

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique
Département Génie Civil



Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du
diplôme d'ingénieur d'état en génie civil

Thème

ENROBES TIEDES A BASE DE ZEOLITHE

Réalisé par :

Zineb BELHADJ

Encadré par :

Pr. M. MORSLI (ENP)

Dr. D. MAGRAMENE (CTTP)

Jury composé de :

Pr. A. BALI (Président de jury)

Pr. R. KETTAB (Examinatrice)

Dr. R. BOUTEMEUR (Examineur)

ملخص:

صناعة المزيج الساخن تحتاج الى طاقة لتسخين المواد المكونة لها. هذا يؤدي الى انطلاق كمية معتبرة من الغازات السامة التي تلوث الجو مما يؤدي الى مشاكل صحة عمومية. و اول من يشعر بالضرر هم العمال المهتمون بتعداد الطرقات. السؤال المطروح هو ايجاد كيفية التقليل من انطلاق الغازات السامة الناتجة عن صناعة المزيج بدون المساس بجودة الطرقات. فقد يكون المزيج الدافئ الحل لهذه المشكلة. لهذا، كان موضوع هذا العمل محاولة التحكم في تقنيات صناعة المزيج الساخن و المزيج الدافئ ثم جعل مقارنة بين تلك التقنيتان من حيث جودة التعبيد و هذا من خلال تجارب ضمن مخابر المكتب الوطني للمراقبة التقنية للأعمال العمومية.

كلمات مفتاحية: مزيج ساخن، مزيج دافئ، تلوث، طاقة

Résumé :

La fabrication des enrobés nécessite l'utilisation d'énergie pour chauffer les matériaux ; ce qui a pour conséquence, des rejets de gaz et de particules fines dans l'atmosphère. Ces émissions entraînent des problèmes de santé publique dont les premières victimes sont les ouvriers appelés à manipuler ces produits sur les chantiers. La question qui se pose alors est, comment réduire la consommation d'énergie dans cette industrie, et donc la pollution engendrée, sans altérer les performances des routes ? Les enrobés tièdes pourraient donc constituer une bonne alternative aux enrobés classiques.

De ce fait, l'objectif de ce projet de fin d'études est de maîtriser les techniques de formulation d'enrobés à chaud et d'enrobés tièdes et de comparer ensuite, sur différents aspects, les performances des uns et des autres au moyen d'essais réalisés au sein du laboratoire de produits noirs du CTTTP.

Mots clefs : enrobés à chaud, enrobés tièdes, pollution, énergie.

Abstract:

The manufacture of hot mix asphalt requires the use of energy for heating the materials; which in turn can cause gas and fine particles emissions in the atmosphere. These emissions cause problems of public health whose first victims are the workers that are required to handle these products on site. The question that arises is how to reduce energy consumption in this industry, and therefore the pollution generated, without affecting the performance of roads? Warm mix could therefore be a good alternative to conventional mixtures.

Therefore, the objective of this project graduation is to master the art of formulation of hot mix and warm mix and then compare different aspects, the performance of each other through tests performed in the CTTTP's laboratory of black products.

Key words: hot mix asphalt, warm mix asphalt, pollution, energy

A maman et papa, pour avoir fait de moi ce que je suis, pour leur soutien indéfectible, leur aide si précieuse, et leur amour inconditionnel,

A Younes et Neila pour avoir apporté, au quotidien, de la joie et du rire dans ma vie,

A ma tante Zoulikha, « Khékha », pour m'avoir guidée dans mes choix,

A ma sœur de cœur, ma cousine et mon amie de toujours, Khadidja,

A mes tantes et oncles,

A mes grands-parents,

A Nazim, pour son aide, sa patience, pour avoir toujours cru en moi et m'avoir sans cesse encouragée à repousser mes limites,

A la mémoire de la petite Rabea et ma tante Saïda, qui vivent toujours dans mon cœur,

Ce travail leur est dédié.

Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier M^{me} MORSLI pour avoir accepté de m'encadrer et m'avoir proposé un sujet aussi passionnant.

Mes remerciements vont également à M. MAGRAMENE du CTPP, pour m'avoir accordé son attention et son aide et m'avoir éclairée de ses bonnes idées.

Je ne saurais oublier les opérateurs du laboratoire de produit noir du CTPP pour leur contribution à la réussite des essais effectués dans le laboratoire de produits noirs. Je citerai Mustapha, Ali, Islem et Hichem.

Je remercie également M^{me} BARKATE (CTPP) pour son aide et sa gentillesse

Je remercie les enseignants de l'ENP, particulièrement M^{me} OUSSEDIK et M. BILEK pour leur dévouement.

Merci également aux membres du jury pour avoir accepté de juger ce travail.

Enfin, je voudrais remercier Nazim pour son immense contribution à ce travail.

Liste des abréviations

CTTP : Contrôle Technique des Travaux Publics	
d/D : Fraction granulaire	
d : petit diamètre	(mm)
D : gros diamètre	(mm)
BBSG : béton bitumineux semi grenu	
BBM : béton bitumineux mince	
BBTM : béton bitumineux très mince	
BBUM : béton bitumineux ultra mince	
HMA : hot mix asphalt	
KGO : Karl Gunnar Ohlson	
LCPC : Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées	
NAT : Nottingham Asphalt Tester	
K : Module de richesse	(%)
TL : Teneur en liant	(%)
PCG : Presse à cisaillement giratoire	
M : Masse	(kg)
G : Grosseur de l'élément	(mm)
E : Epaisseur de l'élément	(mm)
A : Coefficient d'aplatissement	(%)
MDE : Micro-Deval en présence d'Eau	
D_g : Densité des granulats	
V : Volume	(cm^3)
VB : Valeur au Bleu de méthylène	
C : Compacité	(%)
D_b : Densité du bitume	
Σ : surface spécifique	(%)
MVR : Masse Volumique Réelle des granulats	(g/cm^3)
D_{th} : densité théorique	
H : hauteur	(mm)
S : Stabilité Marshall	(kN)
F : fluage	(mm)
ITS : résistance à la traction	(GPa)
ITSR : rapport de résistances en traction indirecte	
ITS_h : résistance des éprouvettes immergées dans l'eau	(GPa)
ITS_s : résistance des éprouvettes conservées à l'air libre	(GPa)
ρ : masse volumique	(g/cm^3)
E^* : module complexe	(MPa)
Φ : déphasage	
S_m : module de rigidité	(Mpa)
ν : coefficient de Poisson	
C1 : conservation des éprouvettes à l'air libre	
C2 : conservation des éprouvettes dans une étuve à 40°C pendant 48h	

Table des matières

INTRODUCTION.....	1
Chapitre I : LES ENROBES BITUMINEUX.....	5
I.1 Introduction.....	5
I.2 Définition d'un enrobé bitumineux.....	5
I.3 Les constituants d'un enrobé.....	6
I.3.1 Granulats.....	6
I.3.2 Les liants hydrauliques.....	9
I.4 Les différents types d'enrobés.....	10
I.5 Conclusion.....	13
Chapitre II : LES ENROBES TIEDES.....	15
II.1 Introduction.....	15
II.2 Définition des enrobés tièdes.....	15
II.3 Avantages des enrobés tièdes.....	16
II.4 Principe des enrobés tièdes.....	16
II.5 Techniques des enrobés.....	17
II.5.1 Additivation du bitume.....	17
II.5.2 Enrobage séquencé.....	17
II.5.3 Moussage du bitume.....	18
II.6 Zéolithe dans les enrobés tièdes.....	19
II.6.1 Présentation de la zéolithe.....	19
II.6.2 Principe général.....	20
II.6.3 Avantage de la formulation avec ajout de zéolithe.....	20
II.7 Conclusion.....	20
Chapitre III : FORMULATION DES ENROBES ET ESSAIS.....	22
III.1. Introduction.....	22
III.2. Formulation des enrobés.....	22
III.2.1. La méthode Marshall.....	22
III.2.2. La méthode Française LCPC.....	24
III.3. Identification des matériaux.....	26
III.2.1 Essais sur granulats.....	26
III.2.2. Essais sur bitume.....	35

III.2.3. Essai d'identification de la zéolithe	41
III.4. Procédure de fabrication de l'enrobé à chaud	43
III.3.1. Etuvage des granulats	44
III.3.2. Etuvage du bitume	45
III.3.3. Malaxage.....	45
III.3.4. Remplissage des moules	46
III.3.5. Compactage des éprouvettes.....	47
III.3.6. Démoulage des éprouvettes	47
III.5. Procédure de fabrication de l'enrobé tiède	48
III.4.1. Etuvage des granulats et du bitume	48
III.4.2. Malaxage.....	48
III.4.3. Remplissage des moules	48
III.4.4. Conservation des éprouvettes	49
III.6. Caractéristiques des éprouvettes.....	49
III.6.1. Mesure des hauteurs et calcul des densités théoriques	49
III.6.2. Essai Marshall.....	50
III.6.3. Essai Duriez (Tenue à l'eau).....	52
III.6.4. Essai de tenue à (l'eau sensibilité de l'eau)	52
III.6.5. Mesure de la masse volumique apparente par pesée hydrostatique et calcul de la compacité	55
III.6.6. Mesure du module complexe	57
III.7. Conclusion	59
Chapitre IV : RESULTATS D'ESSAIS ET INTERPRETATION.....	61
IV.1 Introduction	61
IV.2 Résultats des essais d'identification	61
IV.2.1 Identification des granulats.....	61
IV.2.2 Identification du bitume.....	63
IV.2.3 Identification de la Zéolithe.....	63
IV.3 Résultats des essais sur enrobés	64
IV.3.1. Formulation de l'enrobé.....	64
IV.3.2. Résultats des performances.....	65
IV.4 Conclusion.....	69
Chapitre V : COMPARATIF ECONOMICO-ENVIRONNEMENTAL.....	71
V.1 Introduction.....	71

V.2 Comparaison des performances	71
V.3 Consommation de fuel	72
V.4 Bilan écologique	72
V.5 Bilan économique	73
V.6 Conclusion	74
CONCLUSION	76
Bibliographie	78
Annexe	80
Annexe1. Identification granulats.....	81
Annexe2. Essai d'identification du bitume.....	87
Annexe3. Essai sur zéolithe.....	89
Annexe4. Essai sur éprouvettes	91

Liste des figures

Figure 1.1 : Enrobés bitumineux	5
Figure 1.2: Mélange de granulats	6
Figure 1.3: Classement des granulats selon les dimensions	8
Figure 1.4: Le bitume	9
Figure 1.5: Classification des enrobés selon la température de fabrication	11
Figure 2.1: Moussage du bitume avec pression	18
Figure 2.2: Principe de moussage du bitume sans pression	19
Figure 2.3 : Zéolithe	19
Figure 3.1: Organigramme de la méthode de formulation Marshall	24
Figure 3.2: Méthode de formulation Française LCPC	25
Figure 3.3: Série de tamis de l'analyse granulométrique.....	27
Figure 3.4: Exemple de classement d'une colonne de tamis	27
Figure 3.5: Dimension d'un granulat	28
Figure 3.6: Série de grilles de l'essai d'aplatissement.....	29
Figure 3.7: Machine Los Angeles	30
Figure 3.8: Jarre de l'essai Micro-Deval.....	31
Figure 3.9: Pycnomètre	33
Figure 3.10: Essai de bleu de méthylène.....	34
Figure 3.11: Matériel de l'essai du point de ramollissement	35
Figure 3.12: Essai du point de ramollissement	36
Figure 3.13: Appareil de l'essai de pénétrabilité	37
Figure 3.14: Schéma représentant l'essai de pénétrabilité.....	37
Figure 3.15: Ductilimètre	38
Figure 3.16: Schéma représentant l'essai de ductilité du bitume.....	39
Figure 3.17: Test d'adhésivité.....	40
Figure 3.18: Analyse granulométrique de la zéolithe.....	42
Figure 3.19: Mesure de la densité de la zéolithe	42
Figure 3.20: Mesure de la teneur en eau de la zéolithe	43
Figure 3.21: Etuvage des granulats	44
Figure 3.22: Etuvage du bitume	45
Figure 3.23: Mélange des granulats et du bitume	45
Figure 3.24: Malaxage de l'enrobé	46
Figure 3.25: Remplissage des moules	46
Figure 3.26: Compacteur.....	47
Figure 3.27: Démoulage des éprouvettes	48
Figure 3.28: Principe de l'essai Marshall	50
Figure 3.29: Eprouvettes dans un bain à 60°C	51
Figure 3.30: Ecrasement des éprouvettes pour l'essai Marshall.....	51
Figure 3.31: Schéma représentant le principe de l'essai Duriez.....	52
Figure 3.32: Conservations des éprouvettes.....	53
Figure 3.33: Ecrasement des éprouvettes en traction indirecte	54

Figure 3.34: Pesée des éprouvettes à l'air et dans l'eau	55
Figure 3.35: Schéma du principe d'Archimède	56
Figure 3.36: Essai de mesure du module dans le NAT	58
Figure 4.1: Courbe granulométrique des différentes fractions granulaires	61
Figure 4.2: Courbe granulométrique de la zéolithe	63
Figure 4.3: Courbe granulométrique du mélange	64
Figure 4.4: Histogrammes de la stabilité Marshall	66
Figure 4.5: Histogrammes du fluage	66
Figure 4.6: Histogrammes du quotient Marshall	67
Figure 4.7: Histogrammes de la tenue à l'eau	67
Figure 4.8: Eprouvettes effritées dans le bain à 40°C	68
Figure 4.9: Histogramme du module de rigidité	68
Figure 1: Résultats du module complexe pour l'enrobé à chaud 1	99
Figure 2: Résultats du module complexe pour l'enrobé à chaud 2	100
Figure 3: Résultats du module complexe pour l'enrobé avec 1% de zéolithe 1	101
Figure 4: Résultats du module complexe pour l'enrobé avec 1% de zéolithe 2	102
Figure 5: Résultats du module complexe pour l'enrobé avec 0.3% de zéolithe 1 conservation C1	103
Figure 6: Résultats du module complexe pour l'enrobé avec 0.3% de zéolithe 2 conservation C1	104
Figure 7: Résultats du module complexe pour l'enrobé avec 0.3% de zéolithe 1 conservation C2	105
Figure 8: Résultats du module complexe pour l'enrobé avec 0.3% de zéolithe 2 conservation C2	106

Liste des tableaux

Tableau 1-1: Spécifications européennes pour bitumes purs	10
Tableau 4-1: Caractéristiques des granulats	62
Tableau 4-2: Caractéristiques du bitume.....	63
Tableau 4-3: Caractéristiques de la zéolithe.....	63
Tableau 4-4: Pourcentage des constituants et surface spécifique.....	64
Tableau 4-5: Module de richesse, teneur en bitume et masse volumique du mélange	65
Tableau 4-6: Performances des enrobés	65
Tableau 5-1: Tableau comparatif des performances	71
Tableau 5-2: Bilan écologique	73
Tableau 5-3: Coût supplémentaire d'un enrobé tiède par ajout de zéolithe	73
Tableau 1: Analyse granulométrique du gravier 8/15	81
Tableau 2: Analyse granulométrique pour le gravier 3/8.....	82
Tableau 3: Analyse granulométrique pour le sable 0/3.....	83
Tableau 4: Aplatissement du gravier 8/15.....	84
Tableau 5: Aplatissement du gravier 3/8.....	84
Tableau 6: Résultats de l'essai Los Angeles.....	85
Tableau 7: Résultats de l'essai Micro-Deval en présence d'eau	85
Tableau 8: Résultats de la mesure de la densité des granulats	86
Tableau 9: Résultats de l'essai Bille-anneau	87
Tableau 10: Résultats de l'essai de pénétrabilité	88
Tableau 11: Résultats de l'essai AKZOO	88
Tableau 12: Analyse granulométrique de la zéolithe	89
Tableau 13: Résultats de la mesure de densité de la zéolithe.....	90
Tableau 14: Résultats de la teneur en eau de la zéolithe.....	90
Tableau 15: Caractéristiques géométriques des éprouvettes de la formulation à chaud	91
Tableau 16: Caractéristiques géométriques des éprouvettes de la formulation avec ajout de 1% de zéolithe	91
Tableau 17: Caractéristiques géométriques des éprouvettes avec ajout de 0.3% de zéolithe..	92
Tableau 18: Densité des enrobés formulés à chaud	93
Tableau 19: Densité des enrobés tièdes avec 1% de zéolithe	93
Tableau 20: Densité des enrobés tièdes avec 0.3% de zéolithe	94
Tableau 21: Mesure de la compacité des enrobés formulés à chaud.....	95
Tableau 22: Mesure de la compacité des enrobés tièdes avec 1% de zéolithe.....	95
Tableau 23: Mesure de la compacité des enrobés tièdes avec 0.3% de zéolithe.....	95
Tableau 24: Stabilité Marshall de l'enrobé formulé à chaud.....	96
Tableau 25: Stabilité Marshall de l'enrobé tiède avec 1% de zéolithe	96
Tableau 26: Stabilité Marshall de l'enrobé tiède avec 0.3% de zéolithe	97
Tableau 27: Tenue à l'eau de l'enrobé formulé à chaud	98
Tableau 28: Tenue à l'eau de l'enrobé tiède avec 0.3% de zéolithe	98

INTRODUCTION

Les voies de communications terrestres ont toujours existé et n'étaient autrefois que des sentiers frayés à travers les campagnes, les forêts, les montagnes... Cependant, l'existence des premières routes telles qu'on les connaît aujourd'hui remonte à l'époque de l'empire romain. Celles-ci se caractérisaient par des tracés, le plus souvent rectilignes, par des ouvrages d'art comme les ponts et les ponceaux, des bornes militaires qu'on rencontrait chaque mille romain, des arcs de triomphes aux entrées des villes et des chaussées qui, parfois, sont renforcées par des pieux ou des poutres sur les terrains instables. (planete-tp)

Les routes ont toujours contribué au développement économique et social des peuples. La majeure partie du transport des hommes et des marchandises se fait par routes. Selon une estimation qui remonte aux années 2000, la terre disposait de plus de 32, 345,165 km de route et celles-ci ne cessent d'augmenter. (cosmovisions)

L'ère de la mondialisation que nous vivons actuellement ne peut se faire sans le développement d'un réseau routier assez dense. Cela induit alors une consommation en enrobés non négligeable. En 2007, elle s'élevait à près de 1.6 milliards de tonnes. (paquin, 2009)

L'Algérie est un pays en voie de développement, et pour atteindre ses objectifs, il doit d'abord densifier son réseau routier. C'est pour cela qu'il vient dernièrement de se doter de « l'autoroute est-ouest », qui traverse l'Algérie d'est en ouest reliant ainsi la Tunisie au Maroc et de « la transsaharienne », qui elle, le traversera du nord au sud et reliera la côte méditerranéenne au Mali. Notre réseau routier s'estime à plus de 109 452 km de route. (Présidence de la république algérienne)

Ces dernières années, le réchauffement climatique est d'actualité car il est ressenti dans le monde entier. La pollution due aux émanations de gaz à effet de serre en est la première cause. Il est donc primordial de réduire notre consommation énergétique et nos déchets. La protection de l'environnement représente un enjeu majeur. Avec la signature des accords de Kyoto, l'Union Européenne s'est même engagée à réduire les gaz à effets de serre deux fois plus que ce qui avait été convenu. Depuis le début des années 2000, cette préoccupation de protection de l'environnement a été placée au cœur des axes de travail des services de recherches et développement des grandes entreprises routières et des sociétés pétrolières. La mise au point des enrobés tièdes représente une étape importante de ce programme et

constitue une concrétisation opérationnelle des démarches de développement durable et de protection efficace de l'environnement.

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 différents procédés de mélange et tout en respectant les normes ou spécifications sur le produit bitumineux ainsi fabriqué et mis en service. Cela signifie que 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.

Les travaux entrepris dans ce projet de fin d'étude visent avant tout une immersion dans le domaine des produits noirs, dans un milieu professionnel, et une ouverture sur les techniques nouvelles plus respectueuses de l'environnement.

Ce mémoire comporte cinq chapitres:

Le **premier chapitre** est dédié aux enrobés bitumineux, leurs constituants, leurs caractéristiques, ainsi que leur formulation.

Dans le **deuxième chapitre**, nous présentons un état de l'Art sur les enrobés tièdes : définition, description des différents procédés pour leur formulation et bilan sur les recherches en cours.

Le **troisième chapitre** est consacré à la description des essais : identification des matériaux, formulation d'un enrobé à chaud et d'un enrobé tiède et caractéristiques des éprouvettes.

Le **quatrième chapitre** quant à lui est axé sur les résultats des essais et leur interprétation.

Enfin, le **cinquième chapitre** est un comparatif entre les deux formulations réalisées du point de vue performances, écologie et économie.

Chapitre I : LES ENROBES BITUMINEUX

I.1 Introduction

Une chaussée doit permettre la circulation convenable des véhicules. Elle est structurée à partir de couches d'assises, d'une couche de roulement et éventuellement d'une couche de liaison intermédiaire. Les couches d'assises (base et fondation) assurent la protection thermique de la plate-forme et apportent à la chaussée la résistance mécanique aux contraintes générées par le trafic. La couche de roulement représente la dernière étape de la technique routière. La majorité des chaussées algériennes sont réalisées à base d'enrobés bitumineux : grave bitume en couche d'assise et béton bitumineux en couche de roulement.

I.2 Définition d'un enrobé bitumineux

Un enrobé est un mélange de granulats et de fines recouverts d'un liant hydrocarboné. Ils sont utilisés pour la réalisation de chaussées. Il en existe différents types. Ces derniers se distinguent entre eux par la distribution granulométrique, le type et la teneur en liant, le procédé de fabrication et éventuellement l'ajout d'additifs. (ROBER & LAFON, 2011/2012)

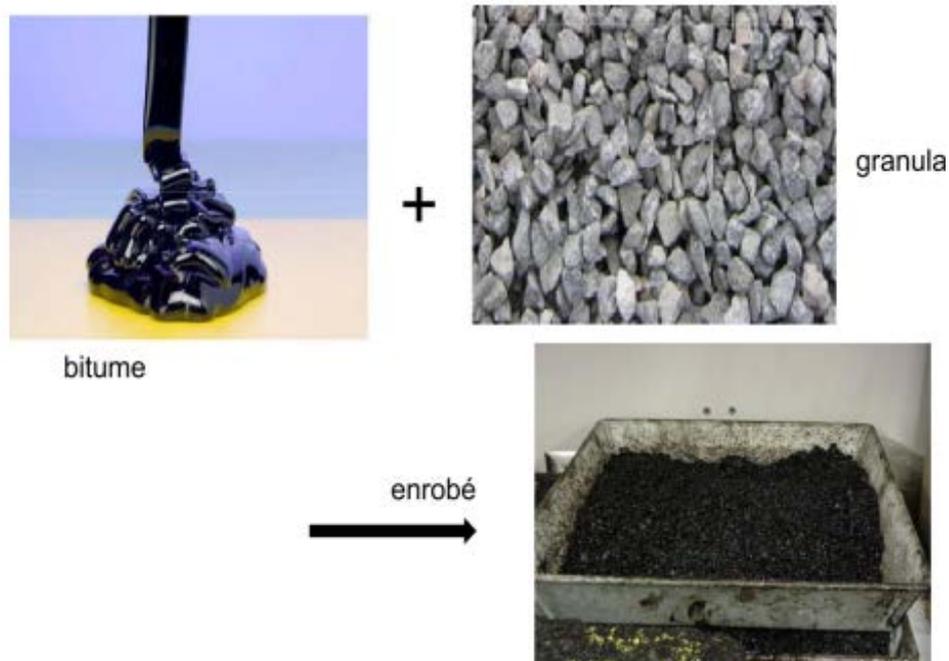


Figure 1.1 : Enrobés bitumineux

I.3 Les constituants d'un enrobé

I.3.1 Granulats

Les granulats représentent plus de 90% de la masse de l'enrobé. Ils proviennent de diverses origines, répondent à une définition précise et sont caractérisés par un certain nombre de paramètres. (CIMbéton)

I.3.1.a. Définition

Les granulats sont des roches fracturées utilisées dans les secteurs du bâtiment et des travaux publics. Leur diamètre ne dépasse pas les 125mm.

