux employés et les critères de dimensionnement.

1.5.2. 1. Méthodes empiriques

Il existe toute une gamme de méthodes empiriques, s'étendant entre le cas extrême où le dimensionnement repose uniquement sur l'expérience du technicien, au cas plus élaboré s'appuyant sur les résultats d'essai systématiques pour diverses structures de chaussée. Dans ce second cas, les paramètres de dimensionnement sont corrélés aux informations ainsi collectées. Le champ d'application de ces méthodes est restreint, car elles ne peuvent être utilisées que pour une structure de chaussées donnée et dans des conditions d'utilisations précises.

C'est le cas de la méthode AASHTO (American Association of State Highway and Transportation and Officials) [5]. Le dimensionnement s'effectue pour un certain nombre d'essieux standards équivalents de 80 KN. Le degré d'incertitude d'atteindre la durée de vie supposée, l'erreur sur la prédiction du trafic et du comportement de la structure, les effets du gel, le gonflement du sol support et le drainage de la chaussée sont pris en compte par la méthode. Le nombre structurel de la chaussée, (qui dépend de la capacité de la chaussée à écouler le trafic de dimensionnement) est calculé, ainsi que l'épaisseur des couches structurelles. Ce choix d'épaisseur de chaussée se fait via des abaques et des formules produites à partir d'analyses statistiques de régressions sur des résultats d'essais.

1.5.2.2. Méthodes rationnelles

Les méthodes rationnelles sont fondées sur un modèle de chaussée produisant le plus fidèlement possible le fonctionnement mécanique de la chaussée. Elles font appel aux théories de la mécanique des milieux continus et de la résistance des matériaux. Cette approche relie les paramètres principaux tels que les propriétés des matériaux et les conditions de chargement aux contraintes et déformations de la structure routière. Ces valeurs sont ensuite utilisées pour l'estimation du comportement à long terme de la chaussée. Cette prévision est basée sur les lois d'évolution qui ont été déterminées en laboratoire ou par l'observation de structure existantes.

Classiquement, le trafic est estimé pour une durée de vie donnée de la chaussée, puis converti en nombre de cycles d'essieux de référence. Les contraintes et déformations de la chaussée sont ensuite calculées sous l'action de l'essieu de référence, à l'aide de modèles mathématiques (la structure étant supposée élastique, linéaire et isotrope) et dans des zones de la structure considérées comme critiques par rapport à certain mode de dégradation. Les contraintes calculées sont comparées à des contraintes admissibles, déterminées par des valeurs limites de résistance des matériaux constitutifs, pondérées par des coefficients de sécurité.

Cette étape empirique du dimensionnement se révèle nécessaire car la théorie seule n'est pas à l'heure actuelle suffisante au dimensionnement réaliste des chaussées [3].

Les étapes de la méthode analytique de conception des chaussées sont :

- Choix de la couche de surface et pré dimensionnement par référence à des situations comparables : il s'agit de l'étape empirique du dimensionnement, s'appuyant sur les essais de simulation en laboratoire calés sur des observations de chantier. C'est à cette étape que se fait la vérification de la tenue à l'orniérage de la couche bitumineuse, lors de la formulation du matériau. Elle se pratique avec l'essai à l'ornièreur qui conduit à l'acceptation ou au rejet de la formulation testée, bien que cet essai soit parfois jugé comme trop sévère.
- Calcul de la réponse de la structure sous l'essieu de référence de 130 KN. La structure de chaussée est représentée par un système multicouche élastique, avec continuité des déplacements aux interfaces. Les caractéristiques élastiques des matériaux proviennent d'essais de laboratoire.

- Vérification en fatigue de la structure retenue et déformations du support de la chaussée, par le biais de logiciels de calculs numériques. Les critères de vérification tiennent compte des connaissances tirées de l'observation de chaussées réelles. Le ruine de la chaussée est supposée atteinte lorsque les couches liées sont rompues ou lorsque le sol support a dépassé un certain niveau de déformation permanente, les critères de dimensionnement retenus sont dans le premier cas la déformation (ou la contrainte) en traction maximale à la base des couches liées, et dans le second cas la déformation verticale maximale en surface du sol support. Le risque d'orniérage n'intervient pour sa part ni en tant que critère de dimensionnement, ni au titre d'une vérification venant après le choix des épaisseurs.
- Ajustement des épaisseurs calculées pour tenir compte des contraintes technologiques de réalisation.
- Vérification nécessaire de la tenue au gel-dégel.
- Définition de la coupe transversale de la chaussée.

Notons qu'à ce jour, aucune méthode dimensionnement n'est capable de prendre compte de tout les aspects du comportement des enrobés bitumineux, notamment :

- Les efforts du comportement viscoélastique des matériaux bitumineux,
- Les efforts induits par le trafic du fait des caractéristiques géométriques de la route (pentes.....),
- L'anisotropie des matériaux.

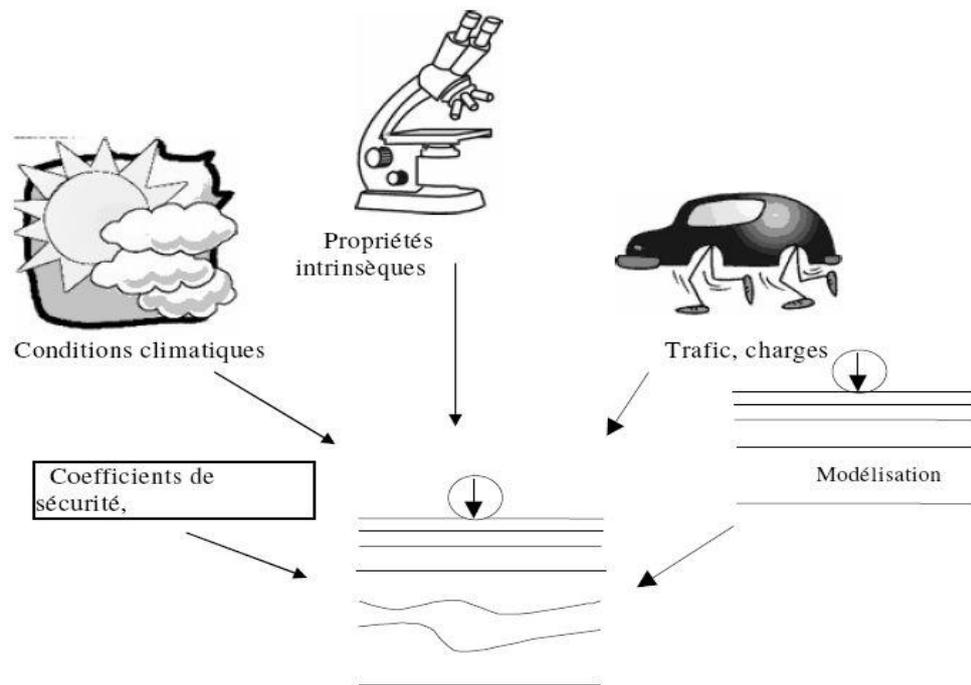


Figure 1.11 : Ingrédients à réunir pour un bon dimensionnement par approche mécanique [6].

1.5.2.3. L'approche du dimensionnement par modèles mécaniques

Dans les grandes lignes, le concept est assez proche de celui de l'approche classique ; à ceci près que l'on essaie de s'affranchir le plus possible de l'empirisme, en essayant notamment de l'introduire dans la modélisation que des propriétés intrinsèques du matériau, obtenus à partir d'essais réalisés dans des conditions parfaitement maîtrisées (autant que faire se peut) et reproductibles.

La méthode de dimensionnement doit considérer les trois aspects suivants [7]:

- La théorie employée pour modélisée de manière fiable les principaux mécanismes de dégradations de chaussées souples. Il est à noter que les mécanismes principaux, tels l'orniérage des couches bitumineuse, ou encore les fissures de surface ne sont pas encore directement prises en compte de manière rationnelle dans les méthodes de dimensionnement usuelles.
- L'évaluation des propriétés intrinsèques des matériaux employés dans la théorie retenue.
- La détermination des relations entre les propriétés des matériaux et le niveau de dégradation admissible sur chaussée.

De telles méthodes de dimensionnement devraient être capables de prédire les performances à long terme de chaussée (et donc sa durée de vie), sous un trafic et des conditions climatiques données. L'évolution des propriétés des matériaux de construction au cours du cycle de vie de la chaussée et sous l'action combinée du gel, du vieillissement, de la fissuration, des déformations permanentes et des chargements climatiques doit être prise en compte. Pour ce faire, il est souhaitable que la modélisation s'élabore de manière itérative (Fig. 1.11), il s'agit concrètement de gérer la vie de la chaussée, en tenant compte de la modélisation de maintenance et des stratégies de réhabilitations. Les étapes itératives explicitées :

- Données du modèle : elles sont relatives à la géométrie de la structure, aux conditions de trafic, aux conditions climatiques et aux propriétés des matériaux. Ces données peuvent provenir de sources externes ou être générées par l'algorithme (dépendance des propriétés du matériau selon le climat par exemple ;
- Modèle : il s'agit d'un algorithme de calcul, générant la réponse de la structure en termes de déformations, contraintes et déplacement en tout lieu de structure ;
- Données pour la loi de comportement : elles sont nécessaires à l'application de la loi de comportement, à partir de laquelle l'évolution de la structure sera prédite. Il s'agit des contraintes, déformation/ déplacement en des zones critiques de la chaussés. A ce stade, d'autres facteurs externes peuvent être pris en compte, tels les caractéristiques thermiques, le vieillissement, les variations statiques,...
- La loi de comportement : c'est la relation entre les données précédemment décrites et la structure, ainsi que l'influence de ces données sur l'état de la chaussée. L'accumulation des dégradations (calculées à l'aide de modèles de détérioration appropriés, permettant de relier les contraintes et déformations aux chargements dans les propriétés des matériaux ou la géométrie de la structure) et la comparaison avec des situations critiques en vue du dimensionnement sont pris en compte lors de cette étape du processus itératif.

Les résultats final de cette procédure est l'état de la chaussée à chaque instant, permettant de juger s'il est admissible ou non ; ce résultat peut ensuite être réimplanté en guise de données initiales pour évaluer un autre cycle de la vie de la chaussée. Les points forts de ces méthodes de dimensionnement sont les suivants :

- Les conséquences sur la chaussée de l'évolution de la configuration des charges roulantes pourront être appréciées. Par exemple, les effets de l'augmentation des charges, de l'augmentation de la pression de contact, de la multiplication des essieux,.....
- Une meilleure utilisation des matériaux disponible. L'usage de matériaux stabilisés pourra être simulé en vue de la prédiction du comportement à long terme de la chaussée.
- Des procédures améliorées d'évaluation de l'apparition prématurée des dégradations pourront être développées, ce qui permettrait de comprendre pourquoi certaines chaussées s'abiment bien avant leur durée de vie supposée. On pourrait ainsi mettre sur pied de meilleures techniques de diagnostic,
- Les efforts du vieillissement pourraient être pris en compte dans l'estimation du comportement de la structure, le bitume durcit avec le temps, ce qui affecte aussi bien l'apparition des fissures de fatigue que l'orniérage,
- Les effets des variations saisonnières sur le comportement de la chaussée peuvent être pris en compte,
- Pour les chaussées rigides, les conséquences de l'érosion des couches de fondations pourront être estimées.

Contrairement aux méthodes non rationnelles, les procédures resteront valables s'il survient des modifications dans le type de matériaux de construction utilisé, le trafic, le type de véhicules, le type de roues ou encore leur configuration.

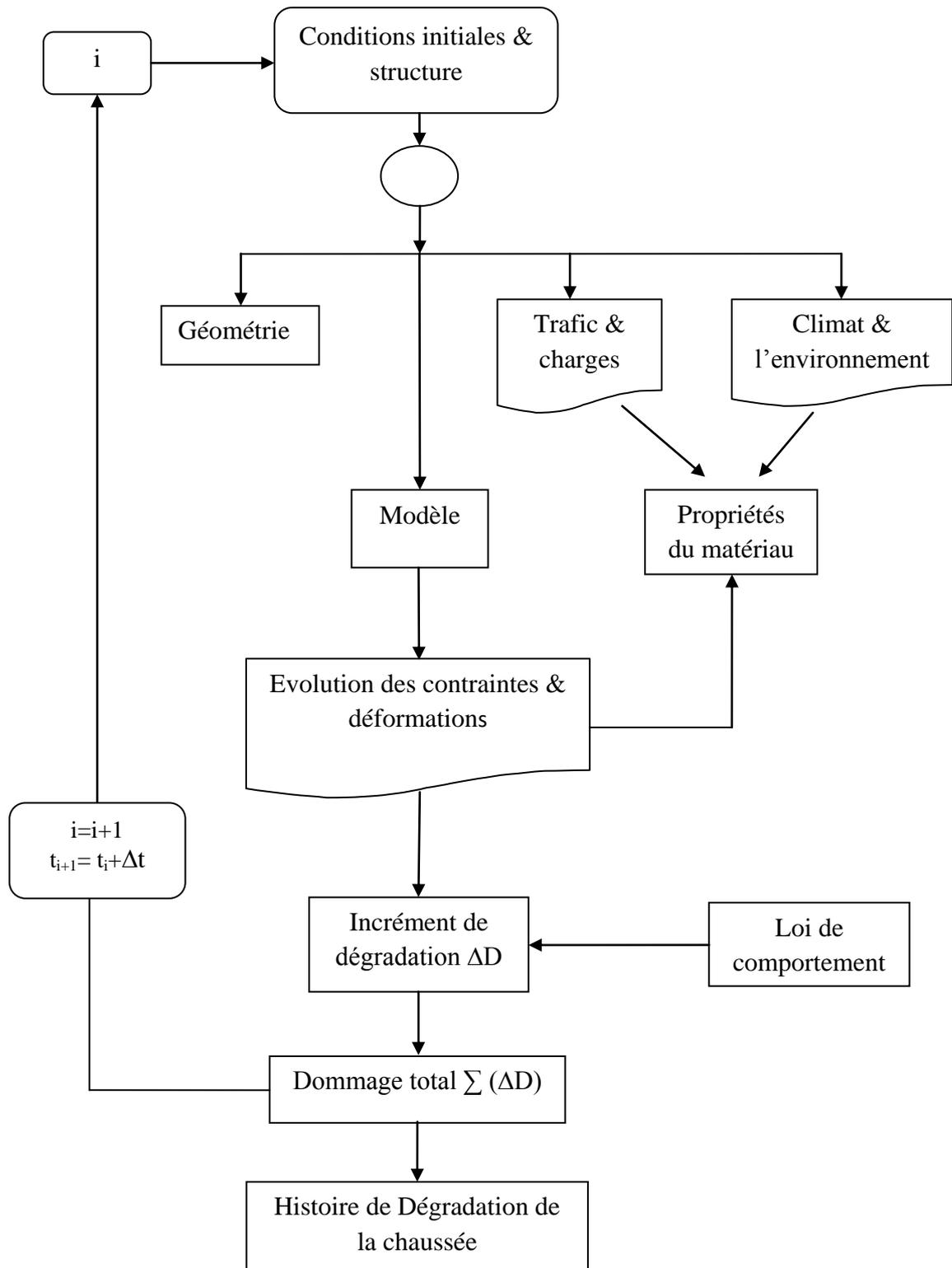


Figure 1.12 : Différentes étapes d'un dimensionnement par modèle mécanique [8].

1.6. Dégradation des chaussées bitumineuse

Les chaussées bitumineuses subissent des dégradations dues au trafic routier et/ou aux conditions climatiques, nous allons en préciser les causes et les conséquences [5, 6,7].

1.6.1. Facteurs de dégradation des chaussées

Les facteurs affectant la dégradation des chaussées bitumineuse sont classés en deux catégories. Les facteurs internes comme les propriétés des matériaux de la structure des chaussées et les facteurs extérieurs comme le trafic et l'environnement (température, gel).

1.6.1.1. Structure de chaussée (Matériaux)

Le niveau de contraintes dans une chaussée constitue un facteur majeur dans le mécanisme de déformation. Il dépend de l'épaisseur de la chaussée et de l'amplitude du chargement (Gillespie et al. 1993). Pour les chaussées à faibles épaisseurs, un défaut de compactage de plate-forme support accélère la déformation. Cette déformation permanente dépend aussi de l'épaisseur de la couche de surface [9].

Dans le cas d'une couche mince, on a une mauvaise distribution du chargement, ce qui induit de fortes contraintes dans la couche d'assise, qui produisent ainsi des déformations permanentes (Ekdahl, 1999). La Figure 1.13 présente l'influence de l'épaisseur de la couche de surface sur la déformation verticale au dessus de la couche de base et de plate-forme support (Ekdahl, 1999) (essai de plaque de chargement : $r = 150$ mm, $\sigma = 0,8$ Mpa). On note que les couches minces de surface affectent le niveau de déformation dans les couches inférieures. Sebaaly (1992) et Stolarski (1999) ont montré que l'influence de la pression de gonflage est modérée dans les couches d'enrobé bitumineuses épaisses (plus de 150 cm).

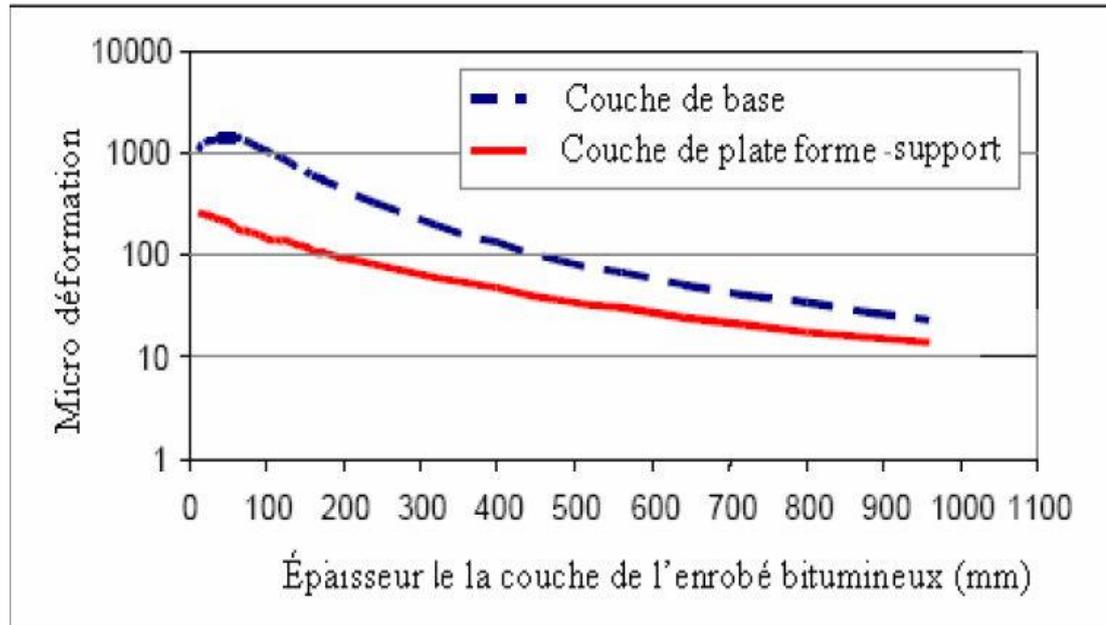


Figure 1.13 : Influence de l'épaisseur de la couche de surface sur la déformation verticale au dessus de la couche de base et de plate-forme support (Ekdahl, 1999) [9].

Les performances d'une chaussée sont contrôlées par les propriétés du liant bitumineux qui se comporte comme un fluide visqueux à des températures élevées et / ou des taux de chargement long. A noter que ces propriétés visqueuses du liant sont à l'origine physique des déformations permanentes (Heck, 2001, Corté et Di Benedetto, 2005). L'utilisation des liants plus durs et moins susceptibles à la température diminue considérablement les risques de déformation (Corté et al.1997, Desmoulin et al.2005). Perret et al. (2001,2003) ont montré que l'enrobé bitumineux à haut module a une forte résistance à la fatigue. Les résultats expérimentaux montrent que la résistance de l'enrobé bitumineux à la déformation permanente, par conséquent la résistance à l'orniérage, augmente en utilisant un traitement par la chaux ou le caoutchouc (Ali et al. 2005) ou le polymère (Xu et al. 2004 et Zubeck et al. 2002). La déformation diminue en utilisant la stabilisation des couches inférieures de la chaussée par du ciment ou de la chaux (Mallela, 2004). Romanoschi et al. (2004) ont montré que l'utilisation de bitume dans les couches inférieures réduit les contraintes et les déformations dans la chaussée. De plus, l'utilisation de « geogrid » et « geosynthetics » conduit à une répartition plus uniforme des charges et par conséquent à une réduction de la propagation des fissures dans la chaussée.

1.6.1.2. Effet du trafic [6]

Chaque couche de chaussée subit des écrasements et des flexions sous l'effet du trafic (Figure 1.14). Le calcul des efforts et des déformations qui s'effectue traditionnellement en considérant des multicouches élastiques linéaires isotropes, nécessite, en premier lieu, la connaissance du module de Young E et éventuellement du coefficient de Poisson ν . C'est précisément à partir de ces deux coefficients, que les logiciels *Alizé* ou encore *Ecoroute* –basés sur le modèle de Burmister (1943)- permettent la résolution du problème considéré comme élastique [2].

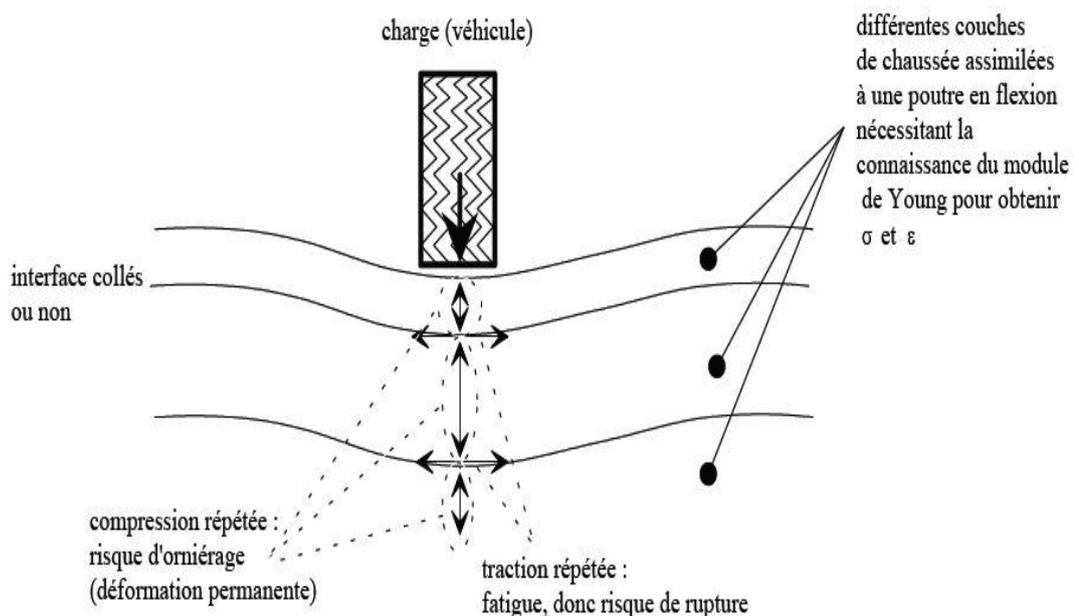


Figure 1.14 : Schématisation des sollicitations induites par le trafic (Di Benedetto, 1998) [10].

Les tractions répétées à la base des couches, sous l'effet du passage des véhicules, créent des micro-dégradations qui s'accumulent et peuvent entraîner la ruine du matériau. Il s'agit du phénomène de fatigue qui s'observe pour de nombreux matériaux. Une fissure peut également apparaître et se propager dans la chaussée.

Les compressions répétées sous le passage de la charge peuvent créer des déformations permanentes qui induisent parfois un orniérage à la surface de la chaussée. Cet orniérage peut être dû au tassement des couches de béton bitumineux mais peut aussi être dû éventuellement aux déformations de couches inférieures non traitées.

1.6.1.3. Effet de la température [6]

A basse température le bitume possède un comportement fragile. La chaussée est, par voie de conséquence, susceptible de se fissurer sous l'effet conjugué des conditions climatiques et des contraintes de trafic, outre le vieillissement du matériau.

La température a deux effets mécaniques principaux [10]:

- changement du module du matériau, Un béton bitumineux que l'on chauffe devient plus "mou". Plus généralement, ces matériaux sont dits "thermo-sensibles", c'est-à-dire que leur comportement viscoplastique change selon la température considérée.

Cet effet est, en général, caractérisé par la dépendance du module de rigidité vis-à-vis de la température et de la vitesse de chargement.

- création de contraintes et déformations au sein du matériau en raison des dilatations ou contractions thermiques lors des changements de température (Figure 1.15).

Cet effet est particulièrement néfaste :

- lors d'un refroidissement, par exemple, la chaussée a tendance à se contracter. Or, les mouvements de contraction sont empêchés dans le sens longitudinal de la chaussée. Cela revient donc à exercer une traction sur cette chaussée dans le sens longitudinal, d'où l'amorçage éventuel de fissures transversales. Ces dernières sont ensuite susceptibles de se propager à travers la structure lors de cycles thermiques (journaliers ou autres).
- lorsqu'une couche de base traitée aux liants hydrauliques existe dans la chaussée (structures semi-rigides), elle est sujette au retrait thermique et de prise. Le retrait, empêché par le frottement à l'interface, peut provoquer une fissure dans la couche en béton bitumineux. Cette fissure évolue avec les cycles thermiques et peut progressivement traverser la couche.

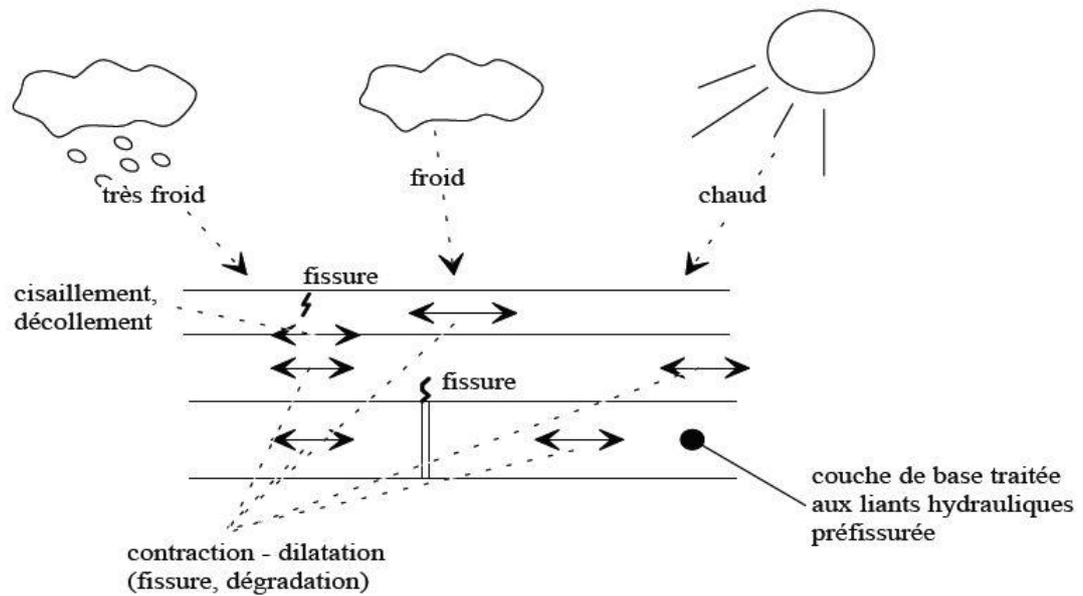


Figure 1.15 : Schématisation des sollicitations induites par la température [10].

La Figure 1.16 illustre le développement de la déformation en fonction de la température pour plusieurs vitesses de circulation (charge par essieu de 11,5 tonnes, Perret et al.2001). Le risque de déformation permanente est élevé dans la couche d'assise (Masada et al. 2004). En effet la teneur en eau affecte les modules de ces couches. Krarup (1994) à observé que les modules des couches non liée diminuent de 35 à 40% avec la saturation. Werlmeister et al. (2003) ont montré que le risque de déformation augmente fortement avec l'augmentation de l'humidité. La Figure 1.17 présente l'influence de la variation saisonnière de la température et de la teneur en eau sur le développement de déformation (White, 1999). On peut constater que la déformation se propage en deux phases, la première est liée à l'augmentation de la teneur (pendant le printemps), alors que la seconde est liée à la température (pendant l'été).

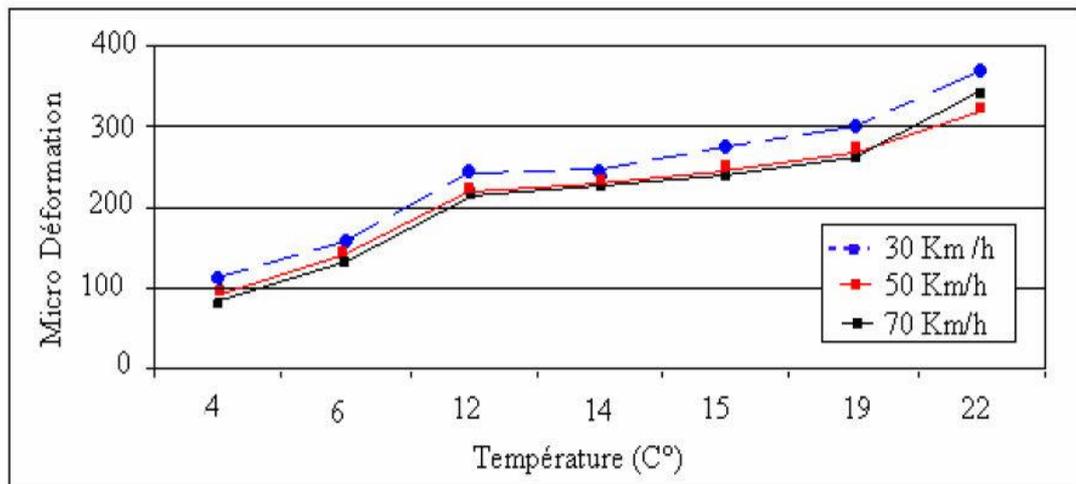


Figure 1.16 : Déformation de la couche de surface en fonction de la vitesse de circulation et de la température de la couche de surface (Ekdahl, 1999) sous une charge d'essieu de 11,5 tonnes (selon Perret et al.2001) [5].



Figure 1.17 : Influence de variation saisonnière sur la déformation (White, 1999) [5].

1.6.1.4. Vitesse de circulation

La dégradation de la chaussée augmente avec la réduction de la vitesse de circulation (Al-Qidi et al. 2004). Une vitesse de circulation faible (notamment sur l'intersection en milieu urbain). Conduit à une augmentation du temps de chargement et par conséquent à une augmentation de risque de déformation. La vitesse de circulation a un effet significatif sur les contraintes longitudinales et transversales en dessous de la couche de surface et la contrainte verticale au dessous de plate-forme support. Quand la vitesse de véhicule décroît de 105 Km/h à 32 Km/h les contraintes longitudinales

transversales en dessous de la couche de la surface augmentent de 30%, et la contrainte verticale au dessus de la plate-forme support augmente de 15% (Wang et al.2004). La figure1.18 illustre l'influence de la vitesse de circulation sur la déformation longitudinale en dessous de la couche de surface (Brown, 1997) [5].

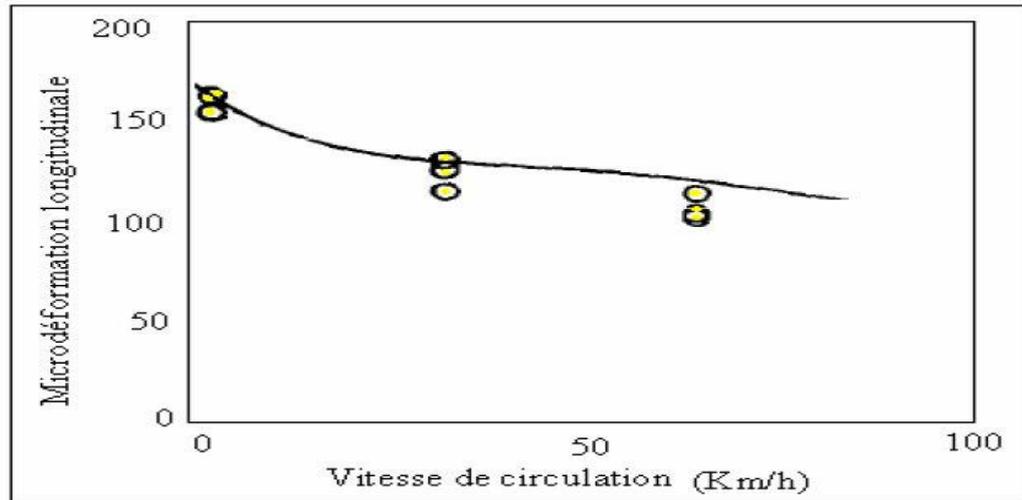


Figure1.18 : Influence de la vitesse de circulation sur la déformation longitudinale dessous de la couche de surface (Brown, 1997) [5].

1.6.2. Principaux modes de dégradation des chaussées bitumineuse

Les chaussées bitumineuses subissent l'agression mécanique des charges roulantes et du climat (température, gel), provoquent des écrasements et des flexions dans la structure routière. Leur répétition est à l'origine de quatre grandes familles de dégradation, selon le catalogue des dégradations des chaussées de LCPC (Mars 1998) nous distinguons [11]:

- Les déformations.
- Les fissures.
- Les arrachements.
- Les mouvements de matériaux.

1.6.2.1. Déformations

Ornière à grand rayon : déformation permanente longitudinale qui se crée sous le passage des roues et dont la largeur est *supérieure à 80 cm*, elle peut concerner l'une ou les deux bandes de roulement (Figure1.22).

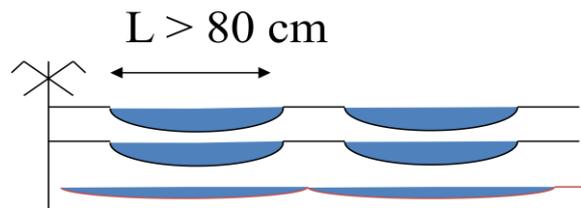


Figure 1.19 : Ornière à grand rayon [11].

