

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

Ecole Nationale Polytechnique
Département Génie Civil



Mémoire de master
Thème

**EFFET DE L'AJOUT DE CHAUX SUR LES
PERFORMANCES D'UN ENROBE TIEDE 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)

Soutenu le 19 juin 2014

Promotion 2014

ملخص:

قد أدى إضافة الجير في مخاليط المواد الهيدروكربونية تحسين الأداء بعدة طرق. في الواقع، أظهرت العديد من الدراسات أن إضافة هذه المادة يجعل من الممكن لزيادة عمر الطريق، لتحسين مقاومتها للتجريد والحد من تدمير الأسفلت. عقود من الأداء الميداني قد حقق من صحة هذه النتائج. في إطار هذه الدراسة، فإن استخدام الجير يساهم في تحسين أداء المزيج الدافئ بالزبوليت. بعد ذلك، سيتم إجراء مقارنة بين الصيغ الثلاثة.

كلمات مفتاحية: الجير، وتجريد، والأداء.

Résumé :

L'ajout de la chaux dans les mélanges hydrocarbonés a permis l'amélioration de leurs performances de plusieurs façons. En effet, plusieurs études ont démontré que l'ajout de cet additif permet d'augmenter la durée de vie des routes, d'améliorer la résistance au désenrobage des granulats et de réduire le vieillissement du bitume. Les décennies de rendement sur le terrain ont validé ces conclusions.

Dans le cadre de cette étude, l'utilisation de chaux vive permettra d'améliorer les performances d'un enrobé tiède à base de zéolithe. Par la suite, une comparaison entre trois formulations sera réalisée.

Mots clefs : chaux, désenrobage, performance.

Abstract:

The addition of lime in hydrocarbon mixtures has led to improved performance in several ways. Indeed, several studies have shown that the addition of this additive makes it possible to increase the lifetime of the road, to improve the resistance to stripping of the aggregates and reduce the aging of the asphalt. Decades of field performance validated these conclusions.

In this study, the use of lime will improve the performance of a warm mix asphalt containing zeolite. Then, a comparison will be conducted between three formulations.

Keywords: lime, stripping, performance.

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 voudrai 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 saurai 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 voudrai remercier Nazim pour son immense contribution à ce travail.

Liste des abréviations

CTTP : Contrôle Technique des Travaux Publics	
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	(%)
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)
C1 : conservation des éprouvettes à l'air libre	
C2 : conservation des éprouvettes dans une étuve à 40°C pendant 48h	

Table des matières

Introduction	2
Chapitre I : GENERALITES SUR LES ENROBES BITUMINEUX	4
I.1 Introduction	4
I.2 Définition d'un enrobé bitumineux	4
I.3 Les constituants d'un enrobé	5
I.3.1 Granulats	5
I.3.2 Les liants hydrauliques	6
I.4 Les différents types d'enrobés	6
I.4.1 Les enrobés à chaud	7
I.4.2 Les enrobés semi-tièdes	8
I.4.3 Les enrobés froids	8
I.4.4 Définition des enrobés tièdes	8
I.5 Enrobés tièdes à base de zéolithe	9
I.5.1 Présentation de la zéolithe	9
I.5.2 Principe général	9
I.5.3 Avantage de la formulation avec ajout de zéolithe	10
I.6 Formulation Marshall	10
I.7 Conclusion	12
Chapitre II : LA CHAUX DANS LES MELANGES BITUMINEUX	14
II.1 Introduction	14
II.2 L'effet de l'eau sur les mélange hydrocarbonés	14
II.3 La chaux et les enrobés bitumineux	15
II.4 Définition de la chaux	15
II.5 Chaux vive et enrobés tièdes à base de zéolithe	15
II.6 Conclusion	16
Chapitre III : FORMULATION ET RESULTATS DES ESSAIS	18
III.1 Introduction	18
III.2 Résultats des essais d'identification	18
III.2.1 Identification des granulats	18
III.2.2 Identification du bitume	20
III.2.3 Identification de la Zéolithe	20
III.3 Résultats des essais sur enrobés	21

III.3.1. Formulation de l'enrobé	21
III.3.2. Résultats des performances	22
III.4 Conclusion.....	27
CONCLUSION	29
Bibliographie	30
Annexes	31
Annexe1. Identification granulats	32
Annexe2. Essai d'identification du bitume	36
Annexe3. Essai sur zéolithe.....	38
Annexe4. Essai sur éprouvettes.....	39

Liste des figures

Figure 1.1 : Enrobés bitumineux	4
Figure 1.2: Mélange de granulats	5
Figure 1.3: Le bitume	6
Figure 1.4: Classification des enrobés selon la température de fabrication	7
Figure 1.5 : Zéolithe	9
Figure 1.6: Organigramme de la méthode Marshall	11
Figure 3.1: Courbe granulométrique des différentes fractions granulaires	18
Figure 3.2: Courbe granulométrique de la zéolithe	20
Figure 3.3: Courbe granulométrique du mélange	21
Figure 3.4: Histogrammes de la stabilité Marshall	23
Figure 3.5: Histogrammes du fluage	24
Figure 3.6: Histogrammes du quotient Marshall	25
Figure 3.7: Histogrammes de la tenue à l'eau	26
Figure 3.8: Histogramme du module de rigidité	27
Figure 1: Résultats du module complexe pour l'enrobé à chaud 1	46
Figure 2: Résultats du module complexe pour l'enrobé à chaud 2	47
Figure 3: Résultats du module complexe pour l'enrobé tiède 1 conservation C1	48
Figure 4: Résultats du module complexe pour l'enrobé tiède 2 conservation C1	49
Figure 5: Résultats du module complexe pour l'enrobé tiède 1 conservation C2	50
Figure 6: Résultats du module complexe pour l'enrobé tiède 2 conservation C2	51
Figure 7: Résultats du module complexe pour l'enrobé tiède avec chaux 1 conservation C1 .	52
Figure 8: Résultats du module complexe pour l'enrobé tiède avec chaux 2 conservation C1 .	53
Figure 9: Résultats du module complexe pour l'enrobé tiède avec chaux 1 conservation C2 .	54
Figure 10: Résultats du module complexe pour l'enrobé tiède avec chaux 2 conservation C2	55