Les granulats contenus dans un enrobé constituent son squelette granulaire dont le rôle est de reprendre les efforts auxquels sera soumise la chaussée.

Il existe plusieurs types de roches, qui, selon leur origine, sont classées dans 3 grandes familles :

- Roches magmatiques (formées par la solidification du magma après refroidissement)
- Roches sédimentaires (formées à la surface de la terre par accumulation de dépôts sédimentaires sous l'action du vent et des eaux)
- Roches métamorphiques (formées à partir des roches magmatiques et sédimentaires, soumises à de fortes pressions et à des températures élevées) (CIMbéton) (ROBER & LAFON, 2011/2012)



Figure 1.2: Mélange de granulats

1.3.1.b. Les types de granulats

Les granulats peuvent être classés suivant leur origine et leurs dimensions.

1.3.1.c. Classement selon l'origine

Les granulats sont classés selon leur origine et leur provenance de la façon suivante :

i. Granulats naturels

- Issus de roche massive : il s'agit souvent de gisement de roches dures. Elles peuvent être calcaires ou éruptives. L'extraction se fait généralement par abattage et concassage de la roche à l'aide d'explosifs, ce qui leur confère leur forme souvent angulaire. Les granulats sont ensuite lavés (surtout dans le cas de roches calcaires contenant une forte quantité d'argile nuisible) et criblés.
- Issus de roche meuble: souvent de forme roulée acquise par l'érosion, ce sont des sédiments d'origine alluvionnaire, déposés par l'ère glaciaire, ou issus des dépôts marins. Ils sont généralement lavés pour les débarrasser de l'excès d'argile et des impuretés nuisibles et criblés selon la granularité désirée.

ii. Granulats artificiels

Ce sont des granulats résultants le plus souvent de la transformation thermique de minéraux. Ils peuvent être des sous-produits industriels tels que les laitiers issus de l'industrie de haut fourneau ou des granulats à hautes caractéristiques élaborés spécialement pour répondre à certaines exigences.

iii. Granulats recyclés

Ce sont des granulats issus de matériaux inorganiques déjà servis dans le secteur de la construction tel que le fraisât d'enrobés bitumineux et le béton concassé de démolition. (CIMbéton)

1.3.1.d. Classement selon les dimensions

Selon leurs dimensions, les granulats sont classés par classes granulaires. La classe granulaire « d/D » est composée de granulats dont le diamètre est compris entre d et D.

Selon la norme NF P 18-101, les granulats ont été répartis dans les différentes familles:

- Les fines 0/D avec $D \leq 0,08$ mm,
- Les sables 0/D avec $D \leq 6,3$ mm,
- Les gravillons d/D avec $d \geq 2$ mm et $D \leq 31,5$ mm,
- Les cailloux d/D avec $d \geq 20$ mm et $D \leq 80$ mm,
- Les graves d/D avec $d \geq 6,3$ mm et $D \leq 80$ mm

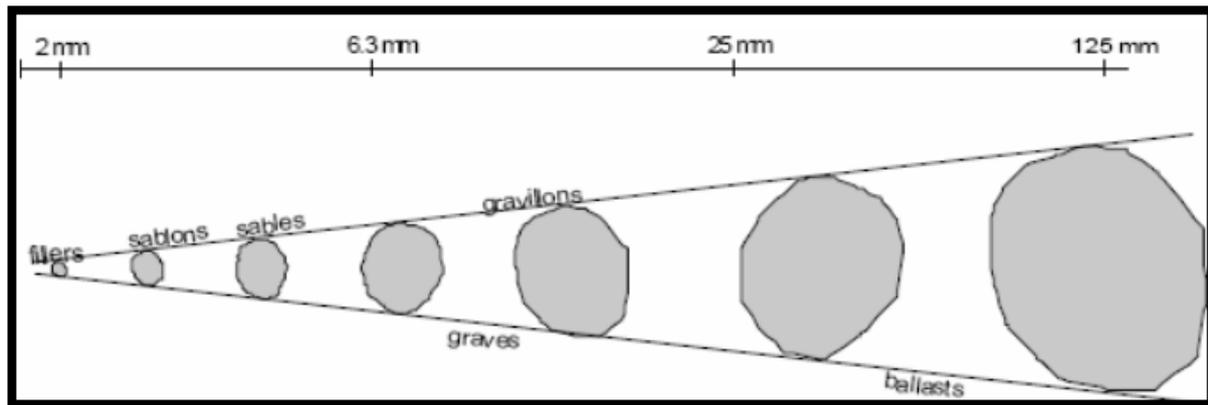


Figure 1.3: Classement des granulats selon les dimensions

En Algérie, les granulats sont classés d'une manière différente. En effet, les différentes fractions granulaires sont: 0/3, 3/8, 8/15 et 15/25. La fraction granulaire 3/8, par exemple, ne comprend que des granulats de diamètres compris entre 3mm et 8mm.

Chaque fraction granulaire comporte plusieurs classes granulaires qui correspondent aux différents tamis. (GHOMARI & BENDI-OUIS, 2007)

1.3.1.e. Caractéristiques des granulats

i. Caractéristiques intrinsèques des granulats

Les caractéristiques intrinsèques des granulats dépendent de la qualité de la roche dont ils sont extraits.

- La masse volumique
- L'absorption d'eau et la porosité
- La résistance à la fragmentation et au polissage
- Sensibilité au gel

ii. Caractéristiques de fabrications

Les caractéristiques de fabrications dépendent de la méthode de production des granulats.

- La granularité
- L'angularité
- La forme (aplatissement)
- La propreté.

I.3.2 Les liants hydrauliques

I.3.2.a. Définition d'un liant hydrocarboné

Le liant hydrocarboné est une matière visqueuse constituée principalement d'atomes de carbone et d'hydrogène. Il permet de souder les granulats entre eux pour former un ensemble cohérent. Ce liant est aussi appelé « liant noir » par opposition au liant hydraulique utilisé pour le béton de ciment.



Figure 1.4: Le bitume

I.3.2.b. Types de liants hydrocarbonés

i. Le goudron

Le goudron est produit par pyrogénéation de matières végétales telles que le bois ou la tourbe. La pyrogénéation est une réaction chimique obtenue en soumettant un corps végétal à une température élevée. Il n'est plus utilisé dans l'industrie du fait qu'il soit cancérigène pour l'homme.

ii. Le goudron de houille

Le goudron de houille est un liquide noir et visqueux. Il s'agit d'un sous-produit de la distillation de la houille lors de la fabrication du charbon. Tout comme le goudron, il a été démontré qu'il était nocif pour la santé et donc remplacé par le bitume dans les infrastructures routières.

iii. Le bitume

Les bitumes sont surtout composés de carbone et d'hydrogène, d'où leurs nom d'hydrocarbures. Le bitume est utilisé dans l'industrie pour ses propriétés d'étanchéité et d'isolation (thermique et acoustique). Néanmoins, les applications routières sont les plus nombreuses, puisque 90% de la production de bitume est utilisée sous forme d'enrobés et d'enduits superficiels. Par ailleurs, on estime que la totalité des réserves mondiales de pétrole brut devrait dépasser les 600Gt, ce qui laisse présager un long et bel avenir à cette industrie. (Nynas Belgium AB, 2005) (SHELL BITUMES, 1991)

Le bitume a la capacité de lier les granulats entre eux, il confère ses propriétés rhéologiques au mélange. Les propriétés viscoélastiques des bitumes déterminent le comportement dynamique des couches bitumineuses sous l'action des véhicules. (CTTP, 2004)

Tableau 1-1: Spécifications européennes pour bitumes purs

caractéristiques		Pénétrabilité à 25°C (×0.1mm)	Point de ramollissement (°C)	Point d'éclair, minimum (°C)
Normes		EN 1426	EN 1427	EN 22592
Désignation des classes appropriées	23/30	20-30	55-63	240
	35/50	35-50	50-58	
	50/70	50-70	46-54	230
	70/100	70-100	43-51	
	160/220	160-220	35-43	220

I.4 Les différents types d'enrobés

Il existe différents types d'enrobés qui généralement se distinguent entre eux par les fractions granulaires, le type et la teneur du liant, le procédé de fabrication et les éventuels additifs.

Une des classifications des enrobés est basée sur la température de fabrication.

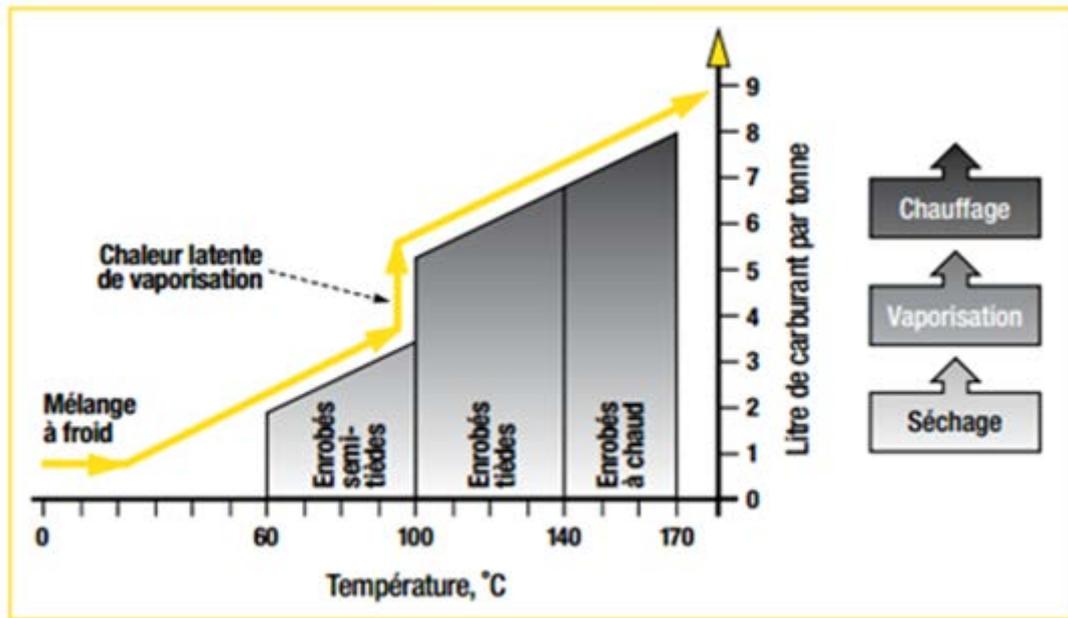


Figure 1.5: Classification des enrobés selon la température de fabrication

1.3.3.a. Les enrobés à chaud

Ce sont des enrobés fabriqués à une température proche de 180°C et mis en œuvre à une température proche de 150°C.

On peut distinguer :

- **Les bétons bitumineux**: utilisés pour les couches de roulement, ils correspondent aux bétons bitumineux semi-grenus (BBSG). Malgré leurs bons résultats du point de vue de l'adhérence, ils ont été remplacés par de nouvelles techniques plus performantes et moins coûteuses du fait de leur épaisseur moins importante. On citera le béton bitumineux mince (BBM), le béton bitumineux très mince (BBTM) et le béton bitumineux ultra mince (BBUM). Cela est possible grâce à l'utilisation de bitumes modifiés par l'ajout de polymère, de poudrettes de caoutchouc ou de fibres synthétiques. (cours-genie-civil)
- **Graves bitumes** : utilisées pour les assises de chaussées, il s'agit d'un enrobé composé de granulats de dimensions 0/20 et de 4% de bitume relativement dur (35/50). (cours-genie-civil)
- **Enrobés à module élevé** : ils sont utilisés dans les couches d'assise de chaussées et la couche de liaison. Pour obtenir cet enrobé, il aura été nécessaire d'utiliser un bitume très dur (20/30) voir hyper dur (10/20) afin d'augmenter le module de rigidité de l'enrobé, ce qui permettra de minimiser le problème de l'ornièrage. (cours-genie-civil)

- **Enrobés drainants** : il s'agit d'un matériau utilisé dans les couches de roulement. Il est caractérisé par une teneur en vide comprise entre 20 et 25% ce qui le rend perméable. Cette perméabilité est obtenue par l'utilisation de granularité discontinue. Le rôle de cet enrobé est d'évacuer les eaux par temps de pluie et ainsi d'éviter les projections d'eau. Il présente aussi l'avantage de réduire le bruit de roulement dû au trafic routier. (cours-genie-civil)

1.3.3.b. Les enrobés tièdes

L'objectif est de fabriquer des enrobés à chaud à température moins élevée (séchage des granulats, enrobage), tout en conservant des performances identiques aux enrobés à chaud de même type (qualité de l'enrobage, maniabilité, compacité, caractéristiques de surface). Le but poursuivi est la diminution de la facture énergétique globale (séchage, vaporisation de l'eau), la réduction des différentes nuisances associées aux techniques bitumineuses à chaud : les gaz à effets de serre, la quantité et la qualité des fumées à la centrale de fabrication et sur le chantier d'application.

Le principe est d'enrober autrement qu'à chaud (140 à 180°C) pour avoir :

- Un enrobage complet et uniforme,
- Un liant sans agents fluxant ou fluidifiants,
- Des propriétés mécaniques nominales dès la fin de la mise en œuvre, par un abaissement des températures de fabrication et de compactage, selon un procédé de fabrication, avec ou sans ajout, capable de maîtriser la viscosité du liant, jusqu'à la fin de la mise en œuvre.

1.3.3.c. Les enrobés semi-tièdes

La plage de températures est comprise entre 70 et 100°C. Sa technologie de production requiert une émulsion bitumineuse ou de la mousse de bitume. Celles-ci ont pour principal effet de réduire la viscosité du liant par un effet émulsifiant ou par une expansion volumique (dans le cas de la mousse).

1.3.3.d. Les enrobés froids

Il s'agit d'enrobés fabriqués et mis en place à température ambiante. Le principe repose sur le fait de mélanger les granulats à une émulsion de bitume ou à un bitume préalablement fluidifié par un solvant ou une huile légère. Ils sont principalement utilisés pour les couches de surface afin d'apporter une bonne adhérence et plus souvent pour corriger les imperfections de surfaces tels que les nids de poules et les fissures. (cours-genie-civil)

I.5 Conclusion

Les enrobés bitumineux sont incontournables dans la construction routière et particulièrement dans la réalisation de chaussées souples. La révolution du transport routier n'aurait pu se faire sans le succès des enrobés dits « à chaud » réputés pour leurs performances remarquables. Néanmoins, leur fabrication requière la consommation de beaucoup d'énergie et nécessite une mise en œuvre à haute température, ce qui a pour conséquence de graves problèmes de santé publique et ce, à cause de la pollution atmosphérique qui en résulte. En effet, les émanations de gaz à effet de serre et de particules fines dus au secteur routier ne sont pas négligeables.

A la fin du XX^{ème} siècle, plusieurs types d'enrobés ont été mis au point pour répondre aux attentes des utilisateurs et une réflexion a été menée pour essayer de réduire l'impact du secteur routier sur l'environnement. Pour ce faire, plusieurs études ont été entreprises afin de créer un enrobé répondant aux exigences de sécurité et nécessitant une moindre consommation d'énergie, et donc qui engendrerait une pollution moins importante.

Chapitre II : LES ENROBES TIEDES

II.1 Introduction

Les préoccupations des politiques routières des pays industrialisés ne se concentrent plus seulement sur l'amélioration de la sécurité des usagers et sur le confort des déplacements routiers, mais également sur la protection de l'environnement. A cet effet, la mise au point des enrobés tièdes devient inéluctable pour limiter la contribution de la construction routière à la pollution atmosphérique.

Les enrobés tièdes ont commencé à être développés en Europe au début des années 90 et, c'est en 1995, en Allemagne, que les premières techniques avec ajout de zéolithe ont été mises au point en laboratoire.

En 1997, la première chaussée à base d'enrobés tièdes est réalisée à Hambourg en utilisant la méthode à base de cire. Mais ce n'est que durant les années 2000 que les techniques se développent et s'affinent grâce aux recherches des différentes entreprises privées.

Par la suite, les enrobés tièdes se répandent à travers l'Europe et traversent l'atlantique pour être expérimentés aux Etats-Unis. (Bueche, 2011)

II.2 Définition des enrobés tièdes

Un enrobé tiède est un enrobé dont les températures de fabrication et de mises en œuvre sont moins élevées que celles des enrobés conventionnels, et ce, sans altérer leurs performances. En d'autres termes, les performances de ces enrobés tièdes sont strictement identiques à celles de enrobés à chaud. Dès la fin de leur mise en œuvre ou de leur mise en service (à la différence des enrobés à froid, nécessitant une période plus ou moins longue de murissement).

« On peut définir de manière générale les enrobés à faibles impacts comme des mélanges bitumineux dont la température de fabrication est inférieure à celle des enrobés à chaud traditionnels (Hot Mix Asphalt –HMA). Les enrobés à chaud ont une température de production qui se situe généralement entre 150 et 180 °C et une température de pose située entre 130 et 160 °C. Le choix des températures est principalement lié au grade de bitume utilisé.» (Bueche, 2011)

II.3 Avantages des enrobés tièdes

Les attentes dans le domaine des enrobés sont nombreuses et fonction des différents acteurs qu'ils soient des usagers, des ouvriers, ou des gestionnaires. (Bueche, 2011)

Aussi, les enrobés tièdes se caractérisent par les avantages suivants :

- Réduction de la consommation énergétique : le fait de réduire la température de fabrication et de mise en œuvre des enrobés permet aux centrales d'enrobage de faire une économie d'énergie non négligeable.
- Réduction de la pollution : la confection d'enrobés nécessite un apport de chaleur ce qui engendre le dégagement de gaz à effet de serre et d'agents toxiques dans l'atmosphère. En faisant baisser la température de fabrication et de mise en œuvre, ces émissions se voient diminuer.
- Augmentation du temps de conservation : le mélange étant tiède, il est moins sensible à une baisse de température qui pourrait altérer sa maniabilité. Cela permet donc de transporter ces enrobés sur de longues distances.
- Réduction de la viscosité du mélange : l'amélioration de cette propriété mécanique permet une meilleure maniabilité et compactibilité.
- Amélioration des conditions de travail : la température de l'enrobé n'étant pas très élevée, les ouvriers sont moins exposés à des risques de brûlures ou de suffocation dus aux émanations lors de la mise en œuvre.
- Réduction du temps de remise en service : cela est dû au fait que la température de mise en œuvre soit moins élevée et proche de la température de mise en service.
- Réduction de la salissure sur le matériel : étant plus liquide, le bitume adhère moins au matériel de fabrication.
- Recyclabilité.
- Réduction de la consommation énergétique lors du séchage des granulats.

II.4 Principe des enrobés tièdes

Le principe général des enrobés tièdes vise à baisser la température d'enrobage, tout en conservant la maniabilité du mélange pour le répandage et le compactage. Il s'agit de trouver un procédé de fabrication (additifs, double enrobage, enrobage séquentiel, liant spécial, moussage par le sable humide, ajout d'eau, ...) pour maintenir artificiellement la viscosité du liant durant toute la période d'application qui peut être étendue jusqu'à 3 ou 4 heures (y compris les attentes imprévues), permettant un compactage efficace (teneur en vides conformes aux spécifications) et une bonne mise en place de l'enrobé (texture, uni, homogénéité,...).

Les enrobés tièdes sont conformes aux normes françaises sur les enrobés à chaud et doivent respecter les propriétés en laboratoire (caractéristiques mécaniques et d'état) et sur chantier (texture, teneur en vides, épaisseur).

II.5 Techniques des enrobés

Le principe des enrobés tièdes est de pouvoir trouver un moyen de diffuser le bitume dans le squelette minéral et conserver une bonne maniabilité et compactabilité tout en réduisant la température de malaxage. Cela peut être réalisé selon les trois méthodes suivantes:

- Additivation du bitume,
- Enrobage séquencé,
- Effet de moussage du bitume.

II.5.1 Additivation du bitume

Cette méthode consiste à ajouter un additif chimique dans le bitume pour en modifier les propriétés. Cet additif peut agir sur la viscosité du liant ou sur les forces superficielles à l'interface granulat-liant, ce qui a pour effet de rendre temporairement l'enrobé moins visqueux. Ces additifs peuvent être synthétiques tels que les émulsifiants ou les dérivés d'alcool gras ou organiques tels que les cires paraffines.

A noter aussi qu'il existe sur le marché des bitumes pré-additivés, directement prêts à l'emploi. On citera le « Procédé Sasobit »: il consiste à « ramollir » le liant par fusion de paraffines (100°C) et solubilisation au bitume (115°C). Le bitume ainsi « plastifié » est préparé par un mélangeur en ligne (4 à 5 % de Sasobit). Ce liant prêt à l'emploi peut être utilisé sur tout type de centrale, sans modification. Il permet la fabrication des enrobés à une température moyenne proche des 130°C (soit des températures inférieures de 30 à 40°C par rapport à l'enrobé classique à chaud). Il autorise un compactage efficace jusqu'à 80°C. L'enrobé présenterait un bon comportement aux basses températures et une meilleure résistance à l'orniérage. (Bueche, 2011)

II.5.2 Enrobage séquencé

Les premiers essais d'enrobage séquentiel se trouvent dans la méthode de Karl Gunnar Ohlson (KGO). Cette méthode repose sur le fait de modifier la séquence d'enrobage sans modifier les éléments du mélange. Développée dès 1976, son principe consiste tout d'abord à enrober les gros granulats (diamètre supérieur à 2 mm environ) avec la totalité du liant, puis, le reste des granulats, c'est-à-dire, le sable et les fillers sont ajoutés au mélange.