Ornière à petit rayon: déformation permanente longitudinale qui se crée sous le passage des roues et dont la largeur est *inférieure à 80 cm*, elle peut concerner l'une ou les deux bandes de roulement (Figure 1.21).

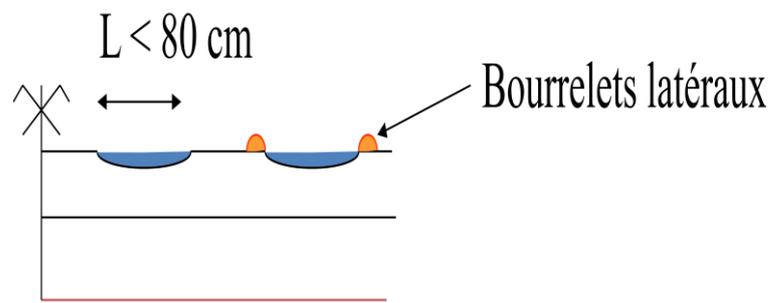


Figure 1.20 : Ornière à petit rayon [11].

Affaissement de rive: enfoncement prononcé localisé à la partie de la chaussée comprise entre le bord et la bande de roulement de rive (Figure 1.24).

Affaissement hors rive: enfoncement ponctuel, prononcé, localisé à gauche ou dans la bande de roulement de rive, défaut encore désigné « flache » lorsqu'il a une forme circulaire (Figure 1.23).

Gonfle: soulèvement ponctuel, le plus souvent circulaire (Figure 1.25).

Bourrelet transversal: renflement linéaire généralement perpendiculaire à l'axe (Figure 1.26).

Décalage de joint: dénivellation verticale entre les deux lèvres d'un joint (dalle, fissure, joint m. o.).



Figure 1.21 : Orniéage à petit rayon dans la Chaussée routière [11].



Figure 1.22 : Orniéage à grand rayon dans la Chaussée routière [11].



Figure 1.23 : Affaissements de chaussée. [11]



Figure 1.24 : Affaissements de rives [11].



Figure 1.25 : Gonfle [11].



Figure 1.26 : Bourrelet transversal [11].

1.6.2.2. Fissures

Les principales formes des fissures sont les suivants :

Fissures Transversales: fissure sensiblement perpendiculaire à l'axe, isolée ou périodique d'espacement variable, intéressant tout ou partie de la largeur (Figure 1.27).

Fissures Longitudinales: fissure sensiblement parallèle à l'axe, *dans ou hors bandes* de roulement (Figure 1.28).

Fissures en « dalles »: ensemble de fissures longitudinales et transversales se rejoignant pour former un réseau ou un maillage quasi rectangulaire de maille inférieure ou égale à 2m.

Fissures de joint: ouverture sous forme de fissure rectiligne au raccordement de 2 bandes d'enrobés (Figure 1.30).

Fissures d'adaptation: fissure provenant de mouvements de sols (tassement, élargissement, glissement, retrait) (Figure 1.29).

Fissures diverses: fissures apparaissant de façon anarchique: fissures paraboliques, en étoiles ou Y (Figure 1.31).

Faiçonnage: ensemble de fissures entrelacées ou maillées, *dans ou hors bandes* de roulement. On distingue : mailles fines et larges selon que les mailles sont *supérieures ou inférieures à 30 cm* (Figure 1.32, Figure 1.33, Figure 1.34).

Faiçonnage circulaire: ensemble de fissures entre lacées ou maillées *< à 30 cm, de diamètre < à 1m.*

Cassure d'angle et Fissure oblique: rupture de dalle rejoignant deux côtés adjacents situé à *- ou +50 cm.*



Figure 1.27 : Fissures transversales [11].



Figure 1.28 : Fissures longitudinales [11].



Figure 1.29 : Fissures d'adaptation [11].



Figure 1.30 : Fissuration des joints [11].



Figure 1.31 : Fissuration en étoile [11].



Figure 1.32 : Faiénçage [11].

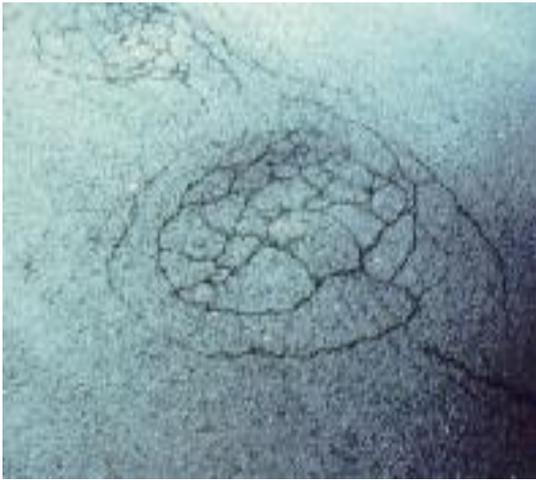


Figure 1.33 : Faïençage circulaire [11].



Figure 1.34 : Faïençage dans les bandes de Roulement [11].

1.6.2.3. Arrachements

Les principales formes d'arrachement sont les suivants :

Glaçage: aspect lisse et brillant de la surface résultant de l'usure des gravillons ou remontée de bitume.

Plumage: arrachement des gravillons du revêtement.

Désenrobage: départ de mastic (bitume+filler) autour des granulats de l'enrobé (Figure 1.36).

Peignage: départ de gravillons se développant suivant des sillons parallèles à l'axe (E.S.).

Dégradation du joint longitudinal: départ de gravillons sur un joint entre deux bandes de revêtement.

Pelade: arrachement de la couche de roulement par plaque (décollement localisé) (Figure 1.37 et Figure 1.38).

Tête de chat: pierre dure apparaissant à la surface après usure de la couche de roulement pour des chaussées souple traditionnelles ou pour des chaussées en béton.

Nid de poule: cavité circulaire créée en surface par départ de matériaux (Figure 1.35).



Figure 1.35 : Nid de poule [11].



Figure 1.36 : Désenrobage - plumage –
Enrobés [11].



Figure 1.37 : Pelade de l'enrobé (niveau 3)
[11].



Figure 1.38 : Pelade de l'enrobé (niveau 2)
[11].

1.6.2.4. Mouvements de matériaux

Les principaux formes de ce phénomène est :

Ressuage: remontée du liant à la surface de la chaussée recouvrant tout ou partie des granulats (BB ES) (Figure 1.39).

Indentation: enfoncement des gravillons dans l'enrobé en période chaude sous l'action du trafic (ES).

Remontée de fines: apparition d'éléments fins à la surface provenant de l'assise (hydraulique ou béton), ces remontées sont généralement localisées au droit de défaut de la couche de roulement: fissures, faïençage, flache, joint non imperméabilisé (Figure 1.40).

Rejet de pompage: éjection de matériaux (eau, boues,...) à la surface lors du passage des véhicules lourds, au niveau des fissures ou joint par suite de l'existence de cavités sous les dalles (Béton).



Figure 1.39 : Ressuage [11].



Figure 1.40 : Remontée de fines [11].



Figure 1.41 : Réparations multiples [11].



Figure 1.42 : Désordres divers [11]

1.6.3. Désordres : principales origines

Les principales origines des désordres observées sont données ci-après [11].

1.6.3.1. Déformations

Les principales origines des déformations sont regroupées dans le tableau suivant :

Tableau 1.1 : Principal origine des déformations des chaussées bitumineuses.

<ul style="list-style-type: none"> • Affaissements 	<ul style="list-style-type: none"> • Drainage inexistant ; • Sous- dimensionnement ; • Post-compactage ; • Chaussée non épaulée en rives ;
<ul style="list-style-type: none"> • Bourrelets 	<ul style="list-style-type: none"> • Fluage ; • Gonflement des matériaux ; • Zone de freinage intense ; • Susceptibilité thermique du liant ;
<ul style="list-style-type: none"> • Empreintes 	<ul style="list-style-type: none"> • Stationnement prolongé d'un véhicule ;
<ul style="list-style-type: none"> • Flèches 	<ul style="list-style-type: none"> • Compacités insuffisantes
<ul style="list-style-type: none"> • Ornières 	<ul style="list-style-type: none"> • Désagrégation ; • Surcompactage dû à circulation PL ; • Surdosage en bitume ; • Stabilité insuffisante de l'enrobé ;
<ul style="list-style-type: none"> • Tôle ondulée 	<ul style="list-style-type: none"> • Action mécanique et défaut de cohésion.

1.6.3.2. Fissurations

Les fissures des chaussées bitumineuses proviennent de différentes causes, le tableau suivant regroupe les principales causes de leur apparition :

Tableau 1.2 : Principal origine des fissures des chaussées bitumineuses.

<ul style="list-style-type: none"> • Faiénçage 	<ul style="list-style-type: none"> • Dégradation des couches inférieures (fatigue) ; • Décollement de la couche de roulement ; • Sous-dimensionnement.
<ul style="list-style-type: none"> • Fissures 	<ul style="list-style-type: none"> • Joints, reprises ; • Retrait ; • Gélivité du corps de chaussée ; • Elargissement mal réalisé (pas de redans) ; • Chaussée mal épaulée en rives ; • Vieillissement du bitume, contrainte thermique ;

1.6.3.3. Arrachements

Les principales causes sont de ce phénomène sont:

Tableau 1.3 : Principal origine des arrachements des chaussées bitumineuses.

<ul style="list-style-type: none"> • Désenrobage 	<ul style="list-style-type: none"> • action de l'eau ; • action mécanique ;
<ul style="list-style-type: none"> • Glaçage 	<ul style="list-style-type: none"> • polissage des granulats CR ; • usure de la CR
<ul style="list-style-type: none"> • Nids de poule 	<ul style="list-style-type: none"> • Rupture du liant sous action mécanique; • Drainage inexistant ; • Pollution du corps de chaussée ;
<ul style="list-style-type: none"> • Plumages 	<ul style="list-style-type: none"> • Désenrobage des granulats de CR (eau, chimique) ; • Ségrégation m.o. CR (axe finisseur) ; • ESU (matériel, viscosité bitume) ;
<ul style="list-style-type: none"> • ornières 	<ul style="list-style-type: none"> • Usures pneus à crampons.

ESU : Enduit superficiel à haut performances.

CR : couche de roulement.

1.6.3.4. Mouvements de matériaux

Les principales causes sont les suivantes :

Tableau 1.4 : Principal origine des mouvements de matériaux des chaussées bitumineuses.

• Remontées d'eau	<ul style="list-style-type: none"> • drainage insuffisant ; • évaporation intense ;
• Remontées de liant (ressuage)	<ul style="list-style-type: none"> • température forte - ramollissement du bitume ; • excès de liant, support trop mou, charge forte ;
• Remontée du mortier	<ul style="list-style-type: none"> • excès de liant et de fines ;
• Pompages	<ul style="list-style-type: none"> • infiltrations d'eau sous dalles, mauvais transfert de charges du joint, drainage sous dalles.

1.7. Conclusion

Les chaussées des routes sont des ouvrages essentiels nécessitent beaucoup de moyens financiers et du temps pour les réaliser, ces structures ont un rôle important dans le développement économique d'une région ou d'un pays.

Pour cela, la réalisation des chaussées de ces routes doit être faite correctement de sorte que le passage des véhicules n'engendre pas de déformations qui endommagent la structure de la chaussée et provoquent de sérieux dégâts qui peuvent aller jusqu'à la rupture de l'ouvrage ou tout de moins l'arrêt de son service. La ruine d'une chaussée peut induire des pertes économiques considérables outre celui de la réparation structurelle de l'ouvrage. De ce défi est née la notion de *chaussée durable*, ou *chaussées adaptées aux véhicules lourds*. Particulièrement pour les chaussées subissant des variations de température importante comme c'est le cas dans le sud Algérien.

Avec l'avancement de la technologie et l'apparition des nouveaux matériaux, une nouvelle génération d'enrobés est née, les enrobés à Module Elevé (EME et BBME) qui, en plus du module élevé, présentent une plus grande résistance à la fatigue que les mélanges conventionnels. Cet objectif ne sera atteint que si leur réalisation est soumise à des études approfondies et à des normes reconnues.

L'Algérie ne voulant pas rester en deçà des progrès réalisés dans le monde, a fait appel à des groupements étrangers pour une réalisation modernes de ses infrastructures routières intégrant des techniques innovantes dont les BBME.

Le chapitre suivant présente une étude détaillée sur les enrobés bitumineux et les principales caractéristiques de ce mélange dans la chaussée.

CHAPITRE II

LES ENROBÉ BITUMINEUX

2.1. Introduction

Les enrobés bitumineux sont un mélange de granulats et de bitume. Il existe plusieurs type de bitume, préférant aux enrobés leurs caractéristiques mécaniques et physiques. Ceci afin de prévenir les différents endommagements qui peuvent survenir durant la durée de vie d'une chaussée. Ces endommagements sont en grande partie dus au trafic routier et au x conditions climatiques surtout dans les zones arides et désertiques du sud du pays. Afin de prévenir ces dégâts il est important de bien comprendre le comportement de ces mélanges et leurs caractéristiques.

2.2. Définition d'enrobés bitumineux

On appelle un enrobé bitumineux tout mélange constitué de granulats agglomérés entre eux par un liant bitumineux, ce mélange peut être enrichi par des fines. Ce terme est plus particulier que celui de "enrobé", car ce dernier englobe des mélanges dont le liant n'est pas forcément un bitume (goudron, asphalte.....). La Figure 2.1 et 2.2 représente un matériau bitumineux dans des structures de chaussées bitumineuses.

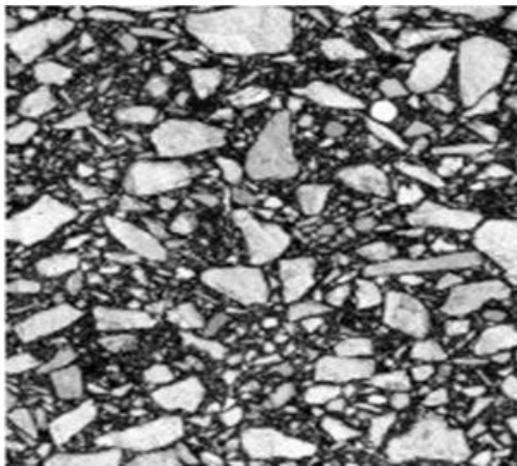


Figure 2.1 : Coupe d'un matériau Bitumineux [12].



Figure 2.2 : Prélèvement sur chantier du matériau Bitumineux [12].

2.3. Différentes familles d'enrobés bitumineux

Les bitumes sont majoritairement utilisés pour la construction routière (90%) mais aussi dans d'autres domaines tels que l'étanchéité, l'isolation ou encore le conditionnement de déchets radioactifs.

Selon le mode de fabrication nous distinguons les grandes familles suivantes :

2.3.1. Les enrobés bitumineux à chaud

Le bitume est mélangé aux granulats et aux fines à des températures élevées (environ 160°C en minimum) pour former un enrobé bitumineux [13]. Typiquement, cet enrobé comporte en masse 5% de liant et 95% de granulats. En volume, le liant représente 10%, les granulats 85% et le vide 5%. La teneur en vide peut aller jusqu'à 20-25 % pour obtenir des vides communicants dans les cas des enrobés drainants.



Figure 2.3 : Réalisation des enrobés à chaud sur chantier [12].

2.3.2. Les enrobés bitumineux tièdes

Les enrobés tièdes se composent d'une famille d'enrobés préparés à chaud, dont la température de fabrication varie entre 80°C et 130°C, selon les différents procédés de mélange. Les performances de ces enrobés tièdes sont strictement identiques à celles des enrobés à chaud, dès la fin de leur mise en œuvre ou de leur mise en service mais présentent l'avantage de permettre une diminution des nuisances (fumées, odeurs, gaz) tant au moment de la fabrication qu'à celui de la mise en œuvre, une limitation de la production des gaz à effets de serre, une réduction de la consommation énergétique lors du séchage

partiel des granulats, et une diminution des émanations de vapeurs, particulièrement important dans les espaces confinés peu aérés [14,15].



Figure 2.4 : Teste de température d'un enrobé tiède sur chantier [16].



Figure 2.5 : Réalisation des enrobés tiède sur Chantier [16].

Nous utilisons les enrobés tièdes au pour les raisons suivants :

- Réduction des températures des enrobés à chaud,
- Conservation de leur caractéristique mécanique,
- Réduction des émissions dans l'atmosphère,
- Amélioration des conditions de travail des équipes,
- Diminution des consommations énergétiques,
- Extension de la période de réalisation (en arrière saison),
- Remise plus rapide du service,
- Augmentation du temps d'application,
- Réduction des vapeurs par temps de pluie.

2.3.3. Les enrobés bitumineux à froid

Cette technique concerne les émulsions de bitume dans de l'eau, solution peu onéreuse sur le plan énergétique mais nécessitant un ajustage précis du PH pour réaliser l'émulsion et une basicité adéquate des granulats pour rompre cette émulsion et libérer ainsi l'eau [17,18].

L'enrobé bitumineux à froid est un mélange de faible granulométrie (0/4 ou 0/6 en principe) avec une forte teneur en liant et en fines, généralement utilisé de manière temporaire pour permettre la circulation de véhicules sur des voies en cours de travaux, ou encore pour reboucher des petites tranchées, trous, et nids de poules sur des chaussées déformées. Cet enrobé est très utilisé au printemps en période de dégel, pour réparer les détériorations de la chaussée dus au gel.



Figure 2.6 : Réalisation d'un enrobé bitumineux à froid sur chantier [19].

Dans notre étude nous nous intéressons aux enrobés bitumineux à chaud.

2.4. Comportement des enrobés bitumineux

Les enrobés bitumineux ont un comportement complexe. La Figure 2.7 permet d'identifier les quatre types de comportement principaux des enrobés en considérant l'amplitude de la déformation $|\varepsilon|$ et le nombre de cycles de chargement appliqués N , (Di Benedetto, 1990) [20]:

- Pour un faible nombre de chargements et des déformations de quelques pourcents, le comportement observé est fortement non linéaire.
- Pour des chargements comprenant quelques centaines de cycles et des déformations faibles (10^{-4}) le comportement est considéré, en première approximation, viscoélastique linéaire.
- Lors de chargements de plusieurs dizaines de milliers de cycles et des déformations faibles, les phénomènes d'endommagement apparaissent, le matériau se fatigue.

- En outre, lorsque des cycles déviatoires en contraintes sont appliqués à partir d'une contrainte nulle, des déformations irréversibles non négligeables existent pour des amplitudes de déformation proches de la rupture. Leur accumulation crée de l'orniérage. C'est le quatrième type de comportement qu'il convient d'identifier.

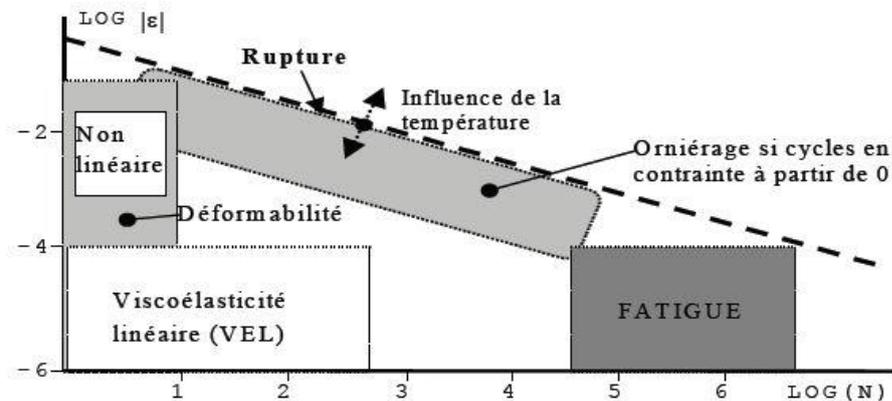


Figure 2.7 : Comportement “type” des bétons bitumineux, (ϵ) déformation – (N) nombre de chargements [18].

La Figure 2.7 permet de fixer un ordre de grandeur des différents domaines de comportement du mélange bitumineux pour une température fixée. Les frontières considérées correspondent bien évidemment à des ordres de grandeur qui peuvent varier sensiblement selon le matériau, la température et la direction du chemin de sollicitation suivi (compression, cisaillement, ...).

Dans ces conditions, les quatre propriétés mécaniques importantes pour les matériaux traités aux liants hydrocarbonés utilisés dans le domaine routier sont :

- la rigidité ou le module (comportement viscoélastique linéaire: VEL),
- le comportement en fatigue,
- le comportement à l'orniérage qui correspond à l'accumulation de déformations permanentes. Cela constitue donc un phénomène lié aux irréversibilités et aux non linéarités déjà existantes dans le domaine des faibles déformations,
- la fissuration et la propagation de fissure au travers de la structure de chaussée. En particulier, le phénomène de fissuration par apparition de contraintes liées aux variations de température (dilatation et/ou contraction thermique) est un aspect important qui introduit un couplage thermique/mécanique.

2.5. Constituants du mélange d'enrobés bitumineux

Les enrobés bitumineux sont constitués d'un mélange granulaire dont la taille varie entre 0 et D (mm) et d'un liant hydrocarboné. Le mélange final compacté et refroidi possède une teneur en vides non nulle qui participe aux performances du produit.

2.5.1. Granulats

Ils sont constitués de fines, de sables et de gravillons respectant une courbe granulométrique [21].

a. Fines

Les fines (passant < à 63 μ m) d'un mélange bitumineux sont généralement un mélange de fines d'apport peuvent être issues de roches massives : les filles calcaire est utilisé majoritairement. On rencontre également d'autres matériaux tels que le ciment, la chaux vive, le filler activé (mélange de fines calcaires et de chaux éteinte), la chaux éteinte, les cendres volantes, les fillers de cimenterie et les ardoises.

b. Sables

Les sables pour les enrobés bitumineux sont des sables concassés 0/2 ou 0/4 (grave) souvent fillérisés à 18% (0/2) ou de 10% à 14% (0/4). La courbe granulométrique d'un mélange avec un sable et des gravillons de provenances différentes peut alors présenter des anomalies (discontinuité ou bosse).

c. Gravillons

Les gravillons (d/D) constituent « l'ossature » du mélange bitumineux. A ce titre, leur nature, leur angularité, leur forme conditionnent pour partie la stabilité des mélanges et les caractéristiques de surface des couches de roulement. De plus, la nature minéralogique influe directement sur la formulation du mélange : certains matériaux (basaltes, granites, gneiss) sont plus difficiles à compacter, d'autres présentent un caractère absorbant (basaltes, laitiers, calcaires dolomitiques) dont il faut tenir compte pour le dosage en liant. La nature minéralogique et la propreté influent également sur l'adhésivité bitume-granulat.

d. Courbes Granulométriques

Le matériau granulaire final est obtenu par mélange des différentes fractions granulaires (d/D) entrant dans sa composition. Chaque fraction est caractérisée par une courbe granulométrique indiquant les passants aux différents tamis normalisés. La courbe granulométrique de mélange est caractéristique du matériau final.

2.5.2. Bitume

Les bitumes sont surtout composés de carbone et d'hydrogène, d'où leur nom d'hydrocarbure, il convient de distinguer les termes de bitume et de liant hydrocarboné trop souvent confondus. En effet, le liant hydrocarboné peut être bitumineux, goudronneux ou à base de bitume fluidifié.

2.5.2.1. Composition chimique et structure de bitume

On distingue deux grandes familles de composés du bitume : les *asphaltènes* et les *maltènes*. Les asphaltènes sont composés essentiellement d'hydrogène et de carbone et se présentent sous la forme d'un "solide" friable brun à noir. Généralement, les bitumes comportent 10 à 20% en poids d'asphaltènes. Quant aux maltènes, ils sont constitués principalement d'huiles saturées, d'huiles aromatiques et de résines.

L'ensemble forme un système colloïdal constitué par une suspension de micelles d'asphaltènes peptisés par les résines dans un milieu huileux (voir la Figure 2.8). En effet, les résines s'absorbent sur les asphaltènes et permettent leur dispersion dans le mélange huileux (hydrocarbures aromatiques et saturés). On dit qu'il y a peptisation.

Les aromatiques assurent le rôle de solvant, tandis que les saturés assurent le rôle de flocculant. La dispersion des agglomérats d'asphaltènes est plus ou moins forte selon la composition de la phase maltène (huiles + résines) : la structure du bitume est, en effet, différente selon que les asphaltènes forment ou non un réseau flocculé, baignant dans un milieu dispersant faiblement structuré par les résines. Dans ce cas, on parle de *structure "gel"* (élastoplastique). Dans le cas d'une structure où les asphaltènes forment une suspension diluée et bien stabilisée dans un milieu dispersant fortement structuré par les résines, les asphaltènes ne peuvent interagir. On parle alors de *structure "sol"* (visqueuse) [22]. Une classe intermédiaire, appelée "*sol-gel*", correspond aux bitumes intermédiaires.

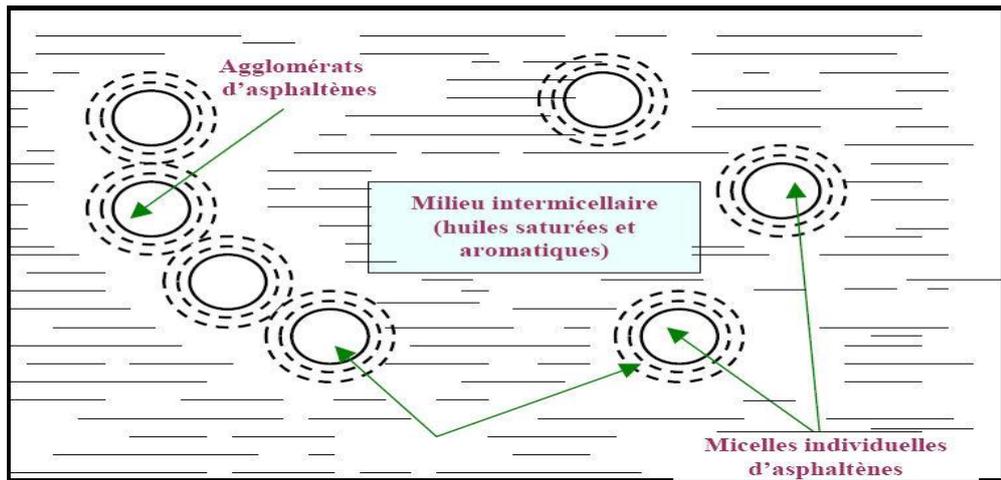


Figure 2.8 : Schématisation de la structure colloïdale d'un bitume routier (d'après Brule, 1978) [23].

2.5.2.2. Différentes familles de Bitume

Il existe plusieurs types de bitume, les plus connus sont [21] :

1. Bitumes purs

Ils comprennent les bitumes purs normalisés et les bitumes spéciaux divisés en bitumes de grade « dur » et en bitumes à susceptibilité améliorée.

2. Bitumes modifiés

Les bitumes modifiés sont des liants bitumineux dont les propriétés ont été modifiées par l'emploi d'un agent chimique, qui, introduit dans le bitume de base, en modifie la structure chimique et les propriétés physiques et mécaniques. Ils sont préparés avant l'emploi dans une unité spécialisée. Les agents chimiques comprennent le caoutchouc naturel, les polymères synthétiques, le soufre et certains composés organométalliques. Les principaux agents chimiques utilisés dans la modification des bitumes sont :

- Polymères thermoplastiques élastomères
 - SBS (Styrène Butadiène Styrène)
 - SIS (Styrène Isoprène Styrène)
 - SB (Styrène Butadiène)
 - SBR (Copolymère statistique)

- Polymères thermoplastiques plastomères

EVA (Ethylène acétate de vinyle)

EMA (Ethylène acrylate de méthyle)

EBA (Ethylène acrylate de butyle)

PIB (Polyisobutylène).

- Latex

Polychloroprène

Caoutchouc SBR

Caoutchouc naturel

- Poudrette de caoutchouc

a. Les liants modifiés élastomères

On distingue les mélanges physiques et les bitumes élastomère obtenus par réticulation. Les mélanges physiques sont généralement hétérogènes à une échelle de quelques micromètres. La finesse de la structure des bitumes élastomères va directement intervenir sur la stabilité du mélange à chaud et sur ses propriétés physiques sur toute la gamme de températures.

Les bitumes élastomère réticulés ont une structure résultant d'une double forme de liaisons extrêmement fine, de l'ordre du micromètre. Cette réaction est irréversible.

Les bitumes élastomère réticulés sont par rapport au liant initial, des résistances en traction plus élevées, ainsi que des raideurs et des ductilités augmentées.

La modification du bitume par des élastomères induit des différences de comportement rhéologique. Par rapport au bitume pur, le BmP SBS présente, à basse température, des modules plus faibles, donc une meilleure flexibilité. La situation s'inverse à hautes températures. Pour un bitume donné, cette modification du comportement rhéologique, dépend de la nature et de la teneur en polymère.

b. Les liants modifiés plastomères

Les bitumes copolymères d'éthylène (EVA, EMA et EBA) :

Aux faibles teneurs en polymères (< 5%), la modification des propriétés est due essentiellement à l'augmentation de la teneur en asphaltènes de la phase bitume. Dans ce cas, le choix du bitume d'origine est prépondérant.

Aux fortes teneurs en polymères, on a affaire à un polymère plastifié par une fraction des maltènes du bitume et c'est le choix du polymère qui conditionne les propriétés du liant. On constate une diminution de la pénétrabilité et une forte augmentation de températures bille-anneau.

c. Les bitumes caoutchouc

On distingue deux familles qu'ils sont les suivants :

Les bitumes caoutchouc non stockables :

Fabriqué à partir de poudrette de caoutchouc obtenue par rapage de caoutchouc naturel et synthétique, le bitume caoutchouc présente un caractère élastomérique, une haute viscosité à haute température et une bonne flexibilité basse température.

Les bitumes caoutchouc stockables :

Fabriqué à partir de déchet broyés de pneumatiques de camions et de voitures, une huile lourde et d'un élastomère synthétique, le bitume caoutchouc présente un très fort allongement à la rupture à basse température.

3. Bitume pigmentables

Ils sont obtenus à partir de brut sélectionnés et sont caractérisés par une très faible teneur en asphaltènes. Les grades sont les mêmes que pour les bitumes routiers classiques. La coloration se fait à l'aide d'oxydes métalliques à raison de 2,5% à 6% environ en masse par rapport à l'enrobé.

4. Liants de Synthèse

Ces liants sont obtenus par mélange de coupes pétrolières et pétrochimiques sans asphaltènes. Ils se présentent sous un aspect transparent en film mince qui permet de garder la teinte naturelle du granulat. Ils peuvent être colorés par l'addition de 2% de pigments.

5. Liants bitumineux avec charges minérales

Ces liants prêts à l'emploi sont obtenus par mélange en usine, de bitume pur et de charges minérales, par exemple de la chaux. La teneur en liant est différente de la teneur en bitume.

6. Liants d'origine agrochimique

Ce sont des liants fabriqués à partir de matières végétales sans matériau dérivé de la pétrochimie. Le produit est transparent et peut être coloré. Son utilisation est en cours d'évaluation.

7. Bitume antikérozène

Ce sont des bitumes spécialement formulés pour résister au risque de dissolution par les pertes de kérosène sur les parkings et voies de circulation des aéroports. Ils peuvent être utilisés dans la composition des Béton Bitumineux Aéronautiques (BBA).

2.5.2.3. Classe de comportement des bitumes purs en fonction de $|\varepsilon|$ et T

La Figure 2.9 permet d'identifier simplement les principaux types de comportement des bitumes en fonction de l'amplitude de la déformation ($|\varepsilon|$) et de la température T, pour une vitesse de déformation fixée. On y distingue :

- les domaines fragile et ductile, où la résistance à la traction σ_p peut être mesurée,
- la rupture fragile, qui peut être caractérisée par la ténacité K_c ou l'énergie de rupture G_c (Mécanique Linéaire de la Rupture),
- le comportement élastique linéaire, caractérisé par les modules E et G,
- le domaine viscoélastique linéaire, caractérisé par les modules complexes E^* et G^* ,
- le comportement purement visqueux (Newtonien), caractérisé par la viscosité η ,
- pour des déformations de l'ordre de quelques pour cent, le domaine où le comportement est fortement non linéaire.

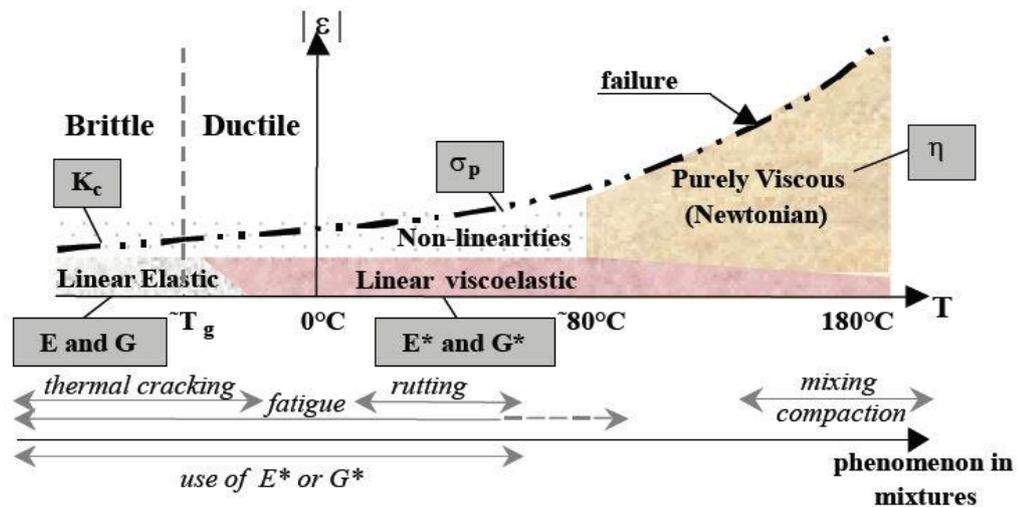


Figure 2.9 : Classes de comportement des bitumes en fonction de $|\epsilon|$ et T [24, 25].