Liste des tableaux

Tableau 3-1 : Caractéristiques des granulats.....	19
Tableau 3-2: Caractéristiques du bitume.....	20
Tableau 3-3: Caractéristiques de la zéolithe.....	20
Tableau 3-4: Pourcentage des constituants et surface spécifique.....	21
Tableau 3-5: Module de richesse, teneur en bitume et masse volumique du mélange	22
Tableau 3-6: Performances des enrobés.....	22
Tableau 1: Analyse granulométrique du gravier 8/15	32
Tableau 2: Analyse granulométrique pour le gravier 3/8.....	32
Tableau 3: Analyse granulométrique pour le sable 0/3.....	33
Tableau 4: Aplatissement du gravier 8/15.....	33
Tableau 5: Aplatissement du gravier 3/8.....	34
Tableau 6: Résultats de l'essai Los Angeles.....	34
Tableau 7: Résultats de l'essai Micro-Deval en présence d'eau	34
Tableau 8: Résultats de la mesure de la densité des granulats	35
Tableau 9: Résultats de l'essai au bleu de méthylène.....	35
Tableau 10: Résultats de l'essai Bille-anneau	36
Tableau 11: Résultats de l'essai de pénétrabilité	36
Tableau 12: Résultats de l'essai de ductilité	37
Tableau 13: Résultats de l'essai AKZOO	37
Tableau 14: Analyse granulométrique de la zéolithe	38
Tableau 15: Résultats de la mesure de densité de la zéolithe.....	38
Tableau 16: Résultats de la teneur en eau de la zéolithe	38
Tableau 17: Mesure des caractéristiques des éprouvette de l'enrobé à chaud.....	39
Tableau 18: Mesures des caractéristiques des éprouvettes de l'enrobé tiède	39
Tableau 19: Mesure des caractéristiques des éprouvettes de l'enrobé tiède avec ajout de chaux	40
Tableau 20: Densité des enrobés formulés à chaud	40
Tableau 21: Densité des enrobés tièdes avec 0.3% de zéolithe	41
Tableau 22: Densité des enrobés tièdes avec 0.3% de zéolithe + 0.3% de chaux.....	42
Tableau 23: Mesure de la compacité des enrobés formulés à chaud.....	42
Tableau 24: Mesure de la compacité des enrobés tièdes.....	42
Tableau 25: Mesure de la compacité des enrobés tièdes avec ajout de chaux	42
Tableau 26: Stabilité Marshall de l'enrobé formulé à chaud	43
Tableau 27: Stabilité Marshall de l'enrobé tiède	43
Tableau 28: Stabilité Marshall de l'enrobé tiède avec ajout de chaux.....	44
Tableau 29: Tenue à l'eau de l'enrobé formulé à chaud	44
Tableau 30: Tenue à l'eau de l'enrobé tiède	45
Tableau 31: Tenue à l'eau de l'enrobé tiède avec ajout de chaux.....	45

Introduction

L'Algérie dispose actuellement d'un réseau routier de plus de 109 452 km. Aussi, la situation économique du pays est en voie de développement et nécessite donc la construction de plus de routes. Celles-ci doivent donc être toujours plus performantes.

Les nouvelles techniques développées doivent répondre à des besoins de sécurité et de durabilité. Cela implique moins d'entretien sur les routes et donc celles-ci seraient moins soumises à des fermetures du trafic.

Les nouveaux procédés doivent aussi répondre aux besoins écologiques qui aujourd'hui, représentent les enjeux majeurs de l'industrie moderne. De ces techniques, on relèvera la formulation d'enrobés tièdes, qui permet de réduire la consommation énergétique, d'augmenter le temps de conservation de l'enrobé avant sa mise en œuvre et donc de rallier des chantiers routiers éloignés des centrales mais aussi, la remise en service rapide des chaussées.

Les chaussées étant exposées aux aléas du climat, les ingénieurs sont souvent confrontés au problème de désenrobage. Afin de prévenir cette détérioration, des additifs connus sont ajoutés à l'enrobé. Lors des essais entrepris pour cette étude, de la chaux vive aura servi d'additif pour faire face à ce problème.

Un comparatif des performances sera alors établi entre les enrobés dit « classiques », les enrobés tièdes et les enrobés tièdes traités à la chaux vive pour mettre en évidence les bienfaits de celle-ci sur les mélanges bitumineux.

Chapitre I : GENERALITES SUR LES ENROBES BITUMINEUX

I.1 Introduction

Les chaussées souples sont principalement constituées d'enrobés bitumineux. Ces derniers doivent répondre à certains critères afin de garantir le confort et la sécurité des usagers de la route. Ces enrobés sont élaborés suivant des techniques et de procédés divers selon la couche de chaussées à laquelle ils seront destinés.

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)

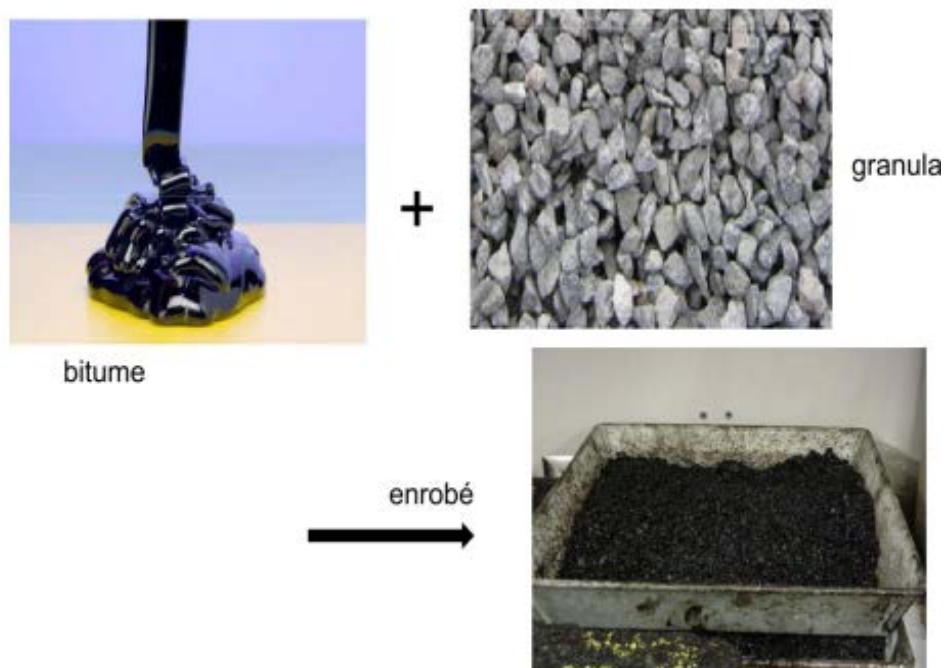


Figure 1.1 : Enrobés bitumineux

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

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 1.3: Le bitume

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.