Cette méthode a notamment permis d'abaisser la température de production de 20-30 °C ainsi que de diminuer la teneur en liant tout en maintenant un taux de vides comparable à un enrobé traditionnel. Le mélange bitumineux s'avère ainsi financièrement plus intéressant. Les expériences rapportent également que l'enrobé apparaît plus homogène, avec une maniabilité et compactibilité améliorées.

Aussi, la cohésion et le problème de ségrégation ont pu être améliorés, tout en maintenant les propriétés mécaniques équivalentes, voire meilleures (module, résistance à la traction). Les désavantages potentiels se situent notamment au niveau de l'augmentation de la durée de malaxage.

La méthode KGO a été améliorée notamment par l'utilisation de deux différents liants. Aujourd'hui, La technique employée repose sur le fait d'utiliser deux types de bitumes, le premier à faible viscosité et le second à viscosité plus élevée, et ce, selon la viscosité finale désirée. En règle générale, le ratio volumique entre le bitume de faible viscosité et celui de haute viscosité est de 1/3 : 2/3. (Bueche, 2011)

II.5.3 Moussage du bitume

Cette méthode consiste à faire mousser le bitume en incorporant de l'eau (appelée aussi effet de soupe). Ce principe est connu depuis longtemps comme étant un élément permettant de réduire la viscosité de l'enrobé. L'eau peut être ajoutée suivant deux techniques:

Avec pression : cette méthode repose sur le fait de créer un choc entre un jet de bitume chaud et de l'eau froide sous pression à l'entrée d'une chambre d'expansion pour créer une émulsion de bitume. (MARCHAND)

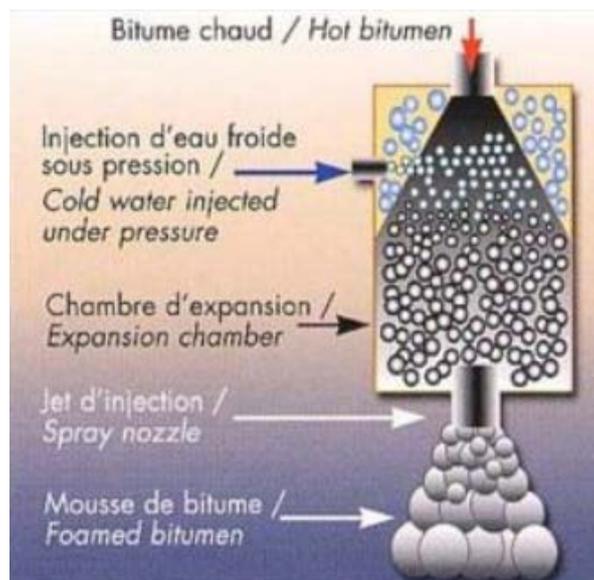


Figure 2.1: Moussage du bitume avec pression

Sans pression : l'idée est d'utiliser des granulats humides tels que du sable humide ou des additifs contenant de l'eau cristallisée en leur sein qui se vaporise au contact de la chaleur, tel que la zéolithe, créant ainsi une mousse de bitume qui facilite l'enrobage. (MARCHAND)

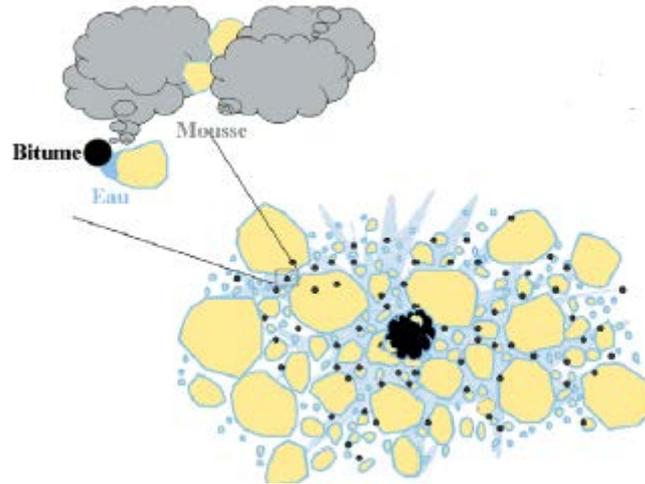


Figure 2.2: Principe de moussage du bitume sans pression

II.6 Zéolithe dans les enrobés tièdes

II.6.1 Présentation de la zéolithe

La zéolithe est une roche dont la structure est cristalline. En grec zéolithe signifie « Pierre qui bout ». Elle se forme naturellement dans les eaux alcalines ou dans les sédiments. Elle a la faculté de s'hydrater et de se déshydrater de façon réversible. Il existe 48 formes naturelles de zéolithe. Cependant, les chimistes en ont synthétisé près de 200.



Figure 2.3 : Zéolithe

II.6.2 Principe général

Les enrobés tièdes à base de zéolithe sont développés par l'entreprise EUROVIA depuis quelques années. La zéolithe utilisée, l'Aspha-Min, est composée de cristaux de silicate d'alumine hydratés et se présentent sous forme d'une poudre blanche. Au contact de la chaleur apportée par les granulats préalablement chauffés à une température de 150°C, la zéolithe libère son eau cristallisée produisant ainsi de la vapeur d'eau. Au contact du liant, celle-ci aura pour rôle de produire une mousse de bitume chaud, favorisant ainsi un bon enrobage et une bonne maniabilité. Cet additif permet une réduction de température de fabrication des enrobés de l'ordre de 30°C.

La zéolithe est ajoutée dans le mélange granulaire à hauteur de 0.3% de la masse totale d'enrobé. (BAKOWSKI)

II.6.3 Avantage de la formulation avec ajout de zéolithe

Le choix de la formulation d'enrobés tièdes par la zéolithe s'est imposé vu son prix relativement bas. Cela est dû au fait qu'elle soit facilement synthétisable. Cette formulation consiste à ajouter la roche riche en eau aux granulats sans modifier les caractéristiques chimiques du bitume. De plus, les modifications à apporter aux centrales d'enrobage sont faciles à exécuter et relativement peu onéreuses.

II.7 Conclusion

Les enrobés tièdes ont été la solution apportée par les ingénieurs pour pallier aux inconvénients de l'utilisation des enrobés dits classiques. En effet, ils permettent de réduire les émissions de gaz à effet de serre et ce, en réduisant la consommation de fuel.

La méthode de fabrication des enrobés tièdes par l'ajout de zéolithe permet d'obtenir des enrobés de bonne qualité sans nécessiter de modifications à apporter aux centrale. En effet, pour une économie maximale, des sacs thermo fusibles de zéolithe peuvent être ajoutés lors de la confection de l'enrobé directement dans le mélange granulaire.

Chapitre III : FORMULATION DES ENROBES ET ESSAIS

III.1. Introduction

Cette étude expérimentale porte sur la formulation d'un enrobé à chaud et d'un enrobé tiède selon la méthode Marshall. L'enrobé tiède est fabriqué selon la technique de « moussage sans pression à base de zéolithe ». Les performances mécaniques des deux mélanges seront alors comparées.

La fabrication d'un enrobé passe par deux phases :

- Identification des matériaux (granulats, bitume, additif).
- Formulation de l'enrobé à chaud et tiède (procédure de formulation et essais).

Dans ce chapitre, les différents essais d'identification, la méthodologie de formulation adoptée lors de ce travail et les essais de formulation seront présentés.

III.2. Formulation des enrobés

Dans le but de confectionner des enrobés bitumineux pour la réalisation de chaussées de qualité et de répondre aux différentes exigences de sécurité routière et de durabilité, plusieurs méthodes de formulation s'offrent aux ingénieurs. Celles-ci permettent de définir des proportions pour les différents composants de l'enrobé de manière à assurer des performances satisfaisantes. Les cinq principales méthodes sont les suivantes :

- La méthode HVEEM,
- La méthode Marshall,
- La méthode Superpave,
- La méthode Française LCPC,
- La méthode du Ministère des transports du Québec.

Dans ce chapitre, seule la méthode Marshall et la méthode Française LCPC seront détaillées.

Cependant, il faut savoir qu'en Algérie, la formulation utilisée dans la production d'enrobés est faite selon la méthode Marshall. L'étude se fera donc selon cette méthode.

III.2.1. La méthode Marshall

La méthode Marshall a été élaborée à la fin des années 30. Elle reste toujours très répandue en Amérique du Nord, au Canada et en Afrique du Nord.

Elle repose sur le principe de l'écrasement diamétral d'une éprouvette placée entre deux mâchoires cylindriques. Les exigences de base essentiellement recherchées sont la stabilité, la déformation (fluage) ainsi que le volume des vides.

Les premières étapes de formulation consistent à sélectionner et à évaluer les granulats selon les critères recherchés et à déterminer un taux de liant approximatif en fonction de la localité géographique et du type d'enrobé sélectionné. Il est important de déterminer le fuseau granulométrique et de s'assurer qu'il réponde bien à la plage de granulométrie fixée selon les normes.

Finalement, il faut établir la surface spécifique de la masse granulaire associée au fuseau ciblé. Le noyau de la méthode consiste à déterminer la teneur optimale en bitume en se référant à l'évolution des caractéristiques des enrobés confectionnés (densité, stabilité, volume des vides) pour différents dosages en bitume.

L'avantages de cette méthode de formulation réside dans le fait qu'elle soit simple, rapide et relativement complète de par la prise en compte des vides, de la stabilité et de la durabilité de l'enrobé. Aussi, ce procédé de formulation est relativement peu coûteux et de grande mobilité. Toutefois, le procédé de fabrication des éprouvettes (compaction par impact) est le point faible de cette méthode car les modèles ne sont pas représentatifs des conditions de chantier. Elle repose principalement sur l'essai Marshall proprement dit et l'essai Duriez pour la tenue à l'eau. (Delorme)

La méthode Marshall comprend un seul niveau (stabilité et tenue à l'eau), aucune exigence sur l'orniérage, le module et la fatigue. Cependant, il est de plus en plus courant d'associer à cette méthode la mesure du module de rigidité par l'essai de traction indirecte NAT-Nottingham Asphalt Tester- notamment pour la formulation des enrobés modifiés.

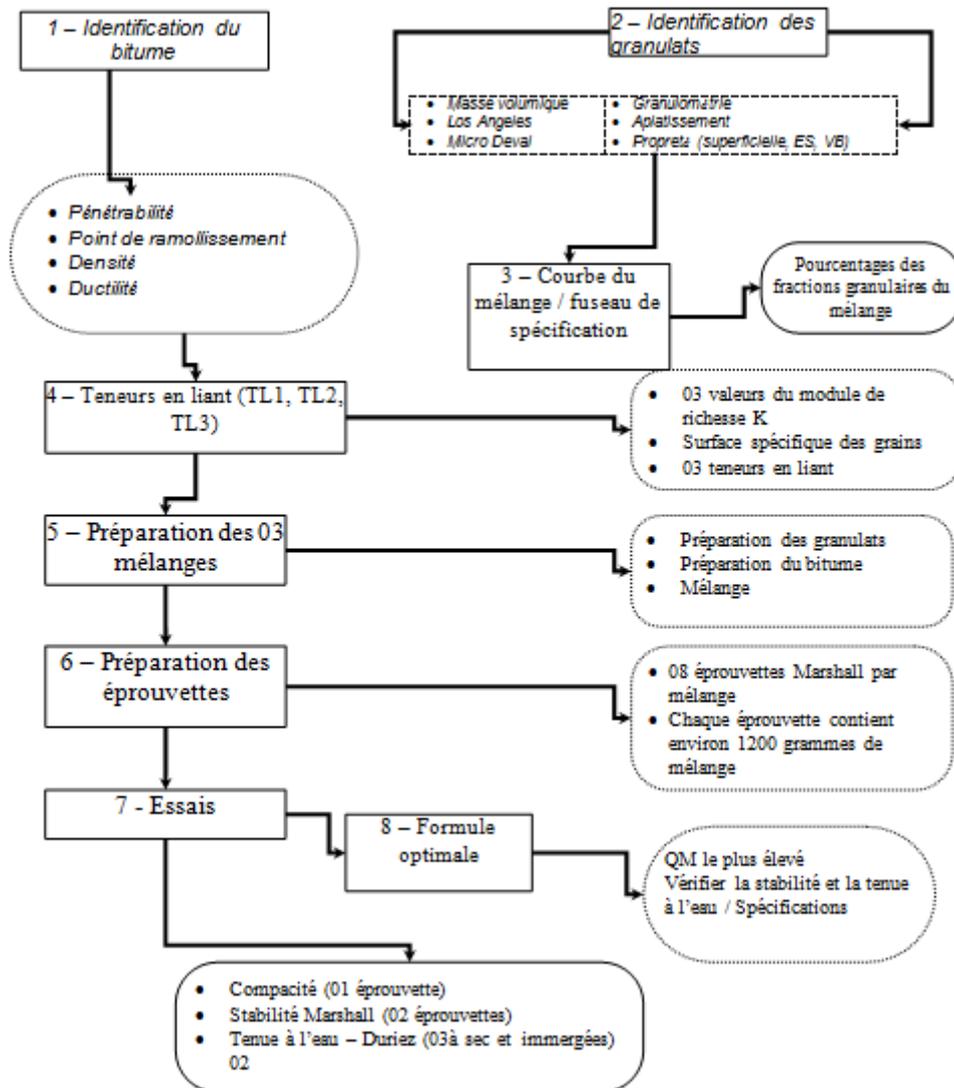


Figure 3.1: Organigramme de la méthode de formulation Marshall

III.2.2. La méthode Française LCPC

La méthode Française optimise la formulation de l'enrobé en laboratoire sur la base d'un essai simulant l'aptitude au compactage de l'enrobé par l'essai à la presse à cisaillement giratoire (PCG). Des exigences à l'orniérage et à la PCG sont alors introduites dans le processus de formulation de l'enrobé. (J. L. DELORME, 2007)

La formulation Française constitue une méthodologie de travail efficace et basée sur plusieurs essais, qui représentent assez fidèlement le comportement en chantier et l'usure générée par la circulation. Par contre, il s'agit d'un procédé d'envergure qui nécessite des équipements très dispendieux.

De plus, les caractéristiques de fonctionnement de ces appareils sont propres aux équipements français et nécessitent certains ajustements afin d'être compatibles aux équipements utilisés dans les autres procédés de formulation, principalement en Amérique du Nord. (J. L. DELORME, 2007)

La méthode de formulation LCPC comprend quatre niveaux de formulation:

Niveau 1 : Essai de compactage à la presse à cisaillement giratoire NF EN 12697-31 + Essai Duriez NF EN 12697-12

Niveau 2 : Essai d'orniérage NF EN 12697-22

Niveau 3 : Essai de module NF EN 12697-26

Niveau 4 : Essai de fatigue NFP 98-261-1

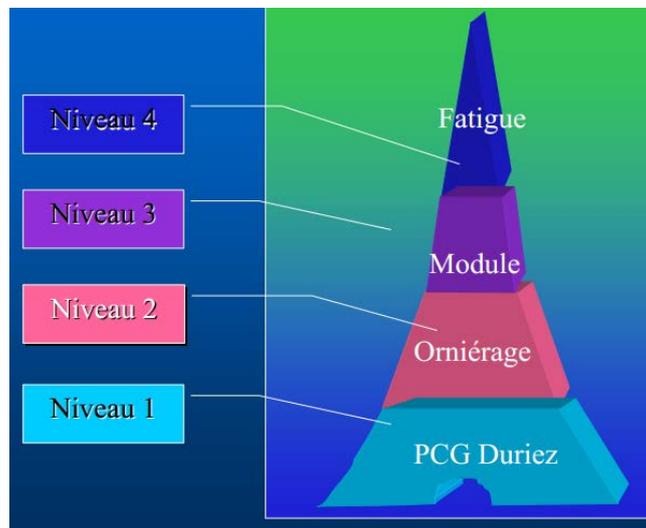


Figure 3.2: Méthode de formulation Française LCPC

Dans le cas d'application à faible niveau de sollicitation, le niveau 1 peut être suffisant sans essai complémentaire.

III.3. Identification des matériaux

III.2.1 Essais sur granulats

Les essais d'identification des granulats ont pour objectif de déterminer les caractéristiques intrinsèques et géométriques du squelette granulaire. De ces caractéristiques, seules certaines méritent d'être mises en évidence pour la confection d'enrobés, et ce, par les résultats des essais suivants :

- Analyse granulométrique
- Essai d'aplatissement
- Essai Los Angeles
- Essai Micro-Deval
- Densité des granulats
- Essai au bleu de méthylène

II.2.1.1. Analyse granulométrique

i. Principe de l'essai

Cet essai a pour but de déterminer la grosseur et le pourcentage respectif de chaque famille de grains. Cela permettra ainsi de classer les granulats par fractions selon leur taille afin de définir leur courbe granulométrique. Cette dernière servira lors de la détermination des différentes proportions du mélange granulaire. En effet, il s'agit de faire passer un échantillon de granulats dans une série de tamis superposés et dont les ouvertures sont normalisées et classées par ordre décroissant. Il est possible alors de tracer la courbe granulométrique en pesant le tamis ou le refus.

ii. Matériel utilisé

Cet essai nécessite l'utilisation d'une série de tamis dont les ouvertures, carrées, sont normalisées. Ceux-ci sont choisis selon la nature de l'échantillon et de la précision attendue.



Figure 3.3: Série de tamis de l'analyse granulométrique

Les tamis les plus usités pour cet essai comportent les ouvertures suivantes :

80, 50, 40, 31.5, 25, 20, 16, 14, 12.5, 10, 8, 6.3, 5, 4, 3.15, 2.5, 2, 1.25, 1, 0.63, 0.315, 0.250, 0.16, 0.08 et 0.063

iii. Procédé expérimental :

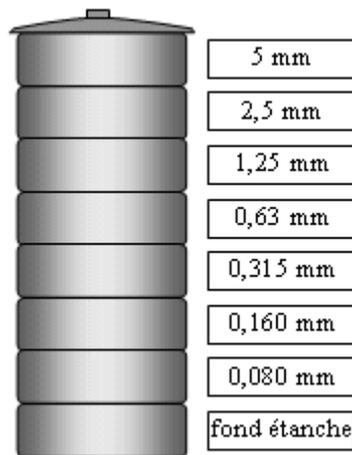


Figure 3.4: Exemple de classement d'une colonne de tamis

La prise des granulats se fait pour une masse de $M=0.2D$ avec M la masse à considérer exprimée en Kg et D le plus gros diamètre de la fraction exprimé en mm (exemple pour la fraction 8/15, $D=15 \rightarrow M = 0.2D = 0.2 \times 15 = 3K$. Une marge d'erreur est prise en compte. La masse de la prise d'essai sera donc de 3100g pour compenser les pertes lors du lavage et éviter de prendre une masse inférieure à 3000g).

Les granulats sont alors lavés au tamis de 0.063mm et pesés à nouveau afin de vérifier leur propreté. Celle-ci doit être inférieure à 2%. Ils sont ensuite séchés à 105°C dans l'étuve. L'échantillon est passé aux tamis, du plus gros diamètre au plus fin. Le refus de chaque tamis est par la suite pesé et notifié.

II.2.1.2. Essais pour la mesure du coefficient d'aplatissement

Cet essai est réalisé selon la norme algérienne NA 256

i. Principe de l'essai

Effectué en parallèle avec l'analyse granulométrique, cet essai consiste à faire passer le refus de l'opération de tamisage à travers la grille correspondante au tamis. Cela permet de déterminer le coefficient d'aplatissement des granulats. Celui-ci représente le pourcentage pondéral des granulats qui vérifient la relation $G/E > 1.58$, avec G la grosseur de l'élément qui est aussi la dimension de la maille carrée minimal du tamis par lequel le granulat passe et E l'épaisseur qui est la distance minimale de deux plans tangents au granulat. Ceci dit, la présence d'un fort taux de granulats à la forme plate réduit les performances de l'enrobé et rend la chaussée beaucoup trop glissante.

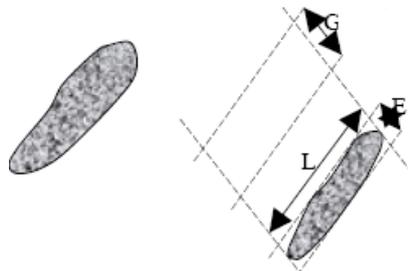


Figure 3.5: Dimension d'un granulat

ii. Matériel utilisé

Cet essai est réalisé à l'aide d'une série de grilles dont les écartements sont normalisés et des tamis de l'analyse granulométrique. Les écartements les plus usités sont les suivants : 8, 6.3, 5, 4, 3.15 et 2.5.



Figure 3.6: Série de grilles de l'essai d'aplatissement

iii. Procédé expérimental

Cet essai se fait en parallèle avec l'essai granulométrique. Chaque refus de tamis est passé dans la grille correspondante.

La pesée des passants est alors effectuée et les résultats sont notés sur un tableau.

iv. Calcul des résultats

Le coefficient d'aplatissement est exprimé par la relation suivante : $A = \sum Me / \sum Mg$

Avec :

Me : masse de la classe d/D

Mg : masse des granulats passant à travers la grille d'écartement e.

II.2.1.3. Essai de détermination de la résistance à la fragmentation (Los Angeles)

i. Principe de l'essai

Cet essai a pour but de déterminer la résistance aux chocs d'une fraction granulaire. Il ne concerne que les fractions 3/8 et 8/15. Les chocs sont simulés en projetant des masses métalliques (boulets) sur une quantité de granulats en faisant tourner l'ensemble dans un tambour. La résistance aux chocs est mesurée par la valeur Los Angeles.

Cette valeur est obtenue en calculant le pourcentage des granulats passants au tamis de 1.6mm après avoir subis les chocs qui causent une fragmentation.

ii. Appareil d'essai (machine Los Angeles)

Le tambour employé pour cet essai s'appelle la machine Los Angeles. Elle consiste en un cylindre métallique fermé des deux côtés, de dimensions normées à savoir 508mm de longueur, 711mm de diamètre et 12mm d'épaisseur de paroi.

Les granulats sont introduits à l'intérieur par une trappe de même longueur que le cylindre et de 150 mm de large. A l'intérieur, on trouve les boulets, des sphères métalliques de 47mm de diamètres et d'une masse moyenne de 430 g.



Figure 3.7: Machine Los Angeles

iii. Procédé expérimental :

Lors de l'essai Los Angeles les granulats sont d'abord passés aux tamis pour en sortir les classes désirées. En effet, pour la fraction 3/8, il ne sera retenu que la classe 4/6.3 (3000g du refus du tamis 5mm et 2000g du refus du tamis 4mm) et, uniquement la classe 10/14 pour la fraction 8/15 (3000g du refus du tamis 12.5mm et 2000g du refus du tamis 10mm).