2.5.2.4. Propriétés rhéologiques des liants bitumineux

Parmi les propriétés rhéologiques demandées au bitume, il doit d'abord être pompable et maniable à température élevée (vers 160°C et plus). Ensuite, il doit être suffisamment rigide aux températures élevées de service pour maintenir le squelette granulaire et limiter le fluage des enrobés, permettant d'éviter ainsi le phénomène d'orniérage qui se manifeste typiquement autour de 50°C, selon le trafic.

Enfin, il doit être suffisamment mou aux basses températures de service pour permettre aux contraintes de se relaxer et résister ainsi à la fissuration par fatigue ou de retrait thermique (domaine de température de l'ambiante jusqu'aux plus basses températures, typiquement -7°C en Algérie)

Ces propriétés sont généralement difficilement conciliables, sinon incompatibles, et il est donc difficile d'obtenir un bitume utilisable sous tous les climats et trafics possibles. C'est pourquoi différents types de bitumes sont disponibles et divers critères rhéologiques permettent de les caractériser et de les classer.

Des propriétés rhéologiques du bitume satisfaisantes sont essentielles sur le plan fonctionnel pour obtenir des performances de l'enrobé correctes. Les essais pour mesurer ces propriétés peuvent être de deux types [26]:

- les essais technologiques : ils tendent à caractériser la consistance du produit dans des conditions normalisées. Ils définissent les spécifications sur lesquelles sont fondés les choix des bitumes pour les diverses applications.

- les essais rhéologiques : ils permettent de mesurer une grandeur physique définie (module, complaisance, viscosité). La rhéologie est l'étude physique des déformations de la matière liées à la viscosité, la plasticité, l'élasticité et l'écoulement sous l'effet des contraintes. La mesure de ces grandeurs physique a pour but de prévoir le comportement mécanique des matériaux, et en l'occurrence, du bitume.

Les essais du premier type (voir ANNAXE A) permettent de « matérialiser » très simplement le comportement du matériau, alors que les mesures mécaniques, plus complexes et plus longues à exécuter apportent plutôt des éléments de compréhension de ce comportement.

2.6. Formulation des enrobés bitumineux

L'objectif principal de la formulation est de déterminer une composition optimale de granulats, de liants et de vides qui permette d'atteindre les performances visées.

2.6.1. Paramètres influencent sur la formulation des enrobés bitumineux

Différents paramètres peuvent avoir une influence contradictoire sur le comportement d'un enrobés bitumineux. Il faudra donc trouver un bon compromis, pour que l'enrobé joue le rôle qui lui est assigné. Parmi ces paramètres on a :

2.6.1.1. Granulométrie et caractéristiques des granulats

Les caractéristiques des granulats influents sur la formulation du béton bitumineux sont présentées dans ce qui suit:

- Teneur en filler

Le rôle du filler est de remplir les vides et d'augmenter la compacité. C'est le mastic bitume/filler qui lie les granulats. Une forte teneur en filler doit s'accompagner d'une forte teneur en liant mais cela est à moduler en fonction des propriétés recherchées. En revanche, une faible teneur en filler, ou même une absence de filler, nécessite l'utilisation de liant visqueux pour conserver la cohésion de l'enrobé.

- La nature de la courbe granulométrique

On appelle :

- courbe « nougat », une courbe riche en sable donc pauvre en gravillons ;
- courbe « grenue », une courbe riche en gravillons donc pauvre en sable (on parle également de courbe « creuse » ;
- courbe « semi-grenue », une courbe intermédiaire entre la courbe nougat et la courbe grenue.

Les formules semi-grenues permettent une meilleure compactabilité que les formules grenues mais peuvent présenter une tenue faible à l'orniérage et une rugosité moyenne, voire faible. La discontinuité augmente la rugosité.

- Nature des granulats

La plupart des granulats sont composés d'un composite de plusieurs minéraux qui peuvent présenter des caractéristiques très différentes. Leur nature influence l'affinité du liant avec le granulat. En général les calcaires, à l'inverse des matériaux siliceux, présentent une bonne adhésivité avec le bitume. Par contre, l'adhérence entre le pneumatique et un granulat calcaire n'est généralement pas bonne et donc ce type de roche n'est généralement pas utilisé pour réaliser une couche de roulement.

- Angularité des granulats

L'angularité des granulats est également un paramètre important. Une angularité croissante a pour inconvénient de conduire à des enrobés plus difficiles à compacter mais de plus en plus stable mécaniquement. Elle assure de bonnes caractéristiques antidérapantes de la couche de roulement (Figure 2.14).

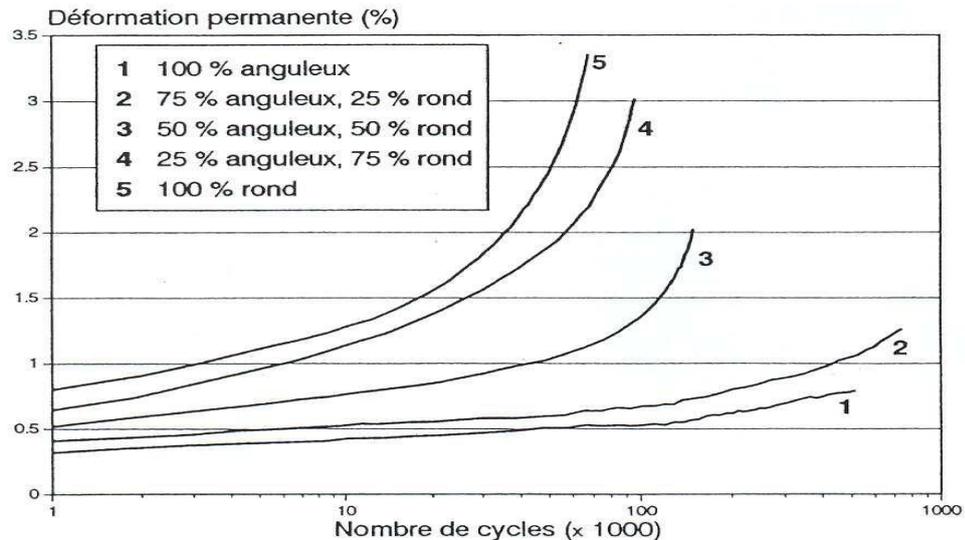


Figure 2.10 : Influence de la forme des granulats [Vanelstraete et Francken, 1994] [27].

2.6.1.2. Nature du liant

La nature du liant, qui influence ses propriétés mécaniques, a une part importante dans la résistance à l'orniérage des matériaux bitumineux. La susceptibilité thermique, qui caractérise le niveau de variation des propriétés mécaniques des matériaux bitumineux, notamment à hautes températures, dépend strictement de la même propriété du liant utilisé : plus le liant est thermiquement susceptible, plus le mélange l'est.

D'autre part, les propriétés mécaniques du liant, à côté de celles des composants minéraux, influencent la rigidité et la résistance aux déformations permanentes des mélanges bitumineux.

Des études expérimentales (Vanelstraete et Francken, 1994, Corté et al. 1997) [28, 29] montrent que l'utilisation des liants plus durs et moins susceptibles à la température diminue considérablement les risques d'orniérage (Figure 2.15), par contre elle peut poser des problèmes de fragilisation du mélange à basses températures.

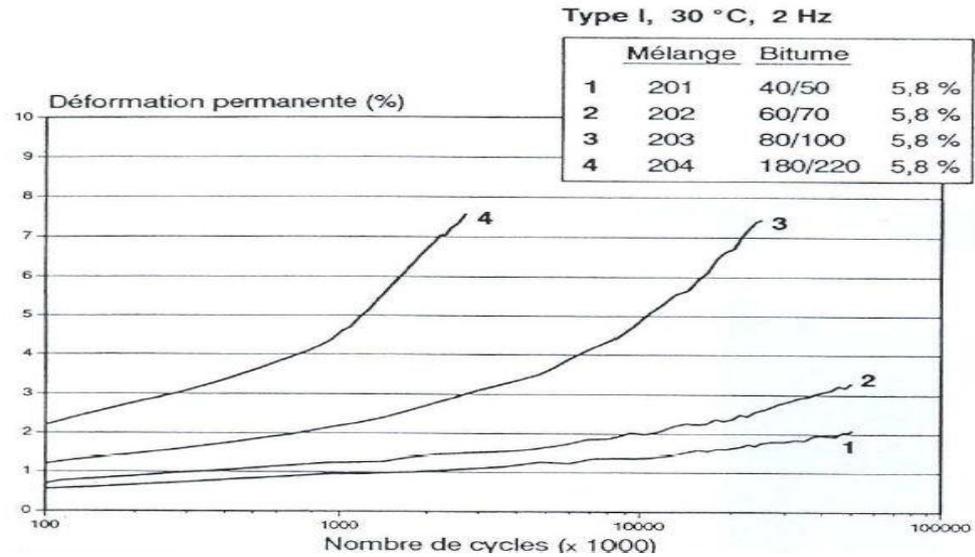


Figure 2.11 : Influence de la nature du liant [Vanelstraete et Francken, 1994] [28].

2.6.1.3. La teneur en liant

Le niveau d'enrobage des composants minéraux est directement lié à la teneur en liant et donc également à la qualité des contacts entre les agrégats du squelette granulaire (ANNEXE B). L'introduction d'une quantité de liant excessive va saturer le mélange, ce qui réduit les efforts de contact entre les granulats et ce n'est que l'adhésivité et la cohésion du liant qui assurent la résistance aux déformations permanentes du squelette granulaire, et donc du mélange.

Les études expérimentales de Corté et al [29] sont des démonstrations parfaites de cette tendance (Figure 1.16).

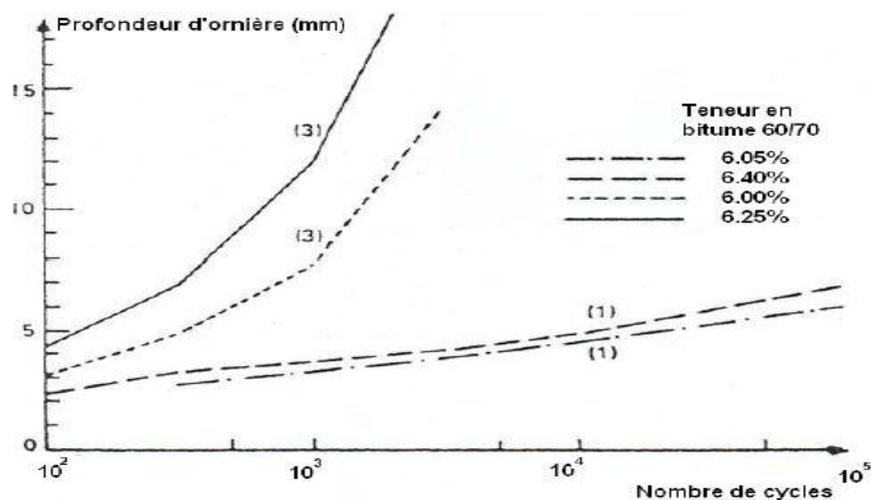


Figure 1.12 : Influence de la teneur en liant au niveau d'ornièrre [29].

Par contre, une quantité insuffisante de liant pose également des problèmes. Ceci n'assure pas un bon enrobage des granulats et les composants minéraux perdent cette fois l'adhésivité, la teneur en vide augmente et la stabilité du squelette granulaire diminue.

Ceci engendre également une forte susceptibilité aux déformations permanentes due au post-compaction, de faibles cohésions et frottement interne.

Des recherches expérimentales ont montré l'existence d'une teneur en bitume optimale pour chaque mélange, pour laquelle la cohésion et le frottement interne des agrégats, deux facteurs qui améliorent la résistance aux déformations permanentes du mélange, atteignent leurs valeurs maximales (Figure 1.17).

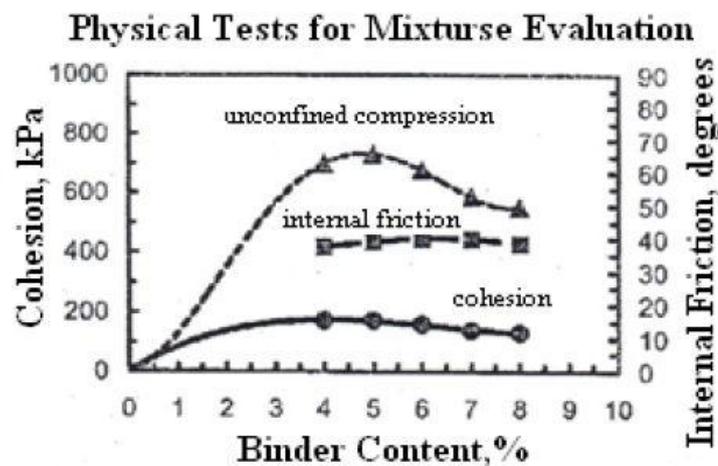


Figure 1.13 : Propriétés internes en fonction de la teneur en liant [30].

2.6.1.4. Pourcentage de vides ou Compacité

Le pourcentage de vides ou la compacité des mélanges hydrocarbonés sont des paramètres très importants dans le domaine de la formulation des enrobés. En effet, les propriétés des matériaux sont dépendantes des volumes respectifs du squelette granulaire, de celui du liant (y compris éventuellement celui des additifs) et du volume d'air "libre", appelé par la suite pourcentage de vides (la teneur en vide).

$$\text{COMPACITE} = 100 - \% \text{ vides}$$

Il est habituellement considéré qu'une bonne compacité (faible teneur en vides) correspond à une bonne résistance aux déformations permanentes. Mais les études expérimentales de [Cross et Brown, 1992, Sousa, 1994] montrent qu'une teneur en vides inférieure à 2-3% entraîne une forte accélération des déformations permanentes.

La déformation se produit rapidement à faible teneur en vides car les composants granulaires sont saturés dans le liant et ce dernier agit comme un agent de lubrification, qui favorise des déformations plastiques du squelette granulaire, plutôt que comme un agent de cohésion.

D'un autre côté, une mauvaise compacité entraîne un post-compactage au début de la vie des structures routières et provoque également des déformations permanentes, Il faut donc assurer une teneur en vides optimale, qui se situe entre 4% et 6% selon la norme NF P 98-141[31].

2.6.2. Méthode de Formulation des enrobés bitumineux

Les méthodes de formulation des enrobés bitumineux se sont développées au cours des quarante dernières années pour répondre à l'évolution des exigences des donneurs d'ordre. La formulation des mélanges est d'autant plus délicate que souvent, pour les enrobés bitumineux, l'amélioration d'une caractéristique lors d'un changement de composition va influencer défavorablement sur une autre caractéristique. Il est bien connu par exemple que l'augmentation de la teneur en liant est bénéfique pour la résistance en fatigue, mais néfaste à l'égard de la résistance à l'orniérage.

Les propriétés recherchées pour un matériau bitumineux dépendent de la couche dans laquelle il est employé. Ainsi pour les couches d'assises, dont le rôle est de répartir les charges sur le sol support sans déformation excessive, l'enrobé doit être plutôt rigide, résistant en fatigue, résistant aux déformations permanentes et relativement compact. Pour une couche de roulement, directement en contact avec le trafic et les agressions climatiques, l'accent est mis sur la durabilité avec une bonne résistance à l'action de l'eau, sur la résistance aux déformations permanentes mais surtout sur la recherche de caractéristiques de surface (rugosité, bruit de roulement, etc). On outre, selon les cas, l'enrobé de couche de roulement doit être suffisamment compact pour protéger les couches inférieures des infiltrations d'eau, ou bien suffisamment ouvert pour permettre le drainage de l'eau. Ces caractéristiques sont multiples et parfois contradictoires.

La manière d'aborder cette question est variée et dépend fortement du contexte local. Plusieurs méthodes de formulation ont été développées dans divers pays [21], tel que la méthode du LCTP en France (voir ANNEXE C). En Algérie une méthode a été établie en Février 2004 (Recommandations algérienne sur l'utilisation des bitumes et des enrobés en béton bitumineux à chaud), cette méthode empirique est basée sur des résultats d'essais mécaniques. Les étapes de cette méthode sont les suivantes [32]:

- Choisir une courbe granulométrique dans laquelle la courbe de mélange s'insère dans le fuseau de référence du mélange hydrocarboné.
- Choisir plusieurs teneurs en liants qui correspondent à plusieurs modules de richesse (selon les exigences établies par les normes des mélanges).
- Détermination des performances mécaniques des différents mélanges obtenus pour différentes teneurs en liant, au point de stabilité Marshall, le Fluage et l'essai Duriez.
- Choix de la formule et de la composition optimale.

2.7. Caractéristiques du mélange bitumineux

Dans cette partie, les caractéristiques des enrobés bitumineux sont d'abord examinées à l'échelle de la liaison bitume-granulat [26], puis du point de vue de la structure entière.

2.7. 1. Liaison bitume – granulat

Dans un enrobé bitumineux, le bitume est utilisé pour enduire les granulats dans l'intention de les agglomérer et d'assurer une étanchéité et/ou une adhésion de l'ensemble. L'accrochage du liant aux granulats doit donc être aussi intense que possible. L'adhésion du bitume à un granulat est d'autant plus importante que le bitume le mouille parfaitement.

Avant d'explicitier la notion de mouillage, une précision de terminologie est nécessaire afin d'éviter les confusions. L'adhésivité est une propriété d'attraction entre deux matériaux, la cohésivité, par contre, est relative à la cohésion interne d'un matériau, dans le cas du bitume, elle est essentiellement liée à la viscosité. Quant à l'effet mouillant, il est le signe visible de l'existence de forces attractives d'un liquide pour un autre composé. Il matérialise l'adhésivité entre deux matériaux, par exemple un liquide et un solide.

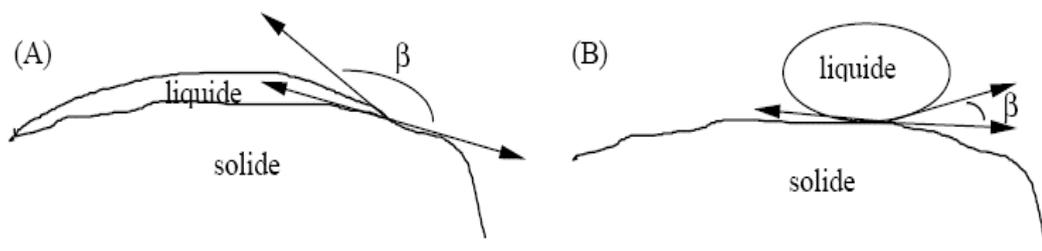


Figure 2.14 : Angle de mouillage à l'interface liquide-solide [8].

La figure 2.19 illustre le contact d'un élément solide avec un liquide. Le cas (A) schématise une bonne adhésivité entre ces deux matériaux, l'angle de mouillage β est grand, alors que le cas (B) représente une mauvaise adhésivité, l'angle β étant petit. L'angle de mouillage d'un bitume sur un solide sec est généralement élevé (partie (A)).

Toutefois, il dépend de la nature du solide considéré, à savoir la nature minéralogique du granulat [33,34].

Il est possible d'une part d'utiliser un bitume de viscosité élevée. D'autre part, les granulats ou le bitume peuvent être dopés par des éléments destinés à améliorer le mouillage (dopes d'adhésivité) par diminution de la tension interfaciale bitume-granat ou à rigidifier l'interface.

2.7.2. Structure des enrobés bitumineux

Les qualités d'adhésion et d'étanchéité au sein de l'enrobé bitumineux résultent du concours des propriétés de l'interface de chaque granulat avec le bitume mais aussi des caractéristiques de la structure de l'enrobé pris dans son ensemble. Ainsi, le bitume est généralement bien fixé et retenu par les granulats dans des enrobés denses où il a été mélangé aux granulats secs à température élevée. L'enrobé doit donc idéalement consister en une structure homogène et compacte, dans laquelle les granulats sont fixés dans un continuum de bitume. En pratique, il existe toujours des hétérogénéités dues à la ségrégation, la sédimentation et le gonflement des granulats.

La plupart des bitumes se comportent comme des liquides visqueux à des températures ordinaires (de l'ordre de 30°C). S'il existe des différences de densité entre le bitume et les granulats ou si la viscosité du bitume est très faible, les granulats ont théoriquement tendance à sédimenter (ou flotter) au bout d'un certain temps. Ces phénomènes conduisent à une accumulation des granulats dans les couches inférieures (ou supérieures) de l'enrobé. Une telle accumulation entraîne la diminution de l'épaisseur du film de bitume entourant chaque granulat, elle induit donc une plus grande perméabilité de l'enrobé et favorise l'absorption d'eau.

L'observation d'enrobés a montré que, pour la viscosité des bitumes habituellement utilisés, l'intensité de ces phénomènes varie avec la température et la granulométrie des granulats durant les premières minutes qui suivent la fabrication des enrobés. Ensuite, aux températures ordinaires, la sédimentation (ou la flottation) est trop lente pour avoir une signification à l'échelle de la dizaine d'années. En ce qui concerne le gonflement de l'enrobé, il est lié au rapport bitume/granulats et surtout à la nature de ces derniers.

Les granulats qui présentent des affinités pour l'eau ont tendance à absorber l'humidité ambiante et plus rarement certains granulats produisent des gaz à la température de fabrication ou d'utilisation des enrobés. Ces deux phénomènes, absorption d'eau ou production de gaz, conduisent à des gonflements de la structure de l'enrobé. Des pores et des fissures peuvent se développer, endommager la structure de l'enrobé et réduire l'adhésion de l'ensemble et l'étanchéité.

2.8. Propriétés Mécaniques des enrobés bitumineux

Les propriétés mécaniques des matériaux bitumineux peuvent être déduites de l'analyse des résultats d'essais de laboratoire. Ces essais, normalisés lorsqu'ils servent au contrôle et au dimensionnement, ces derniers sont effectués dans des conditions bien définies de température et sollicitation. Ils sont réalisés sur des éprouvettes confectionnées en laboratoire ou éventuellement prélevées sur place.

Les essais de caractérisation des propriétés mécaniques des matériaux bitumineux sont nombreux et divers, il est néanmoins possible de les classer en différentes catégories. Une des classifications proposée par Di Benedetto (1990), introduit deux catégories d'essai : les essais homogènes et les essais non homogènes.

2.8.1. Les essais non homogènes

Correspondent à des essais de structure ; il faut postuler une loi de comportement à priori et prendre en compte la structure de l'éprouvette ou de l'ouvrage pour obtenir les paramètres de la loi de comportement (module complexe par exemple), et ce après des calculs qui sont souvent compliqués. Ils peuvent être utilisés dans le cas où le comportement du matériau est simple (élasticité linéaire isotrope ou viscoélasticité linéaire isotrope). Parmi ces essais nous avons :

2.8.1.1. Essais Marshall

L'essai Marshall [35], qui est toujours très utilisé au niveau international, conduit à la détermination directe de la stabilité Marshall (SM) (force maximale appliquée) ; et du fluage Marshall (FM) (valeur de la déformation en 1/10 mm correspondant à la stabilité), deux grandeurs liées à la caractérisation empirique de l'orniérage. Elles permettent de définir le quotient Marshall SM/FM. Les éprouvettes, compactées par impact, sont immergées dans un bain d'eau à 60 °C pendant une durée de 30 à 40 min puis comprimées

à vitesse constante (51 mm/min) en compression diamétrale empêchée au moyen de mâchoires hémicylindrique.

2.8.1.2. Essais Duriez

La méthode d'essai Duriez, essai de compression simple type, a pour but de déterminer, à 18 °C pour un compactage donnée, la teneur à l'eau d'un mélange hydrocarboné à chaud à partir des résistances à la compression avec ou sans immersion des éprouvettes [36].

Les éprouvettes sont fabriquées par compactage statique à double effet. La masse volumique apparente est ensuite déterminée sur un certain nombre d'éprouvettes pour calculer le teneur en vide. D'autres éprouvettes sont soumises à un essai de compression après conservation à 18°C dans des conditions définies :

- à l'air pour certaines éprouvettes
- en immersion pour d'autres éprouvettes.

La teneur à l'eau est caractérisée par le rapport des résistances avec ou sans immersion.

2.8.1.3. Essai à la Presse à Cisaillement Giratoire (PCG)

L'essai à la presse à cisaillement giratoire (PCG) est un essai de formulation. la particularité de l'appareil réside dans le fait que l'échantillon n'est pas densifié par impacte comme dans le cas de la méthode Marshall, mais plutôt sous l'action combiné d'un piston exerçant une pression fixée à 600 KPa et d'un moule cylindrique de 150 mm de diamètre incliné de 1,25 degré et décrivant un mouvement giratoire de 30 tours/minute [37].

Le compactage est obtenu en effectuant le nombre de giration désiré, qui est généralement de 200. La température de l'échantillon est ajustée en fonction de type de bitume utilisé.

Ce mode de compactage traduit la relation linéaire qui existe entre le nombre de passes d'un rouleau compacteur de chantier et le nombre de girations ; (ce n'était pas le cas avec le nombre d'impacts de la méthode Marshall). Alors que la méthode Marshall ne permet la mesure d'un pourcentage de vides que pour un effort de compactage unique, l'essai à la PCG permet de mesurer l'évolution du pourcentage de vides dans le mélange en fonction du nombre de giration. Cette courbe du pourcentage de vides en fonction du

nombre de giration décrit la maniabilité du mélange, qui est utilisée comme critère de formulation des enrobés.

Le critère de maniabilité permet d'exercer une discrimination entre des mélanges trop maniable, qui auront tendance à présenter des ornières, et des mélanges peu maniables, qui seront perméables et peu durables. L'essai à la PCG permet également une appréciation quantitative de l'éprouvette densifiée, de la texture de la surface et des risques de ressuage en service.

Un autre critère, fixé à 200 girations, permet d'estimer le compactage ultime subi par le mélange en service : le mélange doit conserver une quantité minimale de vides d'environ 2%, pour éviter l'orniérage ou le ressuage ; à 200 girations, l'évaluation visuelle de l'éprouvette confirme la présence ou l'absence de ressuage d'une quantité excessive de bitume.

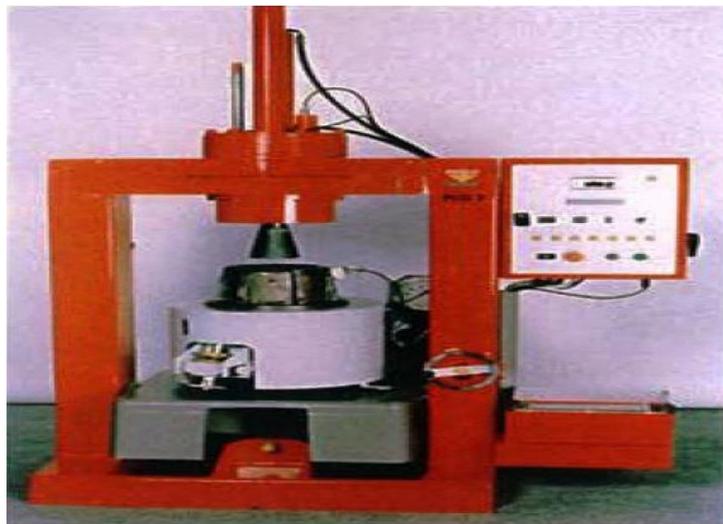


Figure 2.15 : Presse à cisaillement giratoire mlpc type 2 [21].

2.8.2. Les essais homogènes

Dans ces essais, les champs de contraintes et de déformations sont identiques en tout point de l'échantillon. Par opposition aux essais non homogènes, les essais homogènes permettant d'avoir accès directement aux contraintes et déformations du matériau sans postulats aucun, et donc à la loi de comportement. Ils sont plus pertinents pour décrire le comportement du matériau. Permet ces essais on a :

2.8.2.1. Essai de déformation permanente (l'orniérage)

L'orniérage est un facteur de dégradation des chaussées bitumineuse fortement circulées. L'essai consiste à prévoir le comportement de l'enrobé soumis à un trafic agressif et sous température élevée. Cet essai est très important pour les routes très circulées et avec un pourcentage de poids lourds assez élevé, il permettra de simuler au laboratoire la résistance de l'enrobé à l'orniérage.

L'essai consiste à déterminer la profondeur de l'ornière au passage répété d'un pneumatique, selon l'épaisseur de l'enrobé on confectionne une plaque de 5 ou 10 cm qu'on lui fait subir une énergie de compactage normalisée à 60°C, plusieurs cycles sont appliqués 1000, 3000, 10 000, 30 000, 100 000 [38], le résultat (profondeur d'ornière) est comparé à la norme EF EN 12697-22. La profondeur de la déformation produite dans le passage de roue, est notée en fonction du nombre de cycles. Les spécifications portent sur un pourcentage d'ornière à un nombre de cycles donné, qui dépend du type de matériau et de sa classe.

2.8.2.2. Essai de Fatigue

Les structures de chaussées subissent un endommagement progressif par fissuration sous l'agressivité du trafic routier. Ce phénomène de fatigue est étudié en laboratoire par des essais de flexion deux points réalisés sur consoles à profil trapézoïdal qui subissent en tête des sollicitations sinusoïdales continues [39].

Cet essai permet d'étudier le comportement des enrobés bitumineux vis-à-vis de la fissuration, il est pratiqué sur des éprouvettes de forme trapézoïdales, l'éprouvette est encastrée à la base, sollicitée en tête en flexion sinusoïdale par déplacement imposé d'amplitude constante choisie afin de caractériser la rupture à un million de cycle. L'essai est pratiqué à 10°C et à une fréquence de 25 Hz [39].



Figure 2.16: Essai de fatigue sur éprouvettes trapézoïdales [21].

La répétitivité des cycles de flexion alternée entraîne un endommagement de l'éprouvette (des fissures sont localisées). L'essai est conduit jusqu'à réduction de moitié de l'effort mesuré en tête, c'est le critère de la rupture. Les résultats obtenus sont reportés sur un diagramme (déformation - nombre de cycles à rupture).

2.8.2.2. Essais du Module complexe

Le module complexe d'un enrobé est déterminé à différentes fréquences et températures, à petite déformation, afin de caractériser le comportement viscoélastique linéaire de l'enrobé. Il existe différentes méthodes d'essai pour déterminer le module complexe des enrobés.

Ces méthodes d'essai sont résumées dans le Tableau 2.1, où des essais de traction ou de compression, directe ou indirecte, sont proposés, ainsi que des essais de flexion en différents points [36].

Tableau 2.1 : Méthodes d'essai normalisées pour la détermination du module complexe des enrobés.

Norme	Méthode d'essai	Statut
AASHTO TP 62-07	Compression direct	Modifiée en 2007
ASTM D 3497-79	Compression directe	Ré-approuvée en 2003
ASTM D 4123-82	Traction indirecte	Retirée en 2003
EN 12697-26	Flexion en deux points Flexion en trois points Flexion en quatre points Traction indirecte Traction-compression directe Traction directe	Éditée en 2004

Nous présentons ici quelque essai.

- Essai Traction compression directe (TCD)

L'essai traction-compression directe (TCD) est un essai sous chargement homogène, uniforme et distribué dans l'éprouvette, ce qui permet de calculer l'état de contrainte et de déformation directement dans l'axe de sollicitation (Di Benedetto et coll., 2005) [40]. Dans le cas des essais de flexion et de traction indirecte, les contraintes et les déformations ne sont pas réparties uniformément dans l'éprouvette et sont déterminées de manière indirecte. La configuration de l'essai TCD permet également de déterminer la résistance à

la fatigue (traction-compression), à la déformation permanente (compression) répétée ou à la fissuration thermique (traction) des enrobés (Doucet et Auger, 2007). La détermination directe de la contrainte et de la déformation pour l'essai TCD sont indiqués à l'Équation (2.1) et à l'Équation (2.2), L'essai est représenté dans les Figures 2.22, 2.23.

$$\sigma = \frac{4P}{\pi d^2} \quad (2.1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h} \quad (2.2)$$

Avec :

σ : Contraintes axiale (Kpa) ;

ε : Déformation axiale (m/m) ;

P : la charge axiale (KN) ;

d : diamètre de l'éprouvette (m) ;

Δh : Déplacement axiale (m) ;

h : hauteur pour la mesure de Δh (100mm) (m).

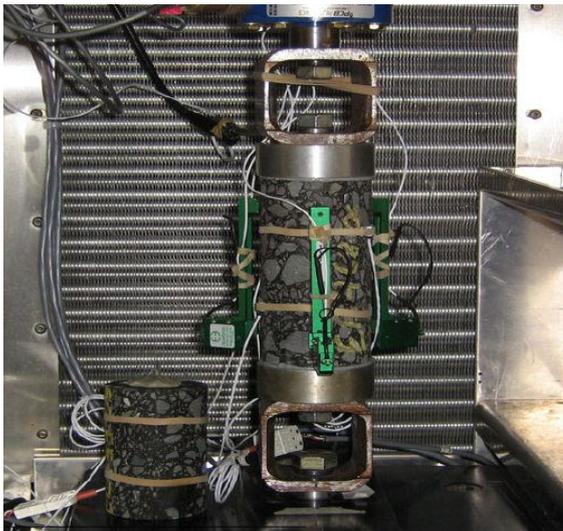


Figure 2.17 : Essai de Traction compression Direct [41].

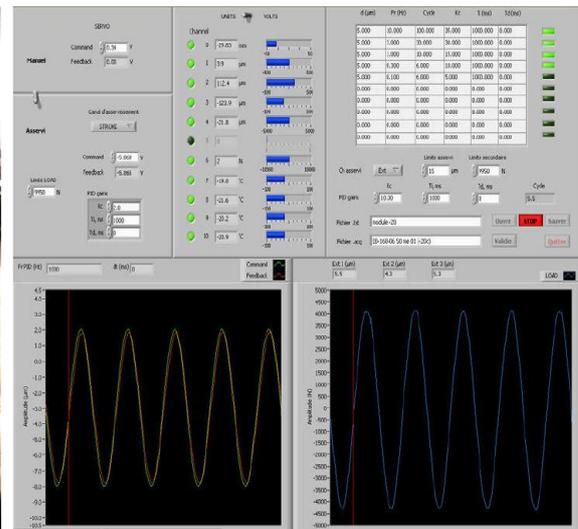


Figure 2.18 : Ecran de contrôle de Compression direct [41].