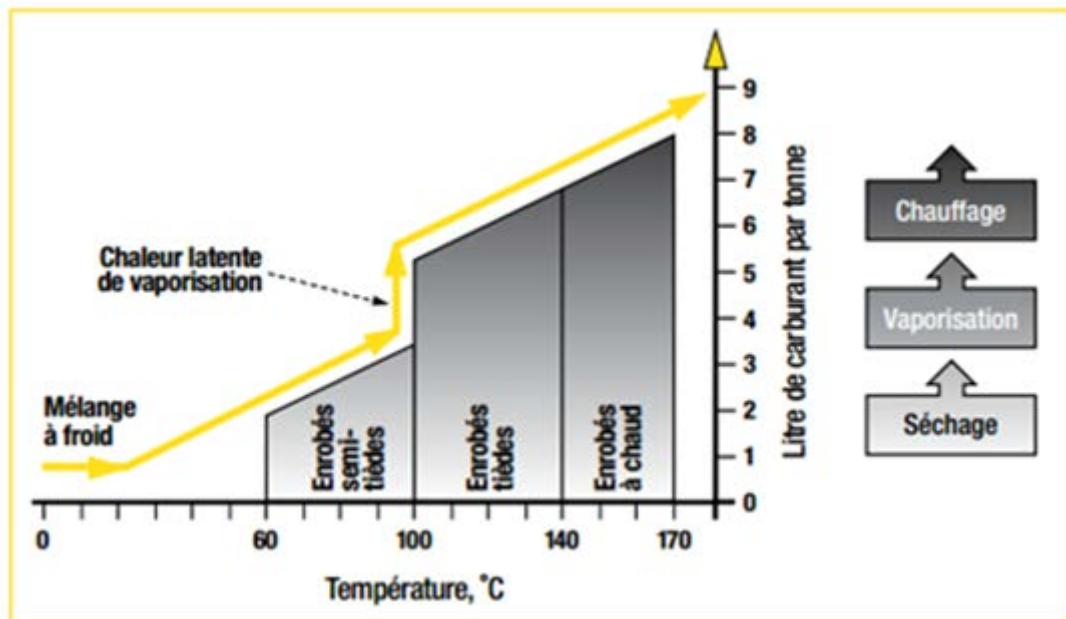


Figure 1.4: Classification des enrobés selon la température de fabrication

1.4.1 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'orniérage. (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)

I.4.2 Les enrobés semi-tièdes

La plage de températures de fabrication des enrobés semi-tièdes 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).

I.4.3 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.4.4 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)

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.

I.5 Enrobés tièdes à base de zéolithe

I.5.1 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 1.5 : Zéolithe

I.5.2 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 présente 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)

I.5.3 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.

I.6 Formulation Marshall

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. Cependant, en Algérie, la formulation utilisée dans la production d'enrobés est celle de la méthode Marshall. L'étude se fera donc selon cette méthode.

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.

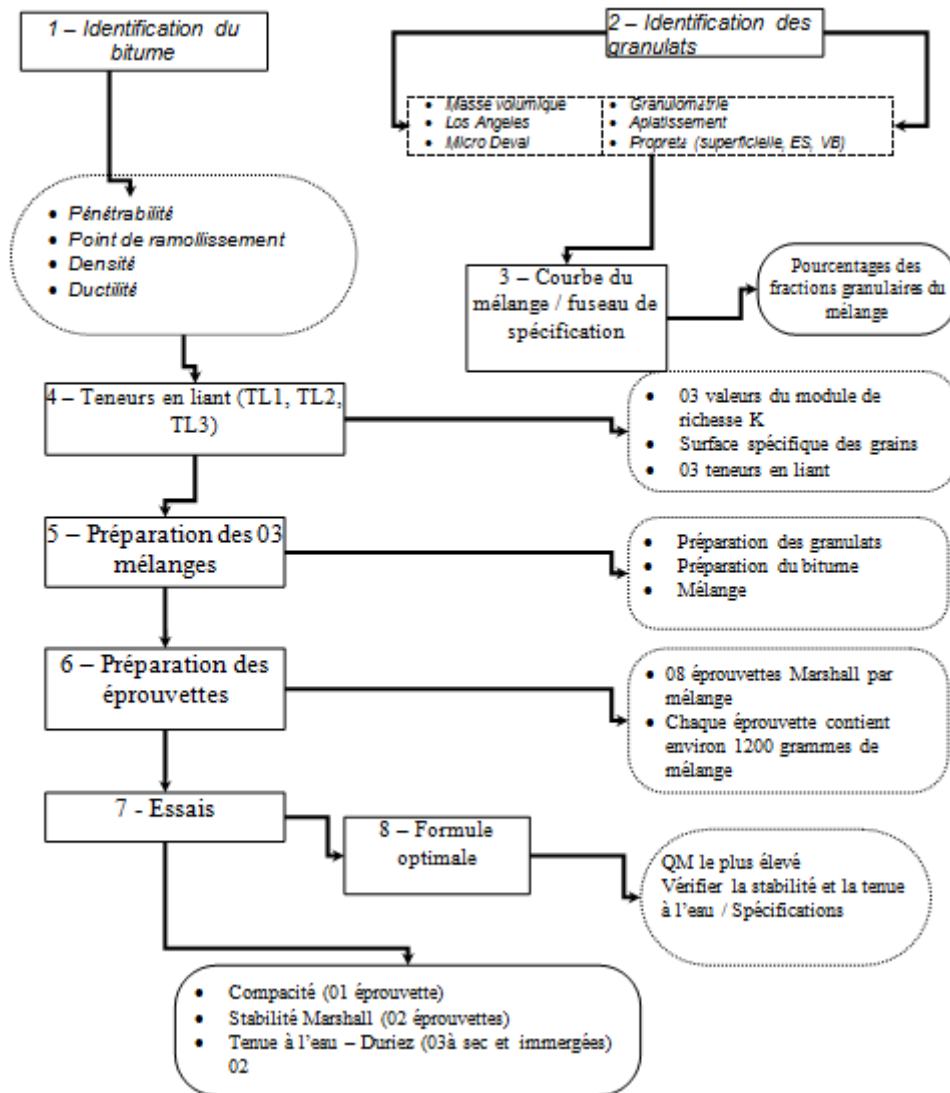


Figure 1.6: Organigramme de la méthode Marshall

I.7 Conclusion

Il existe plusieurs techniques d'enrobage. Elles ont été développées selon des besoins et un désir continu d'amélioration des performances.

Néanmoins, depuis quelques années déjà, les recherches sont de plus en plus axées sur la question environnementale d'où, l'élaboration de procédés visant à réduire les consommations énergétiques et de ce fait, les émissions des gaz et des particules nocives.

Chapitre II : LA CHAUX DANS LES MELANGES BITUMINEUX

II.1 Introduction

Pour la fabrication d'un enrobé de qualité, il est primordial de s'assurer que les granulats soient parfaitement secs, et que le bitume soit préservé de tout polluant extérieur. Néanmoins, il arrive que de l'humidité se retrouve dans les mélanges hydrocarbonés, soit de façon accidentelle, du fait de l'exposition des granulats aux intempéries, soit de façon volontaire, dans le cas des enrobés tièdes par moussage de bitume. Dans ce cas, il est impératif d'entreprendre les actions nécessaires pour éviter les problèmes inhérents à la présence d'eau dans l'enrobé.

II.2 L'effet de l'eau sur les mélange hydrocarbonés

Dans le cas où de l'eau venait à se retrouver dans un mélange bitumineux, ceci pourrait affecter l'enrobé confectionné de deux manière différentes :

- L'humidité peut interférer entre le bitume et le granulat, créant ainsi une baisse d'adhésivité.
- Elle peut pénétrer le bitume et en affecter les propriétés, en particulier, sa force de cohésion.