Les granulats sont ensuite lavés au tamis 1.6mm et séchés dans une étuve à une température de 105°C pendant 24h. Une quantité de 5000 g de granulats est alors placée dans le tambour avec un certain nombre de boulets (le nombre dépend de la fraction granulaire à savoir, sept (7) boulets pour la fraction 3/8 et neuf (9) pour la fraction 8/15). Le tambour est alors programmé pour effectuer 500 rotations à une vitesse moyenne de 33tr/mn.

Au terme du passage au tambour, les granulats sont lavés dans un tamis dont les mailles ont un diamètre de 1.6mm et placés dans une étuve à 105°C pendant 24h avant d'être à nouveau pesés.

II.2.1.4. Essai micro-Deval en présence d'eau (MDE)

i. Principe de l'essai

L'essai micro-Deval a pour but de déterminer la résistance à la fragmentation et à l'attrition d'un granulat. Il consiste à éroder un échantillon de granulats de classe 10/14 pour la fraction 8/15 et 4/6.3 pour la fraction 3/8 en le faisant tourner dans une jarre en présence de billes d'acier et d'eau (l'eau a pour but d'éviter les étincelles).

La résistance à l'érosion est quantifiée par la valeur MDE. Celle-ci est déterminée par le pourcentage, après le passage au tambour, du refus des granulats lavés au tamis de diamètre de 1.6mm.

ii. Appareil d'essai

L'essai Micro-Deval nécessite l'emploi d'un broyeur cylindrique utilisant des billes en acier de 10mm de diamètre.



Figure 3.8: Jarre de l'essai Micro-Deval

Il est constitué d'un cylindre en acier appelé jarre dont le diamètre est de 20cm et dont la longueur est de 30cm. La jarre est mise en rotation par un arbre horizontal mu par un moteur 1 cv.

iii. Procédé expérimental :

Cet essai repose sur l'utilisation des mêmes proportions et classes de granulats que l'essai Los Angles.

Ils sont lavés au tamis 1.6mm et séchés à l'étuve. Une prise de 500g est placée dans une jarre avec 2,5L d'eau et 2000g de billes d'acier pour la fraction 3/8 et 5000g pour la fraction 8/15. Ils subissent 12 000 rotations pendant 2 heures.

Les granulats sont ensuite lavés et passés au tamis 1,6mm. Le passant est séché à l'étuve et pesé. Le pourcentage du passant de 1,6mm représente la valeur MDE.

II.2.1.5. Densité des granulats

i. But de l'essai

Cet essai a pour but de déterminer la masse volumique des granulats et de là, en déduire leur densité.

ii. Matériel de l'essai

Pour cet essai, il est nécessaire d'utiliser un pycnomètre et une balance à précision.

iii. Procédé expérimental

Pour déterminer la densité des granulats, il est nécessaire d'en peser une quantité de masse M_g dont le volume n'atteint pas la contenance du pycnomètre. Après nettoyage, ce dernier sera pesé à vide (masse M_p) puis, pesé une seconde fois après l'avoir rempli d'eau jusqu'au trait de jauge (masse M_{pe}). Ces étapes effectuées, l'eau est vidangée et remplacée par la masse de granulats M_g puis complété jusqu'au trait de jauge avec de l'eau.

Afin de permettre à l'eau de pénétrer dans tous les interstices et les pores, le pycnomètre est laissé pendant 24h puis complété jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée. Il est alors pesé et cette masse est notée M_{peg} .

iv. Calcul des résultats

La densité des granulats est calculée par la formule suivante :

$$D_g = \frac{M_g}{V_g}$$

Sachant que :

$$V_g = V_p - V_e$$

Or :

$$V_p = M_{pe} - M_p \text{ et } V_e = M_{peg} - M_g$$

Donc :

$$D_g = \frac{M_g}{V_g} = \frac{M_g}{V_p - V_e} = \frac{M_g}{(M_{pe} - M_p) - (M_{peg} - M_g)}$$

Avec :

D_g : densité des granulats

M_g : masse des granulats

V_g : volume des granulats

- V_p : volume du pycnomètre
 V_e : volume de l'eau
 M_{pe} : masse du pycnomètre rempli d'eau
 M_p : masse du pycnomètre
 M_{peg} : masse du pycnomètre rempli des granulats et de l'eau



Figure 3.9: Pycnomètre

II.2.1.6. Essai au bleu de méthylène

Cet essai est réalisé selon les recommandations de la norme algérienne NA 1948

i. Principe de l'essai

Le but de cet essai est de mesurer la capacité d'un granulat à absorber des molécules de bleu de méthylène et ainsi de déterminer la quantité de fines argileuses présentes dans le sable car, ce sont les fines qui possèdent cette capacité d'absorption.

ii. Matériel de l'essai

Pour les besoins de cet essai, il est nécessaire d'avoir un bécher d'une capacité d'un litre, un agitateur et une burette.

iii. Procédé expérimental.

Cet essai nécessite de réaliser au préalable une solution de bleu de méthylène. Pour préparer 1L de solution, 10g de poudre de bleu sont d'abord séchés à 45°C pendant 30 min. La poudre est ensuite mélangée à 500ml d'eau distillée, chauffée à 45°C et la solution obtenue est agitée pendant 30 min avant d'être complétée par les 500ml d'eau restante. Cette solution ne peut être utilisée au-delà de 28j.

Une masse connue M de l'échantillon de granulat est ajoutée à 500ml d'eau déminéralisée dans un bécher et mélangée à l'aide d'un agitateur pendant 5min environ (à une vitesse de 600tours/min puis à 400tours/min) afin de créer la suspension servant pour cet essai.

Une dose de 5ml de solution de bleu est ajoutée à la suspension et remuée pendant une (1) minute. Le teste de la tâche est ensuite réalisé en déposant une goutte de suspension sur du papier filtre. Cette opération est réitérée jusqu'à ce que l'auréole qui se forme autour de la tâche soit bleu claire. Lorsque le teste est positif, il est nécessaire de le répéter 5 fois à une minute d'intervalle et il s'achève si après cela la tâche avec l'auréole bleu persiste. Le volume total de solution de bleu est alors noté V.



Figure 3.10: Essai de bleu de méthylène

iv. Calcul des résultats

La valeur au bleu de méthylène VB représente le rapport entre la masse de colorant absorbé M_b et la masse M de l'échantillon des granulats testés.

$$VB = \frac{M_b}{M}$$

Etant donné que la concentration C du bleu de méthylène utilisé pour cet essai est de 10g/L, la masse de colorant absorbée est donnée par :

$$M_b = C * V$$

III.2.2. Essais sur bitume

Dans le cadre de ce travail, il est primordial d'utiliser un bitume 40/50. Il faut alors vérifier si les caractéristiques y correspondent. Pour cela, les essais suivants ont été effectués au laboratoire de produits noirs du CTPP :

- Essai de ramollissement bille-anneau
- Essai de pénétrabilité
- Test d'adhésivité passive par la méthode AKZOO
- Essai de ductilité

III.2.2.1. Essai de point de ramollissement (bille-anneau)

Cet essai est réalisé sur la base de la norme algérienne NA 2617

i. Principe de l'essai

Cet essai a pour but de déterminer le point de ramollissement des produits noirs en relevant la température à laquelle un disque de bitume se ramolli sous le poids d'une bille d'acier.

ii. Matériel de l'essai

Cet essai nécessite l'utilisation d'anneaux ainsi que de leurs supports, de billes d'acier, d'un bain thermostatique, d'un thermomètre et d'un agitateur.



Figure 3.11: Matériel de l'essai du point de ramollissement

iii. Procédé expérimental

L'échantillon de bitume est d'abord chauffé à une température comprise entre 145°C et 165°C jusqu'à ce qu'il soit complètement fluide (max 2h). il faut ensuite le verser dans les anneaux préchauffés et préalablement posés sur une plaque lisse enduite d'un mélange de glycérine et de dextrine afin que le produit ne colle pas sur la plaque. Enfin, il faut le laisser refroidir pendant 30minutes. La partie supérieur est arasée à l'aide d'une spatule chauffée afin d'enlever l'excès de bitume formant un abcès. Placer les anneaux dans les supports et poser l'appareillage dans un bécher ou un vase rempli d'eau distillée. Une bille d'acier est alors placée au centre de chaque anneau. L'eau est chauffée à l'aide d'une plaque chauffante à une vitesse de 5°C/min. Sa température est relevée à la 1^{ère}, 2^{ème} et 3^{ème} minute.

La température est relevée une fois de plus lorsque le bitume enveloppant la bille touche la plaque du support.



Figure 3.12: Essai du point de ramollissement

NB : La différence entre les températures de ramollissement des deux anneaux ne doit pas excéder 1°C

III.2.2.2. Essai de pénétrabilité

Cet essai a été réalisé selon la norme algérienne NA 5192.

i. Principe de l'essai

Cet essai a pour objet de déterminer la pénétrabilité du bitume en faisant pénétrer une aiguille dans un gobelet rempli de bitume et de relever la longueur de pénétration.

ii. Matériel de l'essai

Cet essai a nécessité l'utilisation d'un gobelet métallique, d'une aiguille, d'un pénétromètre, d'un bain d'eau thermostatique, d'un thermomètre et d'un récipient à gobelet.



Figure 3.13: Appareil de l'essai de pénétrabilité

iii. Procédé expérimental

Le bitume est chauffé à une température comprise entre 145°C et 165°C jusqu'à ce qu'il soit complètement fluide. Il est ensuite rempli dans le gobelet préalablement chauffé. La hauteur de l'échantillon doit être telle que la profondeur maximale que l'aiguille est susceptible d'atteindre soit supérieure à 10 mm du fond du gobelet.

L'échantillon est protégé de la poussière par un couvercle et laissé à une température comprise entre 20°C et 30°C pendant une durée de 1h30 à 2h00 afin qu'il refroidisse. Il est ensuite placé dans un bain d'eau chauffée à 25°C pendant 1h30 à 2h00.

Le gobelet est placé sur le plateau du pénétromètre et l'aiguille chargée à 100g y est placée au-dessus de sorte qu'elle affleure la surface du bitume. L'aiguille est libérée pendant 5sec puis bloquée aussitôt. La profondeur d'enfoncement de cette dernière est relevée à l'aide du cadran du pénétromètre.

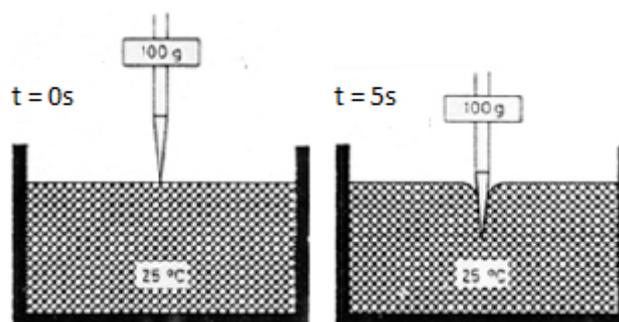


Figure 3.14: Schéma représentant l'essai de pénétrabilité

Cette opération est réitérée 2 autres fois avec la même aiguille et en remettant le gobelet dans le bain d'eau pour avoir 3 mesures.

III.2.2.3. Essai de ductilité

Cet essai est réalisé selon la norme algérienne NA 5223

i. Principe de l'essai

Cet essai a pour but de déterminer la ductilité du bitume en soumettant un échantillon de bitume à une force de traction. La ductilité est la capacité d'un matériau à se déformer d'une façon plastique sans se rompre.

ii. Matériel de l'essai

Cet essai nécessite l'utilisation d'un ductilimètre. Il s'agit d'un appareil servant à soumettre le bitume à un effort de traction en l'étirant d'un côté et en le maintenant fixe de l'autre.

Il est composé d'un bâti en acier inoxydable et d'un bain chauffé avec contrôle thermostatique. Une règle graduée de 0 à 1500mm est insérée sur le côté. Il a une vitesse de 50mm/min.



Figure 3.15: Ductilimètre

Cet essai a également nécessité l'utilisation d'un moule en laiton de dimensions normalisées, d'un bain thermostatique et d'un thermomètre.

iii. Procédé expérimental

Un échantillon de bitume est d'abord chauffé à une température comprise entre 145°C et 165°C jusqu'à ce qu'il devienne fluide. Un moule de ductilité préalablement enduit d'un mélange de glycérine et de dextrine est alors rempli de bitume et laissé à température ambiante pendant 30 à 40 min afin qu'il refroidisse. Le moule est alors placé dans un bain à 25°C pendant 30 minutes. Le bitume est arasé à l'aide d'une spatule chaude afin d'en enlever l'excès formant un abcès.

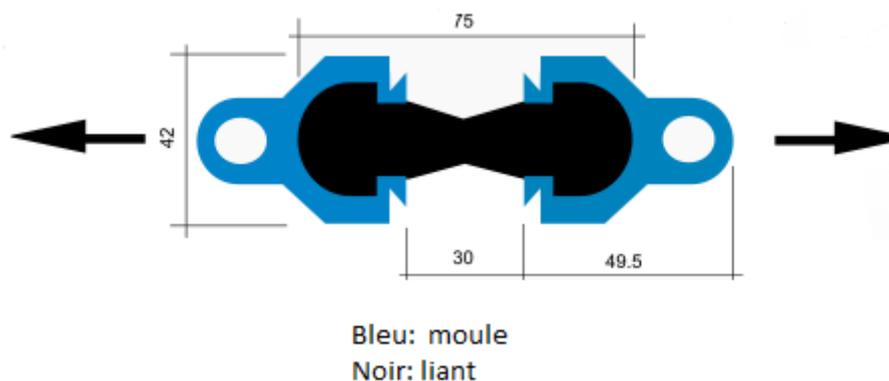


Figure 3.16: Schéma représentant l'essai de ductilité du bitume

Le moule est ensuite placé dans le ductilimètre pendant 1h30 à 25°C. Puis l'étirage est effectué à une vitesse de 50mm/min jusqu'à ce que le bitume atteigne la rupture.

III.2.2.4. Test d'adhésivité passive par la méthode AKZOO

i. Principe de l'essai

Cet essai a pour but de déterminer la résistance qui empêche de dégarnir un agrégat de son film de bitume lors de son immersion dans l'eau.

ii. Matériel de l'essai

Pour la réalisation de cet essai, il est nécessaire d'avoir une boîte métallique de 500ml, une balance, un bain marie d'air chaud ou d'une plaque chauffante, d'un bocal en verre avec couvercle en métal, d'un tamis de 6-7mm, d'un four et d'un thermomètre.

iii. Procédé expérimental

Les granulats sont d'abord lavé dans un tamis de 6-7 mm afin de les débarrasser des poussières, mis à sécher dans une étuve ventilée tout une nuit à 120°C et maintenue ensuite à une température de 60°C.

Une quantité de 6g \pm 1g de bitume est ajoutée à un échantillon de 100g \pm 5g de gravier préalablement préparé et chauffé à une température de 160°C dans une boîte métallique. Le tout est mélangé pendant 2minutes à une température de 160°C. Le gravier revêtu du film de bitume est transvasé dans un bocal de 500ml afin de durcir pendant 2heures. Ce gravier est ensuite immergé dans de l'eau à une température de 60°C et ce pour une durée de 16h. Il est ensuite versé sur une surface lisse.



Figure 3.17: Test d'adhésivité

La surface de gravier retenant le film de liant est alors estimée en % à l'œil nu.

III.2.2.5. Essai de densité relative

Cet essai est réalisé selon la norme algérienne NA 5224.

i. Principe de l'essai

La densité du bitume est mesurée par la technique du pycnomètre.

ii. Matériel de l'essai

Cet essai ne requière que l'utilisation d'un pycnomètre et d'une balance de précision.

iii. Procédé expérimental

Afin de déterminer la densité relative du bitume, il est nécessaire d'abord de peser la masse M_p du pycnomètre à vide puis de peser la masse M_e du pycnomètre rempli entièrement d'eau distillée.

Le pycnomètre est ensuite vidé et séché avant d'être rempli d'une quantité suffisante de bitume M_b . Après une période de refroidissement à l'air libre, il est de nouveau pesé et la masse du pycnomètre rempli de bitume est notée M_{pb} . Enfin, de l'eau distillée est rajouté au bitume contenu dans le pycnomètre et le tout est pesé et noté M_t .

iv. Calcul

La densité du bitume est calculée par la formule suivante :

$$D_b = \frac{M_b}{V_b} = \frac{M_{pb} - M_p}{(M_{pe} - M_p) - (M_t - M_{pb})}$$

Avec :

D_b : densité du bitume

M_b : masse du bitume

V_b : volume du bitume

M_{pb} : masse du pycnomètre rempli d'une quantité de bitume

M_p : masse du pycnomètre

M_{pe} : masse du pycnomètre rempli d'eau

M_t : masse du pycnomètre rempli d'eau et de bitume

III.2.3. Essai d'identification de la zéolithe

Dans le cadre de ce travail, des échantillons de zéolithe ont été fournis par une entreprise qui ne l'a pas encore commercialisée et donc, aucune fiche technique ne l'accompagnait. Il a donc fallu effectuer quelques essais afin de déterminer certaines de ses propriétés importantes.

Ces essais ont été réalisés dans le laboratoire de peinture et acides du CTPP car ils ont nécessité l'utilisation de matériel plus précis du fait des dimensions réduites du matériau.

III.2.3.1. Granulométrie

Cet essai a pour but de déterminer le pourcentage respectif de chaque taille des grains de la zéolithe et ainsi définir sa courbe granulométrique.



Figure 3.18: Analyse granulométrique de la zéolithe

Cet essai a nécessité l'utilisation de tamis d'ouvertures carrées et dont les diamètres, exprimés en mm, sont les suivants :

0.630 – 0.500 – 0.400 – 0.315 – 0.250 – 0.125 – 0.100 – 0.080

III.2.3.2. Densité

Cet essai a pour but de déterminer la densité de la zéolithe. Il a été réalisé à l'aide d'un pycnomètre d'une capacité volumique de 100 ml. L'essai a consisté à peser le pycnomètre vide puis de le peser à nouveau complètement rempli d'eau afin de déterminer sa capacité volumique réelle. Il a été ensuite rempli d'une masse connue M de zéolithe et complété par de l'eau. Les différentes masses relevées, le calcul de la densité peut alors se faire.



Figure 3.19: Mesure de la densité de la zéolithe

III.2.3.3. Teneur en eau

La teneur en eau d'un matériau est la quantité d'eau contenue dans ce dernier. La zéolithe étant une roche utilisée dans la formulation d'enrobé pour son apport en eau, il est donc primordial de mesurer cette propriété afin d'en connaître la quantité qui va être apportée au mélange bitumineux.

Cet essai consiste à placer une masse M_1 connue de zéolithe dans un four pendant 24h et de relever ensuite la masse M_2 de ce matériau immédiatement après l'en avoir sorti.



Figure 3.20: Mesure de la teneur en eau de la zéolithe

La différence des masses M_1 et M_2 représente la quantité d'eau évaporée. La teneur en eau peut alors être déduite

III.4. Procédure de fabrication de l'enrobé à chaud

La formulation selon la méthode Marshall nécessite d'abord de fixer le squelette granulaire. Pour cela, les essais d'identifications sur les granulats sont effectués et les proportions des différentes fractions sont déterminées de sorte que la courbe granulométrique du mélange soit comprise dans le fuseau de référence.

La surface spécifique (la surface totale des granulats) peut alors être calculée par la formule suivante :

$$\Sigma = 0.25G + 2.3S + 12s + 135f$$

Avec :

Σ : la surface spécifique,

G : pourcentage des granulats de diamètre supérieur à 6.3 mm,

S : pourcentage des granulats de diamètre compris entre 6.3 mm et 0.315 mm,

s : pourcentage des granulats de diamètre compris entre 0.315 mm et 0.08 mm,

f : pourcentage des granulats de diamètre inférieur à 0.08 mm.

Le module de richesse K permet de calculer la quantité de liant nécessaire pour enrober chaque grain d'un film de bitume. La formule permettant de le calculer est la suivante :

$$K = TL / (\alpha \times \sqrt[5]{\Sigma})$$

Avec

K : module de richesse

TL: teneur en liant

α : 2.65/MVR (masse volumique réelle des granulats)

Σ : surface spécifique

Tous les calculs précédents seront effectués grâce à un programme sur le tableur Excel.

III.3.1. Etuvage des granulats

Les granulats sont placés dans l'étuve pendant deux heures à une température de 165°C.



Figure 3.21: Etuvage des granulats

L'intérêt de cela est de débarrasser les granulats de toute humidité et de faciliter l'enrobage. En effet, si les granulats ont une température inférieure à celle du bitume lors du malaxage, la température du mélange sera fortement diminuée et cela réduira la maniabilité du bitume et entrainera donc un mauvais enrobage.

III.3.2. Etuvage du bitume

Le bitume est chauffé en même temps que les granulats dans l'étuve à une température de 165°C. Le but étant de le rendre liquide et de ce fait plus maniable. Cela permettra un meilleur enrobage des granulats lors du malaxage.



Figure 3.22: Etuvage du bitume

III.3.3. Malaxage

Les granulats sont mis dans la cuve du malaxeur et mélangés entre eux. Le bitume est ensuite ajouté aux granulats.



Figure 3.23: Mélange des granulats et du bitume

Le tout est placé dans le malaxeur et mélangé pendant 1 minute à vitesse réduite (afin d'éviter la perte de fines) puis pendant 2 minutes à grande vitesse.



Figure 3.24: Malaxage de l'enrobé

Ce mélange est ensuite remis dans l'étuve pendant 1 heure afin de le maintenir à la bonne température avant le remplissage des moules. En effet, en principe, le malaxeur est doté d'une plaque chauffante permettant d'éviter cela et de le garder à cette température.

III.3.4. Remplissage des moules

Pour chaque moule, il est nécessaire de peser un mélange de 1200g. Les moules sont ensuite remis dans l'étuve pour une durée de 2h.



Figure 3.25: Remplissage des moules

III.3.5. Compactage des éprouvettes

Les moules sont placés dans un compacteur mécanique. Chaque éprouvette recevra un compactage de 50 coups à chaque face, soit un total de 100 coups.



Figure 3.26: Compacteur

Les moules seront ensuite laissés à l'air libre pendant 24h jusqu'à total refroidissement.

III.3.6. Démoulage des éprouvettes

Les éprouvettes sont démoulées après 24h de refroidissement. Cela est effectué grâce à l'appareil servant pour l'essai Marshall.



Figure 3.27: Démoulage des éprouvettes

III.5. Procédure de fabrication de l'enrobé tiède

III.4.1. Etuvage des granulats et du bitume

Les granulats sont placés dans une étuve ventilée pendant deux heures à 120°C au lieu de 165°C comme précédemment, dans la formulation d'enrobés à chaud.

Cependant, le bitume est étuvé à 165°C comme pour la formulation précédente.

III.4.2. Malaxage

Un pourcentage de zéolithe est ajouté au mélange de granulats chauds et ils sont malaxés pendant 30 secondes. Le bitume y est alors ajouté.