- Essai de Module complexe par flexion en deux points

L'essai de module complexe sur éprouvettes constitue l'un des essais de base pour la caractérisation des matériaux bitumineux routiers. Cet essai est systématiquement réalisé pour fournir les données requises dans les normes produit (module à 15°C, 10 Hz). Il permet d'identifier les propriétés viscoélastiques linéaires des matériaux bitumineux dans leur gamme de fréquence et de température d'utilisation [40].

Les résultats de cet essai permettent ainsi de caler des modèles rhéologiques pour la modélisation des matériaux bitumineux. Il est égal à la somme du module statique et du module de perte du matériau.

Le principe de l'essai est d'effectuer des chargements sinusoïdaux de fréquence f et de pulsation $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ à la tête d'une éprouvette trapézoïdale et mesurer le déphasage ϕ , la contrainte et la déformation. Le module complexe est donné par la formule suivante :

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_0 e^{i\omega t}}{\varepsilon_0 e^{i(\omega t - \phi)}} = \frac{\sigma_0 \sin \omega t}{\varepsilon_0 \sin (\omega t - \phi)} \quad (2.3)$$

Ce module complexe est le module exigé par les normes produits puisqu'il décrit mieux le comportement viscoélastique de l'enrobé à une température donnée.



Figure 2.19 : Essai de module complexe par flexion en deux points sous chargement sinusoïdale [21].

- Essais de traction Nottingham Asphalt Tester NAT (TND)

Cet essai a pour but de déterminer le module élastique des chaussées bitumineuses. Il est largement utilisé en Algérie (CTTP) et est basé sur la traction indirecte répétée au NAT.

Le principe de l'essai de traction indirecte répétée consiste à soumettre une éprouvette cylindrique de façon répétée à une charge verticale de compression le long d'un diamètre, provoquant ainsi une contrainte de traction le long du diamètre perpendiculaire à la direction du chargement. La déformation transitoire (horizontale) due à cette contrainte est mesurée [40].

Le module élastique est une fonction de la charge de compression et de la déformation de traction. La contrainte de traction (σ_{ti}) et le module élastique (E_{ti}) sont donnés respectivement par les relations suivantes :

$$\sigma_{ti} = \frac{2.P}{\pi.D.e} \qquad E_{ti} = \frac{P(\nu+0,27)}{\Delta D.e} \qquad (2.4)$$

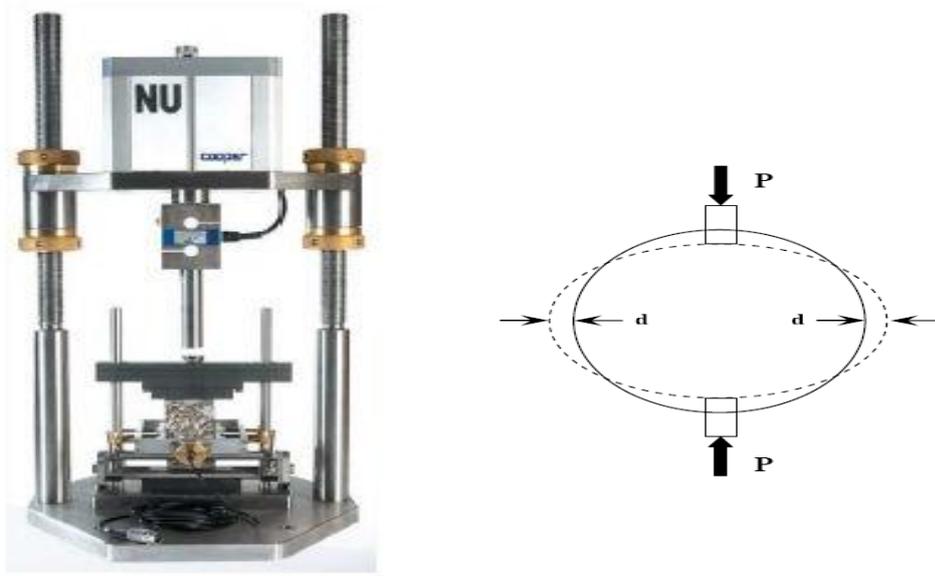


Figure 2.20. Déformation d'une éprouvette - Essai de traction indirecte NAT-[31].

Avec :

σ_{ti} : contrainte de traction indirecte ;

E_{ti} : module d'élasticité de traction indirecte ;

P : effort vertical appliqué ;

D : diamètre de l'éprouvette ;

ΔD : variation du diamètre (déformation horizontale) ;

e : épaisseur de l'éprouvette ;

ν : coefficient de Poisson.

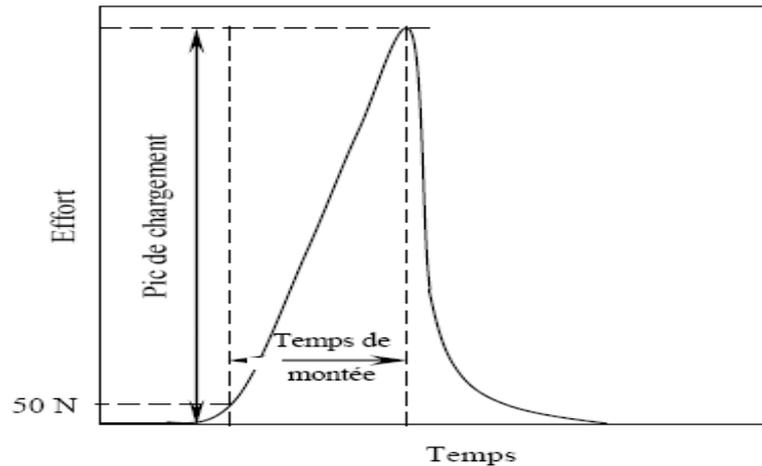


Figure 2.21 : Evolution de l'effort de déformation en fonction du temps [40].

Avant l'essai proprement dit, l'éprouvette est soumise à 5 pulsations de conditionnement, dont le but est la stabilisation des barres de chargement par l'intermédiaire desquelles l'effort est transmis à l'échantillon.

Cinq pulsations d'essai (Figure 2.24) sont ensuite réalisées à une fréquence imposée avec mesure du module élastique à chaque pulsation. Le module obtenu est la moyenne de ces 5 valeurs. Le coefficient de poisson est estimé et la valeur communément utilisée est 0,35 à 20°C à 0,25 à 10°C [40].

2.9. Module complexe des enrobés bitumineux

Le dimensionnement des couches de la chaussée traitée aux liants hydrocarbonés demande de connaître la dépendance du module de rigidité complexe d'enrobé bitumineux vis-à-vis de la température et de la vitesse de chargement, et de son comportement à la fatigue.

Le mélange bitumineux se comporte donc comme un matériau *visco-élastique* dont la rigidité est due à son squelette minéral et dont le caractère visqueux tient au bitume. Ce comportement varie notamment en fonction des conditions de chargement : un temps de sollicitation très court (fréquence de passage élevée) provoque une réponse élastique du matériau et à l'opposé un chargement appliqué longtemps (fréquence faible) se rapproche d'un comportement purement visqueux. Le domaine de linéarité des matériaux bitumineux dépend des conditions de chargement car cela est rappelé dans le paragraphe précédent (le comportement des enrobés bitumineux).

Le module complexe (E^*) est l'expression de la rigidité d'un matériau viscoélastique sous chargement cyclique, tel qu'un enrobé. La déformation d'un matériau viscoélastique dépend du temps de chargement et est différée dans le temps, contrairement à un matériau élastique dont la déformation est instantanée. De plus, l'enrobé est un matériau thermosensible, ce qui signifie que le E^* varie également en fonction de la température. Le E^* permet de généraliser des méthodes de résolution de problèmes mécaniques développées pour les matériaux élastiques aux matériaux viscoélastiques (Di Benedetto et coll., 2005).

Le module complexe E^* est définie comme un nombre complexe composé d'une partie réelle (E_1) et d'une partie imaginaire (E_2), tel que présenté à l'Équation (2.5). Le E^* peut également se décomposer en deux paramètres sous sa forme vectorielle, soit son module ($|E^*|$) (norme du vecteur) à l'Équation (2.6) et son argument (ϕ) (angle du vecteur) à l'Équation (2.7) [36], tel que représenté dans le plan complexe de la Figure 2.25.

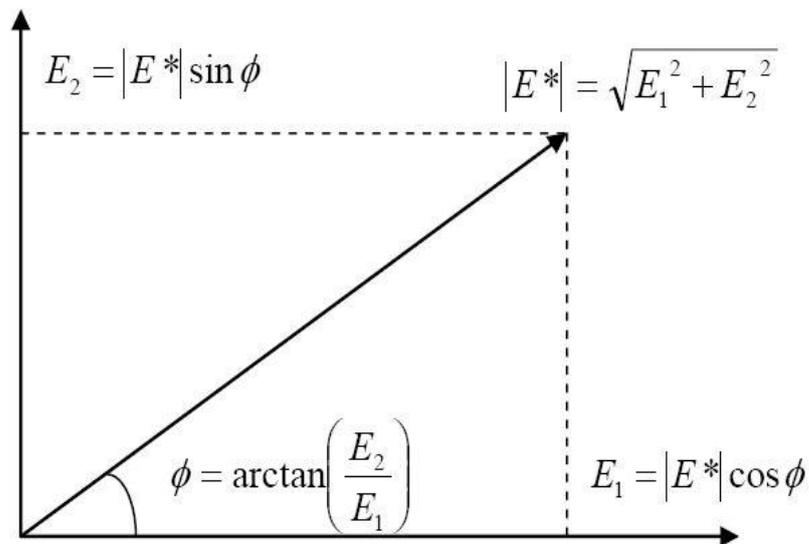


Figure 2.22 : Représentation du module complexe [41].

$$E^* = E_1 + iE_2 = |E^*| \cos \phi + i|E^*| \sin \phi \quad (2.5)$$

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (2.6)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{E_2}{E_1}\right) \quad (2.7)$$

- Ou E^* : Module complexe (MPa) ;
 $|E^*|$: Module du module complexe ;
 ϕ : Argument du module complexe (rad) ;
 E_1 : Partie réelle du module complexe (MPa) ;
 E_2 : Partie imaginaire du module complexe ;
 i : Nombre imaginaire ($\sqrt{-1}$).

Le E^* d'un enrobé est déterminé à l'aide d'essais cycliques à petites déformations ($< 100 \mu\text{m/m}$), soit dans le domaine linéaire du comportement mécanique, où la rigidité de l'enrobé est indépendante de l'état de contrainte ou de déformation (Di Benedetto et coll., 2005). La Figure 2.24 montre un cycle de sollicitation sinusoïdale en traction-compression alternée sur un enrobé [41].

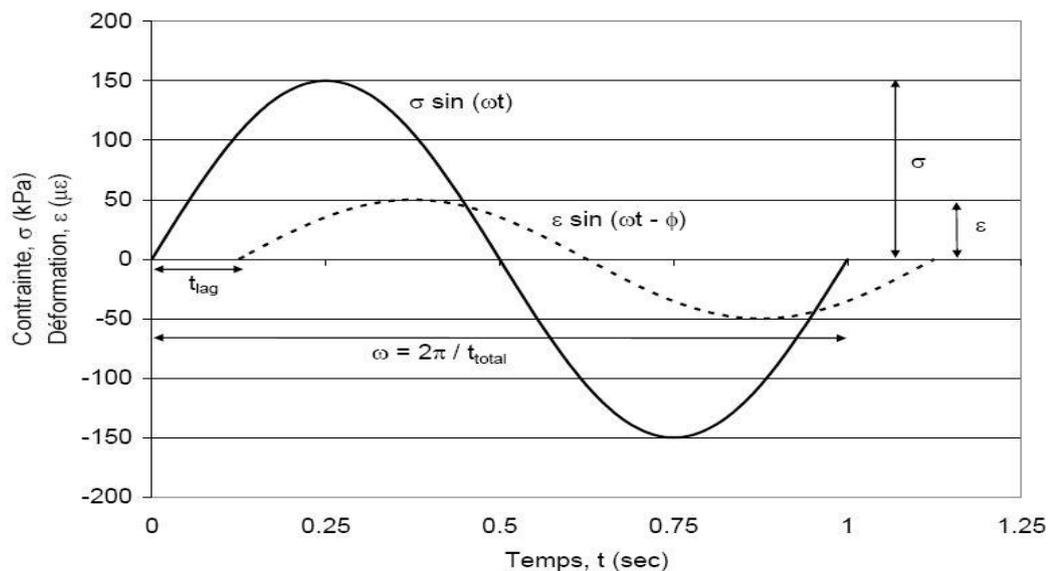


Figure 2.23 : Contrainte en tension-compression cyclique de forme sinusoïdale appliquée sur un enrobé et la déformation mesurée [41].

Sous sollicitation cyclique, le E^* est le rapport entre la contrainte cyclique et la déformation cyclique, tel que présenté à l'Équation (2.8). La déformation accuse un retard sur la contrainte, ce qui introduit un déphasage dans l'équation qui s'exprime alors sous forme de nombre complexe. Le $|E^*|$ de l'enrobé est nommé « module dynamique » en mécanique de chaussée, il est déterminé selon l'Équation (2.9). Le ϕ est nommé « angle de phase », il est déterminé selon l'Équation (2.10).

$$E^* = \frac{\sigma \sin(\omega t)}{\varepsilon \sin(\omega t - \varnothing)} = |E^*| \cdot \cos \varnothing + i|E^*| \sin \varnothing. \quad (2.8)$$

$$|E^*| = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.9)$$

$$\varnothing = \omega t_{lag} \quad (2.10)$$

Avec :

E^* : Module complexe ;

$|E^*|$: Module dynamique ;

\varnothing : Angle de phase (rad) ;

σ : Contrainte (MPa) ;

ε : Déformation (m/m) ;

ω : Période (rad/s) ;

t : Temps de chargement (s) ;

t_{lag} : Temps de déphasage entre σ et ε .

Le $|E^*|$ est le rapport entre la contrainte totale (maximale) et la déformation totale (maximale), bien qu'elles ne se produisent pas en même temps. Le $|E^*|$ est une approximation du module élastique d'un matériau viscoélastique, qui peut être utilisée pour le dimensionnement des chaussées lorsque les lois de l'élasticité sont employées. Le \varnothing représente le décalage dans le temps entre la contrainte et la déformation. Il varie de 0° pour un matériau purement élastique (réaction instantanée) à 90° pour un matériau purement visqueux. Le $|E^*|$ est nommé « module dynamique » en Amérique du Nord (AASHTO TP 62-07, ASTM D 3497-79) et « module de rigidité » en Europe (EN 12697-26). Le E^* est nécessaire pour décrire le comportement viscoélastique complet de l'enrobé.

Les résultats de E^* peuvent être représentés dans le plan complexe de Cole et Cole ou dans l'espace de Black (voir ANNEXE D). Ces résultats d'enrobés sont déterminés à différentes fréquences et températures qu'il permet de bien visualiser le module complexe des enrobés bitumineux dans son état naturel dans la structure routière sous un chargement roulant.

2.10. Conclusion

Les enrobés sont des matériaux routiers par excellence. Placés dans la structure de chaussée, ils permettent une diffusion suffisante des contraintes pour éviter une déformation permanente du sol support. Ces mélanges jouent un rôle structurant important dans les chaussées des autoroutes et routes à fort trafic à cause de leur module complexe (module de rigidité). Pour cela la détermination de ce module devient incontournable pour le dimensionnement des épaisseurs des couches de chaussées durables.

Le dimensionnement des chaussées bitumineuses est généralement effectué de manière empirique, en raison de la difficulté à modéliser son comportement. Par ailleurs, l'approche empirique impose des limitations lors de l'optimisation du dimensionnement et des interventions, ainsi que de l'établissement de spécifications pour de nouveaux matériaux (EME, BBME) et de nouvelles techniques, par exemple. Ces nouveaux matériaux sont venus pour pallier aux inconvénients des matériaux classiques (à savoir module de rigidité petit et de ce fait ne supportent pas de charges importantes donc apparition de déformations permanentes tels qu'orniérage et fatigue).

Il apparaît que la détermination de la résistance à l'endommagement est nécessaire pour évaluer les performances mécaniques de l'enrobé. Ainsi, en plus le comportement à petites déformations décrit par le module complexe, la détermination de la résistance à l'endommagement par orniérage à haute température, par retrait thermique à basse température sont également requis, afin d'évaluer la performance d'un enrobé dans un contexte de dimensionnement des chaussées algérienne, particulièrement dans les zones sahariennes où l'utilisation des BBME s'avère de plus en plus efficace.

CHAPITRE III

LES BÉTONS BITUMINEUX A MODULE ÉLEVÉ

3.1. Introduction

L'utilisation de matériaux bitumineux à module élevé pour la construction et l'entretien des chaussées apporte de nombreux avantages. En particulier, le dimensionnement qui en résulte aboutit à des épaisseurs de couches notablement plus faibles, ce qui permet de limiter l'utilisation de granulats de bonne qualité et de réduire les volumes de matériaux à transporter. La limitation de l'épaisseur des couches permet le maintien des gabarits sous ouvrage et, dans certains cas, évite la mise à niveau des équipements tels que bordures et glissières.

On attribue l'invention des BBME à la France. Les bétons bitumineux à module élevé ont fait leur apparition à grande échelle dans ce pays il y a plus de 20 ans. Ces matériaux font l'objet d'une norme dans ce pays et sont couramment appliqués sur des chaussées fortement sollicitées.

Des expériences sont menées pour utiliser des bétons bitumineux à module élevé BBME en couches de chaussée. Ceux-ci sont obtenus par le choix d'une formulation spécifique et par le recours à des bitumes durs élaborés spécialement pour cet usage.

Les BBME ont fait l'objet de plusieurs applications en Algérie (2007) pour la réalisation des tronçons sur l'autoroute Est-Ouest, nous présentons ci-après une étude détaillée sur ces nouveaux matériaux.

3.2. Définition des enrobés bitumineux à module élevé (BBME)

On définit les bétons bitumineux à module élevé, appelés communément BBME, sont des mélanges en proportions bien définies de gravillons, de sables et de filler avec un liant bitumineux et éventuellement des additifs. Ces mélanges présentent une rigidité sensiblement plus grande que celle des mélanges conventionnels (granulats, bitume) avec des doubles et des triples valeurs ($E > 9000$ MPa). En plus du module élevé, une plus grande résistance à la fatigue que les mélanges conventionnels caractérise ces matériaux.

3.3. Classes des enrobés à module élevé

On distingue suivant la classe granulaire deux types de bétons bitumineux à module élevé (BBME) [31]:

- béton bitumineux à module élevé 0/10 mm (BBME 0/10) ;
- béton bitumineux à module élevé 0/14 mm (BBME 0/14).

Chaque type peut se situer dans trois classes de performances : classe 1, 2 ou 3. Ces trois classes de performances sont en fonction des caractéristiques mécaniques suivantes [31]:

- la résistance à l'orniérage,
- La valeur du module de rigidité,
- compacité et % de vide.

Ces classes de performances sont définies au moyen d'une épreuve de formulation, dont le niveau est fonction de l'utilisation du produit.

3.4. Dispositions pour parvenir aux objectifs

Pour obtenir les valeurs de module, trois solutions possibles (à associer si nécessaire) [12]:

- utiliser un bitume de classe 20/30.
- ajouter un additif de durcissement avec un bitume pur 35/50 : polyoléfines, asphaltènes en poudre, etc.
- disposer de liants de module élastique élevé.

3.5. Constituants du mélange d'enrobés bitumineux à module élevé(BBME)

Les BBME sont constitués de la même façon que les mélanges classiques avec un rajout de l'additif pour améliorer les performances mécaniques. Ils se composent comme suit [21]:

3.5.1. Granulats

Le squelette granulaire reste sensiblement le même que celui de l'enrobé classique.

Les catégories des granulats sont spécifiées en fonction des objectifs recherchés et du contexte du chantier. Elle ne peut pas être inférieure aux caractéristiques minimales.

3.5.2. Bitume

Le liant utilisé est le plus souvent un bitume pur prêt à l'emploi, beaucoup plus rarement un bitume modifié ou un bitume spécial, tels que définis dans la norme NF EN 12591[42], élaborés par les sociétés pétrolières et les entreprises routières.

3.5.3. Additif

Les additifs sont destinés à améliorer les propriétés de l'enrobé. Ils peuvent être introduits soit dans le mélange au moment du malaxage soit directement dans la cuve de bitume. Ils permettent d'augmenter notamment:

- La liaison bitume-granulats.
- Le module.
- La résistance à l'orniérage.

Ils sont compatibles avec tous les grades de bitume. Parmi les additifs nous avons par exemple le PR Plaste (fig. 3.1, 3.2, 3.3 et 3.4), le gilsonite et l'asphalte dur.

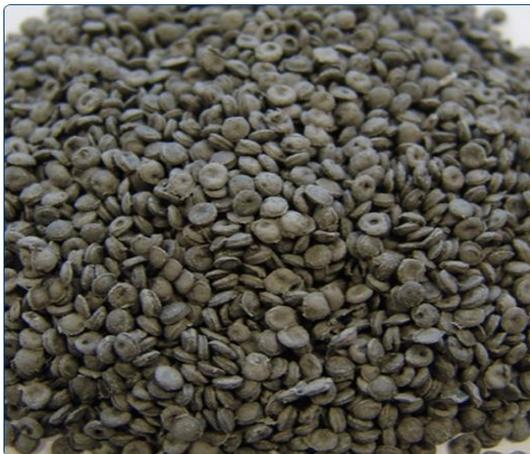


Figure 3.1 : PR PLAST Module [43].



Figure 3.2 : PR PLAST S [43].



Figure 3.3 : RP PLAST SAHARA [43]. Figure 3.4 : PR Phone: Additif anti – bruit [43].

Nous présentons ci-après quelques additifs utilisées dans le domaine routier [21]:

3.5.3.1. Dopes d'adhésivité

Pour améliorer l'affinité (liaison) réciproque entre liant et les granulats et en assurer la pérennité, des dopes d'adhésivité peuvent être utilisés. Il s'agit principalement de composés tensioactifs azotés dérivés des acides gras (amines, polyamines...) dosés à environ 0,3 à 0,6 % du bitume. La chaux ou les fines calcaire, dosées jusqu'à 1% du bitume, peuvent également être utilisées comme agents dopants.

3.5.3.2. Polyéthylène

Provenance : déchets de câble, broyage de bouteilles de lait, de films polyéthylène et de polyéthylène neuf.

Les déchets de polyéthylène sont souvent un mélange de polyéthylène haut et bas densité. Lors de la fusion voisine de 130°C le polyéthylène se combine en partie avec le bitume. Le dosage est habituellement compris entre 0,4% et 1%, par rapport aux granulats. La proportion de polyéthylène par rapport au bitume, peut ainsi varier entre 20% et 66%.

3.5.3.3. Polymères

Ils se présentent sous forme de granulés incorporés lors du malaxage du mélange.

3.5.3.4. Poudrette de caoutchouc et granulats de caoutchouc 2/6

Incorporés au moment du malaxage, le caoutchouc se combine partiellement avec le bitume. La température de fabrication est supérieure à celle du bitume pur. La masse volumique du caoutchouc est $1,15 \text{ g/cm}^3$.

3.5.3.5. Fibres neuves et de recyclage

Les fibres peuvent être mélangées au liant préalablement ou introduites dans le mélange à sec ou encore après incorporation du bitume.

Selon le type de fibres, le mode de préparation en laboratoire doit être adapté tout en restant fidèle au mode d'incorporation industrielle.

Différentes natures de fibres sont utilisées :

a. Verre

Ce sont des fibres inorganiques de longueur compris entre $100 \mu\text{m}$ et 10 mm , d'un diamètre de l'ordre de $5 \mu\text{m}$ à $6 \mu\text{m}$.

Le traitement de surface conditionne les propriétés induites. Le dosage habituel est de $0,8 \%$ par rapport aux granulats. Leur masse volumique est de $2,5 \text{ g/cm}^3$ et leur surface spécifique théorique est de $0,3 \text{ m}^2/\text{g}$.

b. Cellulose

Ce sont des fibres naturelles de longueur compris entre $900 \mu\text{m}$ et $1,1 \text{ mm}$, d'un diamètre de l'ordre de $15 \mu\text{m}$ à $50 \mu\text{m}$. elles peuvent être pré-enrobées sous forme de granulats. Leurs masse volumique est de $0,9 \text{ g/cm}^3$ et leur surface spécifique théorique est de $0,16 \text{ m}^2/\text{g}$.

c. Roche

Ce sont des fibres minérales de longueur compris entre $200 \mu\text{m}$ et 2 mm , d'un diamètre de l'ordre de $3 \mu\text{m}$ à $5 \mu\text{m}$. leur masse volumique est de $2,7 \text{ g/cm}^3$ et leur surface spécifique théorique est de $0,6 \text{ m}^2/\text{g}$.

d. Polyester

Ce sont des fibres synthétiques de longueur comprise entre $600 \mu\text{m}$ et $1,2 \text{ mm}$, voire 6 mm . Elles résistent à une température de 220°C . Le dosage est de l'ordre de $0,6 \%$ par rapport aux granulats.

e. Composite

Ce sont des fibres issues de produits de recyclage par exemple de pièces automobiles.

3.5.3.6. Bitume et asphaltes naturels

On distingue plusieurs familles qu'ils sont les suivants :

a. Bitume de Trinidad épuré

Le bitume épuré est extrait par raffinage, il contient une partie minérale, sa masse volumique est voisine de $1,40 \text{ g/cm}^3$, la pénétration à 25°C est comprise entre 1 1/10 mm et 4 1/10 mm, et la température bille- anneau supérieure à 90°C . (Le bitume « soluble » a une pénétration standard de 3 à 12 1/10 mm et une température bille- anneau compris entre 68 et 78°C).

b. Poudre de Trinidad 50/50

C'est un mélange composé de 50% de bitume Trinidad épuré et de 50% de filler calcaire.

c. Gilsonite

La Gilsonite est un hydrocarbure naturel, qui se présente sous forme de 0/2. La masse volumique est de $1,05 \text{ g/cm}^3$, la pénétration standard est voisine de 0 (1/10 mm) et la température bille-anneau supérieure à 150°C . Le dosage va de quelques pourcent à 10% des granulats secs.

3.5.3.7. Colorants

Les colorants utilisés en techniques routière sont des pigments minéraux qui ont fait preuve de stabilité à la température d'enrobage ainsi qu'à la lumière. Les plus courants sont les oxydes métalliques suivants :

- Les oxydes de fer de couleur rouge, jaune ou grise.
- Le chromate de plomb jaune claire.
- L'oxyde de chrome de couleur verte.
- L'oxyde de cobalt de couleur bleue.
- L'oxyde de titane de couleur blanche.

3.6. Caractéristiques des enrobés bitumineux à module élevé(BBME)

Dans cette partie, nous allons dans un premier temps présenter l'épreuve de formulation comprenant les différents essais et exigences à atteindre en fonction du type d'enrobé. Ensuite, nous résumerons les principales caractéristiques concernant les BBME.

3.6.1. L'épreuve de formulation

Le niveau d'étude de formulation dépend en général du type d'enrobé, du niveau de sollicitation de la chaussée, de la taille du chantier et des enjeux. La plupart des enrobés nécessitent au moins une étude de niveau 2 excepté les EME et BBME (enrobés à module élevée et le béton à module élevé) qui sont orientés vers une étude de niveau 4 [21].

Le niveau 0 (sans essais) correspond aux enrobés destinés aux zones non circulées. Les autres différents niveaux de l'épreuve varient du plus simple (niveau 1) au plus complet (niveau 4), les niveaux supérieurs englobant les exigences des niveaux inférieurs. La description du contenu de chaque niveau et les raisons de son choix font l'objet d'une description dans ce que suite.

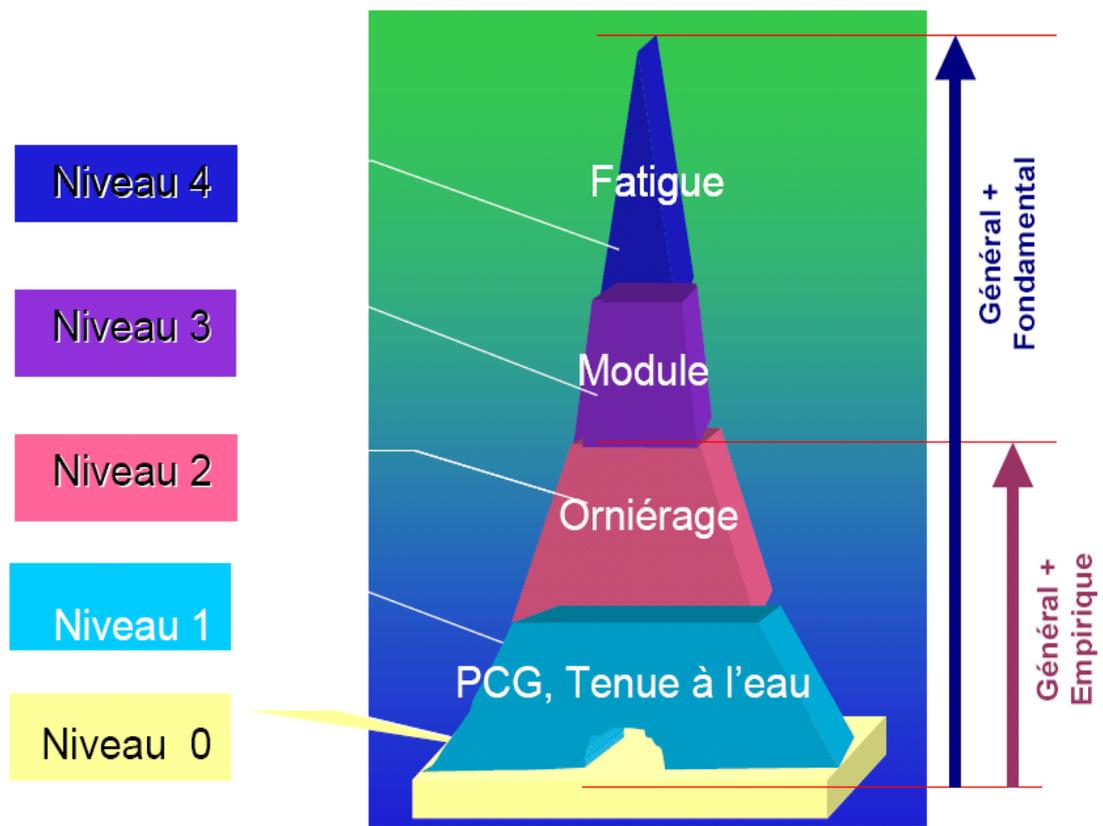


Figure 3.5 : Résumé des niveaux de l'épreuve de formulation [21].

Niveau 0

Le niveau 0 (sans essais) correspond aux enrobés destinés aux zones non circulées, et correspond à une description de la formule avec la granularité et la teneur en bitume.

Niveau 1

Le mélange doit satisfaire une fenêtre de pourcentages de vides à l'essai de Presse à Cisaillement Giratoire ainsi que le seuil de tenue à l'eau.

À l'exception du niveau 0, ce niveau est commun à toutes les épreuves. Dans le cas d'applications à faible niveau de sollicitation, le niveau 1 peut être suffisant sans essai complémentaire.

Niveau 2

Ce niveau comporte les essais du niveau 1 (Presse à Cisaillement Giratoire et tenue à l'eau), auxquels on ajoute un essai d'orniérage.

Niveau 3

Ce niveau comporte les essais Presse à Cisaillement Giratoire et de tenue à l'eau du niveau 1, l'essai d'orniérage du niveau 2 et la caractérisation du module du mélange.

L'essai de module est spécifié dans le cas de chantiers importants et lorsque la couche concernée intervient dans le fonctionnement structurel de la chaussée.

Les valeurs de module à 15°C, 10 Hz ou 0,02s sont directement utilisées dans les modèles de calcul de dimensionnement [40].

Par définition dans les normes produites, les épreuves de formulation des GB (grave bitume) classe 4, BBME (béton bitumineux à module élevé) et des EME (enrobé à module élevé) doivent obligatoirement comprendre un essai de module. Pour les autres produits qui peuvent appartenir à l'approche empirique ou fondamentale, la détermination du module doit être mentionnée.

Niveau 4

Ce niveau comporte les essais Presse à Cisaillement Giratoire et tenue à l'eau du niveau 1, l'essai d'orniérage du niveau 2, la caractérisation du module du mélange du niveau 3. Il est complété par la détermination de la résistance en fatigue.

L'essai de fatigue est à spécifier dans le cas de chantiers très importants et dès que la couche concernée travaille en fatigue.

3.6.2. Performances de béton bitumineux à module élevé (BBME)

Les enrobés à module élevé (BBME) sont employés en couche de liaison ou de roulement. Sous trafic rapide et lourd, les épaisseurs moyennes (en cm) de mise en œuvre ainsi que les épaisseurs minimales en tout point sont mentionnées dans le tableau 3.1 [31]. Cette technique performante nécessite un très bon respect des épaisseurs, pour un bon fonctionnement structurel.

Tableau 3.1. Epaisseurs d'utilisation par couche pour BBME.

Type de BBME	Epaisseur moyenne d'utilisation (cm)	Epaisseur minimale en tout point ⁽¹⁾ (cm)
BBME 0/10	5 à 7	4
BBME 0/14	6 à 9	5
(1)Le respect de ces épaisseurs minimales peut nécessiter un reprofilage par fraisage ou apport de matériaux, ou bien une épaisseur moyenne adaptée située dans les fourchettes ci-dessus.		

Ces épaisseurs sont plus faibles que celles des mélanges classiques : le fait d'être plus riche en liant rend l'enrobé plus maniable et plus structurant à épaisseur égale. Il est également plus imperméable. Par rapport à celui des mélanges classiques, le niveau élevé du module de rigidité réduit les déformations dans le matériau au niveau de la couche inférieure, ce qui est favorable à une réduction de l'épaisseur sous les mêmes sollicitations de trafic.