C'est deux probabilités de détérioration peuvent menacer l'intégrité et la durée de vie de la chaussée.

Le problème de désenrobage est le plus connu des dommages engendrés par l'humidité dans les enrobés. Ce phénomène a très souvent été observé lors de l'utilisation de certains types de granulats comportant un acide. Celui-ci, au contact de l'eau se ionise et, incompatible avec un acide se trouvant dans le bitume, fait que la liaison entre le bitume et le granulat se voit fragilisée.

Quant au problème de manque de cohésion, il est dû au fait que le bitume soit mélangé à l'eau, ce qui a pour conséquence non seulement de l'assouplir mais aussi, de réagir avec des molécules à haut potentiel de polarisation le constituant, créant ainsi une pellicule de savons hydrosolubles qui affaiblit la liaison liant-granulat et favorise le désenrobage.

II.3 La chaux et les enrobés bitumineux

La chaux est utilisée dans la confection d'enrobés afin de réduire la sensibilité à l'eau et le désenrobage. Des études récentes ont confirmé qu'en plus des bienfaits susnommés, elle possède aussi les avantages suivants :

- Plus de rigidité au liant et une meilleure résistance à l'orniérage.
- Améliore la dureté et la résistance à la fissuration dans les climats froids.
- Limite le vieillissement du bitume en limitant son oxydation.

De par le monde, les autorités chargées de la maintenance des infrastructures routières ont constaté qu'en plus des avantages cités précédemment, l'ajout de chaux dans les mélanges hydrocarbonés augmente considérablement la durée de vie des chaussées dans le cas d'une utilisation combinée à d'autres additifs, tels que les polymères. (National Lime Association)

II.4 Définition de la chaux

La chaux est une matière issue de la décomposition thermique du calcaire. Il s'agit d'une poudre blanche utilisée dans plusieurs domaines, entre autres, dans le génie civil. Elle est souvent utilisée dans la confection d'enrobés bitumineux pour en améliorer les performances.

Elle se décline en trois sortes :

- **Chaux vive (CaO)** : elle est le produit de la calcination du calcaire directement sorti du four.
- **Chaux éteinte (Ca(OH)₂)** : appelée aussi portlandite, elle est obtenue par ajout d'eau à la chaux vive. Selon la quantité d'eau ajoutée, elle peut être hydraulique (poudre blanche) ou grasse (appelée aussi aérienne, sous forme de pâte)
- **Chaux dolomitique (magnésienne)** : chaux riche en dolomie (CaMg(CO₃)₂), une roche composée essentiellement de dolomite et de calcite.

II.5 Chaux vive et enrobés tièdes à base de zéolithe

La technique de formulation d'enrobés tièdes par moussages de bitume a pour but d'apporter de l'eau au mélange, ce qui rendra le liant plus malléable malgré la baisse de la température de fabrication. Cependant, il est avéré que l'eau réduit de manière conséquente l'adhésivité entre le bitume et les granulats et donc peut causer des problèmes de désenrobage flagrants.

Afin de pallier à ce problème, des agents anti-décollage, tels que la chaux, sont employés en tant qu'additifs dans le mélange.

Dans le cas des enrobés tièdes à base de zéolithe, la chaux a pour rôle de neutraliser l'effet néfaste de l'eau qui aura servi à augmenter la malléabilité du bitume lors du malaxage.

Aussi, le choix de l'utilisation de la chaux vive plutôt que de la chaux éteinte revient aux deux raisons suivantes :

- La chaux n'ayant pas été hydratée, elle possède la capacité de réagir avec l'eau dégagée par la zéolithe.
- Le contact entre la chaux vive et l'eau dégagée par la zéolithe provoque une réaction exothermique. La chaleur émise lors de cette réaction contribue à l'augmentation de la température du mélange, et donc améliore la maniabilité du bitume, ce qui facilite l'opération de malaxage et par conséquent l'enrobage des granulats. (Kucharek)

II.6 Conclusion

Tout aussi paradoxale que cela puisse paraître, l'eau contenue dans la zéolithe permet la bonne confection de l'enrobé tiède mais peut nuire sévèrement à son intégrité. Elle permet d'obtenir une excellente maniabilité du bitume même à de basses températures mais, peut contribuer fortement au désenrobage du squelette granulaire.

Dans ce cas, l'ajout de la chaux peut alors constituer la solution à ce problème en agissant sur l'interface granulat-bitume.

Chapitre III : FORMULATION ET RESULTATS DES ESSAIS

Tableau 3-1 : 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 CTT. 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.

III.2.2 Identification du bitume

Tableau 3-2: 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.

III.2.3 Identification de la Zéolithe

Tableau 3-3: Caractéristiques de la zéolithe

Teneur en eau	22.16%
Densité	1.92

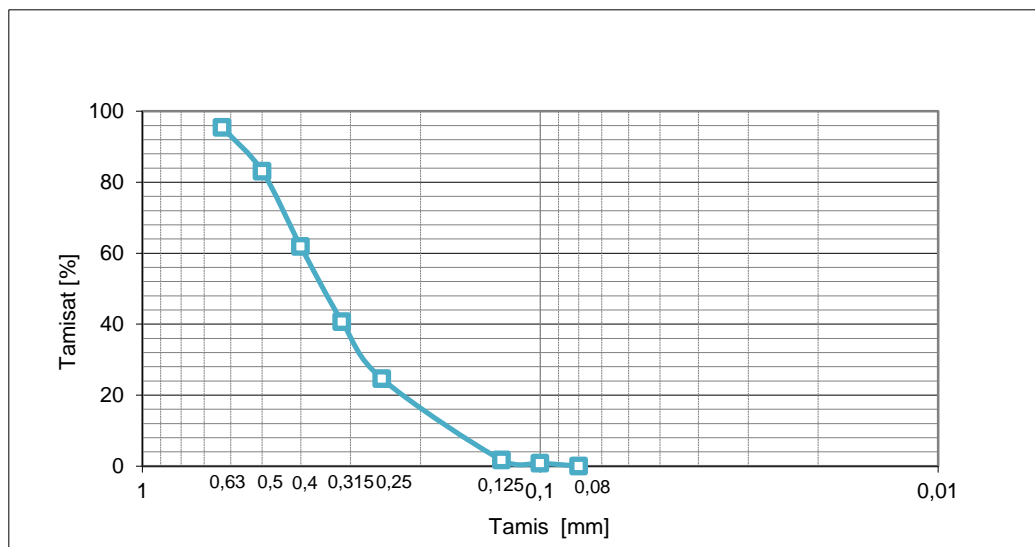


Figure 3.2: Courbe granulométrique de la zéolithe

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.