Le malaxage peut alors commencer. Il se fait à une température comprise entre 120 et 130°C. Dans ce travail, il a été réalisé de façon manuelle car le malaxeur n'est pas doté d'un système de chauffage permettant de maintenir une température constante.

III.4.3. Remplissage des moules

Contrairement à la confection d'enrobé à chaud, les moules ont été remplis immédiatement et les éprouvettes aussitôt compactées.

Le compactage a été réalisé de la même manière que pour la formulation d'enrobés à chaud, à savoir 50 coups sur chaque face, soit 100 coups en tout pour chaque éprouvette.

Le démoulage se fait après 24h de refroidissement à température ambiante.

III.4.4. Conservation des éprouvettes

Les premières éprouvettes confectionnées, avec un taux de zéolithe de 1%, ont montré un bon compactage. Cependant, lors des essais Marshall et de tenue à l'eau, il a été observé une dégradation spectaculaire de ces mêmes éprouvettes.

Il a été décidé alors de suivre deux modes de conservation afin de voir si un temps de murissement devait être respecté et si cela avait un impact sur les performances.

Deux modes de conservation ont donc été respectés :

- A température ambiante : les essais sont immédiatement effectués sans période de murissement.
Cette conservation sera notée « Immédiate ».
- A 40°C dans une étuve ventilée : les éprouvettes sont conservées pendant une période donnée afin d'atteindre un certain degré de murissement. Mais par manque de temps, elles sont conservées dans une étuve ventilée à 40°C pendant une courte durée, soit 48h. Cela permettra d'accélérer le murissement, qui, dans des conditions de temps idéales, aurait duré 7 jours à l'air libre.
Cette conservation sera notée « Etuve 40°C ».

III.6. Caractéristiques des éprouvettes

III.6.1. Mesure des hauteurs et calcul des densités théoriques

Après démoulage, les éprouvettes sont d'abord pesées.

Leurs hauteurs sont ensuite déterminées par un pied à coulisse. Cinq mesures sont effectuées sur chacune d'entre elles afin de vérifier l'homogénéité et la planéité de celles-ci.

La densité théorique peut alors être calculée par la formule suivante :

$$D_{th} = \frac{m}{V} = \frac{m}{\pi \times \frac{d^2}{4} \times h}$$

Avec :

D_{th} : densité théorique de l'éprouvette

m : masse de l'éprouvette

V : volume de l'éprouvette

d : diamètre de l'éprouvette

h : hauteur de l'éprouvette

III.6.2. Essai Marshall

Cet essai permet de mesurer la stabilité Marshall et le fluage. Le quotient Marshall pourra alors être déduit.

La stabilité Marshall S d'un enrobé est la résistance maximale à la déformation d'une éprouvette. Quant au fluage F , il s'agit de la déformation irréversible transversale au sens d'application de la contrainte au maximum de la force.

Le quotient Marshall est le ratio entre la résistance à la déformation et le fluage engendré par le chargement.

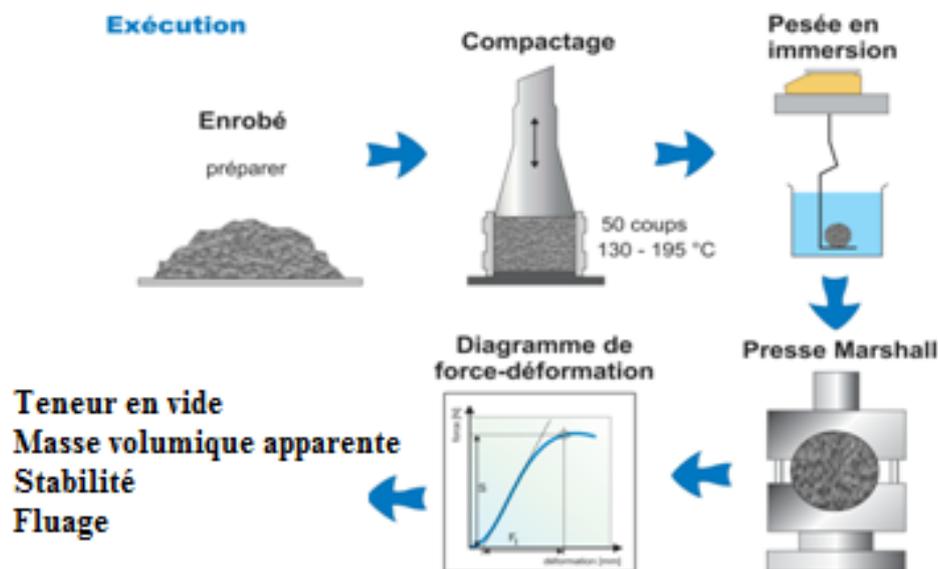


Figure 3.28: Principe de l'essai Marshall

III.6.2.1. Principe de l'essai

Les éprouvettes sont placées dans un bain d'eau et conservées à une température de 60°C pendant une durée de 30 minutes. La mâchoire de l'appareil du test Marshall y est également placée pour qu'elle soit à la même température que les éprouvettes.



Figure 3.29: Eprouvettes dans un bain à 60°C

La mâchoire de l'appareil Marshall est mise en place sur la presse et une éprouvette y est placée.

La lecture du fluage et de la stabilité Marshall sont relevées sur les 2 cadrants de l'appareil et reportée afin de faire les calculs nécessaires.



Figure 3.30: Ecrasement des éprouvettes pour l'essai Marshall

III.6.2.2. Calcul

Le fluage qui représente un déplacement (mm) est lu directement sur le cadran prévu à cet effet.

La stabilité Marshall qui représente la résistance de l'éprouvette est quant à elle calculée en multipliant le déplacement verticale (lu sur l'autre cadran) à la rupture par la raideur de l'appareil (donnée).

Le quotient Marshall Q sera donc égal au rapport de la stabilité sur le fluage S/F.

III.6.3. Essai Duriez (Tenue à l'eau)

III.6.3.1. Principe de l'essai

L'essai Duriez (NF P 98-251-1)

Il mesure la tenue à l'eau: un moule cylindrique par une pression statique à double effet. Une partie des éprouvettes est conservée sans immersion à température (18 °C) et hygrométrie contrôlées. L'autre partie est conservée immergée. Chaque groupe d'éprouvettes est écrasé en compression simple. Le rapport de la résistance après immersion à la résistance à sec donne la tenue à l'eau du mélange.

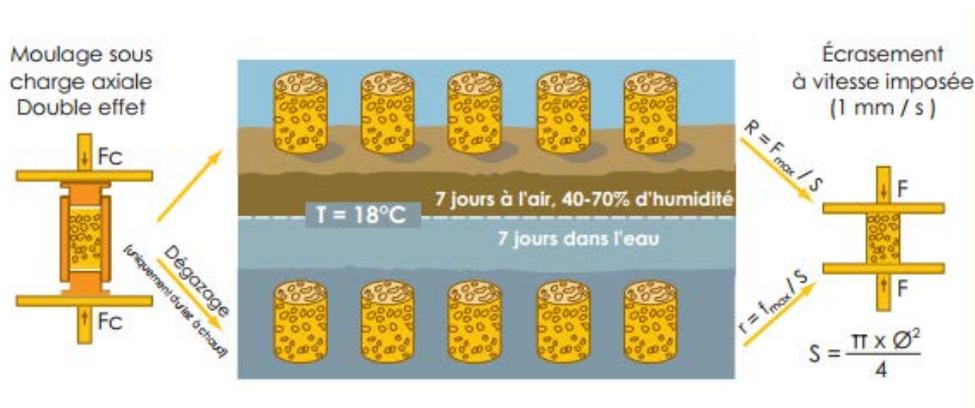


Figure 3.31: Schéma représentant le principe de l'essai Duriez

III.6.3.2. Calcul

III.6.4. Essai de tenue à l'eau (sensibilité de l'eau)

Cet essai permet d'évaluer l'effet de l'humidité sur les performances de l'enrobé. Il a été réalisé selon les recommandations de la norme européenne EN 12697-12.

Ce mode opératoire offre la possibilité d'avoir rapidement des résultats sur l'effet que l'humidité peut avoir sur l'enrobé. Cela est possible par la mesure de la résistance à la traction indirecte d'éprouvettes cylindriques de mélange bitumineux ayant subi une immersion accélérée dans l'eau. La résistance à la traction indirecte d'une éprouvette est calculée par la mesure de sa déformation verticale maximale.

III.6.4.1. Principe de l'essai

Pour cet essai, il est nécessaire d'avoir 4 éprouvettes. Deux d'entre elles seront conservées à l'air libre et donc à température ambiante tandis que les deux autres seront placées dans un bain d'eau à une température de 40°C. Elles seront ainsi conservées pendant 72h.

Le lot d'éprouvettes conservées dans le bain de 40°C est ensuite placé dans un bain de 25°C pendant une durée de 2h afin de les ramener à la température d'essai.



Figure 3.32: Conservations des éprouvettes

Les éprouvettes sont ensuite soumises à une traction indirecte. Ceci est effectué grâce à la presse d'essai de type Marshall. C'est donc une compression radiale verticale de l'éprouvette qui engendre une traction radiale horizontale.

Un dispositif de mesure de la déformation donne la déformation maximale à la rupture de l'éprouvette.



Figure 3.33: Ecrasement des éprouvettes en traction indirecte

III.6.4.2. Calcul

Le calcul de la résistance à la traction indirecte se fait par la relation suivante :

$$ITS = \frac{\text{lecture} \cdot 2 \cdot 0,232}{\pi DH}$$

Avec :

ITS : résistance à la traction exprimée en giga pascals (GPa)

0.232 : raideur de l'anneau exprimé en kilo newtons par millimètre (kN/mm) (appareil de mesure de la charge)

Lecture : lecture de l'anneau exprimé en millimètre (mm) (déplacement)

D : diamètre de l'éprouvette exprimé en millimètre (mm)

H : hauteur moyenne de l'éprouvette exprimée en millimètre (mm)

Le calcul de la tenue à l'eau se fait par la relation suivante :

$$ITSR = \frac{ITS_h}{ITS_s}$$

Avec :

ITSR : rapport de résistances en traction indirecte (indirect tensile strength ratio)

ITS_h : résistance des éprouvettes immergées dans l'eau (humide)

ITS_s : résistance des éprouvettes conservées à l'air libre (sec)

III.6.5. Mesure de la masse volumique apparente par pesée hydrostatique et calcul de la compacité

Cet essai est réalisé selon la norme algérienne NA 5238

III.6.5.1. Définitions

Masse volumique réelle : c'est la masse par unité de volume sans vide d'air d'un corps à une température donnée.

Masse volumique apparente : c'est la masse par unité de volume incluant les vides d'air d'un corps à une température donnée.

III.6.5.2. Principe de l'essai

L'essai consiste à peser les éprouvettes, d'abord à l'air libre, puis en les plaçant dans le panier de la balance hydrostatique se trouvant immergé dans un bac d'eau.



Figure 3.34: Pesée des éprouvettes à l'air et dans l'eau

III.6.5.3. Calcul de la compacité

La compacité est le rapport de la densité théorique calculée lors de la formulation sur la densité réelle des éprouvettes.

$$C = \frac{D_r}{D_{th}}$$

Avec

C : compacité

D_r : densité réelle

D_{th} : densité théorique

La détermination de la densité réelle passe par l'utilisation du principe d'Archimède. En effet, une fois immergée dans l'eau, l'éprouvette est soumise à deux forces de sens opposés à savoir :

- Le poids propre de l'éprouvette $P = M * g$
- La force d'Archimède $F = \rho_w * V * g$ sachant que V est le volume de l'eau déplacé par le volume de l'éprouvette. ($V = V_w = V_{\text{éprouvette}}$)

Etant donné que le panier de la balance hydrostatique est soumis à la force \vec{P}' , résultante des forces \vec{P} et \vec{F} , la masse affichée à l'écran représente la masse de l'éprouvette dans l'eau M' .

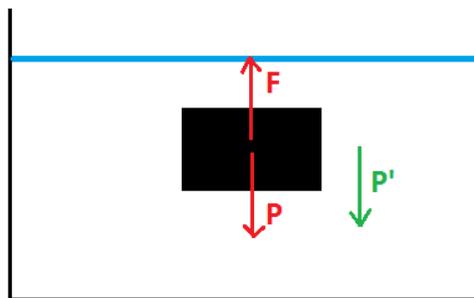


Figure 3.35: Schéma du principe d'Archimède

$$\text{Donc } P' = P - F = M' * g$$

$$\Rightarrow M' * g = (M * g) - (\rho_w * V * g)$$

$$\Rightarrow M' = M - \rho_w * V$$

De (3) on obtient $V = (M - M') / \rho_w$

Alors, l'expression de la masse volumique apparente devient :

$$\rho_{apparente} = \frac{M}{M - M'} * \rho_w$$

On a donc la densité réelle :

$$D_r = \frac{M}{M - M'}$$

Enfin, la compacité est égale à :

$$C = \frac{M}{(M - M') * D_{th}}$$

III.6.6. Mesure du module complexe

III.6.6.1. Définition du module de complexe

Lors de la conception d'une route, l'épaisseur des différentes couches de chaussée dépend de la rigidité du matériau utilisé. Celle-ci est quantifiée par le module de rigidité.

Dans le cas de l'utilisation d'un enrobé bitumineux, il est possible de déterminer sa rigidité par la mesure du module complexe car ce matériau présente un caractère viscoélastique. En effet, le module complexe, noté E^* , est l'expression de la rigidité d'un matériau viscoélastique sous sollicitations cycliques. (Félix Doucet, 2010)

Le module complexe E^* est appelé ainsi car il est représenté par un nombre complexe. Le module de ce dernier prend la valeur $|E^*|$ et représente le module de rigidité du béton bitumineux. Son argument ϕ représente le déphasage entre le chargement et la déformation. Ce déphasage est inhérent à tout matériau viscoélastique soumis à une contrainte. (Félix Doucet, 2010)

III.6.6.2. Principe de l'essai

Afin de déterminer le module complexe du béton bitumineux, une éprouvette est placée dans le Nottingham Asphalt Tester (NAT) où elle subit une série de tractions indirectes de façon radiale, engendrant des petites déformations de l'ordre du dixième de millimètre.



Figure 3.36: Essai de mesure du module dans le NAT

Les éprouvettes sont placées dans le système de chargement qui exerce une force le long du diamètre vertical de l'éprouvette (impulsion). Ces chargements sont répétés et espacés d'une période de repos pour obtenir une charge sous forme d'onde de choc.

Un système de mesure de la déformation diamétrale horizontale se charge alors de tracer la courbe des déformations en fonction du temps.

Sachant que l'enrobé bitumineux est thermosensible, son module complexe est affecté par les changements de température. Pour cela, les éprouvettes sont placées dans une enceinte à une température constante pendant une durée minimum de 4h puis, mises dans le NAT réglé à la même température. (Félix Doucet, 2010)

III.6.6.3. calcul du module complexe

Afin de calculer le module complexe d'un enrobé, il est nécessaire d'effectuer cinq (5) impulsions. Les déformations résultantes de chacune de ces impulsions sont enregistrées et utilisées pour le calcul du module de rigidité mesuré selon l'équation suivante :

$$S_m = \frac{F * (\nu + 0.27)}{(z * h)}$$

Avec :

S_m : est le module de rigidité mesuré à chaque impulsion (MPa),

F : est la valeur maximale de la charge verticale appliquée (N),

z : est l'amplitude de la déformation horizontale obtenue pendant le cycle de chargement (mm),

h : est l'épaisseur moyenne de l'éprouvette (mm),

ν : est le coefficient de Poisson.

Le module de rigidité de l'enrobé est égale donc à la moyenne des modules de rigidité mesurés correspondant à chaque impulsion :

$$|E^*| = \frac{\sum_1^5 S_{m_i}}{5}$$

Cependant, le NAT utilisé lors de cet essai dispose d'une interface informatisée. Les résultats sont donc transmis directement à l'opérateur sous forme de tableau.

III.7. Conclusion

Les résultats des essais pour la détermination des performances des enrobés ne seront acceptés que si les éprouvettes sont réalisées suivant un protocole normalisé. Il est donc primordial de suivre scrupuleusement la procédure de la méthode de formulation choisie afin d'assurer la fiabilité des résultats.

La confection d'enrobé nécessite de définir d'abord les caractéristiques des matériaux entrant dans sa composition. Pour cela les essais d'identification des granulats et du bitume sont capitaux.

Les performances des enrobés sont évaluées par des essais sur des éprouvettes. Dans le cas de la formulation Marshall, ils sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques standardisées type Marshall.

Chapitre IV : RESULTATS D'ESSAIS ET INTERPRETATION

IV.1 Introduction

La formulation des enrobés selon la méthode Marshall se fait par la comparaison des performances de trois (3) mélanges qui diffèrent entre eux par leur teneur en bitume. Cependant, et par manque de temps, il n'a été retenu qu'une seule teneur dans ce travail. Cela dit, les résultats ne seront pas compromis car le but étant de comparer les performances des enrobés à chaud et celles des enrobés tièdes pour une même teneur.

Dans ce chapitre, il sera question de tirer des conclusions à partir des résultats des tests effectués. Ces résultats seront ensuite interprétés et les performances des deux méthodes de formulations (à chaud et tièdes) seront comparées.

Aussi, dans ce travail, la sensibilité des éprouvettes à l'eau a été mesurée par l'essai de tenue à l'eau et non pas l'essai Duriez, procédé utilisé par le CTTTP pour sa rapidité d'exécution. En effet, il permet d'évaluer rapidement l'effet de l'humidité sur les éprouvettes. Cela est possible par une immersion accélérée des éprouvettes dans l'eau.

IV.2 Résultats des essais d'identification

IV.2.1 Identification des granulats

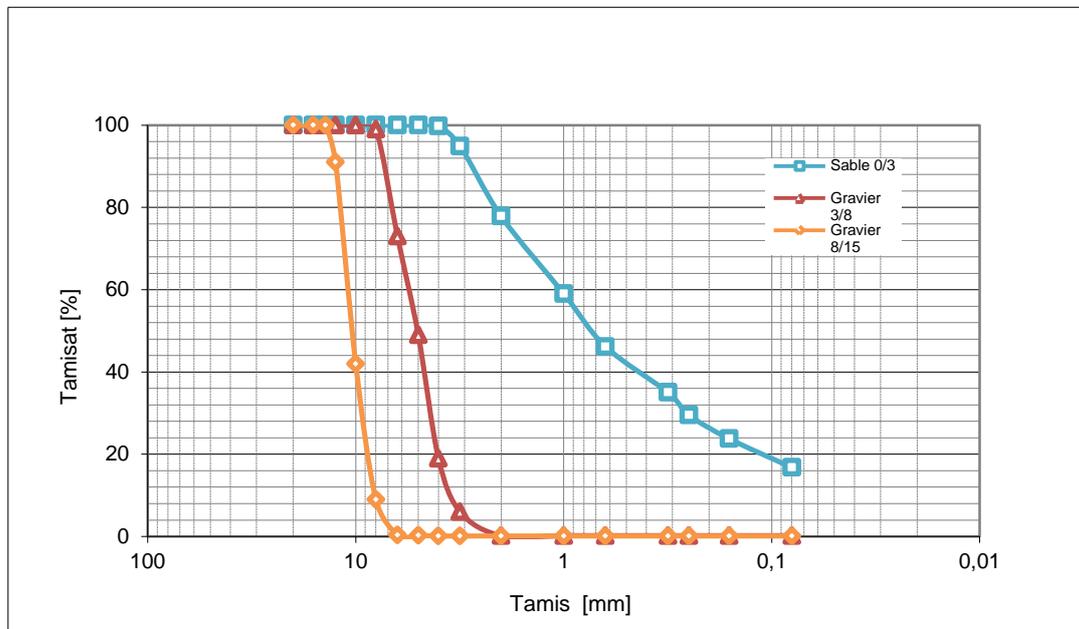


Figure 4.1: Courbe granulométrique des différentes fractions drainaires

Tableau 4-1: Caractéristiques des granulats

Essais	Les fractions			Exigences
	0/3	3/8	8/15	
Coefficient d'aplatissement (%)		16.01	13.84	≤ 25
Propreté superficielle (%)		0.21	0.12	< 2
Valeur au bleu de méthylène	0.83			< 2
Densité spécifique	2.62	2.62	2.62	
Los Angeles (%)		13	17.2	≤ 25
Micro-Deval en présence d'eau (%)		6.2	11.2	≤ 25

On remarque d'après les résultats des essais d'identification des granulats que ces derniers sont conformes aux exigences préconisées par les normes algériennes et les recommandations du CTPP. De plus, la courbe granulométrique présente un aspect continu, ce qui favorise le bon compactage de l'enrobé.

Les granulats testés seront donc retenus pour la formulation d'un béton bitumineux.

IV.2.2 Identification du bitume

Tableau 4-2: Caractéristiques du bitume

Type d'essai	Résultats	Exigences
Pénétrabilité à 25°C (1/10 mm)	39	35/50
TBA	53	50/58
Densité relative	1.02	1.0 à 1.05
Ductilité (mm)	1005	>1000

Il est à noter que les résultats des essais sur le bitume mis à disposition pour la formulation de l'enrobé bitumineux utilisé sont conformes aux exigences de la construction routière en Algérie.

IV.2.3 Identification de la Zéolithe

Tableau 4-3: Caractéristiques de la zéolithe

Teneur en eau	22.16%
Densité	1.92

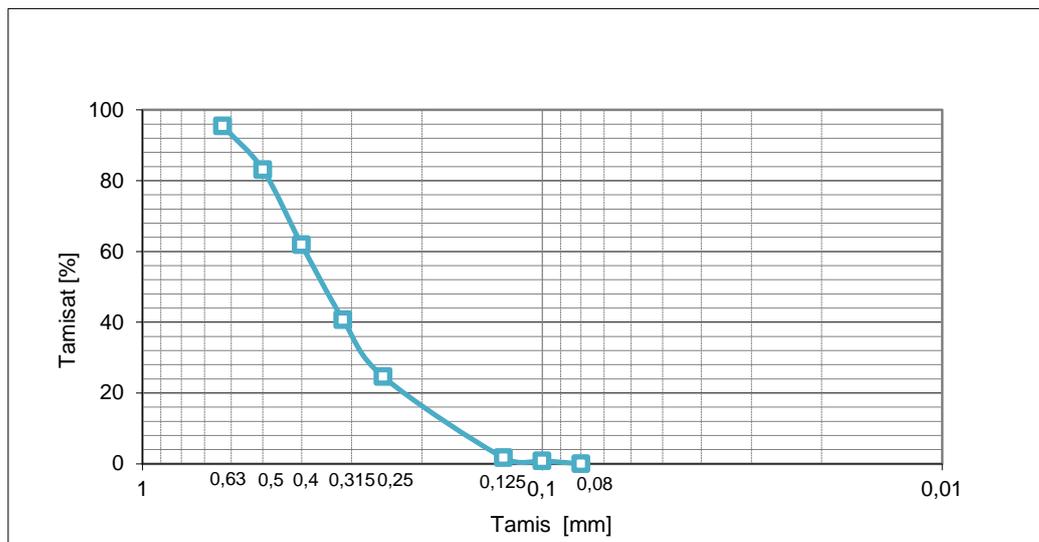


Figure 4.2: Courbe granulométrique de la zéolithe

Sachant que la zéolithe est un produit relativement méconnu dans le domaine de la construction routière algérienne, il était important de mettre en évidence certaines de ses caractéristiques afin de pallier à l'absence de fiches techniques la décrivant.