Le pourcentage du liant est calculé à partir du module de richesse K, de la surface spécifique de l'agrégat et d'un coefficient correcteur du poids spécifique de l'agrégat. Selon la classe du mélange [31], la valeur minimale du module de richesse est déterminée dans le tableau suivant:

Tableau 3.2. Valeurs du module de richesse des BBME.

Type de BBME	BBME 0/10	BBME 0/14
K	3,5	3,3

Pour la conception de la formule de travail dans Laboratoire, le pourcentage des vides et les caractéristiques mécaniques, selon la classe du mélange, sont reprises dans le Tableau 3.3 [31]:

Tableau 3.3. Performances mécaniques des BBME.

Essais sur BBME 0/10 ou 0/14	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Essais Duriez à 18° C (NF EN 12697-12) <i>Rapport: $\frac{r \text{ (en Mpa) apres immersion}}{R \text{ (en Mpa) à sec}}$</i>	$\geq 0,80$	$\geq 0,80$	$\geq 0,80$
Essai Ornièrage (NF EN 12697-22) Profondeur d'ornièr en pourcentage de l'épaisseur de la dalle pour une dalle de 10 cm d'épaisseur à 30.000 cycles et à 60° C, à un pourcentage de vides compris entre 5% et 8%.	$\leq 10\%$	$\leq 7,5$	$\leq 5\%$
Essai module complexe (NF EN 12697-26) Module, en mégapascals, à 15°C, 10 Hz à un pourcentage de vides compris entre 5% et 8%.	≥ 9000	≥ 12000	≥ 12000
Essai de traction directe (EF EN 12697-26) Détermination du module et de la perte de linéarité à un pourcentage de vides compris entre 5% et 8%. Module, en mégapascals, à 15°C, 0,02 s.	≥ 9000	≥ 12000	≥ 12000
Essai de Fatigue (NF EN 12697-26 annexe A) Déformation relative à 10 ⁶ cycles, 10° C et 25 Hz et pour un pourcentage de vides compris entre 5% et 8%, ϵ_6 .	110 μdef	100 μdef	100 μdef

Les BBME de classe 3 sont plus rigides, mais ont de meilleures performances en fatigue et l'ornièrage. Ils pourront être employés chaque fois que l'on recherchera de faibles épaisseurs de chaussée sur des supports déformables, par exemple pour la réfection ou le renforcement de chaussée en traversée d'agglomération, ou lorsque la résistance à l'ornièrage est souhaitée.

Lorsque les constituants sont totalement nouveaux, il est nécessaire d'effectuer une étude à caractère général qui fait appel à l'essai de compactage à la presse à cisaillement giratoire (PCG) [31]. Les limites des % de vide à la PCG pour les BBME sont représentées sur le tableau 3.4 :

Tableau 3.4. Pourcentage de vides des BBME.

Essai	BBME 0/10		BBME 0/14	
	min	max	min	max
Essai de compactage à la presse à cisaillement giratoire (NF EN 12697-31)				
- à 10 girations	11	-	11	-
- à 60 girations	5	10	-	-
- à 80 girations	-	-	4	9

Une bonne tenue en fatigue (cas BBME 0/14) est assurée par une teneur en vide faible (de l'ordre 4% à 9%), et par un film épais de liant autour des granulats, caractérisé par le module de richesse, et assurant une bonne déformabilité favorable à l'auto-réparation.

Les BBME offrent une bonne résistance à l'orniérage et constituent dans une solution souvent utilisée en couche de surface de 7 à 9 cm d'épaisseur, en répondant à la fois au problème d'apport structural et à l'aspect anti-ornières.

3.7. Domain d'emploi des enrobés bitumineux à module élevé (BBME)

Le créneau privilégié est celui des travaux neufs et de renforcement fortement sollicités, avec parfois des contraintes de seuil, comme en contexte urbanisé. On peut citer:

- les voies à trafic lourd, canalisé et lent, telles que couloirs de bus,
- les voies spécifiques à trafic très lourd : voie spéciale poids lourds, quai de chargement, piste d'évolution des engins de manœuvre des portes containers,...
- les renforcements de chaussées en décaissement, voiries urbaines ou périurbaines,
- les couches de base de chaussée neuve à fondation en GRH, ou les couches d'assise de chaussée bitumineuse épaisse,
- la réfection et le renforcement de voies lentes d'autoroutes après fraisage limité à 8 ou 12 cm d'épaisseur. Une couche de roulement générale, en béton bitumineux très mince par exemple, est ensuite mise en œuvre sur toute la largeur des voies,
- les pistes et zones de circulation des aéroports, lorsque le trafic est important en nombre de mouvement et surtout en charge supportée par chaque roue des trains d'atterrissage.

Ces BBME sont fréquemment utilisés sur les aéroports français. Le service technique de l'aviation civile (STAC) a rédigé une note d'information ainsi qu'un guide

pour préciser les coefficients d'équivalence pour le dimensionnement et le domaine d'emploi spécifique des BBME (disponible sur le site internet STAC).

3.8. Précautions d'usage

Les principales précautions, concernant la mise en œuvre, doivent être respectées pour permettre un bon comportement de la chaussée :

- disposer d'un support de capacité portance suffisante pour assurer une restitution satisfaisante durant le compactage, pour densifier correctement le BBME,
- les performances mécaniques du BBME doivent bien entendu, satisfaire les spécifications de la norme, sur notamment la rigidité du matériau,
- respecter impérativement les épaisseurs moyennes du dimensionnement et surtout limiter les variations d'épaisseur (bon uni du support),
- assurer une protection superficielle par une couche de surface adaptée au trafic (suivant le principe de dissociation des couches) et au climat.

3.9. Conclusion

Les bétons bitumineux à module élevé (BBME) constituent une technique moderne, particulièrement performante, pour faire face aux problèmes d'accroissement de l'agressivité du trafic, tout en contribuant au concept du développement durable. La réduction des épaisseurs induit une économie des ressources non renouvelables, une réduction des travaux de décaissement en milieu urbain, ou de mise à niveau des accotements.

La diversité de ses applications routières, industrielles (quais, aires de main œuvre) voire dans le domaine des pistes et voies de circulation des aéronefs est un autre atout majeur de son développement.

Son utilisation dans l'autoroute Est-Ouest est sans conteste un indicateur de l'extension de son emploi surtout dans des conditions climatiques extrêmes.

CHAPITRE IV

MATÉRIAUX ET TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

4.1. Introduction

Différents matériels et techniques expérimentales ont été utilisés pour la caractérisation des matériaux de la présente étude. Dans ce chapitre sont exposés l'origine des matériaux (granulats, bitume, poudrette de caoutchouc), les essais de caractérisations ainsi que des essais mécaniques de formulation, sur les granulats il a été procédé aux essais usuels tel que la granulométrie, la densité, la propreté, l'équivalent de sable. Sur le bitume les essais suivants ont été réalisés, la pénétrabilité, point de ramollissement, densité, la ductilité...etc. sur les mélanges bitumineux il a été procédé comme suit, recherche du mélange optimal, la formulation, l'essai Marshal.

4.2. Caractérisation des matériaux utilisés

Le BBGS 0/14 est un béton bitumineux conventionnel couramment utilisé en couche de roulement, c'est un mélange de granulats de fractions granulaires 0/3, 3/8, et 8/15 et de bitume.

4.2.1. Provenance des matériaux

Les granulats utilisés dans le cadre de la présente étude ont été acheminés à partir de la carrière de Keddara, et le bitume est un produit distribué par NAFTAL. Voir tableau 4.1.

Tableau 4.1: Provenance des matériaux utilisés.

Matériaux	Carrière	Entreprise d'exploitation
Sable 0/3	Keddara wilaya de Boumerdes	SARL AGREGAL
Gravier 3/8	Keddara wilaya de Boumerdes	SARL AGREGAL
Gravier 8/15	Keddara wilaya de Boumerdes	SARL AGREGAL
Bitume 40/50	-	NAFTAL

4.2.2. Caractéristiques des granulats

Les granulats seront caractérisés du point de vu chimique et mécanique

4.2.2.1. Analyse chimique

Les résultats de l'analyse chimique sont récapitulés dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2 : Caractéristiques chimiques des granulats.

Echantillon	Sable concassé 0/3	Gravier (3/8 et 8/15)
Provenance	Keddara	Keddara
Insolubles (SiO ₂ +Silicates)	4.37%	4.37%
Oxyde de fer et Al Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃	1.32%	1.32%
Gypse (CaSO ₄ +2H ₂ O)	Traces	Traces
Chlorures (NaCl)	0.17%	0.17%
Carbonates (CaCO ₃)	94.01%	94.01%
Anhydride carbonique Co ₂	41.36%	41.36%
Perte au fer PF	41.63%	41.63%
Eau de constitution	0.27%	0.27%
Bilan chimique pondéral	100.14%	100.14%

L'analyse chimique des granulats montre que : Le matériau de Keddara à une forte teneur en carbonates (CaCO₃), donc il s'agit d'un matériau calcaire.

4.2.2.2. Analyse Granulométrique

Nous présentons (Figure 4.1) les résultats des analyses granulométriques effectuées au LCTP pour la formulation de BBSG 0/14. L'essai permet de déterminer les dimensions des grains de chaque fraction du mélange bitumineux.

Les différents essais effectués (LA, MDE, ES 10%, etc.) sur les granulats montrent que les matériaux choisis présentent, de bonnes caractéristiques en qualités intrinsèques, mais notre matériau est n'est pas propre (Propreté superficielle >2).

4.2.3. Bitume

Cette étude consiste à caractériser de façon précise le bitume de formulation du BBSG 0/14. Le tableau 5.4 résume les résultats des différents essais effectués au LCTP d'Alger.

Tableau 4.4: Caractéristiques du bitume du mélange de BBSG 0/14.

Type d'essai	Résultat	Moyenne	Spécifications
Pénétrabilité à 25°C (1/10 mm)	43-45	44	35 – 50
Température bille et anneau « TBA » (°C)	52-52	52	50 – 58
Densité relative (g/cm ³)	1,02	1,02	1,0 à 1,05
Ductilité (cm)	>100	-	>100

Le bitume analysé répond bien aux caractéristiques de la classe 40/50 selon la norme NF T65-001.

4.2.4. PR PLAST SAHARA

Dans cette étude on a choisi à traité le problème des zones désertique (Sahara de Sud Algérien) aussi nous avons utilisé l'additif PR PLAST SAHARA.

Le PR PLAST SAHARA C'est un additif de Granulométrie de 0/2 mm. Fabriqué à partir de plastomère ayant subit un pré-gavage à huile, c'est un produit de fluidité constante qui est traité avec un anti-retrait et qui permet d'améliorer la résistance à l'orniérage et à la fissuration des enrobés. Ce polymère de couleur noir, introduit directement au malaxage des enrobés.

Les principaux avantages de PR PLAST SAHARA sont les suivants :

- Amélioration considérablement la résistance à l'orniérage de l'enrobé,
- Amélioration considérablement le module d'élasticité de l'enrobé,
- Amélioration de la fissuration de l'enrobés.

4.3. Formulation d'enrobe bitumineux BBSG 0/14

La formulation du BBSG 0/14 de notre étude a été faite selon la procédure établie par le Contrôle Technique des Travaux Public (CTTP), décrite au chapitre II.

4.3.1. Courbe granulométrique du mélange

La courbe granulométrique qui s'insère dans le fuseau de spécification est obtenue pour les proportions suivantes (tableau 4.5) :

Tableau 4.5 : Pourcentages pondéraux des différentes classes.

Fraction	Pourcentage (%)
Sable 0/3	45
Gravier 3/8	15
Gravier 8/15	40

La courbe granulométrique du mélange est donnée dans la Figure 4.2.

Courbe Granulométrique du mélange BBSG 0/14

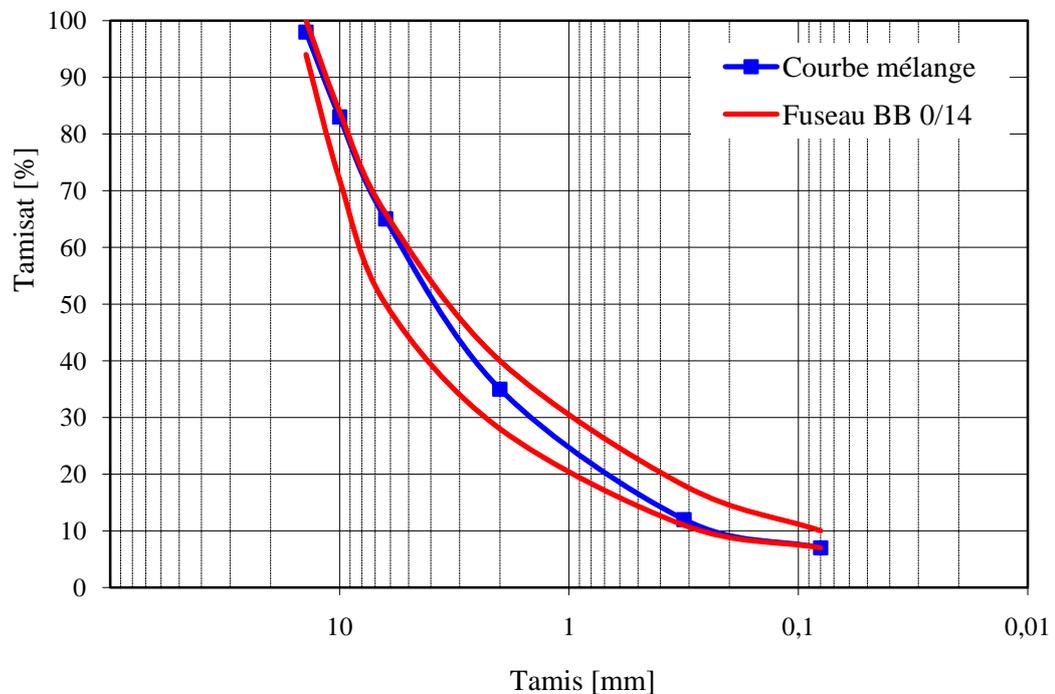


Figure 4.2: Courbe granulométriques du mélange BBSG 0/14.

La courbe granulométrique du mélange issue de cette formule s'inscrit parfaitement dans le fuseau spécifique au béton bitumineux 0/14 défini dans les recommandations algériennes pour l'utilisation des bitumes et enrobés bitumineux de Février 2004.

4.3.2. Détermination de la quantité d'essais à réaliser- Plan d'expérience

Nous allons donner la formulation du BBME modifié 0/14 ainsi que le plan d'expérience qui sera utilisé afin de déterminer son module de rigidité de ce dernier.

4.3.2.1. Objectif et problématique

Le module de rigidité d'un enrobé est le paramètre fondamentale dans le dimensionnement de la chaussée. Ainsi, pour chaque type d'enrobé, il est associé une valeur du module prédéterminée par les normes et/ou recommandations.

Or, pour un type – ou classe- d'enrobé, il existe diverses formulations en fonction des valeurs choisies lors de la démarche de formulation, étant bien entendu, que les valeurs retenues s'inscrivent dans des plages de recommandations prescrites par la réglementation pour le type d'enrobé envisagé. Le but principal de cette étude est de pouvoir calculer à tout moment la valeur réelle du module d'un enrobé, en tenant compte de ses « paramètres vrais de fabrication ».

Notre étude porte sur la détermination du module de rigidité d'un BBME modifié 0/14 par essai de traction indirecte; encore appelé essai NAT. C'est à partir des résultats de celui-ci que nous tenterons d'établir un modèle mathématique reliant le module de rigidité du BBME modifié 0/14 à sa teneur en liant, sa température de fabrication et le pourcentage d'additif. La plage d'utilisation du modèle sera établie à partir des valeurs préconisées pour « le type d'enrobé » envisagé.

4.3.2.2. Choix des paramètres

Les paramètres ayant une influence sur le module de rigidité d'un BBME sont liés à la réalisation de ce dernier. Ainsi dans la conception d'un BBME intervient la température, la teneur en liant, granulats, la teneur en additifs et le compactage. Parmi ces paramètres notre choix s'est porté sur la température, la teneur en liant, et la teneur en additifs comme paramètres principaux influençant le module. Pour le paramètre granulats n'avons aucune influence dessus, de plus nous n'avons pas à disposition les outils permettant d'estimer leur propriétés (angularité, arrondi, nature minéralogique).

Le paramètre compactage n'a pas été retenu car il est en dehors de la formulation. Aussi comme nous nous sommes intéressés aux paramètres ayant une influence directe et contrôlable nous avons opté pour ces paramètres. De plus nous faisons l'hypothèse que ces paramètres influent indépendamment les uns des autres sur le module de rigidité. C'est-à-dire qu'il n'y a pas d'interaction entre eux. Nous pouvons donc résumer ceci dans le tableau 4.6.

Tableau 4.6: Ensemble des facteurs retenu dans la formulation de BBME modifié.

Facteur	Type	Nombre de niveau
Teneur en liant	quantitatif	4
% d'additif	quantitatif	4
Température de fabrication (°C)	quantitatif	2

La détermination des valeurs de ces facteurs a été effectuée comme suite :

- Teneur en liant

La teneur en liant pour un BBME 0/14 modifié est déterminée en pourcentage du poids des agrégats, par la méthode basée sur le module de richesse et la surface spécifique [ANNEXE D]. Elle est donnée par la formule (4.19) :

$$TL = \alpha \cdot k \cdot \sqrt[5]{\Sigma} \quad (4.19)$$

Avec :

$$\alpha = \frac{2,65}{\Sigma p_i \delta_i} \quad (4.20)$$

$$\text{et} \quad 100 \Sigma = 0,25 G + 2,3 S + 12 s + 150 f \quad (4.21)$$

La surface spécifique du mélange BBME Modifié est calculée comme suit :

Tableau 4.7 : Surface spécifique du mélange BBME modifié.

G+S+s+f	Surface spécifique = 0,25G + 2,3S + 12s + 135f	
100	S (m ² /kg) =	11,36

Pour les granulats utilisés dans notre étude : $M_{VRg} = 2.62 \text{ t/m}^3 \Rightarrow \alpha=1.01$

Σ : surface spécifique des granulats = 11,36 (m²/kg),

K : le module de richesse qui caractérise l'épaisseur moyenne du film de bitume autour des granulats (k pour un béton bitumineux 0/14 est en minimum 3,30).

Les différents modules de richesse K ainsi que les teneurs en liant (TL) résiduel du BBME modifié, calculés selon la norme sont résumés dans le tableau 4.8:

Tableau 4.8 : Valeurs de module de richesse et teneurs en liant du plan d'expérience.

Facteur	Type	Nombre de niveau
Teneur en liant	quantitatif	4
% d'additif	quantitatif	4
Température de fabrication (°C)	quantitatif	2

- Additif PR PLAST SAHARA

L'additif PR PLAST a été utilisé dans notre étude. Ce choix a été motivé par le fait qu'il améliore les caractéristiques du matériau vis-à-vis de l'orniérage ainsi que vis-à-vis de la fissuration thermique, or cette dernière nous intéresse pour les applications dans le sud Algérien.

Les taux d'ajout suivants : 0,1% ; 0,3 ; 0,6 et 0,9 ont été considérés. A noter que ces taux englobent l'intervalle préconisé dans la fiche technique et qui est : 0,2 à 0,6 %.

- Température de fabrication

La température de fabrication doit être au minimum de 160° à 170°C selon la fiche technique de PR PLAST SAHARA. On a choisi deux températures pour la fabrication de notre BBME modifié la première T=170°C, et la deuxième T=200°C. Ceci afin de balayer toute la gamme de température de fabrication et aussi afin d'avoir une modification significative dans la formulation, car une variation de 10°C ne changera pas fondamentalement le comportement de notre enrobé (les déformations restant toujours dans le domaine linéaire).

4.3.2.3. Construction du plan d'expérience

Nous avons opté pour le plan d'expérience suivant en nous basant sur la Table de Taguchi. Celle correspondant à notre cas est la Table L₁₆ (2¹⁵).

Tableau 4.9 : Table de Taguchi $L_{16} (2^{15})$.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1	2	2
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1
	a	b	a b	c	a c	b c	a b	d	a d	b d	a b d	c d	a c d	b c d	a b c d

Groupe 1 2 3 4

Dans cette étude on n'a pas pris en compte les interactions entre les facteurs, ce qui permet d'écrire l'équation d'estimation du module de rigidité comme suit:

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 \quad (4.22)$$

Avec

Y : module de rigidité de l'enrobé.

x_1 : Température de fabrication.

x_2 : Teneur en liant.

x_3 : Taux d'ajout d'additif.

a_0 , a_1 , a_2 et a_3 : Coefficients à déterminer.

L'ensemble des combinaisons possibles conduit à prévoir $2.4^2 = 32$ essais.

Le plan retenu est un plan de 16 essais, déduite des tables de Taguchi. Nous présentons ci-dessous le plan sous forme de tableau qui donne les différents essais à réaliser avec les valeurs des différents facteurs.

Tableau 4.10: Les valeurs du plan d'expérience de BBME modifié.

N° essai	Température (°C)	% additif	Teneur en liant (%)
1	170	0,1	5,13
2	170	0,1	5,77
3	170	0,3	5,55
4	170	0,3	6,03
5	170	0,6	5,55
6	170	0,6	6,03
7	170	0,9	5,13
8	170	0,9	5,77
9	200	0,1	5,55
10	200	0,1	6,03
11	200	0,3	5,13
12	200	0,3	5,77
13	200	0,6	5,13
14	200	0,6	5,77
15	200	0,9	5,55
16	200	0,9	6,03

L'analyse des résultats constitue une étape importante : on pourra être amené à accepter ou rejeter le modèle.

4.4. Préparation du mélange bitumineux

La formulation d'enrobé bitumineux BBSG 0/14 passe par les différentes étapes suivantes :

4.4.1. Préparation des granulats :

Les granulats sont séchés dans une étuve ventilée à une température d'enrobage désirée (170°C en minimum). Jusqu'à masse constante, la masse des granulats est considérée constante lorsque la variation de la masse entre deux pesées d'un échantillon représentatif, à deux heures d'intervalles, est inférieure à 0,1% de la masse des granulats.

4.4.2. Malaxage du mélange bitumineux

Le mélange de granulats chauds et bitume sont introduit dans une cuve de malaxeur, en essayant de limiter au maximum les déperditions de température. Le malaxeur est actionné pendant 2 et 5min afin de bien homogénéiser le mélange.

Ensuite, on pèse une quantité de 1200 g de mélange bitumineux dans un moule de diamètre intérieure de $101\text{mm} \pm 0,1 \text{ mm}$. Après avoir placé un disque de papier en fond de moule, on introduit le mélange dans le moule et on compacte chaque couche par une spatule pour minimiser au maximum le % de vide. Un disque de papier est mis en place à la surface du mélange bitumineux pour y noter les références de l'échantillon.

Les moules sont remplis successivement, le 1^{er} moule est immédiatement compactée, les autres moules étant placés dans l'étuve à la température de référence (température de fabrication).

4.2.3. Compactage des moules

Le compactage est l'opération ultime de mise en œuvre des matériaux bitumineux. La qualité de sa réalisation sera déterminante, d'une part, pour la durabilité de la chaussée, de par la compacité qui pourra être obtenue et, d'autre part, pour les caractéristiques de surface de la chaussée.

Cette opération s'effectue par une dame de compactage comportant un marteau pesant 4536g. Ce marteau glisse librement sur une tige de guidage et tombe en chute libre de $457\text{mm} \pm 5\text{mm}$ sur la base de la dame. Le mélange bitumineux est compacté en appliquant 75 coups de marteau de la dame. Le moule est retourné après avoir retiré la hausse afin de présenter la face inférieure de l'éprouvette au compactage. L'éprouvette N° 2 est compactée directement après l'éprouvette N° 1 et ainsi de suite. Les éprouvettes sont conservées 5 heures au moins à une température ambiante après leur compactage.

Le démoulage est effectué en faisant passer les éprouvettes des moules dans l'appareillage du Duriez à l'aide d'un piston extracteur.

4.5. Essais effectuée sur l'enrobé bitumineux BBSG 0/14

Après le démoulage des éprouvettes confectionnées dans notre étude, nous avons réalisé les essais suivants :

4. 5.1. Essai Marshall

Cet essai a été conduit sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 101 mm, compactées à 75 coups par face. L'écrasement s'est effectué à la vitesse de 0,850 mm/s après avoir conservé les éprouvettes dans un bain marie porté à la température de 60°C pendant au moins 30 minutes. Cinq (05) éprouvettes ont été testées pour chaque essai défini. A l'issue de l'essai, nous avons mesuré la force maximal de stabilité ainsi que le fluage correspondant (tableau 4.11).

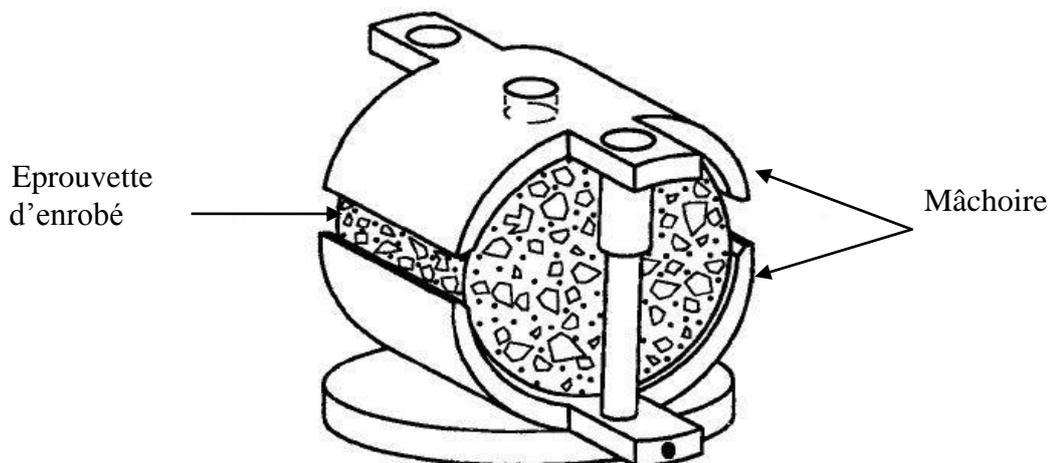


Figure 4.3 : Principe de l'essai Marshall.

Tableau 4.11 : Résultats d'essais Marshall sur le BBSG 0/14.

Teneur en liant (%)	5,13	5,55	5,77	6,03	Spécifications CTPP
Module de richesse K	3,30	3,45	3,60	3,75	-
Stabilité Marshall (Kg/f)	950	850	800	700	≥ 1050
Fluage Marshall (mm)	3,9	4,2	4,3	4,8	≤ 4

D'après les résultats de l'essai Marshall on remarque :

Une diminution de la stabilité Marshall et une augmentation de la résistance en fluage en fonction de l'augmentation de la teneur en liant. Ces stabilités et résistances aux fluages MARSHALL n'est pas conforme aux spécifications [CTTP 2004] préconisées, donc nous avons un problème de stabilité de notre enrobé BBSG 0/14.

4.5.2. Compacité et % vide

La détermination de volume d'air est effectuée après avoir pesé les éprouvettes dans la paraffine. Nous avons mesuré le % du vide (compacité) pour chaque essai. Les compacités obtenues pour le BBSG 0/14 sont représentées sur le tableau 4.12.

Tableau 4.12 : Résultats de compacité de BBSG 0/14.

Teneur en liant (%)	5,13	5,55	5,77	6,03	Spécifications CTPP
Module de richesse K	3,30	3,45	3,60	3,75	-
Compacité (%)	97,95	98,25	98,58	98,97	≥ 92

Le tableau 4.12 montre que les compacités des éprouvettes sont acceptables vue les spécifications du [CTTP 2004].

Conclusion

Les matériaux choisis pour la confection du BBSG 0/14 ne répondent pas aux spécifications exigées par les normes [CTTP 2004], en effet les performances obtenues par l'essai Marshall sont en deçà des valeurs attendues pour une utilisation du produit en couche de roulement. Ceci pourrait être dû à une mauvaise propreté superficielle (7% alors qu'elle devrait être inférieure à 2% tableau 4.3).

Pour la suite de notre travail, afin de tester si l'additif peut rectifier cette instabilité Marshall, nous avons décidé de garder dans un premier temps les teneurs en liants obtenues en appliquant tout en veillant à atteindre les performances préconisées dans la formulation du BBSG 0/14.

4.6. Formulation du BBME modifié 0/14

Les résultats d'essais de formulation du BBME modifié 0/14 (BBSG 0/14 avec additif) selon le plan d'expérience, sont regroupées dans le tableau 4.13.

Tableau 4.13 : Résultats des essais sur le BBME modifié 0/14 selon le plan d'expérience.

N° d'essai	Teneur en liant (%)	% d'additif	Température (°C)	Stabilité Marshall (Kg/f)	Fluage (mm)	Compacité (%)
1	5,13	0,1	170	950	3,7	96,58
2	5,77	0,1	170	900	3,9	96,83
3	5,55	0,3	170	850	4,2	97,13
4	6,03	0,3	170	800	4,3	97,40
5	5,55	0,6	170	875	4,0	97,49
6	6,03	0,6	170	750	4,6	97,70
7	5,13	0,9	170	975	3,6	97,67
8	5,77	0,9	170	950	3,8	97,87
9	5,55	0,1	200	950	3,9	97,86
10	6,03	0,1	200	700	4,8	98,01
11	5,13	0,3	200	900	4,0	98,05
12	5,77	0,3	200	850	4,3	98,26
13	5,13	0,6	200	875	4,0	98,39
14	5,77	0,6	200	800	4,4	98,51
15	5,55	0,9	200	850	4,1	98,68
16	6,03	0,9	200	675	4,9	98,82

La présence d'additifs dans le mélange n'a pas amélioré les performances de notre produit, nous sommes tenus donc de trouver expérimentalement, les teneurs en liants adéquates assurant la stabilité de l'enrobé bitumineux.

4.7. Détermination des nouvelles teneurs en liant

Afin de déterminer les teneurs en liant assurant la stabilité Marshall nous avons procédé par tâtonnement, en diminuant la valeur de la norme de 0,15 à chaque fois. On formule l'enrobé sans l'ajout de PR PLAST SAHARA afin d'éliminer l'effet de ce dernier, et avoir une idée sur le comportement de l'enrobé sans ajout. Les résultats trouvés sont résumé dans le tableau 5.9 à noter que pour cela nous avons confectionné 35 éprouvettes supplémentaires.

Tableau 4.14 : Caractéristiques mécaniques des mélanges d'enrobé bitumineux BBSG 0/14.

La Teneur en liant (%)	Module de richesse K	Stabilité Marshall (Kg/f)	Fluage (mm)	Compacité (%)	% de vide
5	3,04	1050	3,1	98,93	1,07
4,85	2,95	1100	3,0	98,53	1,47
4,70	2,86	1100	2,9	98,29	1,71
4,55	2,77	1300	2,4	97,82	2,18
4,40	2,68	1100	2,8	97,47	2,53
4,25	2,59	1050	3,1	97,22	2,78
4,10	2,50	1000	3,2	96,98	3,02

La Figure 4.3 présente la variation de stabilité Marshall en fonction des nouvelles teneurs en liant.

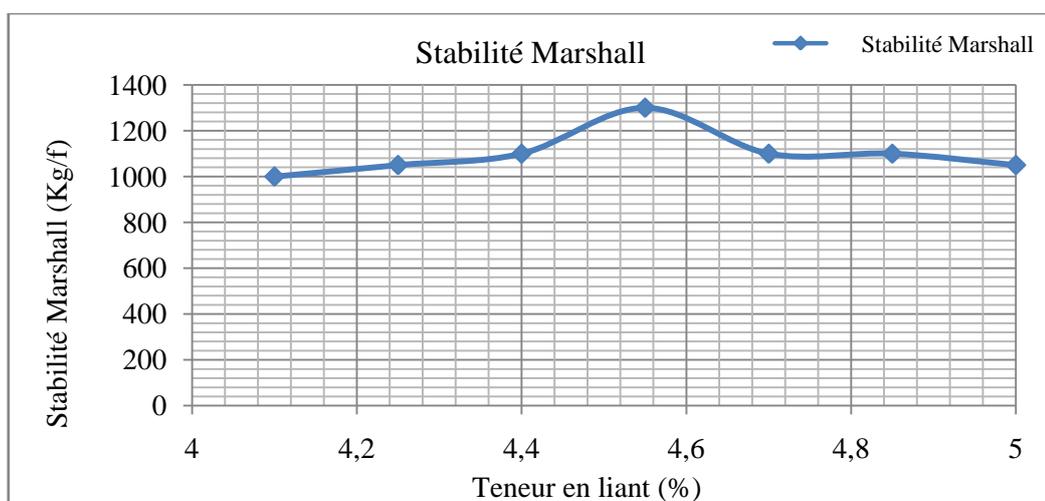


Figure 4.4 : Stabilité Marshall des nouvelles teneurs en liant de BBSG 0/14.

On remarque une augmentation de la stabilité Marshall de BBSG 0/14 jusqu'à un optimum qui correspond à une teneur en liant TL = 4,55%. Cette valeur représente la valeur la plus stable en termes de stabilité, fluage et compacité, et la plus économique (moins d'utilisation de bitume), au-delà de cette valeur nous constatons une diminution de la stabilité Marshall.

On remarque aussi que :

- Les stabilités et les résistances aux fluages MARSHALL sont conformes aux spécifications algériennes pour les enrobés bitumineux [CTTP 2004].
- Les compacités des éprouvettes de mélanges bitumineux sont acceptables.

On choisi les meilleures teneurs en liant donnant les meilleures performances mécaniques du mélange BBSG 0/14 qui correspondent à : 4.55%, 4.40%, 4.70% et 4.85% pour notre plan d'expérience.

4.8. Résultats des essais du plan d'expérience

Nous donnons ci-après dans le tableau (4.15) un récapitulatif des résultats des essais du plan d'expérience pour les nouvelles teneurs obtenues.

Tableau 4.15 : Résultats d'essais des nouvelles teneurs en liant pour BBME modifié 0/14.