III.3 Résultats des essais sur enrobés

III.3.1. Formulation de l'enrobé

Tableau 3-4: 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	$\sum (m^2/kg) = 11,91$

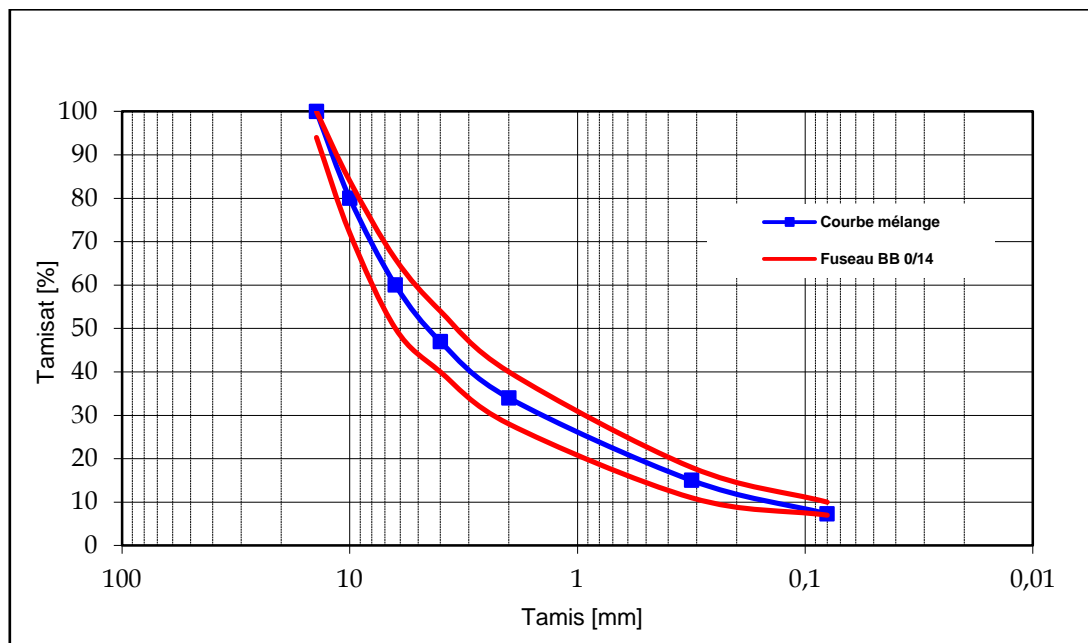


Figure 3.3: Courbe granulométrique du mélange

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 3-5: 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 %.

III.3.2. Résultats des performances

Tableau 3-6: Performances des enrobés

Procédé	A chaud	Zéolithe 0.3%		Zéolithe 0.3% + 0.3%chaux	
		Immédiat (C1)	Etuve 40°C (C2)	Immédiat (C1)	Etuve 40°C (C2)
Densité théorique	2.41				
Densité réelle	2.41	2.35		2.36	
Compacité	1	0.98		0.98	
Stabilité Marshall	9.90	9.69	9.90	9.43	10.34
Fluage	3.10	3.17	3.10	3.17	3.03
Tenue à l'eau	0.97	0.87	0.90	0.92	0.97
Module de rigidité	13479	11504	12536	11461	12597
Quotient Marshall	3.19	3.06	3.19	2.97	3.41

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.

Aussi, on remarque que la chaux n'a aucun impact sur la compacité de l'enrobé.

II.3.2.a Essai Marshall

i. Stabilité Marshall

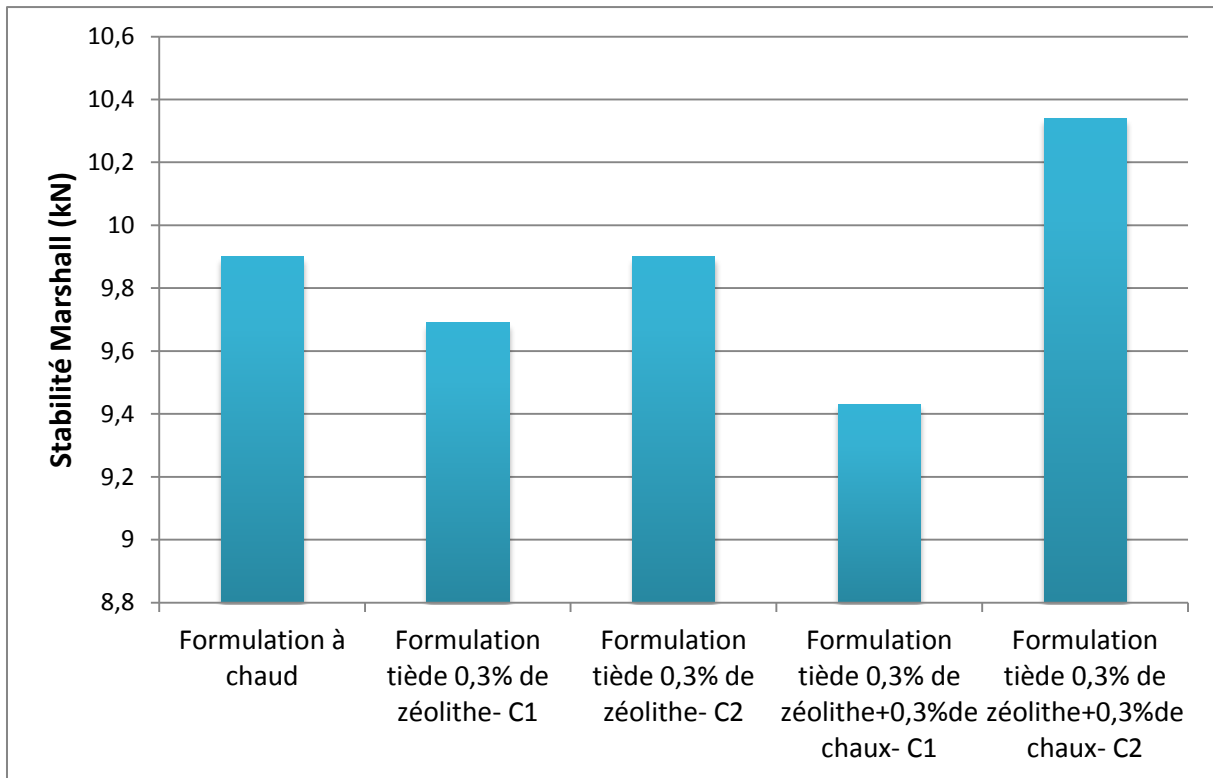
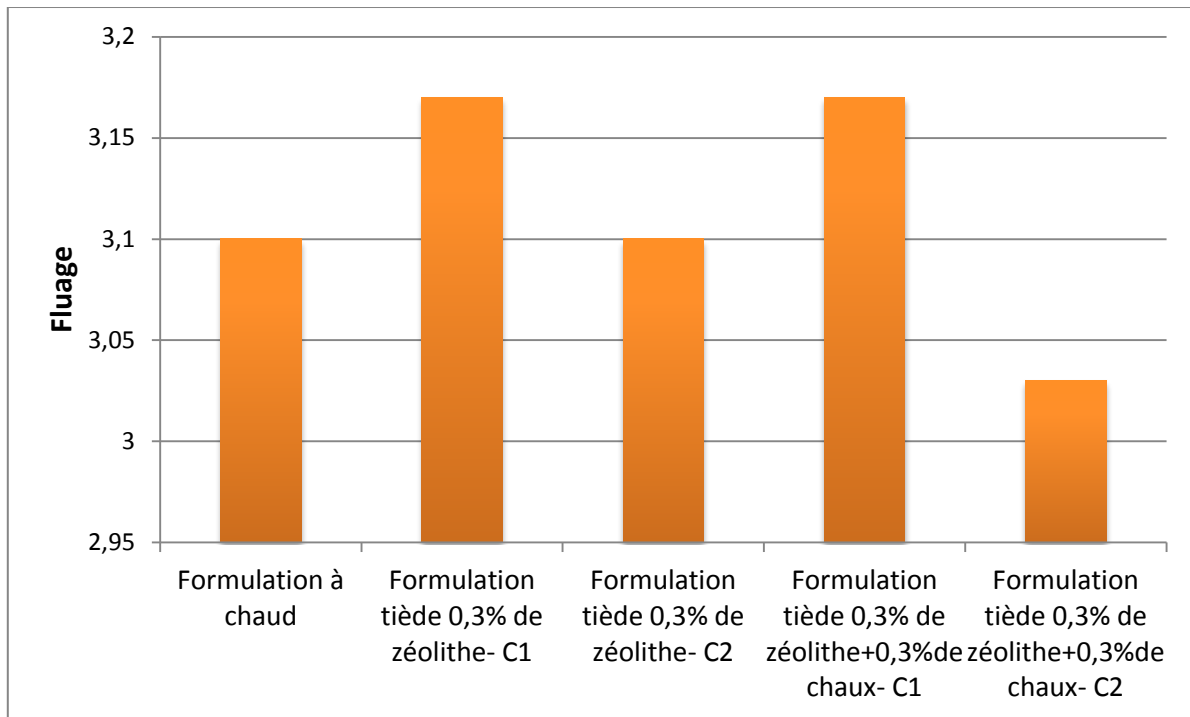