IV.3 Résultats des essais sur enrobés

IV.3.1. Formulation de l'enrobé

Tableau 4-4: Pourcentage des constituants et surface spécifique

Fractions	Pourcentage des constituants (%)
Fillers	0
sable 0/3	43
gravier 3/8	23
gravier 8/15	34
Total	100
G+ S+ s+ f	Surface spécifique = $0,25G + 2,3S + 12s + 135f$
100	$\sum (m^2/kg) = 11,91$

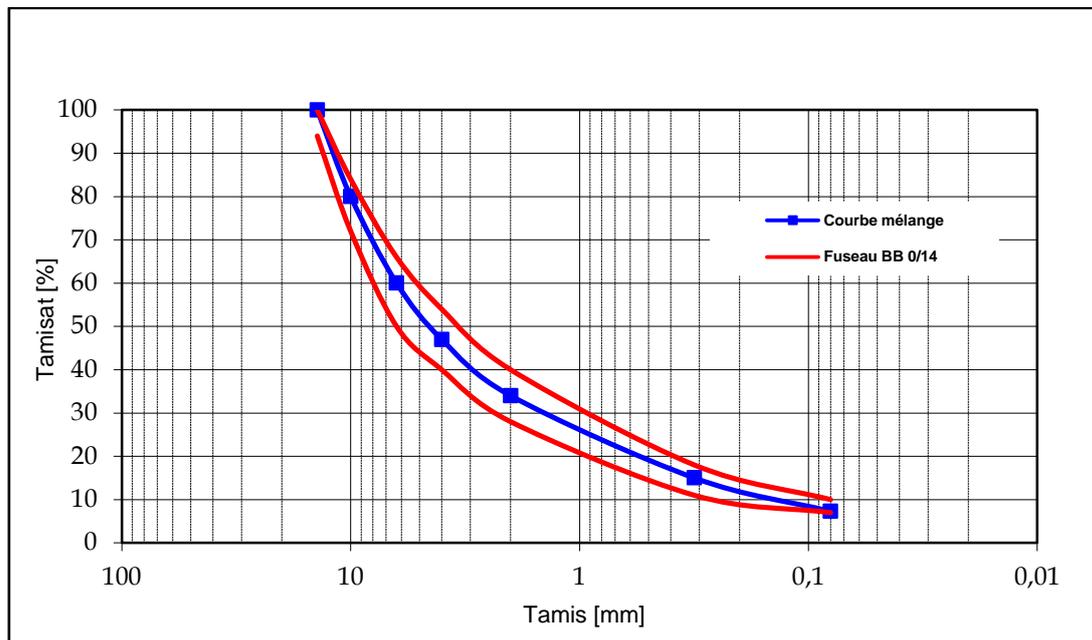


Figure 4.3: Courbe granulométrique du mélange

On remarquera que la courbe granulométrique du mélange se situe parfaitement à l'intérieur du fuseau de référence. Le premier et le dernier point concordent respectivement avec la limite supérieure et la limite inférieure du fuseau.

Tableau 4-5: Module de richesse, teneur en bitume et masse volumique du mélange

Densité du bitume	Module de richesse	Teneur en bitume (%)	Masse volumique du mélange
1,02 t/m ³	3.45	5.75	2.41
	3.6	6	2.40
	3.75	6.25	2.40

La teneur en bitume prise en compte pour la suite des essais sera celle dont le module de richesse est égal à 3.45. Elle sera égale à 5.74 %.

IV.3.2. Résultats des performances

Tableau 4-6: Performances des enrobés

Procédé	A chaud	Zéolithe 1%	Zéolithe 0.3%	
			Immédiat	Etuve 40°C
Densité théorique	2.41			
Densité réelle	2.41	2.36	2.35	
Compacité	1	0.98	0.98	
Stabilité Marshall	9.90	2.78	9.69	9.90
Fluage	3.10	4.2	3.17	3.10
Tenue à l'eau	0.97		0.87	0.90
Module de rigidité	13479	11121	11504	12536
Quotient Marshall	3.19	0.66	3.06	3.19

Il est clair que la compacité des enrobés bitumineux contenant de la zéolithe est sensiblement proche de celle des enrobés à chaud. L'on notera que l'enrobé formulé à chaud à une compacité parfaite.

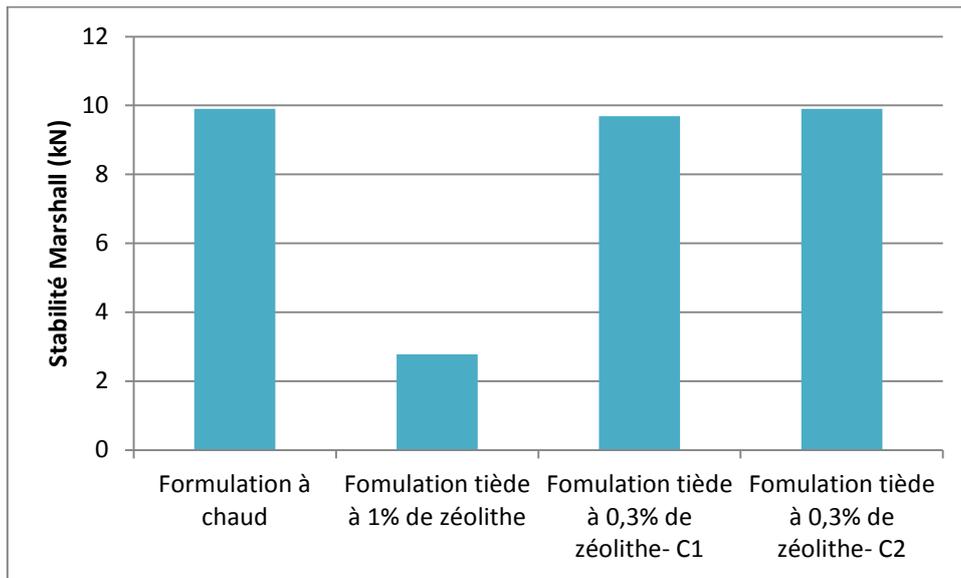


Figure 4.4: Histogrammes de la stabilité Marshall

Les résultats obtenus après l'essai Marshall démontrent qu'une formulation adéquate d'enrobés tièdes par ajout de zéolithe ne nuit en rien à la stabilité du béton bitumineux. Il est à noter que, les éprouvettes ayant été placées dans l'étuve pour accélérer leur temps de murissement présentent une meilleure résistance à la déformation que celle des éprouvettes soumises au test immédiatement après leur démoulage.

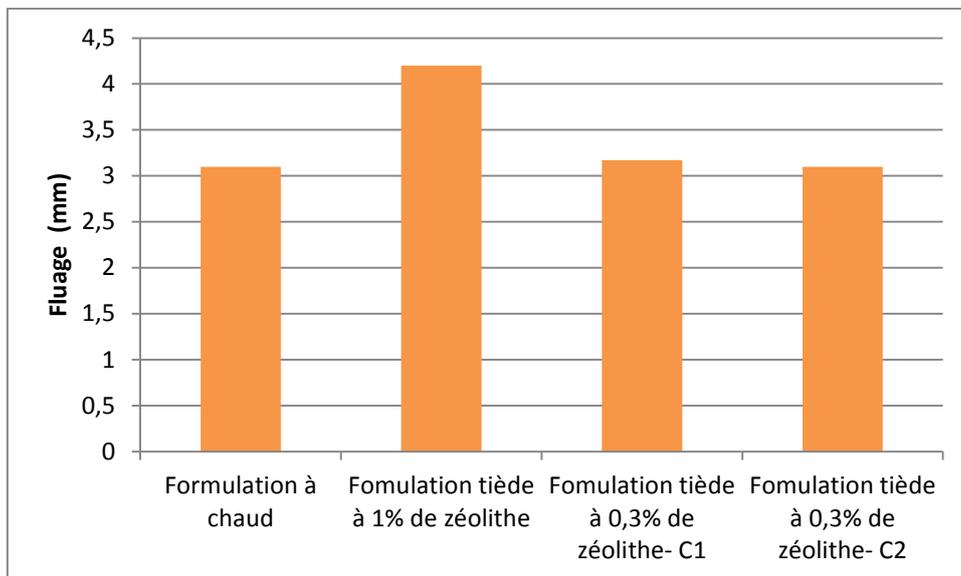


Figure 4.5: Histogrammes du fluage

Les enrobés tièdes par ajout de zéolithe à teneur de 0.3% présentent un fluage quasi-équivalent à celui des enrobés formulés à chaud. Il est évident, d'après les résultats, qu'un excès de zéolithe dans l'enrobé augmente de façon considérable le fluage de ce dernier.

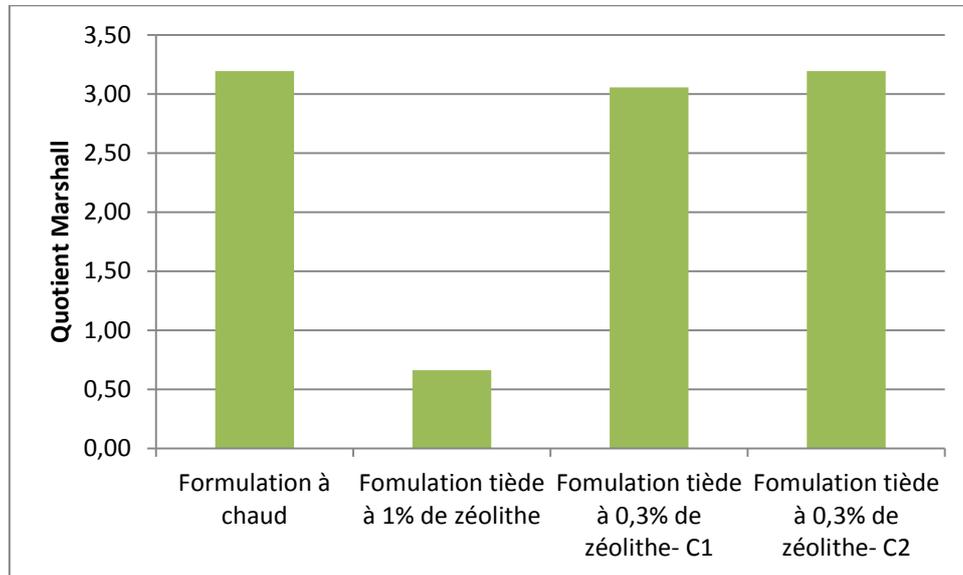


Figure 4.6: Histogrammes du quotient Marshall

Les histogrammes précédents démontrent clairement que les enrobés formulés avec ajout de 0.3% de zéolithe ont un quotient Marshall proche de celui des enrobés formulés à chaud. Par ailleurs, il est à noter que le murissement n'a pas d'impact notable sur la valeur du quotient Marshall.

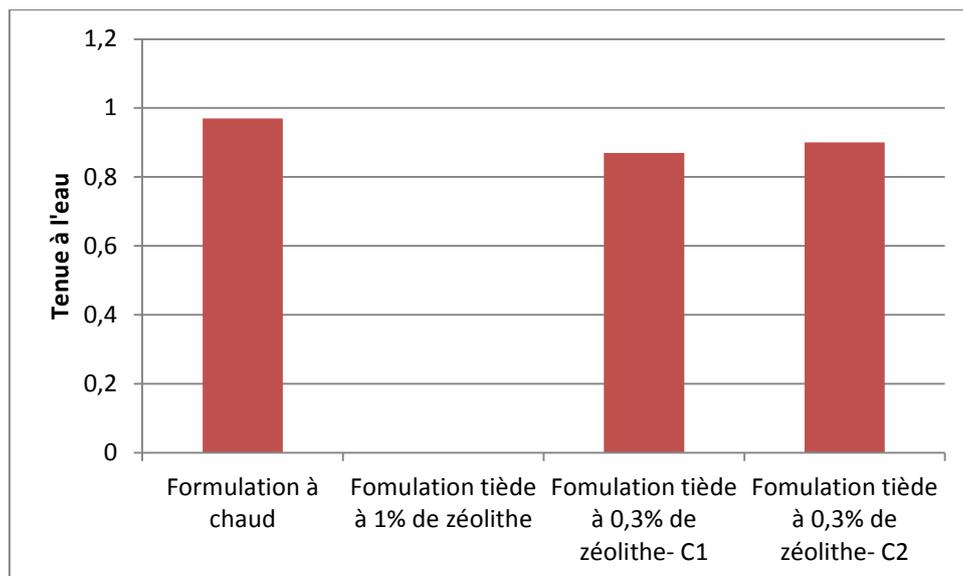


Figure 4.7: Histogrammes de la tenue à l'eau

Les essais de tenue à l'eau montrent qu'il n'y a pas une grande différence entre la formulation d'enrobés à chaud et la formulation d'enrobés tièdes par ajout d'une quantité de 0.3% de zéolithe.

Par ailleurs, les éprouvettes d'enrobés tièdes formulés par ajout d'une quantité de 1% de zéolithe se sont effritées au bout de quelques heures dans le bain de 40°C. L'écrasement a donc été rendu impossible. Cela peut être interprété comme étant une tenue à l'eau nulle.



Figure 4.8: Eprouvettes effritées dans le bain à 40°C

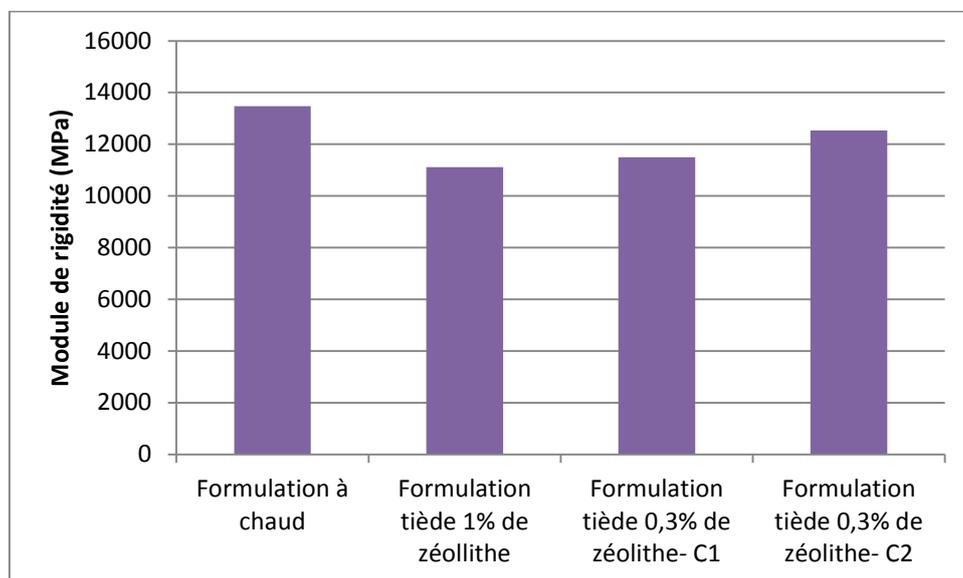


Figure 4.9: Histogramme du module de rigidité

Le module de rigidité n'est pas un essai requis lors de la formulation Marshall. Néanmoins, il a été effectué dans le but d'apporter un comparatif supplémentaire entre les deux types d'enrobés.

Les modules de rigidité des enrobés de cette formulation sont tous de bonnes qualités. Cependant, les formulations d'enrobés tièdes avec une teneur en zéolithe de 1% et de 0.3% (conservation C1) présentent des résultats légèrement inférieurs à ceux des deux autres.

IV.4 Conclusion

Les essais effectués sur les différentes formulations d'enrobés ont clairement démontré que les enrobés tièdes à base de zéolithe à hauteur de 0.3% de la masse totale, présentent des performances similaires à celles des enrobés à chaud. Néanmoins, on remarque qu'il n'y a pas eu d'amélioration des performances avec un temps de murissement.

Aussi, il a été démontré qu'un trop fort taux de zéolithe altère de façon considérable les performances de l'enrobé. En effet, la présence d'une quantité importante d'eau dans l'enrobé induit une mauvaise tenue à l'eau ainsi qu'une faible stabilité.

Chapitre V : COMPARATIF ECONOMICO-ENVIRONNEMENTAL

V.1 Introduction

L'industrie se trouve souvent confrontée aux questions écologiques, mais y répondre peut parfois s'avérer impossible pour des raisons techniques ou économiques. Effectivement, une production écoresponsable est dans la majeure partie du temps très onéreuse. Il est donc nécessaire de faire des compromis ingénieux, parfois, en faveur de l'économie et d'autres fois, en faveur de l'environnement.

L'enjeu est donc de trouver le procédé de production optimal qui allie rendement économique et respect de la nature.

V.2 Comparaison des performances

Tableau 5-1: Tableau comparatif des performances

Procédé	A chaud	Tiède par ajout de zéolithe
Température du bitume	165°C	165°C
Température de séchage des granulats	165°C	120°C
Température de malaxage	160°C	125°C
Stabilité Marshall	9.90	9.90
Fluage	3.33	3.8
Densité réelle	2.41	2.35
Compacité	1	0.98
Tenue à l'eau	0.97	0.85
Module de rigidité	13479	12536

Les essais sur les différents procédés de production d'enrobés, à chaud et tièdes à base de zéolithe, ont démontré que leurs performances sont quasi identiques. Cela indique qu'une baisse de la température de fabrication de l'enrobé combinée à un ajout de zéolithe permet de garder les qualités des enrobés à chaud tout en réduisant la consommation d'énergie.

V.3 Consommation de fuel

Il a été démontré, dans une étude, que la fabrication d'enrobés à chaud nécessitait une quantité de fuel estimée à 5.52 l/tonne d'enrobés tandis que la fabrication des enrobés tièdes par ajout de zéolithe ne requière que 4.11 l/tonne d'enrobés (BAKOWSKI). Cela équivaut à une économie de fuel de 1.41 l/tonne d'enrobés, soit une réduction de 25%. L'Algérie nécessitant une production annuelle de 2.5 millions de tonnes d'enrobés, cela équivaudrait donc à une économie de 3.53 millions de litres de fuel par an. (Abdelaziz, 2008)

En estimant la consommation moyenne d'un véhicule léger à 8 L au 100km, l'économie de fuel peut être comparée à la consommation de 441 250 véhicules parcourant 100km.

V.4 Bilan écologique

Le passage des enrobés à chaud aux enrobés tièdes est avant tout motivé par la réduction de l'impact écologiques des constructions routières. En effet, la production d'enrobés induit des émissions de CO₂, de particules ultrafines, de composés organiques volatiles (COV) et des oxydes d'azote (NO_x) non négligeables. (Brosseaud)

L'étude faite sur le chantier de l'A87 en France a prouvé que les enrobés tièdes permettent de réduire les émissions de CO₂ de 25 %, de NO_x de 39 % et de COV de 35%. (Brosseaud)

Aussi, il a été remarqué que les particules ultrafines sont réduites de 75 % lorsque la température d'enrobage est abaissée de 20°C. Cela diminue de façon non négligeable la gêne olfactive à laquelle les ouvriers sont exposés.

Tableau 5-2: Bilan écologique

	Enrobés à chaud	Enrobés tièdes	Différence
Température de séchage des granulats	165°C	120°C	-45°C
Température de malaxage	160°C	125°C	-35°C
Consommation en fuel	5.52 l/t d'enrobé	4.11 l/t d'enrobé	-1.41 l/t d'enrobé soit 25%
Emission de CO2	14.24 kg/t d'enrobé	10.73 kg/t d'enrobé	-3.51 kg/t d'enrobé soit près de 25%
Emissions de particules ultrafines			- 75%
Composés organiques volatiles (COV)	18.2	11.8	-35%
Les oxydes d'azote (NOx)	26.3	16.1	-39%

V.5 Bilan économique

Afin de faire un comparatif économique entre l'utilisation d'enrobés tièdes et d'enrobés classiques, l'on se propose de tracer le tableau suivant :

Tableau 5-3: Coût supplémentaire d'un enrobé tiède par ajout de zéolithe

Nature des dépenses	Prix unitaire	1 tonne d'enrobé tiède avec ajout de zéolithe	Différence de prix
Consommation de fuel (litre)	15 DA	- 1.41	- 61.65 DA
Zéolithe (kilogramme)	1.3 \$ soit 130 DA	+3	+ 390 DA

Cout
supplémentaire

+ 328.35 DA

On remarque, d'après le tableau 10 que le coût de revient de l'enrobé tiède est plus chère de 328 DA que celui d'un enrobé à chaud. (algerie.prix-construction)

Sachant que le prix d'une tonne d'enrobé classique est aux environs de 1200 DA, le prix de revient d'une chaussée réalisée à l'aide d'un enrobé tiède est 27% plus élevé que celui d'une chaussée classique.

V.6 Conclusion

Du fait des résultats obtenus, on comprend que l'utilisation d'enrobés tièdes est primordiale pour réaliser des économies d'énergie et ainsi, réduire le taux de particules fine et de gaz nocifs rejetés dans l'atmosphère. Bien que le coût de revient soit plus élevé que celui des enrobés réalisés à chaud, l'idéale serait d'encourager leur utilisation pour la banaliser et ainsi en atténuer le prix car leurs bienfaits sont considérables.

Il est à noter que les enrobés tièdes sont très fréquemment utilisés dans les pays occidentaux du fait que le prix du fuel soit relativement élevé comparativement à son prix en Algérie. C'est donc une option envisageable dans le cas très probable de l'augmentation des prix des carburants dans notre pays.

CONCLUSION

La réalisation des chaussées passe par un travail laborieux. Les techniques d'ingénierie établies dans le domaine de la construction routière sont sans cesse améliorées pour offrir plus de sécurité aux usagers et augmenter la durabilité des routes.

Aujourd'hui, les ingénieurs ne recherchent plus seulement l'amélioration des performances, mais ils s'intéressent aussi à l'équilibre de la balance économique-environnementale. En effet, en essayant de maintenir les avantages des enrobés traditionnels tout en réduisant la consommation énergétique, les recherches ont abouti au développement des enrobés tièdes.

Dans ce travail, les différents essais effectués auront clairement démontré que les enrobés tièdes conservent les mêmes performances que celles des enrobés à chaud.