N° d'essai	La teneur en liant (%)	% d'additif	Température (°C)	Stabilité Marshall (Kg/f)	Fluage (mm)
1	4,40	0,1	170	900	3,5
2	4,70	0,1	170	1000	3,0
3	4,55	0,3	170	1250	2,6
4	4,85	0,3	170	1200	2,7
5	4,55	0,6	170	1100	3,1
6	4,85	0,6	170	1050	3,1
7	4,40	0,9	170	1000	3,2
8	4,70	0,9	170	950	3,4
9	4,55	0,1	200	1350	2,0
10	4,85	0,1	200	1250	2,1
11	4,40	0,3	200	1550	1,9
12	4,70	0,3	200	1500	2,0
13	4,40	0,6	200	1100	2,8
14	4,70	0,6	200	1150	2,7
15	4,55	0,9	200	950	3,6
16	4,85	0,9	200	900	3,8

A partir de ces résultats nous tirons les remarques suivantes :

- Une augmentation de 3% et 14% de la stabilité Marshall pour les échantillons de teneur en liant TL = 4,55% et TL = 4,85% respectivement, formulée pour une température T = 200°C avec un taux d'ajout de l'additif de 0,1%.

- Pour une teneur en liant de $TL=4,40\%$ et une température de $T=200^{\circ}\text{C}$ avec un taux d'ajout d'additif de $0,3\%$, nous remarquons une augmentation du fluage Marshall. Cette augmentation est de 33% par rapport au fluage initial.
- La meilleure formulation est celle correspondant à l'essai n°11.

4.9. Conclusion

Dans ces différentes applications, l'expérimentation est motivée par l'obtention d'un modèle, tiré d'un nombre limité d'expériences, qui permet d'effectuer des prédictions ou une optimisation à l'intérieur du domaine expérimental.

L'approche phénoménologique que nous présentons consiste à construire un modèle mathématique, en entrée interviennent des facteurs contrôlés et maîtrisables (température de fabrication, teneur en liant, % d'additif), supposés influents, et en sortie le module de rigidité complexe caractérisant le mélange bitumineux de BBME modifié.

Notre étude a pour objet de minimiser l'influence des points d'essais sur la qualité et la précision de la modélisation expérimentale. La technique des plans d'expérience, en tant que technique de conduite et gestion de campagne d'essais, fondée sur l'optimisation des techniques de régression linéaire, permet d'adopter une démarche formelle dans la définition des essais, et d'apprécier la confiance à accorder aux résultats.

CHAPITRE V

ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

5.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons donner les principaux résultats de la campagne d'essai NAT que nous avons réalisés, sur des éprouvettes cylindriques sous contraintes et températures constantes. Ainsi que le système d'équation matricielle ayant permis de déterminer le module de rigidité du BBME modifié 0/14 étudié. La technique des moindres carrés a été utilisée à cet effet.

5.2. Description de l'appareil utilisé (NAT)

Plusieurs types d'appareils peuvent être utilisés pour mesurer le module de rigidité des enrobés bitumineux. Ces appareils doivent permettre d'appliquer une force durant l'essai, quelle que soient les caractéristiques de l'éprouvette. La figure 5.1 représente l'appareillage mis au point au laboratoire route de CTPP d'Alger.

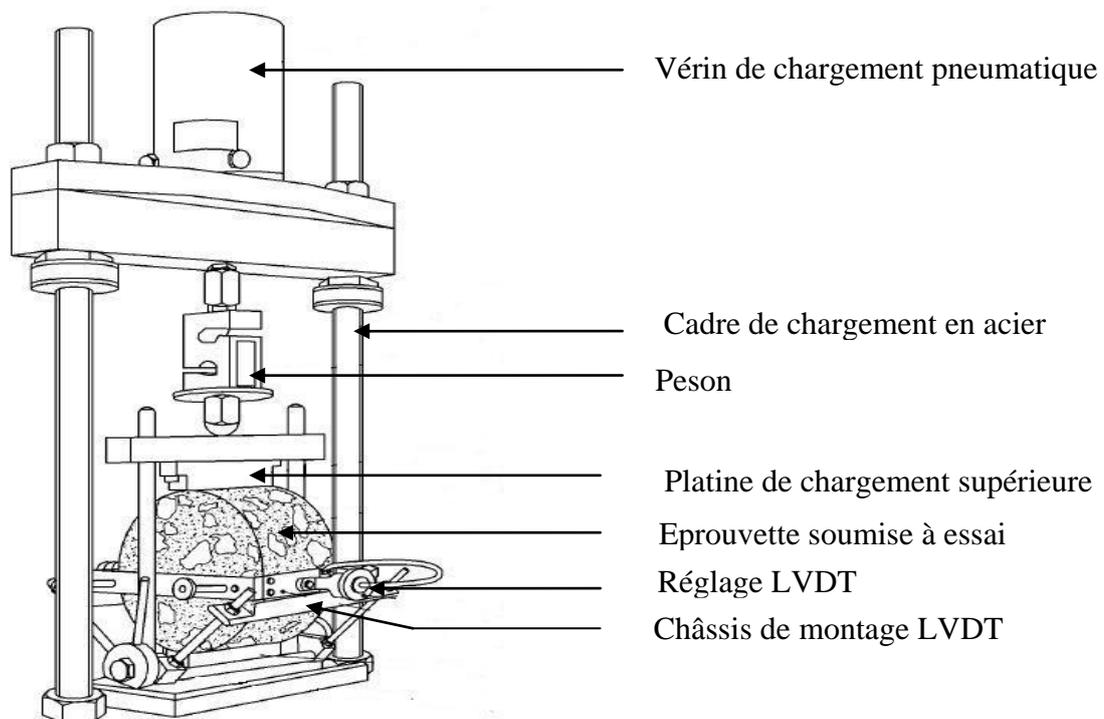


Figure 5.1. Appareil de NAT.

La période de stockage des éprouvettes d'enrobé bitumineux après leur démoulage est inférieure à 4 jours, la température de stockage ne doit pas dépasser 25 °C. Pour un stockage supérieur à 4 jours, la température ne doit pas dépasser 5 °C.

Les températures et les durées de stockage doivent être consignées. Les éprouvettes doivent être stockées sur une face plate et ne doivent pas être empilées.

L'éprouvette doit être placée dans un environnement à température contrôlée et suivie jusqu'à ce qu'elle atteigne la température d'essai.

Après avoir porté l'éprouvette à la température spécifiée, l'éprouvette doit être montée pour l'essai avec l'un des diamètres marqués placé verticalement. La procédure de montage, incluant le réglage des capteurs et de la chaîne de mesure, doit être conforme aux instructions du fabricant.

Cinq impulsions de chargement doivent être appliquées grâce à un vérin, pour chaque application d'impulsion de chargement, Le vérin de chargement doit être capable d'appliquer des impulsions de chargement répétées alternant avec des périodes de repos. La charge doit avoir la forme d'une onde de choc ou à peu près. Le temps de charge doit être contrôlé pendant l'essai.

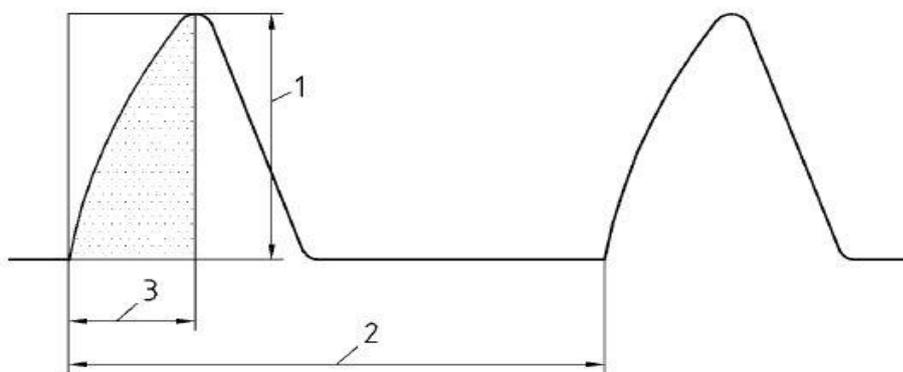


Figure 5.2 : Forme de l'impulsion de chargement, indiquant le temps de montée et la valeur crête de charge.

Tel que :

1. valeur crête de la charge ;
2. période de répétition des impulsions ;
3. temps de montée.

Le temps de montée, mesuré à partir du début de l'impulsion de chargement et qui est le temps nécessaire à l'application de la charge pour passer de zéro à la valeur maximale, doit être de (124 ± 4) ms. La valeur crête de chargement doit être définie pour obtenir une valeur crête de déformation horizontale transitoire visée de 0,005 % du diamètre de l'éprouvette.

La variation de la déformation diamétrale horizontale et de la charge appliquée dans le temps doit être mesurée et consignée, et le facteur de surface de charge déterminé. La déformation d'éprouvette au cours de l'essai est indiquée par un système de mesure de déformation situé dans l'axe de l'éprouvette.

Le module de rigidité mesuré doit être déterminé pour chaque impulsion de chargement sur l'éprouvette cylindrique en fonction de la charge appliquée, coefficient de poisson, la déformation horizontale et l'épaisseur d'éprouvette à l'aide de la formule suivante :

$$E_{ti} = \frac{P(\vartheta + 0,27)}{\Delta D.e} \quad (5.1)$$

Notons enfin, que pour rendre la tâche plus facile à l'utilisateur cet appareil a été relié à un système numérique d'acquisition et de traitement de données.

5.3. Mode opératoire

Il aurait été souhaitable de prendre tout les échantillons mais ceci s'avère impossible du fait que cet appareil n'existe qu'au CTPP et que les responsables du NAT nous ont limité dans le nombre d'échantillons et même avec ça les expériences n'ont pu avoir lieu que plus de sept mois après avoir déposé les échantillons à leur niveau.

Nous avons alors choisi de sélectionner les éprouvettes ayant donné les meilleures stabilités au fluage pour déterminer le module de rigidité d'enrobé modifié.

L'essai NAT a été effectuée sur les six meilleurs teneurs en liant donnant les meilleurs performances mécaniques d'enrobé BBME modifié 0/14, de notre plan d'expérience, correspondant aux essais N° : 3, 4, 9, 10, 11 et 12 (E_1, E_2, E_3, E_4, E_5 et E_6).

Tableau 5.1 : Module de rigidité correspondant pour chaque essai du NAT.

N° d'essai	La teneur en liant (%)	% d'additif	Température (°C)	Module de rigidité correspondant (E)
3	4,55	0,3	170	E ₁
4	4,85	0,3	170	E ₂
9	4,55	0,1	200	E ₃
10	4,85	0,1	200	E ₄
11	4,40	0,3	200	E ₅
12	4,70	0,3	200	E ₆

Après avoir conservé l'éprouvette dans une enceinte pendant 24 heures à la température de l'essai de 15°C, Cinq pulsations d'essai sont ensuite réalisées à une fréquence de 10 Hz (définie par la norme EN 12697-26:2004).

On mesure le module de rigidité à chaque pulsation. Le module obtenu est la moyenne de ces 5 valeurs. La valeur communément utilisée pour le coefficient de poisson est 0,35 (définie par la norme EN 12697-26:2004).

Chaque essai comporte trois échantillons, le module mesuré est le module de module complexe d'enrobé bitumineux ($|E|$) (Figure 5.3, 5.4),



Figure 5.3: Essai NAT (CTTP).

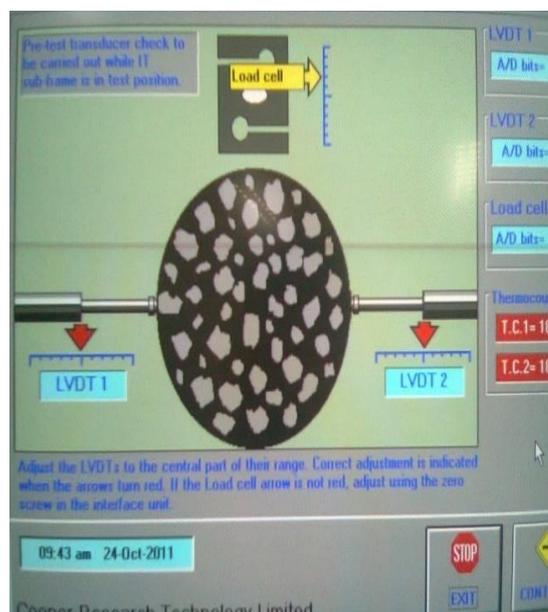


Figure 5.4: Ecran de contrôle du NAT.

Le tableau 5.2 présente les résultats des essais du NAT sur le BBME modifié étudié. Les résultats donnés par l'essai NAT sont résumés dans le tableau 5.2, à noter que nous prenons comme valeur du module la moyenne des résultats trouvés.

Tableau 5.2 : Résultats d'essai NAT sur le BBME modifié 0/14.

Module de rigidité (Mpa)	Module de rigidité de chaque éprouvette	Charge vertical (KN)	Effort horizontal (Kpa)	Déformation horizontal (micron)	Temps de l'évaluation (ms)
$E_1 = 12576$	$E_1' = 12492$ $E_1'' = 12000$ $E_1''' = 13236$	3,75	375.2	2,9	124,4
$E_2 = 12347$	$E_2' = 12312$ $E_2'' = 12100$ $E_2''' = 12629$	3,77	379,4	3,0	123,3
$E_3 = 12723$	$E_3' = 12622$ $E_3'' = 12515$ $E_3''' = 13032$	3,73	373,6	2,7	123,5
$E_4 = 12582$	$E_4' = 12440$ $E_4'' = 12306$ $E_4''' = 13000$	3,74	374,1	2,8	123,8
$E_5 = 14341$	$E_5' = 13587$ $E_5'' = 13228$ $E_5''' = 16208$	3,44	338.6	2,3	124,2
$E_6 = 14168$	$E_6' = 13367$ $E_6'' = 13536$ $E_6''' = 15601$	3,48	341,7	2,5	124,4

A partir des résultats des essais au NAT effectués sur les six formulations, Nous remarquons une diminution du module de rigidité et de la déformation de l'enrobé BBME modifié 0/14 quant la charge appliquée augmente.

5.4. Modèle mathématiques

La méthode des moindres carrée permet de fournir une estimation du modèle mathématique donné dans l'équation (4.22) (chapitre 4). L'équation matricielle se met sous la forme (5.2) :

$$\begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \\ E_5 \\ E_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T_1 & C_1 & A_1 \\ 1 & T_2 & C_2 & A_2 \\ 1 & T_3 & C_3 & A_3 \\ 1 & T_4 & C_4 & A_4 \\ 1 & T_5 & C_5 & A_5 \\ 1 & T_6 & C_6 & A_6 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{Bmatrix} \quad (5.2)$$

Numériquement ceci s'écrit comme suit :

$$\begin{Bmatrix} 12576 \\ 12347 \\ 12723 \\ 12582 \\ 14341 \\ 14168 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 170 & 4,55 & 0,3 \\ 1 & 170 & 4,85 & 0,3 \\ 1 & 200 & 4,55 & 0,1 \\ 1 & 200 & 4,85 & 0,1 \\ 1 & 200 & 4,40 & 0,3 \\ 1 & 200 & 4,70 & 0,3 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{Bmatrix} \quad (5.3)$$

La résolution par moindres carrés donne :

$$a_0 = 3382.42$$

$$a_1 = 56.75$$

$$a_2 = -603.33$$

$$a_3 = 7557.50$$

Le module de rigidité s'exprime donc :

$$Y = 3382.42 + 56.75 T - 603.33 C + 7557.50 A \quad (5.4)$$

5.5. Incertitude sur le modèle mathématique

L'incertitude sur la mesure du module de rigidité peut être écrite comme suit :

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta C}{C} + \frac{\Delta T}{T} + \frac{\Delta A}{A} \quad (5.5)$$

$$\Delta E = E \left(\frac{\Delta C}{C} + \frac{\Delta T}{T} + \frac{\Delta A}{A} \right) \quad (5.6)$$

d'où l'incertitude :

Prenons $E=14350$ MPa (pour $T = 200^\circ\text{C}$, $C = 4,40$, $A = 0,3\%$).

On obtient :

$$\Delta E = 14350 \left(\frac{0,01}{4,40} + \frac{3}{200} + \frac{0,001}{0,3} \right)$$

on prendra donc : $\Delta E = 370$ MPa

Prenons $E=14350$ MPa on obtient :

$$\Delta E / E = 2,6\% = 0,026.$$

Cette incertitude est inférieure à 10% ce qui implique donc que les résultats trouvés est acceptable.

Compte tenu de ce calcul, le module de rigidité s'exprimera :

$$E = 3382.42 + 56.75 T - 603.33 C + 7557.50 A \pm 370 \text{ MPa}$$

(5.7)

5.6. Domain de validité du modèle proposé

Nous redonnons ici les domaines de variation pour lesquels ont été réalisés les essais:

- Teneur en liant : de 4,40% à 4,85%.
- Pourcentage d'additif : de 0,1% à 0,4%.
- Température de fabrication: de 170°C à 200°C.

Il est important de préciser que le modèle mathématique est bien entendu restreint aux bornes de variation précédemment citées et valable uniquement avec des constituants et une composition similaires. Le bitume d'apport est un bitume pur 40/50.

Enfin, il est important de rappeler que cette formule a été obtenue via l'interprétation d'un plan d'expérience qui nous a permis de réaliser 16 essais au lieu des 32 initiaux. Le fait d'utiliser le plan d'expérience représente donc un compromis qui nous a permis d'effectuer tous les essais nécessaires en un temps réduit.

5.7. Calcul du module de rigidité pour l'ensemble des essais

Il est à présent possible de calculer toutes les valeurs du module du plan d'expérience complet. Nous les présentons ainsi dans le tableau ci-dessous (tableau 5.3) où nous pouvons comparer par la même occasion le module de rigidité calculé avec celle mesuré au laboratoire pour les essais effectués.

Tableau 5.3 : Résultats du calcul.

N° d'essai	Teneur en liant (%)	Température (°C)	% d'additif	Module (MPa)		
				mesuré	calculé	$\Delta(\%)$
1	4,40	170	0,1		11131	-
2	4,40	170	0,3		12643	-
3	4,40	200	0,1		12834	-
4	4,40	200	0,3	14341	14345	0,03
5	4,55	170	0,1		11041	-
6	4,55	170	0,3	12576	12552	0,2
7	4,55	200	0,1	12723	12743	0,2
8	4,55	200	0,3		14255	-
9	4,70	170	0,1		10950	-
10	4,70	170	0,3		12462	-
11	4,70	200	0,1		12653	-
12	4,70	200	0,3	14168	14164	0,03
13	4,85	170	0,1		10860	-
14	4,85	170	0,3	12347	12371	0,2
15	4,85	200	0,1	12582	12562	0,2
16	4,85	200	0,3		14074	-

Nous constatons que les valeurs estimées par notre modèle ont une incertitude maximale de 0,2% par rapport aux résultats expérimentaux. De ce fait, nous pouvons dire que les résultats calculés sont en bonne adéquation avec la réalité.

5.8. Poids des différents facteurs

Nous allons tenter de donner l'influence des différents facteurs considérés les uns par rapport aux autres.

Nous avons pu voir, lors de l'étude du poids des facteurs, que les facteurs les plus influents sont la température de fabrication et le pourcentage d'additif. Dans cette partie, nous allons nous intéresser tour à tour à ces différents facteurs et à la teneur en liant en essayant d'en quantifier l'impact de leurs variations de niveaux sur le module de rigidité d'un BBME modifié.

5.8.1. Influence de la teneur en liant

Dans cette partie la teneur en liant (TL) est variable dans le domaine d'étude (4,40% à 4,85%), la température de fabrication et le pourcentage d'additif sont fixés. Les résultats sont représentés dans la figure 5.5.

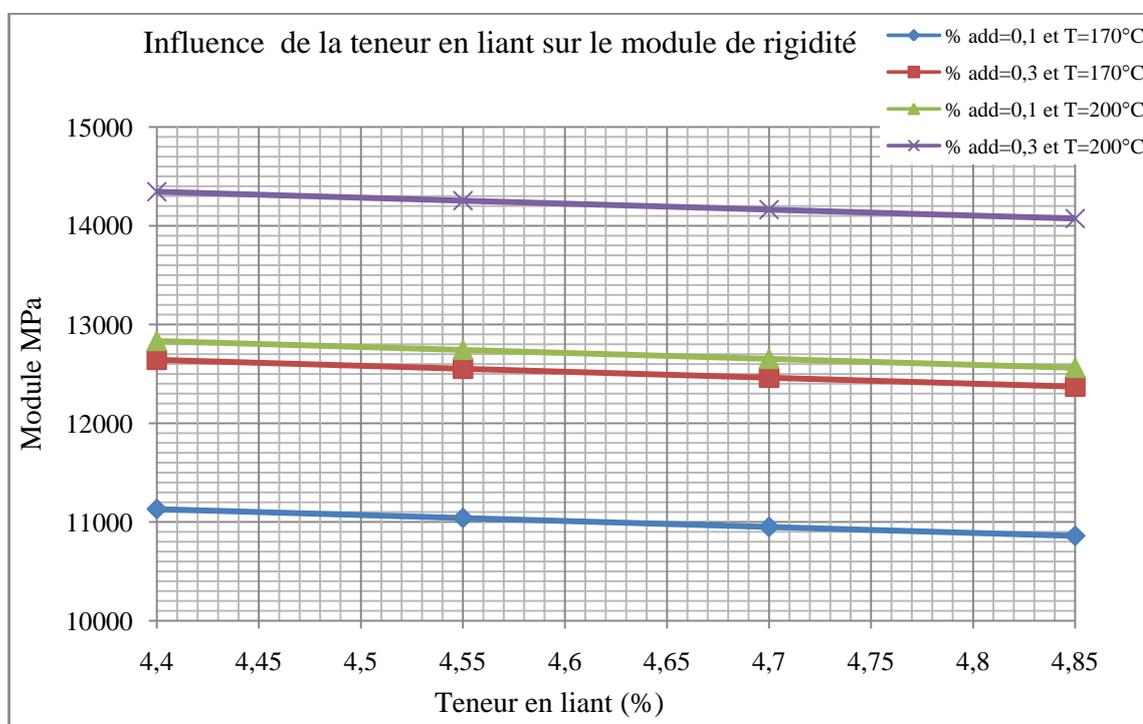


Figure 5.5 : Influence de la teneur en liant sur le module d'un BBME modifié 0/14 (Température de fabrication et le pourcentage d'additif sont fixés).

Nous remarquons que la température de fabrication a une influence plus importante que le taux d'ajout de l'additif. Ainsi pour un même pourcentage d'ajout d'additif nous avons une augmentation du module de rigidité de l'ordre de 2000 MPa en passant d'une température de 170°C à 200°C.

L'augmentation de la teneur en liant dans les limites de l'étude (4,40% à 4,85%) provoque une diminution du module, et ce quelque soit la température de fabrication ou le % d'additif. Cette diminution est de l'ordre de 270 MPa.

5.8.2. Influence de la température de fabrication

Dans cette partie la température de fabrication est variable dans le domaine d'étude (170°C à 200°C), la teneur en liant (TL) et le pourcentage d'additif sont fixés. Les résultats sont représentés dans la figure 5.6.

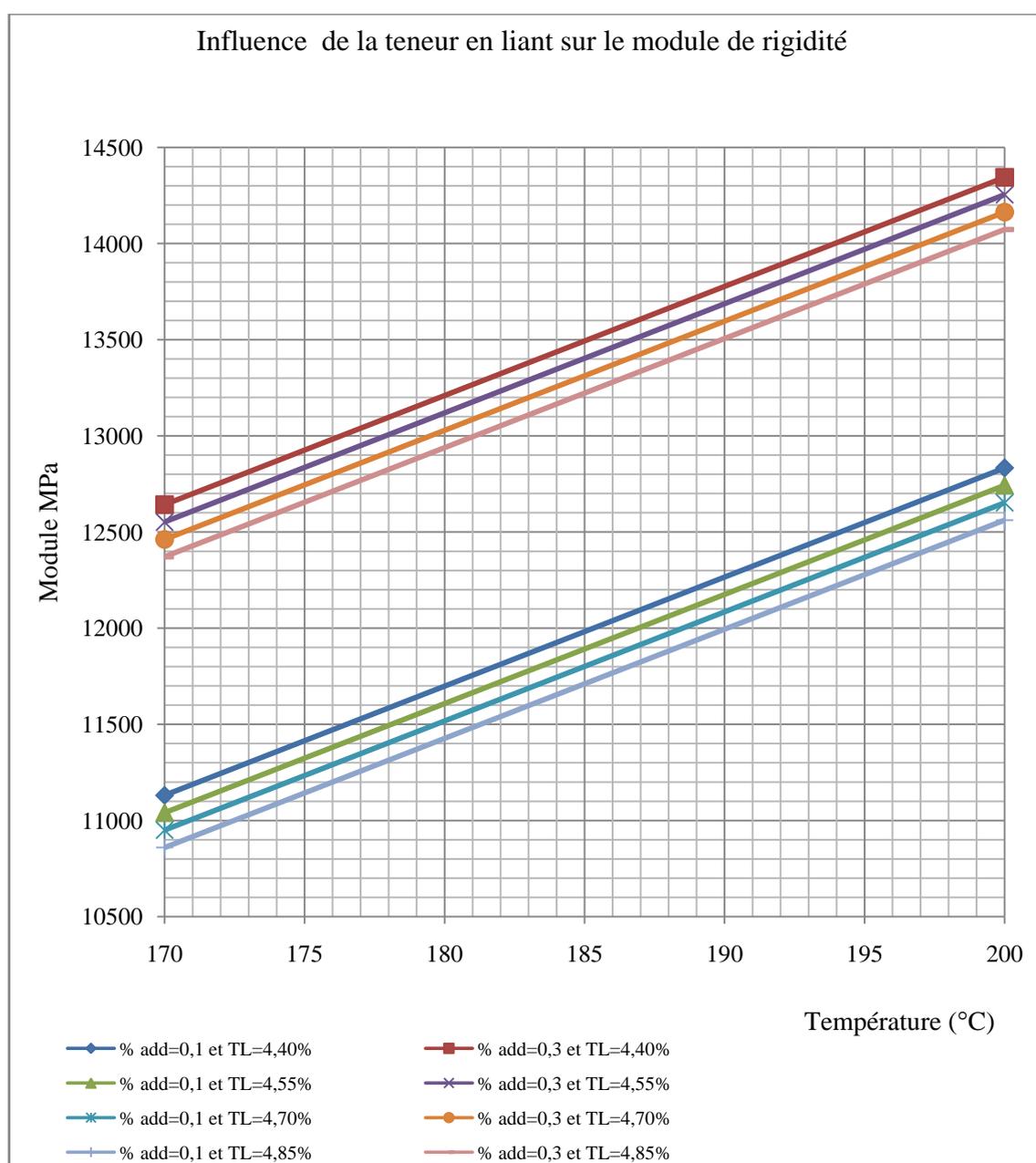


Figure 5.6: Influence de la température de fabrication sur le module d'un BBME modifié 0/14 (teneur en liant et pourcentage d'additif fixés).

Nous observons que l'augmentation de la température de fabrication dans les limites de l'étude (170°C à 200°C) provoque une augmentation du module du BBME modifié 0/14, et ce quelque soit la teneur en liant ou en % d'additif considérés. Cette augmentation est de l'ordre de 1700MPa.

Nous pouvons également observer la prédominance du facteur « teneur en liant » sur le facteur « % d'additif ». En effet, les BBME modifié 0/14 offrant les modules les plus élevés sont ceux dont le pourcentage d'additif est la plus élevé.

5.8.3. Influence du pourcentage d'additif

Dans cette partie le pourcentage d'additif est variable dans le domaine d'étude (0,1% à 0,9%), la teneur en liant (TL) et la température de fabrication sont fixés. Les résultats sont représentés dans la figure 5.7.

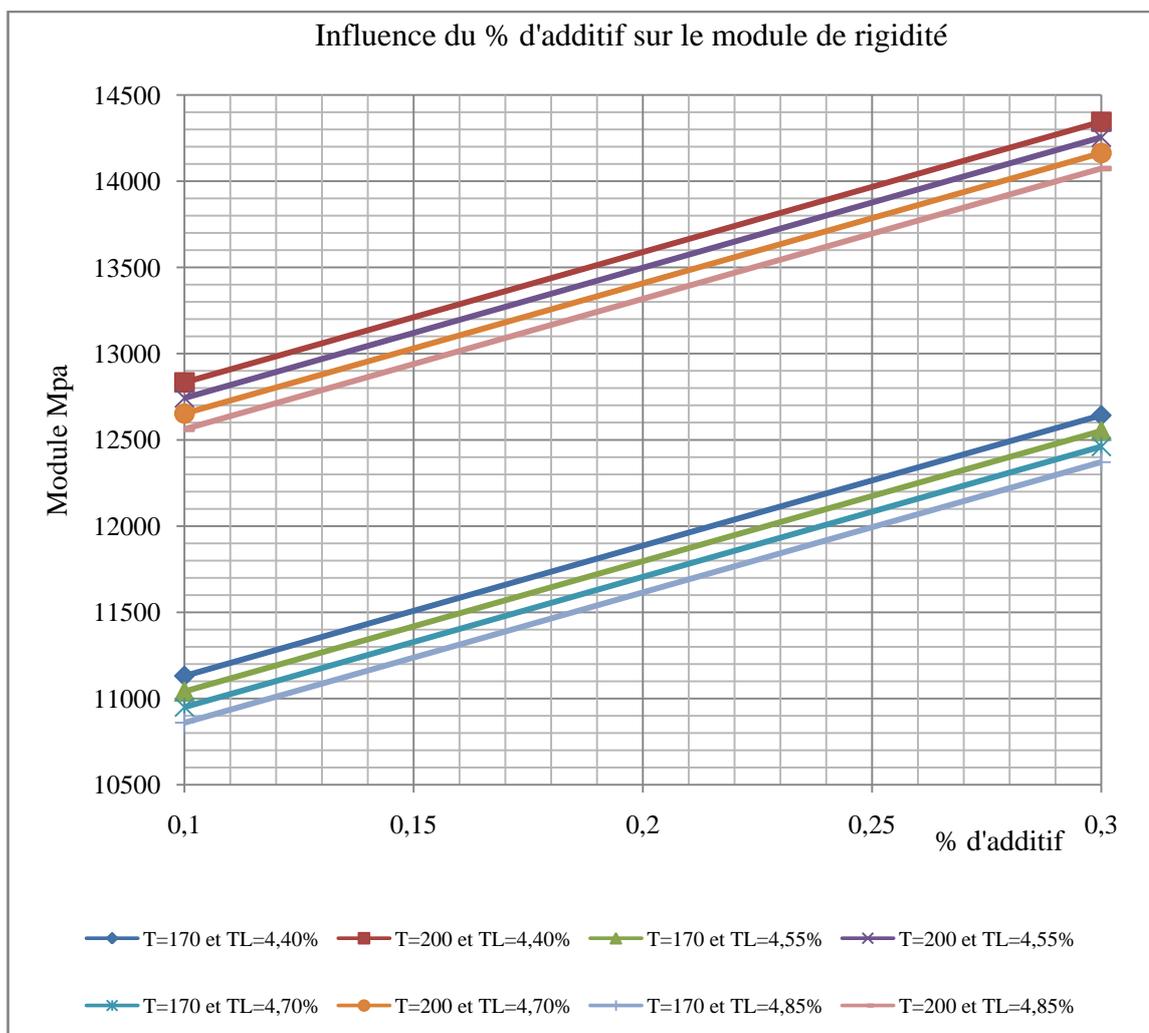


Figure 5.7 : Influence de pourcentage d'additif sur le module d'un BBME modifié 0/14 (Teneur en liant et la température de fabrication fixés).

Nous pouvons voir ici que l'augmentation du pourcentage d'additif entraîne une augmentation du module du BBME modifié 0/14 de l'ordre de 1500 MPa. Nous constatons aussi que les modules les plus élevés correspondent à la température la plus élevée.

Conclusion

A l'issue de ces différentes comparaisons nous pouvons dire que le paramètre le plus prépondérant dans la formulation d'un BBME modifié 0/14 est la température, suivi par le pourcentage d'additif et enfin la teneur en liant.

5.9. Conclusion

Nous avons obtenu par le biais de la méthode de Taguchi une estimation de module de rigidité d'un BBME modifié en fonction du taux d'ajout d'additif, de la température de fabrication et de la teneur en liant. Cette estimation grâce au plan d'expérience, en réduisant le nombre d'éprouvettes à 395 au lieu de 790; Ceci nous a permis de réaliser un gain substantiel en temps et en matériaux et donc en coût.

Nous avons mis aussi en relief la prépondérance des différents paramètres les uns par rapport aux autres. Ainsi il est apparu que la température est plus influente que teneur en liant et le pourcentage d'additif. Le pourcentage d'additif étant quant à lui plus important que la teneur en liant.

Le modèle mathématique suggéré permet de prédire les valeurs à donner aux différents paramètres entrant dans la formulation en vue d'obtenir le module souhaité pour le type d'enrobé étudié.

Inversement, il permet de calculer le module de l'enrobé en tenant compte des conditions de fabrication du produit à savoir la température, la teneur en liant et le pourcentage d'additif. Il est évident qu'on ne peut appliquer le modèle que pour des enrobés similaires à celui qui a fait l'objet de cette étude et dans le domaine de validité donné.

CONCLUSION

Les observations faites sur les rampes, les approches de carrefours, les barrages de gendarmerie et les arrêts de bus c'est-à-dire les endroits où la vitesse de circulation des poids lourds est généralement ralentie, ont montré des déformations des couches bitumineuses. Ces déformations ont été constatées aussi sur l'autoroute Est-Ouest pourtant récemment livrée. Ces déformations sont en majorité des déformations d'orniérage par fluage.

Il apparait que l'origine de ces déformations est une circulation intense ainsi que des conditions climatiques extrêmes.

Afin d'améliorer le comportement de ces couches bitumineuses vis-à-vis de ces déformations, plusieurs solutions sont disponibles. Parmi ces solutions l'ajout d'additifs afin d'améliorer le comportement des couches de roulement. On arrive ainsi à la formulation de ce qui est communément appelé des BBME.