Figure 3.4: Histogrammes de la stabilité Marshall

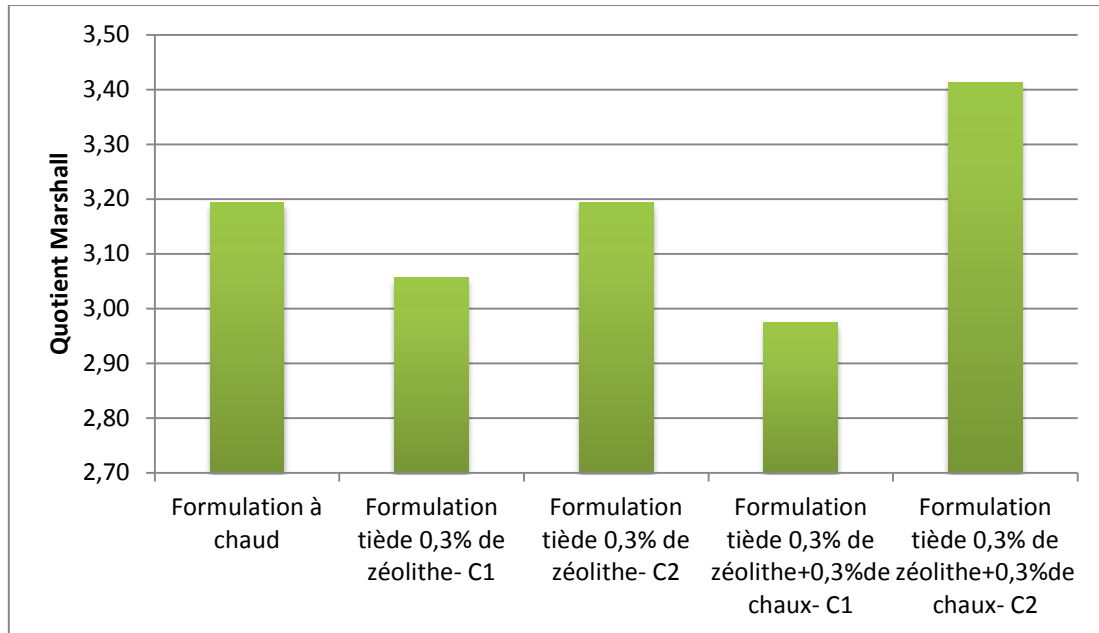
On remarque que la formulation d'enrobé tiède avec 0.3% de zéolithe présente les mêmes performances en matière de stabilité après un court temps de murissement.

Aussi, l'apport de la chaux dans le même mélange n'améliore cette stabilité qu'après un certain temps de murissement. Cela peut s'expliquer par le fait que la chaux a un effet à long terme et n'agit pas instantanément.

ii. Fluage**Figure 3.5: 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.

On remarque néanmoins que la chaux améliore de façon significative le fluage.

iii. Quotient Marshall**Figure 3.6: 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.

Cependant, l'ajout de la chaux vive dans le mélange tiède augmente de façon remarquable le quotient Marshall.

II.3.2.b Essai de tenue à l'eau

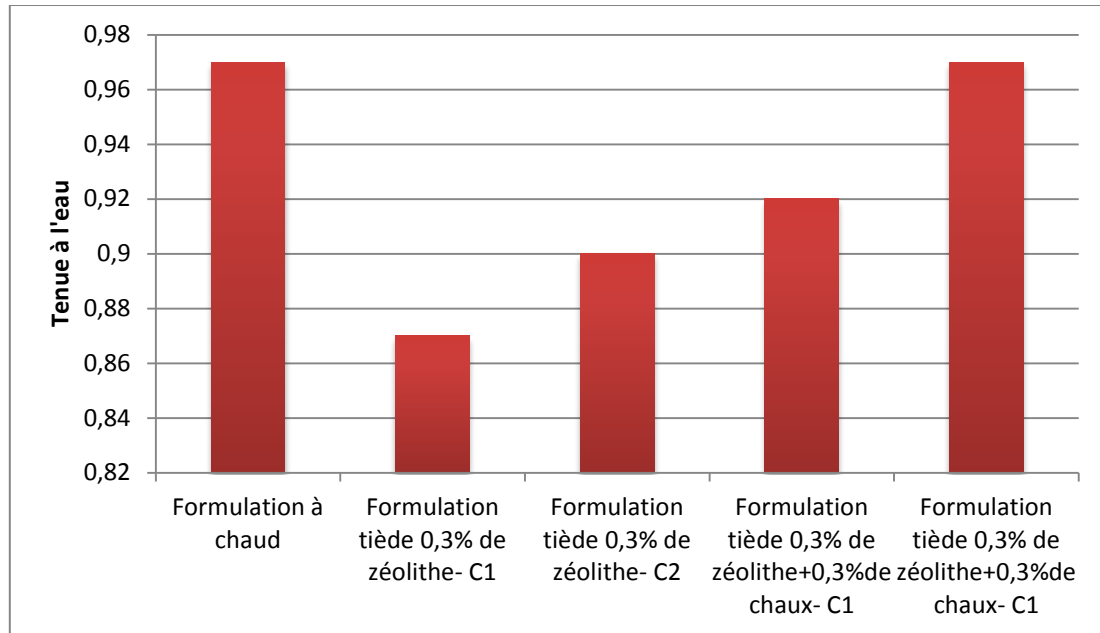


Figure 3.7: Histogrammes de la tenue à l'eau

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.