L'étude comparative, a quant à elle, révélé qu'en Algérie, les enrobés tièdes n'engendrent aucun gains économiques mais au contraire des coûts supplémentaires. Cela est dû au fait que le carburant soit subventionné par l'état et donc ne représente que 6% du coût de revient de l'enrobé classique. L'économie sur le coût du carburant est alors dérisoire devant le prix de la zéolithe. Les seuls avantages sont donc du point de vue écologique. L'état algérien devra donc encourager leur production et ce, dans le but de réduire la pollution qui ne cesse de s'intensifier. Cela peut être possible par des réductions de taxes pour tous les industriels émettant moins de pollution et l'instauration de taxes carbone pour ceux qui, au contraire polluent le plus. Aussi, engager des recherches dans le but de synthétiser la zéolithe au sein du pays permettrait de réduire son prix. Cela aura pour conséquence de banaliser les enrobés tièdes et, avec le temps, réduirait leur coût.

Par ailleurs, dans un futur proche, l'Algérie risque de voir le coût du fuel augmenter à cause des réserves de pétrole qui s'amenuisent dangereusement depuis déjà quelques années. Dans ce cas, les enrobés tièdes pourraient alors s'avérer être une bonne alternative aux enrobés classiques, car leur prix risque de devenir plus intéressants. En effet, dans d'autres pays où le prix du fuel est plus important, les enrobés tièdes permettent de faire des économies financières non négligeables.

Pour le moment, il serait judicieux d'explorer d'autres procédés de fabrication d'enrobés tièdes qui pourraient s'avérer être moins onéreux, voire même économiques.

Ce projet aura donc permis de mettre en évidence les avantages des enrobés tièdes et leur impact écologique sur la planète.

Bibliographie

- (s.d.). Consulté le avril 2014, sur planete-tp: <http://www.planete-tp.com/les-voies-romaines-a1266.html>
- (s.d.). Récupéré sur cosmovisions: <http://www.cosmovisions.com/RangRoutes.php>
- Abdelaziz, Z. A. (2008, juin). Comparaison des formulations d'enrobé à chaud pour couches de roulement des chaussées très circulées en France et en Algérie du point de vue sécurité (glissance) et orniérage. ENTPE de Lyon.
- Algerie.prix-construction*. (s.d.). Consulté le juin 2014, sur [algerie.prix-construction](http://www.algerie.prix-construction.info): <http://www.algerie.prix-construction.info>
- BAKOWSKI, S. (s.d.). Enrobés à l'Asphamin - Enrobés tièdes. EUROVIA.
- Brosseaud, Y. (s.d.). ECOLOGIQUE, SECURITAIRES, CONFORTABLE, LES ENROBES DE DEMAIN SE FERONT AUTREMENT: PRESENTATION DES ENROBES TIEDES. LCPC.
- Bueche, N. (2011). *Evaluation des performances et des impacts des enrobés*. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- CIMbéton. (s.d.). Fiches techniques Tome 1: Les constituants des bétons et des mortiers.
- Cours-genie-civil*. (s.d.). Consulté le fevrier 2014, sur www.cours-genie-civil.com
- CTTP. (2004). Recommandation algériennes sur l'utilisation des bitumes et enrobés .
- Delorme, J. L. (s.d.). Genèse et place de la méthode utilisée en France par rapport aux autres méthodes de formulation. LCPC - Journées de formulation enrobés 2005.
- Félix Doucet, B. a. (2010, Mai). Détermination du module complexe de enrobés au ministère des transports du Québec. Ministère des transport du Québec.
- GHOMARI, F., & BENDI-OUIS, A. (2007). Science des matériaux de construction; université Aboubekr Belkaid.
- J. L. DELORME, C. R. (2007). Manuel LCTP d'aide à la formulation des enrobés. Paris, France: LCTP.
- MARCHAND, j.-L. (s.d.). Les enrobés tièdes. USIRF Routes de France.
- Nynas Belgium AB. (2005). La manipulation sans danger du bitume, Guide pratique.
- Organisme national de contrôle technique des travaux publics. (2011, novembre). Un label de référence.
- Paquin, y. (2009, novembre 24). Evolution et technologies des enrobés tièdes.
- Présidence de la république algérienne*. (s.d.). Récupéré sur [elmouradia](http://www.elmouradia.dz/francais/algérie/economie/algériefr.htm): <http://www.elmouradia.dz/francais/algérie/economie/algériefr.htm>

ROBER, M., & LAFON, J. F. (2011/2012). ROUTES, Matériaux, Durabilité des chaussées, MASTER 2 GENIE-CIVIL, Tome I, UPS.

SHELL BITUMES. (1991). Techniques et utilisations. Société des Pétroles Shell.

Annexe

Annexe1. Identification granulats

1. Granulométrie

- Gravier 8/15

Masse de l'échantillon sec totale : $M_{s1} = 3404\text{g}$

Masse de l'échantillon sec après lavage : $M_{s2} = 3400\text{g}$

Tableau 1: Analyse granulométrique du gravier 8/15

Ouverture du tamis	Masse refus cumulés R_i (g)	Refus cumulés $r_i = (100r_i/M_{s1})\%$	Tamisas cumulés $100-r_i$ (%)	Tamisas cumulés (arrondi) (%)
12.5	293	8.61	91.39	91
10	1980	58.17	41.83	42
8	3114	91.48	8.52	9
6.3	3391	99.62	0.38	0.38
5	3395	99.74	0.26	0.26
0.08	3400	99.82	0.12	0.12

Teneur en fine : 0.12%

- Gravier 3/8

Masse de l'échantillon sec total : $M_{s1} = 1875\text{g}$

Masse de l'échantillon sec après lavage : $M_{s2} = 1871\text{g}$

Tableau 2: Analyse granulométrique pour le gravier 3/8

Ouverture du tamis	Masse refus cumulés R_i (g)	Refus cumulés $r_i = (100r_i/M_{s1})\%$	Tamisas cumulés $100-r_i$ (%)	Tamisas cumulés (arrondi) (%)
8	12	0.64	99.36	99
6.3	509	27.15	72.85	73
5	959	51.15	48.85	49
4	1518	80.96	19.04	19
3.15	1760	93.87	6.13	6
2.5	1839	98.08	1.92	2
2	1852	98.77	1.23	1
1.25	1854	98.93	1.07	1
0.063	1871	99.79	0.21	0.21

Teneur en fine : 0.21%

- Sable 0/3

Masse de l'échantillon sec : $M_{s1} = 1000$

Masse de l'échantillon sec après lavage : $M_{s2} =$

Tableau 3: Analyse granulométrique pour le sable 0/3

Ouverture du tamis	Masse refus cumulée R_i (g)	Refus cumulé $r_i = (100r_i/M_{s1})\%$	Tamias cumulé 100- r_i (%)	Tamias cumulé (arrondi) (%)
4	2.4	0.24	99.78	100
3.15	50.6	5.06	94.94	95
2	221.3	22.13	77.87	78
1	409.4	40.94	59.06	59
0.63	538.1	53.81	46.19	46
0.315	649.8	64.98	35.02	35
0.250	704.8	70.48	29.52	30
0.16	762.2	76.22	23.76	24
0.08	832.2	83.22	16.78	17

2. Essai d'aplatissement

M_g : masse de la classe granulaire d/D.

M_e : masse du passant de la grille d'écartement e.

- Fraction 8/15

Tableau 4: Aplatissement du gravier 8/15

Tamisage sur tamis		Tamisage sur grilles		
Classes granulaire	M_g (g)	Ecartement des grilles (mm)	Passant M_e (g)	$A_i = [M_e / M_g] \times 100$
12.5-16	293	8	54	18.43
10-12.5	1687	6.3	226	13.40
8-10	1134	5	155	13.67
6.3-8	277	4	35	12.64
5-6.3	4	3.15	0	0
$M = \sum M_g = 3395g$ $M_o = 3404g$		$\sum M_e = 470g$		
$A = [\sum M_e / M] \times 100 = 13.84\%$				

- Fraction 3/8

Tableau 5: Aplatissement du gravier 3/8

Tamisage sur tamis		Tamisage sur grilles		
Classes granulaire	M_g (g)	Ecartement des grilles (mm)	Passant M_e (g)	$A_i = [M_e / M_g] \times 100$
8-10	12	5	0	0
6.3-8	497	4	110	22.13
5-6.3	450	3.15	61	13.56
4-5	559	2.5	72	12.88
$M = \sum M_g = 1518g$ $M_o = 1875g$		$\sum M_e = 243g$		
$A = [\sum M_e / M] \times 100 = 16.01\%$				

3. Essai Los Angeles

Tableau 6: Résultats de l'essai Los Angeles

Fraction granulaire	Classe granulaire	Poids initial (g)	Nombre de boulets	Passant au tamis 1.6mm(g)	Coef de Los Angeles(%)
3/8	4/6.3	5000	7	4350	13%
8/15	6.3/12.5	5000	9	4140	17.2%

4. Essai Micro-Deval en présence d'eau

Tableau 7: Résultats de l'essai Micro-Deval en présence d'eau

Fraction granulaire	Classe granulaire	Masse de la prise d'essai (g)	Masse des billes d'acier (g)	Refus du tamis de 1.6mm (g)	Coef Micro Deval
3/8	4/6.3	500	2000	469	6.2%
8/15	6.3/12.5	500	4000au lieu de 5000	444	11.2%

5. Densité des granulats

Tableau 8: Résultats de la mesure de la densité des granulats

Fraction granulaire	0/3	3/8	8/15
Classe granulaire		4/6.3	6.3/12.5
Masse du pycnomètre M_p	716	716.0	716.0
Masse du pycnomètre+ eau M_{pe}	3183	3183	3183
Masse du pycnomètre+ eau+ granulats M_{peg}	3624.5	3625	3624.5
Masse des granulats M_g	700	700	700
Volume du pycnomètre $V_p = M_{pe} - M_p$	2476	2476	2476
Volume de l'eau dans la partie haute du pycnomètre $V_e = M_{peg} - M_g$	2208.5	2209	2208.5
Volume des granulats $V_g = V_p - V_e$	267.5	267	267.5
Densité des granulats $D = M_g/V_g$	2.62 résultats à revoir et confirmer	2.62	2.62

6. Essai au bleu de méthylène

Masse sèche de la prise d'essai de la fraction 0/2 mm M (g) 60

Quantité totale de la solution de colorant ajoutée V (ml) 5

Valeur au bleu VB, exprimée en grammes de colorant par Kg de grains de fraction 0/2mm $VB = \frac{V}{M} * 10 = 0.83$

Annexe2. Essai d'identification du bitume

1. Essai bille-anneau (point de ramollissement)

Pr une bitume 40/50, la température de ramollissement du bitume doit être comprise entre 52 et 58.

Tableau 9: Résultats de l'essai Bille-anneau

Type de bitume	40/50
Heure de début de l'essai	9h00
Température de chauffage de l'échantillon (145°C-167°C)	165°C
Temps de chauffage du bitume (Maximum 2 h)	2h00
Durée de refroidissement de l'échantillon (minimum 30minutes)	30 mn
Température du bain d'eau à chaque minute	Début : 5°C 1mn : 9°C 2mn : 11°C 3mn : 14°C
Température à laquelle touche la plaque inférieure du support (C°)	52/53
Point de ramollissement (C°)	53
Heure à la fin de l'essai	13h40
Durée de l'essai	30mn

2. Essai de pénétrabilité

Pour un bitume 40/50 elle doit être comprise entre

Tableau 10: Résultats de l'essai de pénétrabilité

Heure de début de l'essai	9h00
Temps de refroidissement de l'échantillon dans le godet (min 1h30)	1h30
Temps de pause de l'échantillon dans le bain marie	1h30
Température de l'essai	25°C
Charge appliquée (g)	100g
Valeurs des pénétrations de l'aiguille (1/10mm)	1) 40 / 40 2) 40 / 34 3) 39 / 37
Pénétrabilité moyenne (1/10)	39
Heure de la fin de l'essai	14h00
Durée de l'essai	3h00

3. Essai de ductilité

Dépasse 600mm = classe 40/50

Température d'essai 25°C

Distance d'écartement des pattes d'attache à la rupture 1005 mm

4. Essai d'adhésivité(AKZOO)

Tableau 11: Résultats de l'essai AKZOO

Fraction granulaire	Taux de granulats recouverts par le liant (%)
3/8	98%
8/15	95%

Annexe3. Essai sur zéolithe

1. Granulométrie

Tableau 12: Analyse granulométrique de la zéolithe

Ouvertures de tamis (mm)	Masse refus cumulés r_i (g)	Pourcentage refus cumulés (%)	Pourcentage du tamisât $100 - r_i$ (%)
0.630	4.5	4.5	95.5
0.500	16.9	16.9	83.1
0.400	38.1	38.1	61.9
0.315	55.3	55.3	40.7
0.250	75.4	75.4	24.6
0.125	98.3	98.3	1.7
0.100	99.15	99.15	0.85
0.080	100	100	0

2. Densité

Tableau 13: Résultats de la mesure de densité de la zéolithe

Masse du pycnomètre vide M_p	34.8g
Masse de la zéolithe M_z	10g
Masse du pycnomètre rempli entièrement d'eau M_{p+e}	134.3g
Masse de l'eau $M_e = M_{p+e} - M_p$	99.5g
ρ_e	1g/ml
Volume du pycnomètre $V_p = V_e = \rho_e M_e = M_e$	99.5ml
Masse du pycnomètre + eau + zéolithe M_{p+e+z}	139.1g
Volume de la zéolithe $V_z = V_p - V_e$	$99.5 - [139.1 - 34.8 - 10] = 5.2 \text{ ml}$
$\rho_z = M_z / V_z$	$10 / 5.2 = 1.92 \text{ g/cm}^3$
D_z	1.92

3. Teneur en eau

Tableau 14: Résultats de la teneur en eau de la zéolithe

Masse de la capsule	44.6667g
Masse de la capsule + 2g de zéolithe.	46.6661g
Durée de mise de la prise dans le four	24h
Masse de l'éprouvette après étuvage et calcination	46.2230g
Teneur en eau	22.16%

Annexe4. Essai sur éprouvettes

1. Mesure des hauteurs

Tableau 15: Caractéristiques géométriques des éprouvettes de la formulation à chaud

Formulation à chaud											
N°	1	2	3	4	5	Moy	D	V	Masse	D _{th}	Fac.
1	6.35	6.33	6.37	6.34	6.37	6.352	10.14	512.951	1206.2	2.352	1
2	6.30	6.35	6.34	6.31	6.33	6.326		510.852	1201.5	2.352	1
3	6.20	6.24	6.26	6.27	6.20	6.31		1198.2	509.28	2.35	1
4	6.27	6.19	6.21	6.24	6.20	6.22		1203.8	1203.3	2.40	1.04
5	6.20	6.18	6.20	6.16	6.15	6.18		1197.5	1197.0	2.40	1.04
6	6.16	6.17	6.17	6.15	6.18	6.17		1197.7	1197.2	2.40	1.04
7	6.17	6.20	6.21	6.20	6.20	6.20		1187.9	1187.3	2.37	1.04
8	6.25	6.24	6.22	6.20	6.27	6.24		1203.0	503.63	2.39	1.04

Tableau 16: Caractéristiques géométriques des éprouvettes de la formulation avec ajout de 1% de zéolithe

Formulation zéolithe 1%											
N°	1	2	3	4	5	Moy	D	V	Masse	D _{th}	Fac.
1	6.32	6.33	6.3	6.3	6.35	6.320	10.14	510.367	1204.8	2.36	1
2	6.31	6.33	6.34	6.33	6.3	6.322	10.14	510.529	1205.8	2.36	1
3	6.35	6.38	6.37	6.37	6.39	6.372	10.14	514.567	1205.8	2.34	1
4	6.44	6.48	6.5	6.5	6.47	6.478	10.14	523.127	1206.1	2.31	0.96
5	6.35	6.37	6.37	6.32	6.31	6.344	10.14	512.305	1204.3	2.35	1

Tableau 17: Caractéristiques géométriques des éprouvettes avec ajout de 0.3% de zéolithe

Formulation zéolithe 0.3%											
N°	1	2	3	4	5	Moy	D	V	Masse	D _{th}	Fac.
1	6.35	6.33	6.37	6.34	6.37	6.352	10.14	512.951	1206.2	2.352	1
2	6.30	6.35	6.34	6.31	6.33	6.326		510.852	1201.5	2.352	1
3	6.39	6.33	6.30	6.32	6.38	6.344		512.305	1207.3	2.357	1
4	6.40	6.38	6.38	6.35	6.39	6.380		515.213	1200.1	2.329	1
5	6.49	6.49	6.50	6.52	6.54	6.508		525.549	1205.2	2.293	0.96
6	6.40	6.43	6.49	6.50	6.50	6.464		521.996	1209.0	2.316	1
7	6.29	6.30	6.31	6.29	6.29	6.296		508.429	1208.5	2.377	1.04
8	6.20	6.20	6.20	6.19	6.18	6.194		500.192	1203.8	2.407	1.04
9	6.40	6.39	6.41	6.41	6.40	6.402		516.989	1207.0	2.335	1
10	6.50	6.50	6.50	6.49	6.49	6.496		524.580	1200.5	2.288	0.96
11	6.39	6.41	6.43	6.39	6.41	6.406		517.312	1205.6	2.330	1
12	6.38	6.35	6.36	6.37	6.38	6.368		514.243	1202.3	2.338	1
13	6.45	6.44	6.49	6.50	6.50	6.48		522.97	1206.7	2.31	0.96
14	6.42	6.40	6.41	6.47	6.46	6.43		519.41	1190.0	2.29	1
15	6.41	6.43	6.42	6.44	6.46	6.43		519.41	1202.8	2.32	1
16	6.54	6.46	6.50	6.49	6.48	6.49		524.42	1198.6	2.29	0.96
17	6.38	6.39	6.44	6.43	6.37	6.40		516.99	1191.4	2.30	1
18	6.60	6.61	6.62	6.64	6.60	6.61		534.11	1196.9	2.24	0.96
19	6.62	6.60	6.59	6.59	6.61	6.60		533.14	1209.2	2.27	0.96
20	6.34	6.31	6.30	6.30	6.32	6.31		509.88	1199.1	2.35	1

2. Mesure de la densité

Tableau 18: Densité des enrobés formulés à chaud

FORMULATION A CHAUD				
N° de l'éprouvette	4	5	6	7
Masse de l'éprouvette/air M_a	1203.3	1197.0	1197.2	1187.3
Masse de l'éprouvette / eau M_e	704.6	701.3	701.3	693.8
Volume de l'éprouvette $V = M_a - M_e$	498.7	495.7	495.9	493.5
Densité de l'éprouvette $D = M_a/V$	2.41	2.41	2.41	2.41
Moyenne	2.41			

Tableau 19: Densité des enrobé tièdes avec 1% de zéolithe

ZEOLITHE 1%			
N° de l'éprouvette	1	2	3
Masse de l'éprouvette/air M_a	1204.8	1205.8	1203.8
Masse de l'éprouvette / eau M_e	691.8	693.2	696.7
Volume de l'éprouvette $V = M_a - M_e$	513	512.6	507.1
Densité de l'éprouvette $D = M_a/V$	2.35	2.35	2.37
Moyenne	2.36		

Tableau 20: Densité des enrobés tièdes avec 0.3% de zéolithe

ZEOLITHE 0.3%					
N° de l'éprouvette	Masse de l'éprouvette/air Ma	Masse de l'éprouvette / eau Me	Volume de l'éprouvette	Densité de l'éprouvette	Moyenne
1	1205.6	697	508.6	2.370	2.35
2	1200.8	698.2	502.6	2.389	
3	1206.7	694.3	512.4	2.355	
4	1199.5	686.1	513.4	2.336	
5	1204.5	691.1	513.4	2.346	
6	1208.1	691	517.1	2.336	
7	1207.9	702.6	505.3	2.390	
8	1203.2	700.4	502.8	2.393	
9	1206.6	695.6	511	2.361	
10	1200.2	689.1	511.1	2.348	
11	1205.6	698.5	507.1	2.377	
12	1202.3	692.6	509.7	2.359	
13	1206.7	687.1	519.6	2.322	
14	1190	677.3	512.7	2.321	
15	1202.8	692.3	510.5	2.356	
16	1198.6	685.1	513.5	2.334	
17	1191.4	676.5	514.9	2.314	
18	1196.9	678.2	518.7	2.307	
19	1209.2	686.2	523.2	2.311	
20	1199.1	691.7	507.4	2.36	

3. Calcul de la compacité

Tableau 21: Mesure de la compacité des enrobés formulés à chaud

FOMULATION A CHAUD	
Densité théorique	2.41
Densité réelle	2.41
Compacité	1

Tableau 22: Mesure de la compacité des enrobés tièdes avec 1% de zéolithe

ZEOLITHE 1%	
Densité théorique	2.41
Densité réelle	2.36
Compacité	0.98

Tableau 23: Mesure de la compacité des enrobés tièdes avec 0.3% de zéolithe

ZEOLITHE 0.3%	
Densité théorique	2.41
Densité réelle	2.35
Compacité	0.98

4. Essai Marshall

H : hauteur de l'éprouvette

D : diamètre de l'éprouvette

V : volume de l'éprouvette

M : masse de l'éprouvette

d_{th} : densité théorique de l'éprouvette (M/V)

Fac : facteur de correction. Utilisé à corriger la stabilité Marshall dans le cas où la hauteur de l'éprouvette n'est pas égale à 63.5mm, il est égal aux relations suivantes :

$$Fac = 5.2e^{-0.0258H} \text{ Ou } Fac = 5.24 e^{-0.0032V}$$

Tableau 24: Stabilité Marshall de l'enrobé formulé à chaud

FORMULATION A CHAUD				
N° de l'éprouvette	Lecture anneau	Fluage	Stabilité Marshall (lecture anneau x 0.232)	Stabilité Marshall après corrélation
1	43	3.10	9.98	9.98
2	41	3.20	9.74	9.74
3	43	3.00	9.98	9.98
Moyenne		3.10		9.90

Tableau 25: Stabilité Marshall de l'enrobé tiède avec 1% de zéolithe

ZEOLITHE 1%				
N° de l'éprouvette	Lecture anneau	Fluage	Stabilité Marshall (lecture anneau x 0.232)	Stabilité Marshall après corrélation
1	9	4.10	2.09	2.09
2	15	4.50	2.78	2.78
3	12	4.00	3.48	3.48
Moyenne		4.2		2.78

Tableau 26: Stabilité Marshall de l'enrobé tiède avec 0.3% de zéolithe

ZEOLITHE 0.3%					
N° de l'éprouvette	Conservation	Lecture anneau	Fluage	Stabilité Marshall (0.232x lect.)	Stabilité Marshall après corrélation
2	A l'air libre	41	3.40	9.51	9.51
19		43	3.00	10.21	9.80
20		43	3.10	9.98	9.98
moyenne			3.17		9.76
3	Dans une étuve à 40°C	43	3.10	9.98	9.98
4		44	3.20	10.21	10.21
17		41	3.00	9.51	9.51
moyenne			3.10		9.90