Dans notre étude nous nous sommes intéressés à ces derniers, et en particulier nous avons étudié un BBME modifié par ajout d'un additif qui est le PR PLAST SAHARA.

Cet additif a pour effet :

1. Amélioration considérablement la résistance à l'orniérage de l'enrobé,
2. Amélioration considérablement le module d'élasticité de l'enrobé,
3. Amélioration considérablement de la fissuration de l'enrobés.

De ce fait ce BBME modifié est particulièrement adapté aux conditions climatiques du Sud Algérien.

Nous nous sommes donc intéressés au comportement de cet enrobé bitumineux (BBME) modifié. A cet effet nous avons élaborés différentes formulations afin de déterminer son module de rigidité.

Ces formulations ont été déduites à partir d'un plan d'expérience élaboré à cet effet et ayant pour objet de réduire le nombre d'essai à effectuer. Ce plan d'expérience nous a permis de faire un gain substantiel en matériau et surtout en temps.

Un modèle mathématique correspondant au module de rigidité du BBME modifié a été proposé ainsi que l'incertitude sur la mesure.

Ce modèle mathématique permet d'évaluer l'impact d'une variation de la teneur en liant, du dosage d'additif et de la température de fabrication sur le module d'un enrobé BBME modifié de classe 2. Le modèle est obtenu à l'aide d'un plan d'expérience fractionnaire de Taguchi, et la résolution du système d'équations obtenus est fait par la méthode des moindres carrés.

Nous avons montré aussi que le paramètre température est le plus prépondérant par rapport aux deux autres paramètres considérés à savoir le pourcentage d'additif et la teneur en liant. Le pourcentage d'additif joue un rôle plus important que la teneur en liant sur la rigidité du BBME modifié objet de notre étude.

L'ensemble des analyses et des approches développées ont montré que les BBME constituent une alternative aux enrobés bitumineux classiques. Bien sûr ceci dans la limite de validité donnée dans l'étude.

Cette étude pourra être complétée par des essais sur la fatigue, l'orniérage et le module complexe à chargement sinusoïdal. Malheureusement ces essais ne sont pas disponibles en Algérie aussi il serait utile de les faire dans des laboratoires disposant du matériel nécessaire. Il serait aussi intéressant de voir l'effet d'autres additifs. Un autre développement tout aussi intéressant est la prise en compte de l'interaction entre paramètres de l'étude. Dans la présente étude nous avons considéré que les paramètres influençant le module de rigidité étaient décorrélés. La prise en compte de cet aspect impliquerait un plan d'expérience plus complexe et un nombre d'essais plus importants.

ANNEXE A

CARACTÉRISTIQUES RHÉOLOGIQUES DU BITUME

Des propriétés rhéologiques du bitume satisfaisantes sont essentielles sur le plan fonctionnel pour obtenir des performances de l'enrobé correctes. Les essais pour mesurer ces propriétés peuvent être de deux types:

a. Les essais technologiques

Le bitume est caractérisé conventionnellement par un panel d'essais dits «technologiques» tels que la pénétration, la Température de ramollissement Bille et Anneau, et le point de fragilité Fraass, techniques qui permettent d'évaluer la consistance d'un bitume et qui sont normalisées à l'échelle européenne.

- La température de fragilité FRAASS (NF EN 12593)

C'est la température à laquelle un film mince de bitume rompt sous l'effet de flexion dans des conditions opératoires bien définies de fabrication et d'essai. Pour réaliser l'essai, un film de bitume de 1mm d'épaisseur est coulé sur une lamelle d'acier, sur laquelle des flexions successives sont appliquées tout en abaissant la température de 1°C par minute, dans des conditions normalisées. La température FRASS est utilisée pour caractériser, dans des conditions particulières, le comportement du bitume à basse température. Elle représente dans les conditions de l'essai le début du domaine fragile (transition comportement visqueux /fragile) [61].

- Pénétrabilité a 25° C (norme EN 1426)

La pénétrabilité représente la mesure de l'enfoncement d'une aiguille normalisée dans un bitume maintenu à une température donnée, au bout de 5 secondes sous une charge définie. Elle s'exprime en 1/10 mm. La pénétrabilité la plus utilisée est celle mesurée à 25 °C et avec un chargement de 100g. Ainsi, à une température donnée, plus un bitume est dur, plus sa valeur de pénétrabilité est faible [52].

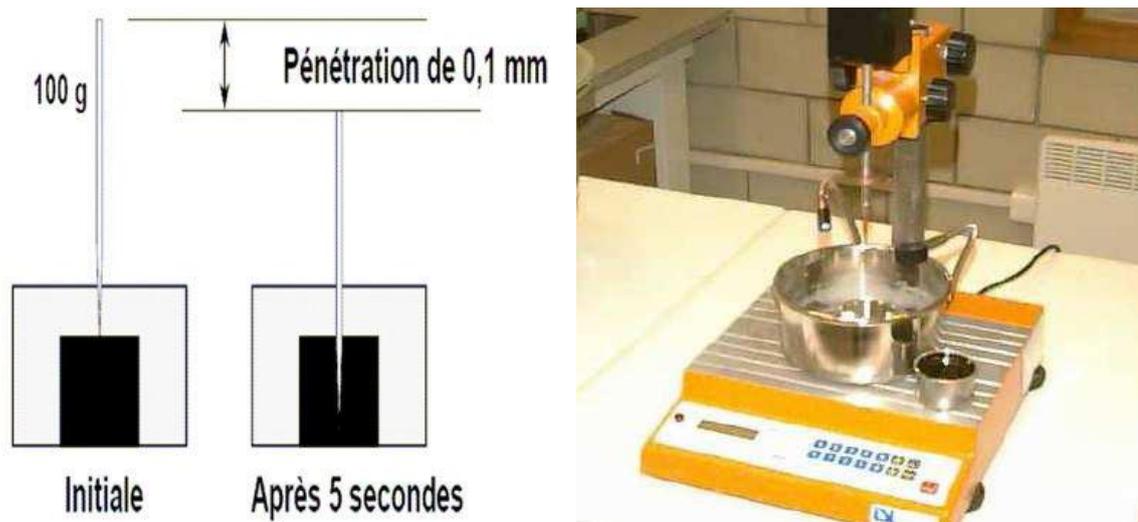


Figure A.1 : Essai de pénétrabilité pour le bitume [11].

- Point de Ramollissement-Température Bille et Anneau- (norme EN 1427)

C'est la température pour laquelle une bille d'acier s'enfonce à travers un disque de bitume contenu dans un anneau de métal dans des conditions définies de fabrication et d'essai. A cette température, le bitume présente une structure interne telle que les contraintes auxquelles il est soumis, par les conditions même de l'essai, sont suffisantes pour permettre une déformation irréversible, elle-même définie [53].

Pour cela, une bille d'acier est placée sur un anneau de cuivre rempli préalablement de bitume ; l'ensemble est plongé dans un bain dont la température est élevée de 5°C par minute : la température de ramollissement est celle à laquelle la bille, entraînant la membrane de bitume, atteint un repère fixé. De bonnes corrélations existent entre la TBA et la résistance à l'orniérage pour les bitumes purs (conventionnels).

Ces deux derniers essais permettent de définir à quelle classe de pénétrabilité (ou grade) le bitume appartient le tableau A.1 présente ces classes :

Tableau A.1 : Les classes (grade) du Bitume.

	Unité	Classes								
		20/30	30/45	35/50	40/60	50/70	70/100	100/150	160/220	250/330
Pénétrabilité à 25°C	* 0,1 mm	20-30	30-45	35-50	40-60	50-70	70-100	100-150	160-220	250-330
Température de Bille et Anneau	°C	55-63	52-60	50-58	48-56	46-54	43-51	39-47	35-43	30-38

Plus le grade d'un bitume est élevé, plus sa consistance (dureté) est faible.

b. Les mesures rhéologiques

Par essais rhéologiques, il est entendu que ce sont essentiellement des essais permettant de mesurer une grandeur physique définie (module, complaisance, viscosité) en relation avec les principaux mécanismes de dégradation d'une chaussée qui sont :

- l'orniérage de la partie supérieure de la chaussée : déformation permanente à des températures voisines de 50°C dues aux charges répétées (Figure 2.11). Ce phénomène est donc fonction de la température et du trafic ;



Figure A.2 : Orniérage des chaussées.

- la fatigue liée au trafic automobile : formation de nombreuses fissures longitudinales à des températures voisines de 0°C. Elle est fonction de la répétition des charges avec le temps.



Figure A.3 : Fissuration par fatigue.

- la fissuration thermique (fissuration transversale) résultant des basses températures (environ -20°C) auxquelles le liant devient cassant.



Figure 2.13 : Fissuration thermique.

Les méthodes de mesure des propriétés rhéologiques sont essentiellement :

- des essais comportant un échelon de sollicitation instantanée, traction directe par exemple ;
- des essais de relaxation à déformation constante ;
- des essais de fluage à contrainte constante et leur recouvrance ;
- des essais à sollicitations périodiques.

La plus utilisée est l'application d'une sollicitation sinusoïdale permettant la mesure du module complexe. Cependant, il se pratique aussi différents essais à vitesse d'élongation imposée, à vitesse de déformation imposée, à vitesse de chargement imposée, etc. Dans ces essais, les sollicitations peuvent s'effectuer en traction, cisaillement, flexion ou torsion.

ANNEXE B

TENEUR EN LIANT

Le liant bitumineux transmet naturellement son comportement viscoélastique à l'enrobé. Il faut donc définir une teneur en liant optimale afin d'assurer la cohésion du mélange et le bon enrobage de tous les grains du mélange par un film mince de bitume, et ce, tout en évitant des problèmes de fluage et d'orniérage trop prononcés à haute température (dans le cas d'une trop forte teneur en bitume).

B.1. La teneur en liant

La teneur en liant TL_{ext} est le rapport de la masse de liant, à la masse de granulats secs, exprimé en pourcent extérieur.

$$TL_{ext} = 100 \times \frac{\text{masse de bitume}}{\text{masse de granulats secs}} \quad (\text{B.1})$$

La valeur TL_{int} (teneur en liant intérieur) qui est le rapport de la masse de liant à la masse de mélange total, exprimé en pourcent intérieur.

$$TL_{int} = 100 \times \frac{\text{masse de bitume}}{\text{masse de granulats secs} + \text{la masse de bitume}} \quad (\text{B.2})$$

A l'étranger, les teneurs en liant sont exprimées soit en TL_{ext} , soit en TL_{int} .

B.2. Le module de richesse K

Le module de richesse K [Duriez, 1950] est une grandeur proportionnelle à l'épaisseur conventionnelle du film de liant hydrocarboné enrobant le granulat. K est indépendant de la masse volumique du mélange granulaire. Il est relié à la teneur en liant *externe* par l'équation suivante :

$$TL_{ext} = K \times \alpha \sqrt[5]{\Sigma} \quad (\text{B.3})$$

Où Σ est la surface spécifique, exprimée en mètres carrés par kilogramme, déterminée par la relation :

$$100 \Sigma = 0,25 G + 2,3 S + 12 s + 150 f \quad (\text{B.4})$$

Avec:

G : proportion d'éléments supérieur à 6,3 mm

S : proportion d'éléments compris entre 6,3 mm et 0,250 mm

s : proportion d'éléments compris entre 0,250 mm et 0,063 mm

f : proportion des éléments inférieurs à 0,063 mm

α : un coefficient correcteur relatif à la masse volumique des granulats

$$\alpha = 2,65 / \rho_G$$

avec

ρ_G : masse volumique des granulats en grammes par centimètre cube.

Il est toujours possible d'utiliser la notion de module de richesse avec la teneur en liant interne $TLint$ à l'aide des équations suivantes :

$$TLint = \frac{100 \times K \times \alpha^5 \sqrt{\Sigma}}{100 + (K \times \alpha^5 \sqrt{\Sigma})} \quad (\text{B.5})$$

Et

$$K = \frac{\left(\frac{100 \times TLint}{100 - TLint} \right)}{\alpha^5 \sqrt{\Sigma}} \quad (\text{B.6})$$

Note : le calcul n'est pas applicable lorsque le mélange contient des fines spéciales ou des additifs tels que des fibres.

ANNEXE C

MÉTHODE DE FORMULATION DE LCTP (FRANCE)

Méthode LCPC (FRANCE)

C'est une approche fondamentale qui reprend un certain nombre d'exigences sur la tenue à l'eau, les pourcentages de vide et la résistance à l'orniérage mais en y ajoutant le module complexe et la fatigue. Dans cette approche, la teneur en liant et l'enveloppe de la courbe granulométrique ne sont pas fixées. L'épreuve de formulation est caractérisée par une approche fondée le plus possible sur les performances du mélange. Les considérations volumétriques sont prises en compte au moyen de la presse à cisaillement giratoire [14].

Cet essai est le pivot de la méthode car il est utilisé pour tous les types d'enrobés à chaud. Cette procédure est décrite sur le schéma ci-dessous (Figure C.1).

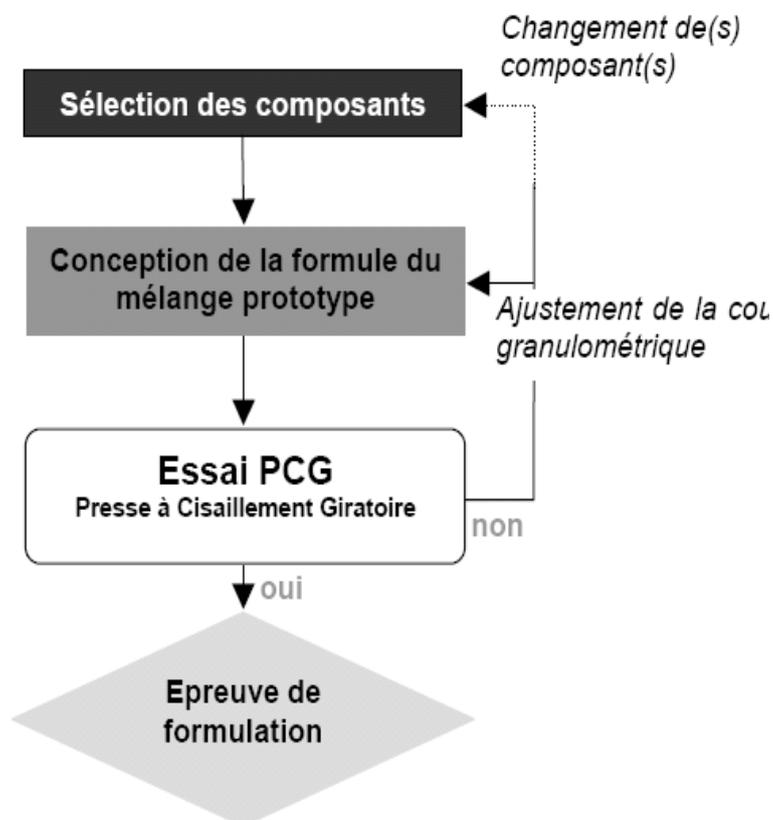


Figure C.1 : Procédure de formulation en France [21].

ANNEXE D

MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS BITUMINEUX

Les différentes composantes du module complexe varient avec la température et la fréquence de sollicitation, fixées pour chaque essai élémentaire. Les résultats expérimentaux $|E^*|$, ϕ , E_1 , E_2 , sont usuellement exprimés à l'aide des représentations classiques décrites dans ce qui suit :

D.1. Courbes isothermes

Elles sont obtenues en traçant la norme du module complexe $|E^*|$ en fonction de la fréquence pour chacune des températures d'essais T , généralement en coordonnées bi-logarithmiques- (Figure D.1).

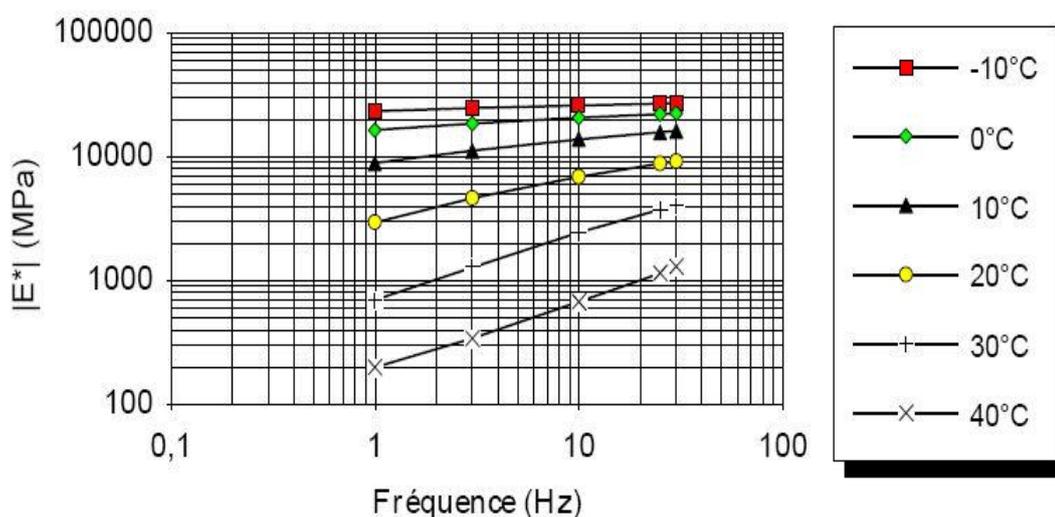


Figure D.1 : Isothermes du module complexe [De la Roche, 1996].

Outre les valeurs de module directement utilisables pour les calculs de dimensionnement, la pente des isothermes permet d'estimer la susceptibilité cinétique du matériau bitumineux (c'est-à-dire la variation de module avec la vitesse de la sollicitation).

D.2. Equivalence fréquence-température

On remarque, à l'examen de ces courbes, qu'une même valeur de module du matériau peut être obtenue pour différents couples (fréquence, température).

Cette propriété est appelée propriété d'équivalence temps-température [William, 1955]. Elle se traduit par l'écriture de $E^*(\omega, T)$ sous la forme $E^*(\omega f(T))$.

Il est possible, en utilisant cette propriété d'équivalence temps-température, de construire une courbe unique ($\log |E^*|$, $\log F$), où F est la fréquence, pour une température de référence (T_R) choisie arbitrairement. Cette courbe est obtenue par translation parallèle à l'axe des fréquences de chaque isotherme par rapport à l'isotherme correspondant à la température de référence jusqu'à superposition des points de même ordonnée.

La courbe ainsi obtenue est appelée courbe maîtresse. Elle permet d'obtenir des valeurs de module pour des fréquences inaccessibles par l'expérimentation (Figure D.2).

Elle est généralement déterminée pour une température T_R de 10°C pour les enrobés (25°C pour les bitumes).

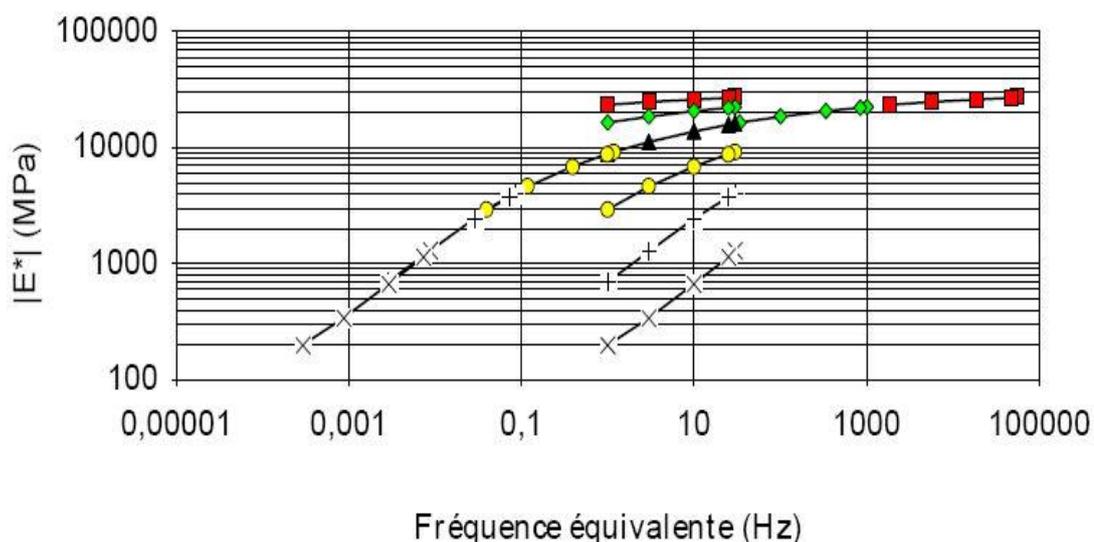


Figure D.2: Exemple de courbe maîtresse.

Le coefficient de translation de l'isotherme T par rapport à l'isotherme T_R de référence choisie est $\log a_t$. Tel que $E^*(\omega, T) = E^*(\omega \cdot a_t, T_R)$ avec $a_{T_R} = 1$.

Plusieurs formules sont proposées pour représenter $\log a_t$. Les plus utilisées sont :

- la formule dite de WLF obtenue par [William, 1955] :

$$\log a_T = \frac{-C_1(T-T_R)}{(T-T_R)+C_2} \quad (\text{C.1})$$

Avec C1 et C2, constantes dépendant du matériau;

T et TR, températures exprimées en °K.

$$- \text{ Une équation de type Arrhénius : } \log a_T = \frac{\delta H}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right) \quad (\text{C.2})$$

Avec δH , énergie apparente d'activation caractérisant le matériau;

R, constante des gaz parfaits;

T et TR, températures exprimées en °K.

A partir de la construction des courbes maîtresses sur un grand nombre de résultats expérimentaux provenant de différents types d'essais, Francken [1996], conclut à la meilleure adéquation de la loi d'Arrhénius pour $\log(a_T)$ pour les enrobés.

D.3.Courbes isochrones

Il s'agit du même type de représentation que précédemment toujours exprimée en coordonnées semi-logarithmiques en inversant les paramètres fréquence et température (Figure D.3).

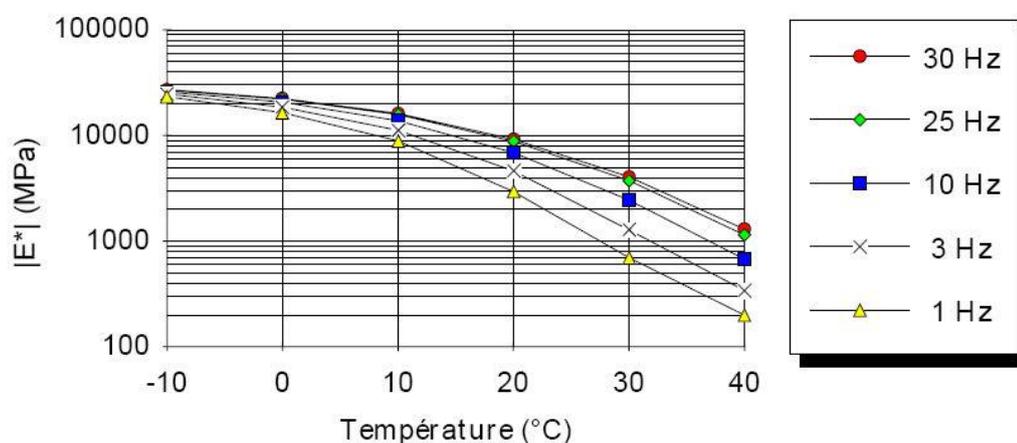


Figure D.3 : Isochrones du module complexe.

A l'instar des courbes isothermes, cette représentation permet cette fois d'estimer la susceptibilité thermique de l'enrobé bitumineux (variation du module pour une variation de température).

D.4.Courbe dans le plan de Cole et Cole [1941]

Cette représentation consiste à porter la partie réelle du module complexe E_1 en abscisse et la partie imaginaire E_2 en ordonnée (Figure D.4).

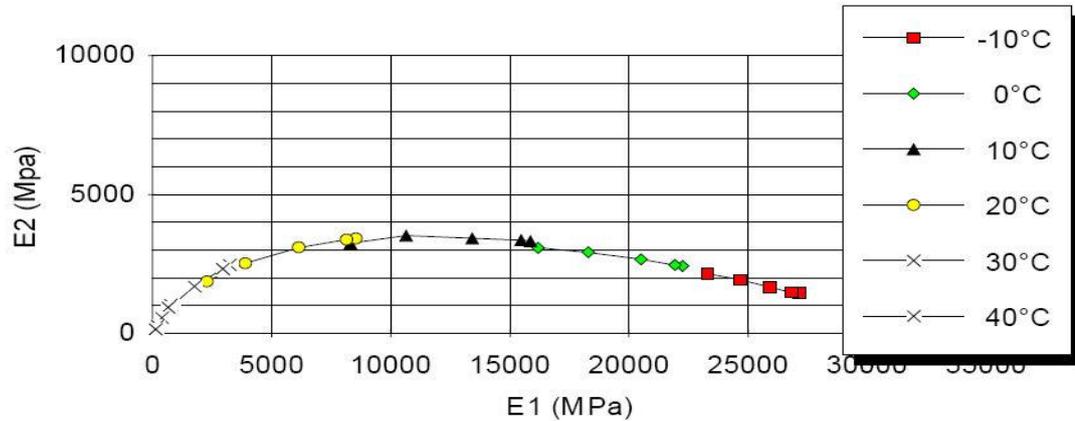


Figure D.4 : Exemple de courbe de module complexe dans le plan de Cole et Cole (Essai en flexion 2 points).

Cette courbe est caractéristique du matériau étudié. Elle peut être utilisée pour caler un modèle de comportement rhéologique. Cependant, elle n'est pas très précise pour les faibles valeurs de module. Pour effectuer le calage pour les faibles valeurs de module, on utilisera la représentation dans l'espace de Black.

D.5.Courbe dans l'espace de Black

Cette représentation consiste à tracer le logarithme de la norme du module complexe $|E^*|$ en fonction de l'angle de phase correspondant (Figure D.5) Une des particularités de cette représentation pour les enrobés consiste à placer l'abscisse (à savoir l'angle de phase) à gauche de l'axe des ordonnées, croissant de droite à gauche.

Lorsque le matériau obéit au principe d'équivalence temps-température, les points expérimentaux permettent de définir une courbe unique, caractéristique du matériau testé.

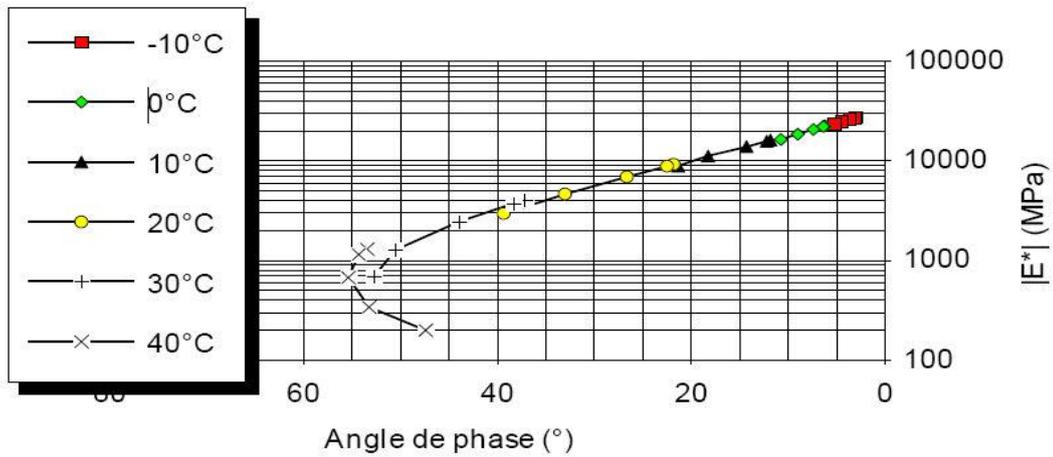


Figure D.5 : Exemple de courbe de module complexe dans l'espace de Black
(Essai en flexion 2 points).

Cette courbe permet de visualiser la zone des modules faibles et en particulier la diminution d'angle de phase pour les hautes températures. Ce phénomène est lié à la présence des granulats dans le mélange : généralement, pour les bitumes purs, l'angle de phase augmente de façon continue ou tend vers une asymptote avec l'augmentation de température.

ANNEXE E

PLAN D'EXPÉRIENCE

L'expérimentation peut rapidement devenir très coûteuse à cause du nombre de simulations à effectuer, aussi on a recourt à des techniques ayant pour but de limiter le nombre d'essais tout en essayant d'obtenir des résultats satisfaisants. Parmi ces techniques les plans d'expériences sont d'un apport non négligeable et contribue de manière significative à améliorer les résultats.

E.1. Notions générales

Avant d'aborder les aspects liés aux plans d'expériences, il est utile de définir certains concepts. En l'absence de modèle mathématique complet et éprouvé, la prédiction du comportement des systèmes complexes nécessite une étude multiparamétrique expérimentale. Ce qui peut être synthétisés comme suit :

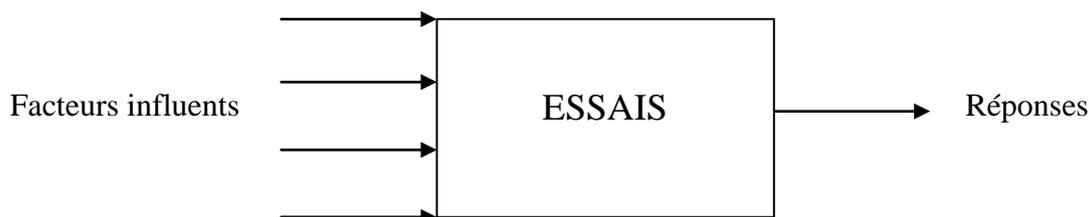


Figure E.1 : Schéma d'un problème expérimental.

On appellera :

- Facteurs : on appelle le facteur une variable ou un état susceptible d'affecter le système étudié.
- Réponse : la réponse du système étudié est la grandeur que l'on mesure pour connaître l'effet des facteurs sur le système. Elle peut être de type quantitatif ou qualitatif.
- Facteur influent : un facteur influent est un facteur qui, lorsqu'il est modifié, modifie la réponse du système. Évidemment, un facteur non influent sera un facteur qui n'a aucun effet sur la réponse du système.

- Niveau d'un facteur : les niveaux d'un facteur indiquent les valeurs que prend le facteur au cours des essais. Le nombre de niveaux d'un facteur représente donc de valeurs attribuées au facteur dans le domaine expérimental.
- Nombre de degré de liberté d'un facteur (ddl) : le nombre de ddl d'un facteur est donné par :

$$\text{DDL} = \text{nombre de niveaux} - 1$$

- Effet d'un facteur : on appelle effet d'un facteur sur la réponse mesurée y , toute variation de y consécutive à un changement de niveau de ce facteur.
- Interaction : lorsque l'effet d'un facteur dépend de la valeur prise par un autre facteur, cela se traduit par une interaction (couplage) entre les deux facteurs.
- Nombre de degrés de liberté d'une interaction : le nombre de ddl d'une interaction entre deux facteurs est le produit des ddl de chacun des deux facteurs.
- Action : on appelle action un facteur ou une interaction entre facteur.

4.3. Ajustement du modèle linéaire

Un modèle linéaire est une équation exprimant une réponse y en fonction de k variables explicatives x_1, \dots, x_k par une relation de la forme (les x_i sont des variables associées aux facteurs ou aux interactions) :

$$y = c + \sum_{i=1}^k a_i x_i + e \quad (\text{E.1})$$

où c et a_i sont les $k+1$ coefficients à estimer et e une erreur aléatoire. L'estimation des coefficients doit minimiser l'écart entre les réponses mesurées y et les réponses estimées à partir du modèle, notées \hat{y} .

La différence entre la réponse mesurée et la réponse estimée, appelée *résidu*, est notée e :

$$e = \hat{y} - y \quad (\text{E.2})$$

L'ajustement du modèle linéaire correspond à l'estimation des coefficients par la méthode des moindres carrés. Ainsi, les valeurs estimées des coefficients notées \hat{a}_i minimisent un indicateur d'erreur qui est la somme des carrés des résidus.

En considérant une réponse observée sur un échantillon de N essais, le modèle s'écrit sous forme matricielle (Figure E.2) avec :

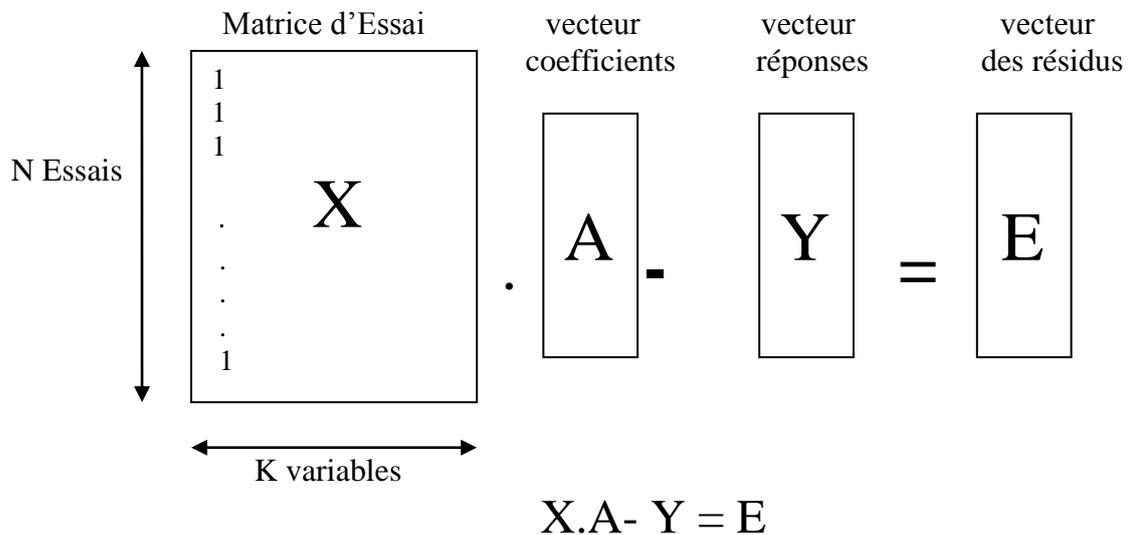


Figure E.2: Représentation matricielles du modèle linéaire.