Cependant, l'ajout de la chaux rend la tenue à l'eau identique à celle des enrobés à chaud.

II.3.2.c Mesure 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 différentes formulations.

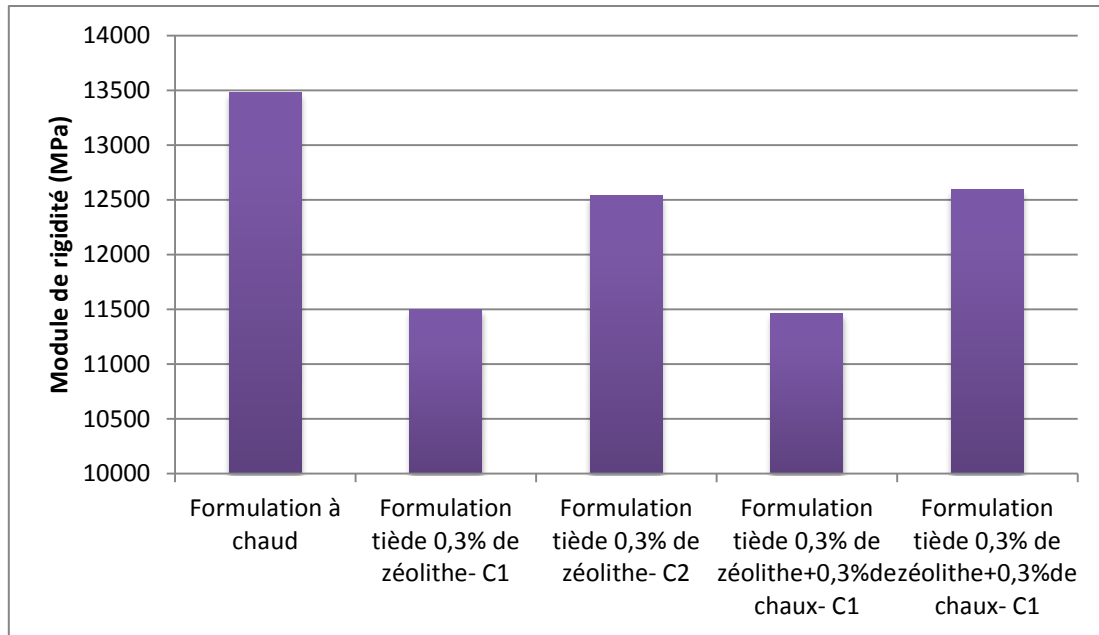


Figure 3.8: Histogramme du module de rigidité

On remarque que les différentes formulations présentent toutes des modules de bonne qualité. Cependant, les formulations d'enrobés tièdes avec zéolithe sans temps de murissement (conservation C1) présentent des résultats légèrement inférieurs à ceux des deux autres.

Il est à noter aussi que la chaux n'a eu aucun impact sur le module de rigidité.

III.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.

Aussi, on notera qu'un apport en chaux au mélange hydrocarboné tiède améliore les performances principales (stabilité, fluage, tenue à l'eau) de l'enrobé à un point tel, que les enrobés tièdes soient de meilleure qualité que ceux de la formulation à chaud et ce, pour la même teneur en bitume.

CONCLUSION

Les revêtements en mélanges bitumineux représentent un élément de base de la construction routière. La stratégie nationale visant à construire un réseau de transport de haut rendement pour le développement économique du pays ne peut donc pas se faire sans des enrobés de haute qualité.

L'un des problèmes majeurs rencontrés sur les chantiers routiers est le désenrobage des granulats. Il est d'autant plus susceptible d'apparaître dans le cas des enrobés tièdes qui nécessitent un apport en eau. Il est donc délicat d'obtenir un enrobé de qualité répondant à ce qu'on attend d'une chaussée moderne, à savoir, une bonne résistance aux sollicitations et une longue durée de vie.

Pour faire face à ce problème, il est recommandé d'utiliser de la chaux. En effet, d'après les essais effectués, on remarque qu'elle améliore de façon spectaculaire les performances des enrobés. La stabilité Marshall de l'enrobé tiède avec l'ajout de la chaux a même surpassé celui de l'enrobé formulé à chaud. C'est dire l'effet que ce produit a sur les performances des mélanges hydrocarbonés.

En résolvant le problème de désenrobage, l'utilisation de la chaux, dans les mélanges hydrocarbonés en générale, et les enrobés tièdes en particulier, permettra de réduire considérablement le temps d'entretien des routes. Cela permettra alors au pays d'atteindre ses objectifs en matière de développement du transport routier.

Bibliographie

BAKOWSKI, S. (s.d.). Enrobés à l'Asphamin - Enrobés tièdes. EUROVIA.

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 .

Kucharek, T. (s.d.). Affinité bitume-granulat, additifs et techniques d'amélioration. Mc Asphalt.

National Lime Association. (s.d.). http://www.lime.org/uses_of_lime/construction/asphalt.asp. Consulté le 2014, sur lime: <http://www.lime.org>

Nynas Belgium AB. (2005). La manipulation sans danger du bitume, Guide pratique.

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.

Annexes

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] x 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 = ∑M _g = 1518g M _o = 1875g		∑ M _e = 243g		
A = [∑M _e / M] x 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 1.6mm (g)	Coef Micro Deval
3/8	4/6.3	500	2000	469	6.2%
8/15	6.3/12.5	500	4000 au 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

Tableau 9: Résultats de l'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 10: 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 11: 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

Tableau 12: Résultats de l'essai de ductilité

Température d'essai	25°C
Distance d'écartement des pattes d'attache à la rupture	1005 mm

4. Essai d'adhésivité(AKZOO)

Tableau 13: 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 14: 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 15: 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 $V_z = V_p - V_e$	$99.5 - [139.1 - 34.8 - 10] = 5.2$ ml
$\rho_z = M_z / V_z$	$10 / 5.2 = 1.92$ g/cm ³
D_z	1.92

3. Teneur en eau

Tableau 16: 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 17: Mesure des caractéristiques des éprouvette de l'enrobé 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 18: Mesures des caractéristiques des éprouvettes de l'enrobé tiède