5. Essai de tenue à l'eau

Tableau 27: Tenue à l'eau de l'enrobé formulé à chaud

FORMULATION A CHAUD				
Conservation	Immergée		A l'air libre	
N° de l'éprouvette	4	5	6	7
Lecture anneau	78	78	80	80
Hauteur de l'éprouvette	6.22	6.18	6.17	6.20
ITS	0.1827	0.1838	0.1889	0.1879
Moyennes	0.1833		0.1884	
ITSR	0.97			

Tableau 28: Tenue à l'eau de l'enrobé tiède avec 0.3% de zéolithe

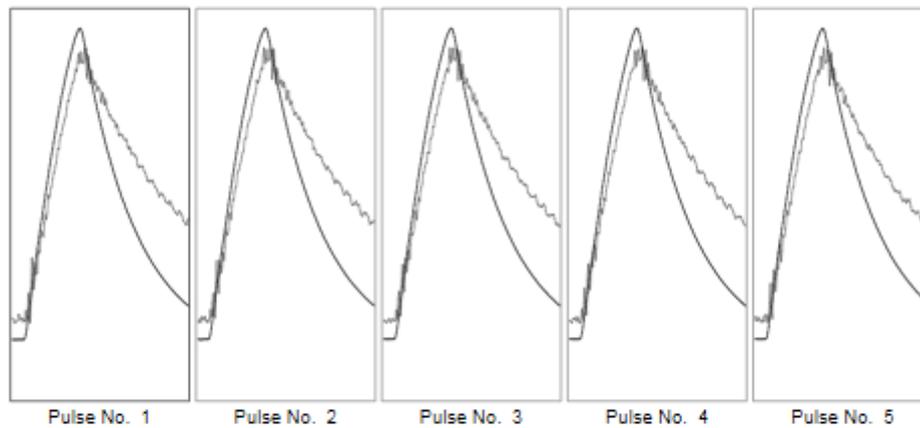
ZEOLITHE 0.3%								
Conservation murissement	A l'air libre				Etuve à 40°C pendant 48h			
Conservation Duriez	Immergée		A l'air libre		Immergée		A l'air libre	
N° de l'éprouvette	5	6	11	12	7	8	9	10
Lecture anneau	55	59	60	69	58	59	68	67
Hauteur de l'éprouvette	6.508	6.464	6.406	6.368	6.296	6.194	6.402	6.496
ITS	0.123	0.133	0.136	0.158	0.134	0.139	0.155	0.150
Moyennes	0.128		0.147		0.136		0.152	
ITSR	0.87				0.90			

6. Mesure du module complexe

INDIRECT TENSILE STIFFNESS MODULUS TEST

(According to Draft for development: DD 213)

Date:	29/05/2014	c:\nat\utils\address.txt
Operator:	Operator	This is where
Specimen ref:	Specref	your address
Target (actual) test temperature:	15°C (15.0°)	should be
Specimen diameter:	101 mms	stored
Specimen thickness:	64 mms	
Poisson's ratio:	0.35	
Target risetime:	124 m.secs	
Target Horiz defm:	5 microns	



Pulse No.	Vertical force (kN)	Horiz Stress (kPa)	Load area factor		Horiz defm (microns)		Rise Time (m.secs)		Stiffness modulus (MPa) 1st diameter	
			Target	Actual	Target	Actual	Target	Actual	Measured	Adjusted
1	3.32	327.2	0.60	0.58	5	2.4	124	122.0	13387	13182
2	3.31	326.1	0.60	0.58	5	2.4	124	124.0	13435	13284
3	3.31	325.6	0.60	0.58	5	2.4	124	125.0	13334	13165
4	3.31	325.6	0.60	0.58	5	2.4	124	125.0	13325	13156
5	3.30	325.5	0.60	0.58	5	2.4	124	125.0	13362	13200
Mean	3.31	326.0	0.60	0.58	5	2.4	124	124.2	13369	13197

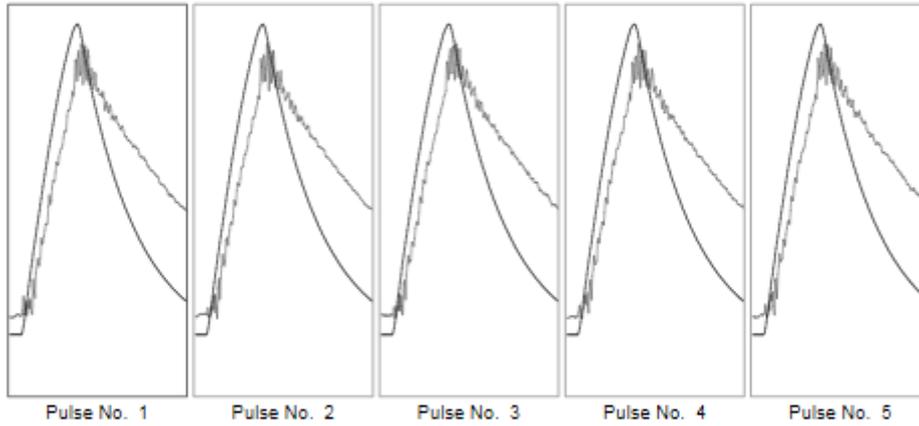
Note: Stiffness adjusted to a load area factor of 0.60

Figure 1: Résultats du module complexe pour l'enrobé à chaud 1

INDIRECT TENSILE STIFFNESS MODULUS TEST

(According to Draft for development: DD 213)

Date: 28-05-2014 Operator: Operator Specimen ref: Specref Target (actual) test temperature: 15°C (15.0°) Specimen diameter: 101 mms Specimen thickness: 66 mms Poisson's ratio: 0.35 Target risetime: 124 m.secs Target Horiz defm: 5 microns	c:\nat\utils\address.txt This is where your address should be stored
---	--



Pulse No.	Vertical force (kN)	Horiz Stress (kPa)	Load area factor		Horiz defm (microns)		Rise Time (m.secs)		Stiffness modulus (MPa) 1st diameter	
			Target	Actual	Target	Actual	Target	Actual	Measured	Adjusted
1	3.28	312.9	0.60	0.58	5	2.2	124	124.0	14056	13856
2	3.25	310.8	0.60	0.58	5	2.2	124	124.0	13976	13796
3	3.26	311.7	0.60	0.58	5	2.2	124	125.0	13937	13777
4	3.26	311.1	0.60	0.59	5	2.2	124	125.0	13748	13602
5	3.26	311.8	0.60	0.58	5	2.2	124	125.0	13937	13779
Mean	3.26	311.6	0.60	0.58	5	2.2	124	124.6	13931	13762

Note: Stiffness adjusted to a load area factor of 0.60

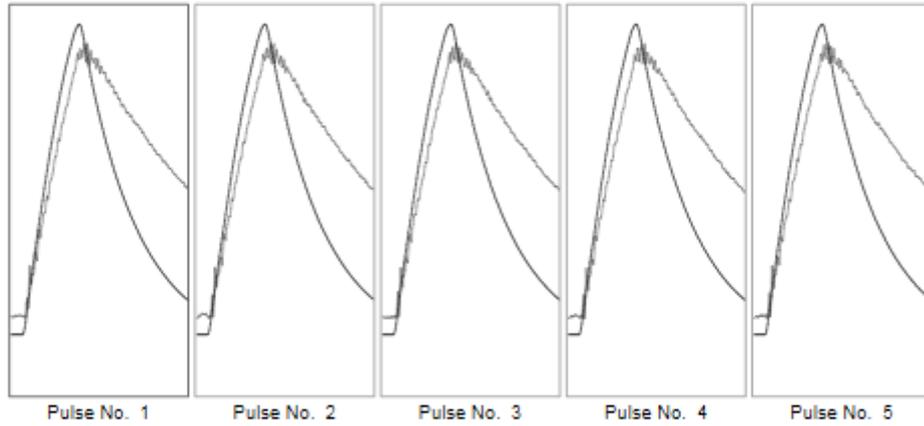
Figure 2: Résultats du module complexe pour l'enrobé à chaud 2

INDIRECT TENSILE STIFFNESS MODULUS TEST

(According to Draft for development: DD 213)

Date: 28-05-2014
 Operator: Operator
 Specimen ref: Specref
 Target (actual) test temperature: 15°C (15.0°)
 Specimen diameter: 101 mms
 Specimen thickness: 85 mms
 Poisson's ratio: 0.35
 Target risetime: 124 m.secs
 Target Horiz defm: 5 microns

c:\nat\utils\address.txt
 This is where
 your address
 should be
 stored



Pulse No.	Vertical force (kN)	Horiz Stress (kPa)	Load area factor		Horiz defm (microns)		Rise Time (m.secs)		Stiffness modulus (MPa) 1st diameter	
			Target	Actual	Target	Actual	Target	Actual	Measured	Adjusted
1	3.31	320.6	0.60	0.58	5	2.7	124	124.0	11856	11700
2	3.29	319.5	0.60	0.59	5	2.6	124	125.0	11899	11773
3	3.30	319.6	0.60	0.59	5	2.6	124	125.0	12048	11921
4	3.29	318.7	0.60	0.59	5	2.6	124	126.0	12176	12044
5	3.30	319.7	0.60	0.59	5	2.6	124	125.0	12128	12005
Mean	3.30	319.6	0.60	0.58	5	2.6	124	125.0	12021	11889

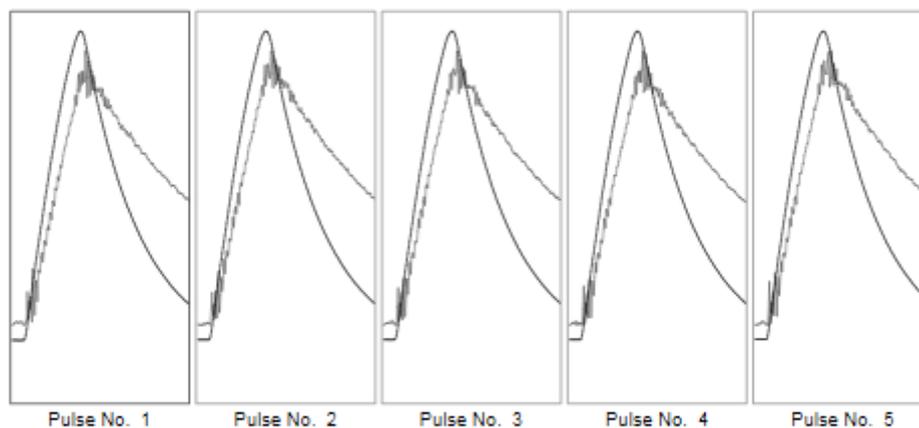
Note: Stiffness adjusted to a load area factor of 0.60

Figure 03: Résultats du module complexe pour l'enrobé avec 1% de zéolithe 1

INDIRECT TENSILE STIFFNESS MODULUS TEST

(According to Draft for development: DD 213)

Date: 28-05-2014 Operator: Operator Specimen ref: Specref Target (actual) test temperature: 15°C (15.0°) Specimen diameter: 101 mms Specimen thickness: 63 mms Poisson's ratio: 0.35 Target risetime: 124 m.secs Target Horiz defm: 5 microns	c:\nat\utils\address.txt This is where your address should be stored
---	--



Pulse No.	Vertical force (kN)	Horiz Stress (kPa)	Load area factor		Horiz defm (microns)		Rise Time (m.secs)		Stiffness modulus (MPa) 1st diameter	
			Target	Actual	Target	Actual	Target	Actual	Measured	Adjusted
1	3.21	321.3	0.60	0.58	5	3.0	124	123.0	10432	10275
2	3.18	317.9	0.60	0.58	5	3.0	124	125.0	10549	10424
3	3.18	318.3	0.60	0.59	5	3.0	124	126.0	10483	10379
4	3.18	317.8	0.60	0.58	5	3.0	124	125.0	10379	10267
5	3.17	317.3	0.60	0.58	5	3.0	124	125.0	10556	10436
Mean	3.18	318.5	0.60	0.58	5	3.0	124	124.8	10480	10354

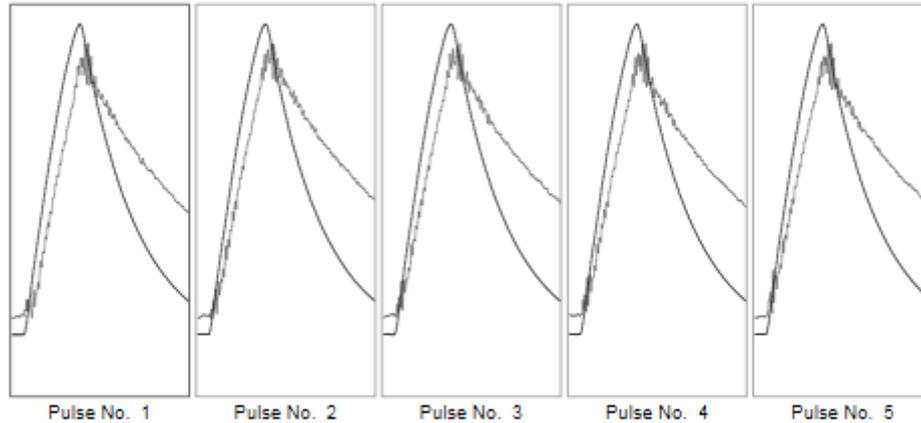
Note: Stiffness adjusted to a load area factor of 0.60

Figure 4: Résultats du module complexe pour l'enrobé avec 1% de zéolithe 2

INDIRECT TENSILE STIFFNESS MODULUS TEST

(According to Draft for development: DD 213)

Date: 28.05.2014 Operator: Operator Specimen ref: Specref Target (actual) test temperature: 15°C (15.0°) Specimen diameter: 101 mms Specimen thickness: 85 mms Poisson's ratio: 0.35 Target risetime: 124 m.secs Target Horiz defm: 5 microns	c:\nat\utils\address.txt This is where your address should be stored
---	--



Pulse No.	Vertical force (kN)	Horiz Stress (kPa)	Load area factor		Horiz defm (microns)		Rise Time (m.secs)		Stiffness modulus (MPa) 1st diameter	
			Target	Actual	Target	Actual	Target	Actual	Measured	Adjusted
1	3.30	320.5	0.60	0.58	5	2.6	124	123.0	11938	11756
2	3.28	317.8	0.60	0.58	5	2.7	124	124.0	11425	11300
3	3.27	316.7	0.60	0.59	5	2.8	124	124.0	11323	11214
4	3.28	317.7	0.60	0.58	5	2.8	124	125.0	11221	11085
5	3.27	317.3	0.60	0.58	5	2.8	124	125.0	10976	10844
Mean	3.28	318.0	0.60	0.58	5	2.8	124	124.2	11376	11240

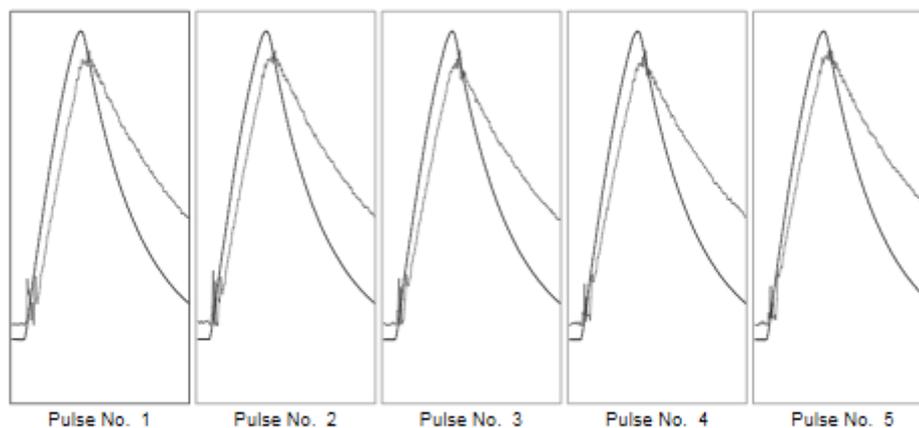
Note: Stiffness adjusted to a load area factor of 0.60

Figure 5: Résultats du module complexe pour l'enrobé avec 0.3% de zéolithe 1 conservation C1

INDIRECT TENSILE STIFFNESS MODULUS TEST

(According to Draft for development: DD 213)

Date: 28-05-2014 Operator: Operator Specimen ref: Specref Target (actual) test temperature: 15°C (15.0°) Specimen diameter: 101 mms Specimen thickness: 64 mms Poisson's ratio: 0.35 Target risetime: 124 m.secs Target Horiz defm: 5 microns	c:\nat\utils\address.txt This is where your address should be stored
---	--



Pulse No.	Vertical force (kN)	Horiz Stress (kPa)	Load area factor		Horiz defm (microns)		Rise Time (m.secs)		Stiffness modulus (MPa) 1st diameter	
			Target	Actual	Target	Actual	Target	Actual	Measured	Adjusted
1	3.21	318.3	0.60	0.58	5	2.5	124	125.0	12601	12422
2	3.19	314.2	0.60	0.58	5	2.5	124	126.0	12339	12195
3	3.20	315.2	0.60	0.58	5	2.7	124	126.0	11524	11388
4	3.20	314.7	0.60	0.58	5	2.7	124	125.0	11457	11305
5	3.20	315.2	0.60	0.58	5	2.7	124	125.0	11683	11530
Mean	3.20	315.1	0.60	0.58	5	2.6	124	125.4	11921	11768

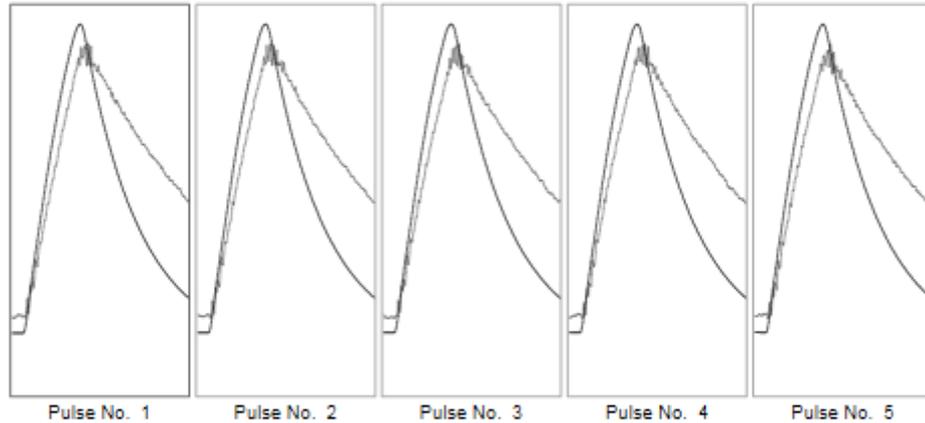
Note: Stiffness adjusted to a load area factor of 0.60

Figure 6: Résultats du module complexe pour l'enrobé avec 0.3% de zéolithe 2 conservation C1

INDIRECT TENSILE STIFFNESS MODULUS TEST

(According to Draft for development: DD 213)

Date: 28-05-2014 Operator: Operator Specimen ref: Specref Target (actual) test temperature: 15°C (15.0°) Specimen diameter: 101 mms Specimen thickness: 84 mms Poisson's ratio: 0.35 Target risetime: 124 m.secs Target Horiz defm: 5 microns	c:\nat\utils\address.txt This is where your address should be stored
---	--



Pulse No.	Vertical force (kN)	Horiz Stress (kPa)	Load area factor		Horiz defm (microns)		Rise Time (m.secs)		Stiffness modulus (MPa) 1st diameter	
			Target	Actual	Target	Actual	Target	Actual	Measured	Adjusted
1	3.24	319.1	0.60	0.58	5	2.5	124	125.0	12728	12551
2	3.21	315.8	0.60	0.58	5	2.4	124	124.0	12950	12803
3	3.20	315.0	0.60	0.59	5	2.4	124	124.0	12839	12706
4	3.21	316.4	0.60	0.59	5	2.4	124	125.0	12971	12851
5	3.21	316.4	0.60	0.58	5	2.4	124	124.0	13074	12918
Mean	3.21	316.5	0.60	0.58	5	2.4	124	124.4	12913	12766

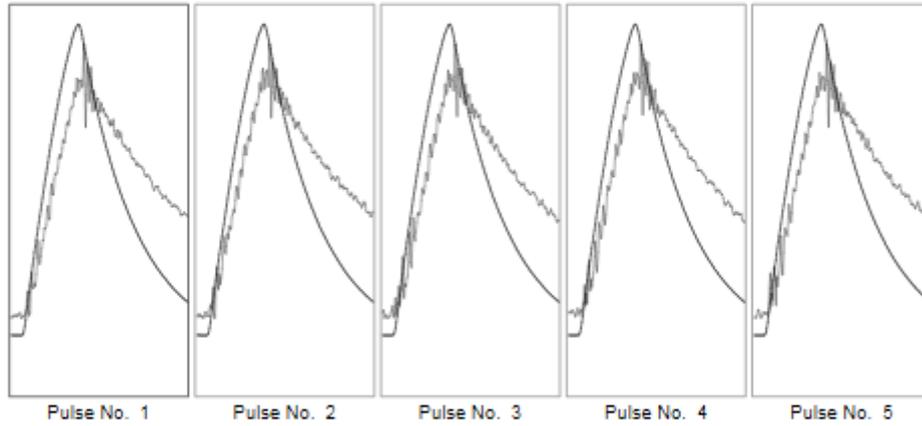
Note: Stiffness adjusted to a load area factor of 0.60

Figure 7: Résultats du module complexe pour l'enrobé avec 0.3% de zéolithe 1 conservation C2

INDIRECT TENSILE STIFFNESS MODULUS TEST

(According to Draft for development: DD 213)

Date: 28.05.2014 Operator: Operator Specimen ref: Specref Target (actual) test temperature: 15°C (15.0°) Specimen diameter: 101 mms Specimen thickness: 84 mms Poisson's ratio: 0.35 Target risetime: 124 m.secs Target Horiz defm: 5 microns	c:\nat\utils\address.txt This is where your address should be stored
---	--



Pulse No.	Vertical force (kN)	Horiz Stress (kPa)	Load area factor		Horiz defm (microns)		Rise Time (m.secs)		Stiffness modulus (MPa) 1st diameter	
			Target	Actual	Target	Actual	Target	Actual	Measured	Adjusted
1	3.30	325.1	0.60	0.58	5	2.6	124	123.0	12309	12124
2	3.27	322.3	0.60	0.58	5	2.6	124	124.0	12150	12006
3	3.27	321.6	0.60	0.58	5	2.5	124	123.0	12892	12509
4	3.27	322.1	0.60	0.58	5	2.5	124	124.0	12773	12611
5	3.27	322.4	0.60	0.58	5	2.5	124	124.0	12440	12286
Mean	3.28	322.7	0.60	0.58	5	2.5	124	123.6	12473	12307

Note: Stiffness adjusted to a load area factor of 0.60

Figure 8: Résultats du module complexe pour l'enrobé avec 0.3% de zéolithe 2 conservation C2