Avec :

- X matrice des données explicatives ou chaque ligne i est constituée des valeurs des variables x_1, \dots, x_k de l'essai i (la 1^{er} colonne de la matrice est constituée de 1, correspondant au terme constant c ,
- A vecteur colonne groupant les $K+1$ coefficient du modèle estimer,
- Y vecteur colonne groupant les N réponses,
- E vecteur colonne groupant les N erreurs entre modèle et réponses.

En considérant que les facteurs sont contrôlés au cours des différents essais et que la réponse Y suit une loi statique normale (gaussienne), de variance σ^2 constante sur le domaine expérimental (hypothèse réaliste), on obtient donc pour le vecteur des résidus :

- Une espérance nulle,
- Une variance égale à σ^2 .

Soit \hat{Y} les n réponses estimées et \hat{A} l'estimateur des $k+1$ coefficients du modèle linéaire :

$$\hat{Y} = X \cdot \hat{A} \quad (\text{E.3})$$

Les N résidus groupés dans un vecteur- colonne E valent $E = Y - X \cdot \hat{A}$ et la somme des carrés des résidus vaut $E^t E$ la minimisation de cette somme des carrés des résidus revient à calculer :

$$\frac{\partial}{\partial A} E^t E = 0 = \frac{\partial}{\partial A} [(Y - X\hat{A})^t (Y - X\hat{A})] \quad (\text{E.4})$$

$E^t E$ étant un scalaire, cela revient à dériver une fonction puissance :

$$\partial (E^t E) = 2(Y - X\hat{A})^t \partial(Y - X\hat{A}) \quad (\text{E.5})$$

On obtient alors :

$$X^t Y - X^t X \hat{A} = 0 \quad (\text{E.6})$$

La matrice produit $X^t X$ est appelée matrice d'information. Si les colonnes de X sont indépendantes nous obtenons :

$$\hat{A} = (X^t X)^{-1} X^t Y \quad (\text{E.7})$$

E.4. Bases des plans d'expériences

Les différentes approches d'acquisition de connaissance et de modélisation expérimentale, ont comme point commun l'étape cruciale de choix des essais à réaliser (Figure E.3).

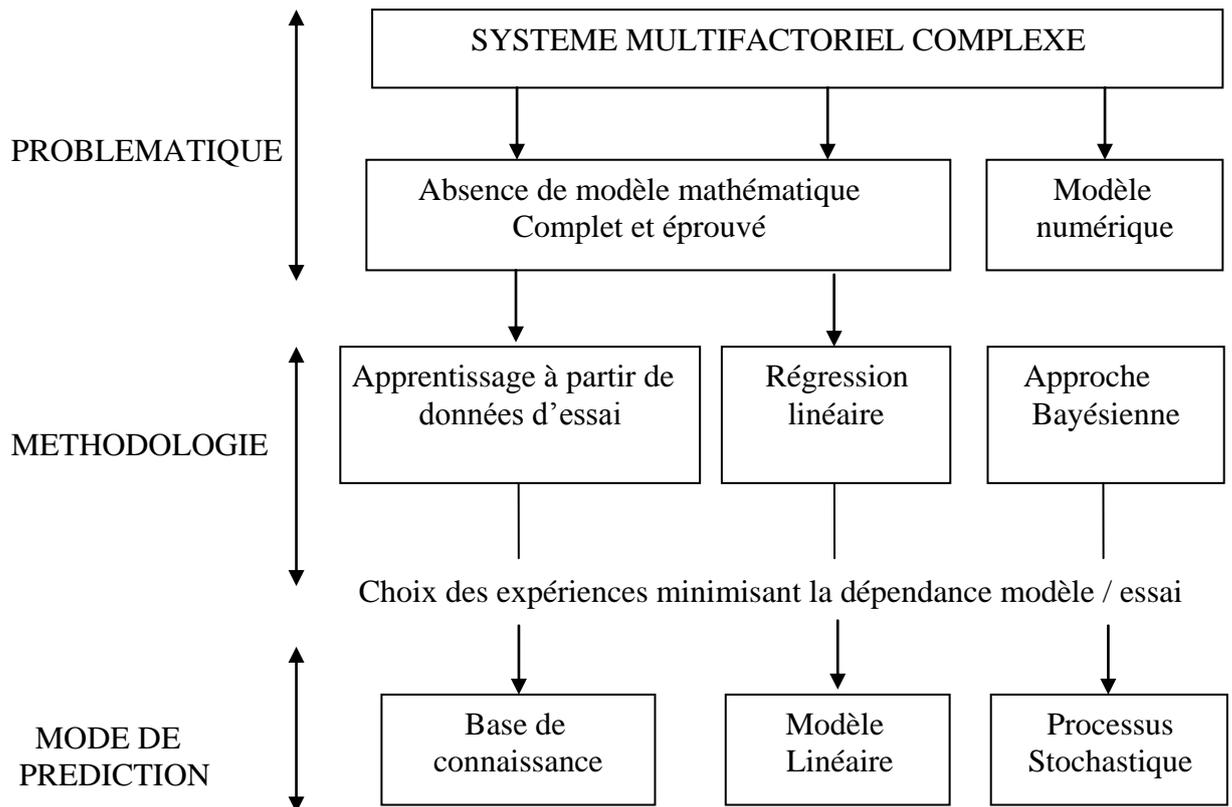


Figure E.3 : Schéma synoptique de l'étude des systèmes multidimensionnels complexes.

En effet, quelque soit la méthodologie des résultats expérimentaux, le modèle est directement lié au choix des essais.

Pour répondre à ce problème, nous présentons dans ce chapitre la méthodologie des plans d'expériences (Box et Hunter, 78 [62]- Taguchi, 87 [63]) qui a pour le but de rationaliser les stratégies expérimentales.

La description des différentes méthodes de construction des plans d'expériences orthogonaux (Box et Hunter, 78-Taguchi, 87) nous conduit à montrer les dangers de l'utilisation de techniques de construction vulgarisées, sans connaître les bases mathématiques et statistiques de ces techniques.

E.4.1. Pathologie des méthodes traditionnelles

Lors d'études expérimentales multiparamétriques, lorsque le nombre de facteurs est supérieur à trois, les stratégies couramment employées pour mener ces expérimentation sont souvent informelles et peu performantes. Elles conduisent en général à de nombreux essais inutiles, et à un volume de résultats difficiles à exploiter.

Supposons que l'on ait à étudier un phénomène physique soumis à l'influence de deux variables notées A et B. la démarche traditionnelle employée de façon intuitive par les expérimentateurs consiste à étudier séparément les deux variables, en faisant varier A de A mini à A maxi en 4 expériences par exemple, et de même pour B (Figure E.3). En huit essais, a-t-on alors vraiment une connaissance du phénomène physique dans le domaine ? Des couplages physiques entre paramètres (synergie ou antagonisme) ne perturberont-ils pas la réponse ?

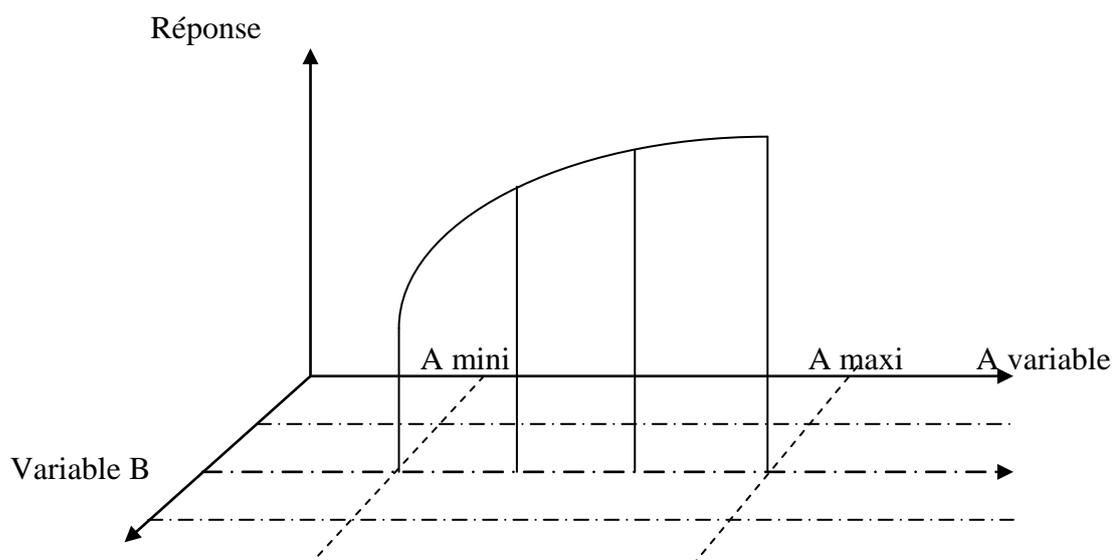


Figure E.4 : Méthodologie traditionnelle d'expérimentation.

Cette démarche correspondant à une étude de sensibilité de la réponse aux différents facteurs, autour du point central du domaine d'étude ; mais elle ne permet pas de connaître la surface de réponse sur l'ensemble du domaine d'étude.

Pour être capable de répondre aux questions précédentes, il faut faire un "maillage" du domaine d'étude des deux variables A et B et réaliser un essai en chacun des nœuds (Figure E.5). Lorsque la modélisation expérimentale se fait à l'aide d'un modèle linéaire, cette démarche peut s'interpréter comme un "développement limité" de la surface de réponse au centre domaine d'étude : c'est la raison pour laquelle toute extrapolation de la modélisation à l'extérieur du domaine d'étude est dangereuse.

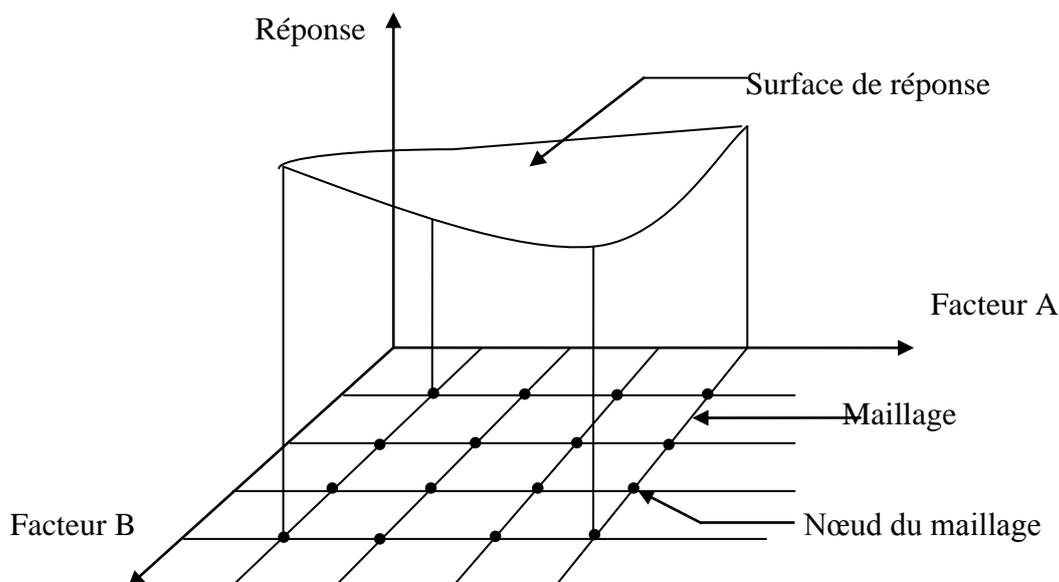


Figure E.5 : Un essai en chaque région du domaine d'après Pillet (1992).

En généralisant au cas d'un système répondant à 7 facteurs supposés influents non linéairement, en prenant 3 valeurs (niveaux) par facteur, il faudrait réaliser $3^7=2187$ essais ! Même en supposant une influence linéaire des facteurs, c'est-à-dire en n'étudiant que 2 niveaux par facteurs (valeurs mini et maxi), $2^7 = 128$ essais seraient nécessaires.

Les nombres des essais étant toujours limité pour des questions de coût et de temps, l'expérimentateur se résout alors à limiter le nombre de facteurs ou (et) à n'examiner que des parties du domaine de variation des facteurs en négligeant par exemple les interactions entre ceux-ci ; cela conduit nécessairement à laisser un doute sur les résultats obtenus.

Le problème se pose alors dans les termes d'une maximisation de connaissances pour un nombre d'essais donné. En faisant varier un seul facteur à la fois, l'expérimentateur chiffre l'effet du facteur en comparant les résultats de seulement deux essais consécutifs. L'effet obtenu est un effet marginal : il explique l'évolution de la réponse pour une combinaison particulière des autres facteurs.

E.4.2. Plans d'expériences

Le principe des plans d'expérience consiste à étudier que certains points du "maillage", tout en appréhendant le phénomène physique dans l'ensemble du domaine. La difficulté de la méthodologie est de choisir ces points de façon optimale.

Les plans d'expériences ont trouvé leurs premières applications dans les recherches agronomiques ou ils étaient particulièrement bien adaptés à l'étude de rendement dans les fermes expérimentales. L'étude des rendements faisant intervenir de nombreux paramètres ; elle nécessitait de définir des stratégies expérimentales qui permettent de rationaliser le nombre d'expériences. Le statisticien Fisher a largement contribué au développement des plans d'expériences par la mise en point de l'analyse de variance et la découverte des principaux dispositifs expérimentaux couramment utilisés en agriculture tels les carrés latins, les carrés gréco-latins et la notion de blocs. La technique des plans d'expériences est maintenant employée dans des domaines aussi divers que l'agriculture, la chimie et la pétrochimie, la biologie, l'électronique, la mécanique. La connaissance de ces méthodes est aujourd'hui un préalable à l'amélioration de la qualité des produits et à la réduction des temps de développement et d'industrialisation.

E.4.3. Fondamentaux mathématiques des plans d'expériences

La démarche des plans d'expériences consiste à définir les expériences qui donnent la meilleure modélisation.

Nous reprenons la notation matricielle du modèle linéaire de la Figure E.2 :

$$Y = X.A + E \quad (\text{E.8})$$

Avec Y le vecteur des N réponses, X la matrice des N essais, A le vecteur des $k+1$ coefficients et E le vecteur des erreurs. L'ajustement des coefficients du modèle correspond à l'estimation des coefficients par la méthode des moindres carrés. Soit \hat{A} l'estimateur des $k+1$ coefficients, on obtient :

$$\hat{A} = (X^t X)^{-1} X^t Y \quad (\text{E.9})$$

L'estimation des coefficients du modèle dépend donc de la matrice d'essais X et des valeurs des réponses.

E.4.3.1. Variance sur les coefficients

Avec les hypothèses et Gauss-Markov tout à fait réalistes (facteurs indépendants et variance de la réponse constante sur le domaine d'étude), on montre que le vecteur E vérifie :

$$esp(E) = 0 \quad \text{et} \quad var(E) = esp(EE^t) = \sigma^2 I_n \quad (\text{E.10})$$

En remplaçant l'expression (4.8) dans (4.9), nous obtenons :

$$\hat{A} = A + (X^t X)^{-1} X^t E \quad (\text{E.11})$$

En calculant l'espérance de l'estimateur des coefficients, nous remarquons que \hat{A} est un estimateur sans biais (l'espérance de l'estimateur est égal à la variable) de A :

$$esp(\hat{A}) = esp(A) + (X^t X)^{-1} X^t esp(E) = A \quad (\text{E.12})$$

Le calcul de la variance sur l'estimation des coefficients se fait en calculant la variance sur ε défini par :

$$\varepsilon = \hat{A} - A = (X^t X)^{-1} X^t E \quad (\text{E.13})$$

$$\text{Soit :} \quad cov(\hat{A}) = E(\varepsilon^t \varepsilon) = E[(X^t X)^{-1} X^t E E^t (X^t X)^{-1}] \quad (\text{E.14})$$

La matrice de variance-covariance des coefficients s'exprime donc par :

$$cov(\hat{A}) = (X^t X)^{-1} \sigma^2 \quad (\text{E.15})$$

Ou les termes diagonaux représentent les variances sur les coefficients ($cov(a_i, a_i) = var(a_i)$) et les termes non diagonaux les covariances entre les coefficients :

$$[cov(a_i, a_j)] = \begin{bmatrix} var(a_1) & \cdots & cov(a_1 + a_k + 1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ cov(a_k + 1, a_1) & \cdots & var(a_{k+1}) \end{bmatrix}$$

Pour quantifier la corrélation entre les facteurs, on définit la matrice de corrélation qui a pour termes :

$$\text{cor}(a_i, a_j) = \frac{\text{cov}(a_i, a_j)}{\sqrt{\text{var}(a_i) \cdot \text{var}(a_j)}} \quad (\text{E.16})$$

E.4.3.2. Optimisation de la matrice de covariance

La matrice de covariance montre que la précision sur les coefficients sera d'autant meilleure que la matrice produit inverse $(X^t X)^{-1}$ aura des termes diagonaux faibles (variances des coefficients faibles) et des termes non diagonaux nuls (facteurs décorrélés). Cette règle est à la base de la construction des plans d'expériences.

La technique des plans d'expériences consiste à combiner les niveaux des facteurs de façon à minimiser les termes de la matrice produit inverse. C'est ce principe qui permet d'explorer un maximum de facteurs, avec un maximum de précision et un minimum d'essais.

Plusieurs critères permettent de minimiser les termes de cette matrice. Toutefois, le plan optimal est un plan tel que :

- Matrice produit $(X^t X)^{-1}$ est diagonale (facteur complémentaire décorrélés),
- Les termes diagonaux sont minima,

Les seules matrices X répondant à ces 2 critères sont des matrices orthogonales : les colonnes de la matrice X sont orthogonales deux à deux.

E.5. Plans d'expériences orthogonaux

Dans ce qui suit nous allons donner succinctement un aperçu des plans d'expériences orthogonaux.

E.5.1. Notion d'orthogonalité d'un plan d'expériences

Voyons tout d'abord d'une manière simple ce que signifie la notion d'orthogonalité.

E.5.1.1. Interprétation géométrique

Nous avons montré que l'estimation des coefficients d'un modèle linéaire par un critère des moindres carrés correspondant à la projection des N réponses dans un espace E^{k+1} , sous-espace de R^N , engendré par les k variables et le terme constant :

$$\hat{Y} = X(X^t X)^{-1} X^t Y = \Pi(Y) \quad (\text{E.17})$$

La matrice d'essais X est une base de E^{k+1} composée de $k+1$ vecteurs linéairement indépendants de R^N . Cette matrice est dite orthogonale lorsque les $k+1$ vecteurs qui la composent sont orthogonaux deux à deux. Cette propriété est vérifiée si et seulement si la matrice carrée $X^t X$ est diagonale, condition vérifiée uniquement pour les matrices combinant des facteurs à deux niveaux.

Remarque : Nous trouvons dans la littérature des plans d'expériences orthogonaux pour un nombre de niveaux des facteurs supérieurs à 2. Ces plans sont appelés orthogonaux au sens de l'orthogonalité d'un plan d'expériences, mais la matrice $X^t X$ n'est pas orthogonale au sens mathématique. Toutefois, les matrices $X^t X$ de ces plans comportent la propriété de quasi-orthogonalité : elles sont orthogonales par blocs.

E.5.1.2. Conséquences pratiques

Si nous appelons action l'effet d'un facteur ou d'une interaction entre facteurs, la condition d'orthogonalité d'un plan d'expériences peut être définie par les deux conditions suivantes :

- Un plan d'expérience est orthogonal vis-à-vis d'un modèle si toutes les actions disjointes du modèle sont orthogonales deux à deux dans le plan,
- La condition nécessaire et suffisante d'orthogonalité de deux actions disjointes est que à chaque niveau de l'une, tous les niveaux de l'autre sont associés le même nombre de fois dans le plan d'expériences.

Nous définissons deux actions disjointes comme deux actions qui ne comportent pas d'action en commun. Par exemple, le facteur A et l'interaction BC sont disjointes, par contre le facteur A et l'interaction AC ne sont pas disjointes car ils comportent l'action A en commun.

Cette condition d'orthogonalité est indispensable pour pouvoir calculer les effets d'un facteur indépendamment des autres facteurs. En effet, lorsque l'on calcule l'effet d'un facteur, il faut que tous les autres facteurs prennent leurs différents niveaux le même nombre de fois sinon l'effet estimé du facteur comportera un biais induit par l'influence des autres facteurs.

E.5.2. Les plans factoriels complets

Voyons comment construire un plan d'expériences complet c'est-à-dire comprenant tous les essais.

E.5.2.1. Méthodologie de construction

Pour étudier une réponse Y en fonction de p facteurs, on réalise les expériences correspondant à toutes les combinaisons possibles de facteurs. Si chaque facteur F_i possède n_i niveaux, alors le nombre d'essais N à réaliser est de :

$$N = \prod_{i=1}^p n_i$$

Si on considère un plan d'expérience à n facteurs de n_i niveaux, le nombre d'expériences sera donc $\prod_{i=1}^n n_i$. Le modèle mathématique associé au plan d'expérience complet est un polynôme du premier degré par rapport à chaque variable. Si, on considère par exemple un plan factoriel à 3 facteurs (x_1, x_2, x_3), le modèle mathématique s'écrit alors :

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 + a_{123}x_1x_2x_3$$

($a_0, a_1, a_2, a_3, a_{12}, a_{13}, a_{23}, a_{123}$) étant les coefficients du modèle.

E.5.2.2. Plans complets à 2 niveaux par facteurs : point de vue mathématique

Plans complets à 2 niveau par facteur, notés 2^k (indiquant le nombre d'essais), sont représentés par les matrices dite de Hadamard. La matrice de Hadamard correspondantes H_{2^p} est obtenue par récurrence :

$$H_1 = (1)$$

$$H_{2^k} = \begin{pmatrix} H_{2^{k-1}} & H_{2^{k-1}} \\ H_{2^{k-1}} & -H_{2^{k-1}} \end{pmatrix} \quad (\text{E.18})$$

Par définition les niveaux des facteurs sont donc notés -1 et 1.

E.5.3. Plans d'expériences fractionnaires

Le plan fractionnaire d'un plan complet est un plan qui permet d'estimer les coefficients du modèle avec beaucoup moins d'essais que ce dernier. Il est obtenu en fractionnant un plan factoriel complet. En général le plan fractionnaire coûte moins cher que le plan complet, mais ce gain sera payé par des ambiguïtés dans l'estimation de certains effets d'actions que l'on appelle des ALLIAS (confusion des effets).

Les travaux de Box et Hunter (1978) [62] et Taguchi (1987) [63] ont débouché sur les plans fractionnaires présentés sous forme de table standards. En fonction des éléments que l'on souhaite prendre en compte dans l'expérimentation :

- Facteur,
- Valeurs (ou niveau) de ces facteurs,
- Interaction entre facteur.

Ces tables permettent de déterminer le nombre d'essai ainsi que les valeurs des facteurs pour chaque essai.

E.5.3.1. Fractionnement d'un plan factoriel complet

Il est possible de couper successivement un plan factoriel complet à partir de plusieurs colonnes mais la diminution du nombre d'essais entraîne des confusions dans la détermination des actions.

En général, les plans fractionnaires sont notés 2^{p-q} (correspondant au nombre d'essai) où p représente le nombre de facteurs étudiés et q le nombre de colonnes de coupure du plan.

E.5.3.2. Méthodologie de construction de Box & Hunter

Box et Hunter ont défini une méthodologie qui consiste à ajouter des colonnes à un plan complet de base. Ces colonnes sont la combinaison linéaire de colonnes du plan complet considéré.

4.5.3.3. Méthodologie Taguchi

Taguchi (1987) a mis au point une méthode originale pour construire des plans fractionnaires. Le problème expérimental doit être synthétisé sous forme des graphes dans lesquels :

- Les facteurs sont représentés par des points,
- Les interactions entre facteur sont représentées par des traits continus liant les points.

Une fois le graphe établi, la construction du plan d'expérience est quasi-immédiates (Pillet, 92 [64]) à partir de tables orthogonales prédéfinies

RÉFÉRENCES

1. Harizi, I. et Bouhini, H., "Modélisation de Chaussée Souple sous une Charge Roulante", Mémoire de PFE, Université Saad Dahlab, Blida, (Octobre 2009), 74 p.
2. Balay, J.M. et Odéon, H., "Cours de Dimensionnement des Structure de Chaussée", Ecole National de Travaux Publique, France, (2008), 37 p.
3. LCTP-SETRA, " Conception et Dimensionnement des Structures de Chaussée-Guide Technique", Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et Services Techniques des Routes et Autoroutes, Paris, (1994), 80 p.
4. Hernández, A.C., "Structures Bitumineuses Épaisses: EME/BBME Cas de la 2^{ème} Rode Autoroutière", Journée sur les Techniques Routières: Couche d'Assise et de Surface, Alger, (15 Avril 2009), 25 p.
5. AASHTO, " AASHTO Guide for Design of pavement Structures", Association of State Highway Transportation Officials, Washington, (1986).
6. Correia, A.G. et Eurocode, " Desing of Pavement Structures", 9th Cost 337 Meeting, (1999).
7. Yoder, E.J. and Wintczak, M.W., "Principales of Pavement Design" , ed. J.W and sons,(1975), New York.
8. Amadeus Management Committee, «Detailed project Elaboration Report", Road Research Center, Brussels, (1998).
9. Bassem, A., "Modèle Numérique pour Comportement Mécanique des Chaussées: Application à l'Analyse de l'Ornièrage ", Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, France, (2006), 130 p.
10. DI Benedetto, H. and Tatsuoka, F., "Small Strain Behavior of Geomaterials: Modelling of Strain Rate Effects", Soils and foundations, VOL 37, N°02, (Juin 1997), p127- 138.
11. Brousseau, Y., "Méthode d'Essai N° 52 Techniques et Méthodes des Laboratoires des Ponts et Chaussées", Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, France, (2005), 38 p.

12. Brousseau, Y., "Les Enrobés à Module Elevé (EME) et les Bétons Bitumineux à Module Elevé (BBME): Etat de l'Art des Techniques Routières en France, Séminaire Sur les Techniques Routières, Alger, (2009), 63 p.
13. Espinoze, M.P., Campero, A., Salcedo, R., *Inorg. Chem.*, 40, 4543-4549, (2001).
14. Xu, H., Que, G., Yu, D., "Energy Fuels", 19, 517-524, (2005).
15. Grigby, R.D. and Green, J.B., "Energy Fuels", 11, 602-609, (1997).
16. Brosseau, Y., "Les Nouveaux Enrobés de Couche de Roulement pour la Construction et l'Entretien des Routes", Séminaires sur les Techniques Routières, Alger, (2009), 54p.
17. Huseby, B., Barth, T., Ocampo, R., *Geochem. Org.*, 25, 273-294, (1996).
18. Doukkali, A., Saoiabi, A., Zrineh, A., Hamad, M., Ferhat, M., Barbe, J.M., Guilard, R., "Energy Fuels", 467-472, (2002).
19. Valery, L., "Béton Bitumineux à Froid", Séminaire sur le Carrefour de la Route Durable, Toulouse (France), (2007), 44 p.
20. Di Benedetto, H., "Modélisation du Comportement des Géomatériaux: Application aux Enrobés Bitumineux et aux Bitumes", Thèse de Doctorat d'Etat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, (1987).
21. Delorme, J.L., Roche, C., et Wendling, L., "Manuel LCTP d'Aide à la Formulation des Enrobés", LCTP Paris (France), (2007), 197 p.
22. Addala, F., "Etude du Comportement Rhéologique des bitumes à Moyenne et Basse Température : Mise au Point d'un Nouvel Essai de Torsion- Compression d'Eprouvette Creuse (T.E.C) ", Thèse Présentée à l'Institut National des Sciences Appliquées, France, (1989).
23. Yen, T.F., "Experimental Evidences Leading to Various Structural Orders of Asphaltenes", *Proceedings of Chemistry of Bitumen*, (1991), 382-407 p.
24. Olard, F., "Etude et Modélisation de Comportement Thermo-Mécanique des Enrobés Bitumineux", Mémoire de Recherche pour l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies du Génie Civil de l'Ecole Doctorale MEGA, France-Lyon, (2000).
25. Olard, F., Di Benedetto, H., Dony, A., Vaniscote, J.C., " Properties of Bituminous Mixtures et Low Temperatures and Relations With Binder Characteristics", 6th International RILEM Symposium on performance testing and Evaluation of Bituminous Materials, Zurich, (2003).

26. Lesueur, D. and Planque, L., " Les Liants Hydrocarbonés: des Bitumes Purs aux Liants Modifiés et Bitumes Spéciaux, Formation sur les Propriétés rhéologique du bitume, Ecole Nationales des Ponts et Chaussées (ENPC), France, (24-27 Mai 2005).
27. Di Benedetto, H. et Corté J.F., " Matériaux Routiers Bitumineux 2", Hermes Lavoisier, VOI 2, (2005).
28. Va Nelstraete, A. et Francken, L., "Ornièrage: Synthèse des Principaux Constats et Resultats", Bulletinn CRR, Numéro 25, 04 ,(1994), p 9-16.
29. Corté, J.F., Brosseand, Y., Kerzreho, J.P., and Spernol, A., " Study of Rutting of Wearing Courses on the L.C.P.C: Test Track", 8th International Conference on Asphalt Pavements, Seattele, (1997).
30. Grimaux, J.P., " Utilisation de l'ornièreur LPC", Bulletin de Liaison des Laboratoires des Poonts et Chaussées. Numéro Spécial V, (1977), p165-172.
31. Norme Française NF P 98-141, Enrobé Hydrocarbonés, Couche de Roulement et Couche de Liaison: Béton Bitumineux à Module Elevé (BBME), (Novembre 1999).
32. Harkat, B. et Bendjaballah, M.H., "Techniques Innovantes et Construction Routières", Projet de Fin d'Etude, Ecole National Polytechnique d'Alger, (2010), 100 p.
33. Fowkers, F., " Dispersion Force Contributions to surface and Interfacialtensions: Contact Angles and heats of Immersion", Contact Angle, Wettability and Adhesion, Advances in Chemistry Series, ACS Washington, (1999).
34. Zisman, N.A., " Relations of the Equilibrium Contact Angle to Liquide and Solid Constitution", Contact Angle, Wettability and Adhesion, Advances in Chemistry Series, ACS Washington, (1999).
35. AFNOR, "Essais Relatifs aux Chaussées", In Recueil de Norme Française, (1995), 542 P.
36. Norme Française NF EN12697-26 Annexe A, Enrobé Hydrocarbonés, Essai Duriez, (2004).
37. Norme Française EF EN12697-31, Enrobé Hydrocarbonés, Essai de Compactage à la Presse de Cisaillement Giratoire, (2004).
38. Norme Française EF EN 12697-22, Enrobé Hydrocarbonés, Essai d'Ornièrage, (2004).
39. Norme Française EF EN 12697-26, Annexe A, Enrobé Hydrocarbonés, Essai Fatigue, (2004).
40. Norme Françaises EN 12697-26, Annexe C, Mélange Bitumineux- Méthode d'Essai pour Mélange Hydrocarboné à Chaud, Essai Module de Rigidité,(2004).

41. Doucet, F. et Auger, B., "Détermination du Module Complexe des Enrobés au Ministère des Transports du Québec", Rapport de Ministère des Transports du Québec, Canada, (2010), 154 p.
42. Norme Française EF EN 12591, Bitume et Liants Bitumineux: Spécification des Bitumes Routiers, (1999).
43. Site PR PLAST: <http://www.pr-industrie.com/f-high-modulus-additive.html>.
44. Norme Française EF EN 933-1, Essai d'Analyse Granulométrique des Granulats, (1990).
45. Norme Française EF EN 933-3, Essai de Coefficient d'Aplatissement des Granulats, (1990).
46. Norme Française EF P 18-591, Essai de Propreté Superficielle des Granulats, (1990).
47. Norme Française EF P 18-597, Essai d'Equivalent de Sable à 10% des Fines, (1990).
48. Norme Française EF P 18-592, Essai de Bleu Méthéline, 1990.
49. Norme Française EF En 1097-6, Essai de Densité spécifique des Granulats, (1990).
50. Norme Française EF P 18-573, Essai Los Angles, (1990).
51. Norme Française EF P18-572, Essai Micro Deval, (1990).
52. Norme Française EN 1426, Essai de Pénétrabilité, (2004).
53. Norme Française EN 1427, Essai Point de Ramollissement-Température Bille et Anneau, (2004).
54. Norme Française ENISO 2592, Essai de Densité relative du Bitume, (1990).
55. Norme Française EF T 66-006, Essai de Ductilité du Bitume, (1999).
56. Norme Française EF T 65-001, Spécifications des bitumes Routiers,(1999).
57. Fiche Technique de RP RPLAST SAHARA.
58. A.S.I., " Orthogonal Arrays and Linear Graphs", Amerccan Supplier Institute, (1987).
59. Norme Française EF P 98-251-2, Essais Statiques sur Mélanges Hydrocarbonés, Essai Marshall, (1992).
60. Norme Française EF EN 12697-6, Mélange Bitumineux, Détermination de la Masse Volumique Apparentte, (Aout 2003).
61. Norme Française EF EN 12593, La température de fragilité FRAASS, 2004.
62. Box, G.E.P., Hunter, W.G., Hunter, J.S, " Statistics for Experimenters : an Introduction to Design", Data Analysis and Model Building. Wiley Interscience, Now York, (1978).
63. Taguchi,G., " Systeme of Experimental Design", Unipub/Kraus International Publication, (1987).

64. Pillet, M., "Introduction aux Plans d'Expériences par la Méthode Taguchi, Les Edditions d'organisation, Paris, (1992).
65. Harizi, I., Bensaïbi, M. et Morsli, M., "Modélisation de Chaussée Souple sous une Charge Roulante", Actes de la 29^{ème} Rencontre de L'AUGC, Tlemcen, Algérie, (29-31 Mai 2011).
66. Harizi, I., Bensaïbi, M. et Morsli, M., "Modélisation des Déformations d'une Chaussée Souple sous Chargement Complexe", Actes de la 1^{er} Congrès International le Génie Civil et le Développement Durable, Tébessa, Algérie, (17-19 Octobre 2011).