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

Tableau 19: Mesure des caractéristiques des éprouvettes de l'enrobé tiède avec ajout de chaux

Formulation zéolithe 0.3% + chaux 0.3 %											
N°	1	2	3	4	5	Moy	D	V	Masse	D _{th}	Fac
1	6.44	6.45	6.46	6.44	6.45	6.45	10.14	520.71	1197.9	2.30	1
2	6.4	6.42	6.43	6.42	6.4	6.41	10.14	517.96	1215.1	2.35	1
3	6.34	6.31	6.32	6.3	6.32	6.32	10.14	510.21	1206.5	2.36	1
4	6.42	6.36	6.32	6.32	6.36	6.36	10.14	513.28	1207.8	2.35	1
5	6.27	6.24	6.24	6.25	6.27	6.25	10.14	505.04	1202.1	2.38	1.04
6	6.38	6.44	6.4	6.35	6.37	6.39	10.14	515.86	1203.3	2.33	1
7	6.39	6.4	6.49	6.49	6.45	6.44	10.14	520.38	1204.1	2.31	1
8	6.42	6.48	6.47	6.41	6.42	6.44	10.14	520.06	1207.7	2.32	1
9	6.36	6.36	6.37	6.37	6.38	6.37	10.14	514.25	1200.2	2.33	1
10	6.4	6.44	6.5	6.48	6.46	6.46	10.14	521.35	1207.3	2.32	1
11	6.5	6.55	6.56	6.54	6.5	6.53	10.14	527.33	1202.1	2.28	0.96
12	6.32	6.32	6.34	6.38	6.34	6.34	10.14	511.98	1194.5	2.33	1
13	6.53	6.53	6.52	6.54	6.53	6.53	10.14	527.33	1200.7	2.28	0.96
14	6.37	6.39	6.37	6.37	6.38	6.38	10.14	514.89	1188.4	2.31	1
15	6.49	6.51	6.49	6.5	6.5	6.50	10.14	524.74	1201.5	2.29	0.96
16	6.38	6.35	6.38	6.36	6.37	6.37	10.14	514.25	1202.2	2.34	1
17	6.39	6.41	6.4	6.4	6.42	6.40	10.14	517.15	1201.9	2.32	1
18	6.23	6.27	6.25	6.29	6.23	6.25	10.14	505.04	1205.9	2.39	1.04

2. Mesure de la densité

Tableau 20: 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 21: 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	

Tableau 22: Densité des enrobés tièdes avec 0.3% de zéolithe + 0.3% de chaux

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	1197.3	684	513.3	2.333	2.355
2	1214.4	702.3	512.1	2.371	
3	1206.1	696.1	510.0	2.365	
4	1207.3	686.1	521.2	2.316	
5	1201.7	691.1	510.6	2.354	
6	1202.5	691.0	511.5	2.351	
7	1203.7	702.6	501.1	2.402	
8	1206.9	700.4	506.5	2.383	
9	1199.8	695.6	504.2	2.380	
10	1206.7	689.1	517.6	2.331	
11	1201.6	698.5	503.1	2.388	
12	1193.9	692.6	501.3	2.382	
13	1200.1	687.1	513.0	2.339	
14	1187.8	677.3	510.5	2.327	
15	1201.4	681.4	520.0	2.310	
16	1202.2	694.2	508.0	2.367	
17	1201.1	686.3	514.8	2.333	
18	1205.2	695.5	509.7	2.365	

3. Calcul de la compacité

Tableau 23: Mesure de la compacité des enrobés formulés à chaud

FOMULATION A CHAUD	
Densité théorique	2.41
Densité réelle	2.41
Compacité	1

Tableau 24: Mesure de la compacité des enrobés tièdes

ZEOLITHE 0.3%	
Densité théorique	2.41
Densité réelle	2.35
Compacité	0.98

Tableau 25: Mesure de la compacité des enrobés tièdes avec ajout de chaux

Formulation zéolithe 0.3% + chaux 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 26: 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 27: Stabilité Marshall de l'enrobé tiède

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

Tableau 28: Stabilité Marshall de l'enrobé tiède avec ajout de chaux

Formulation zéolithe 0.3% + chaux 0.3 %					
N° de l'éprouvette	Conservation	Lecture anneau	Fluage	Stabilité Marshall (0.232x lect.)	Stabilité Marshall après corrélation
8	Immédiat	41	3.2	9.28	9.51
10		42	3.0	9.74	9.74
13		42	3.3	9.28	9.74
moyenne			3.17		9.66
4	Etuve à 40°C	45	3.1	10.44	10.44
5		43	3.0	9.98	10.38
9		44	3.0	10.21	10.21
moyenne			3.03		10.34

5. Essai de tenue à l'eau

Tableau 29: 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 30: Tenue à l'eau de l'enrobé tiède

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			

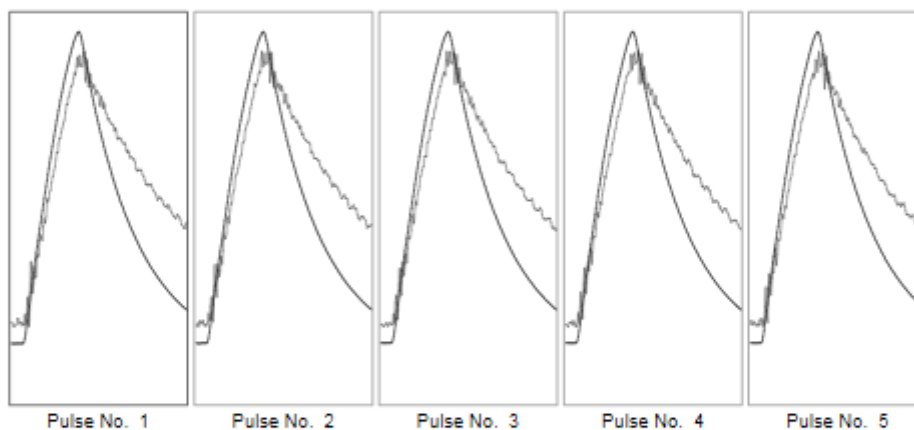
Tableau 31: Tenue à l'eau de l'enrobé tiède avec ajout de chaux

Formulation zéolithe 0.3% + chaux 0.3 %								
Conservation murissement	A l'air libre				Etuve à 40°C pendant 48h			
Conservation Duriez	Immergée		A l'air libre		A l'air libre		Immergées	
N° de l'éprouvette	1	3	10	12	14	18	15	16
Lecture anneau	65	69	75	73	68	74	68	73
Hauteur de l'éprouvette	6.45	6.32	6.46	6.53	6.38	6.25	6.50	6.37
R	0.1468	0.1590	0.1691	0.1628	0.1552	0.1725	0.1524	0.1669
Moyennes	0.1529		0.1660		0.16385		0.15965	
Tenue à l'eau	0.92				0.97			

INDIRECT TENSILE STIFFNESS MODULUS TEST

(According to Draft for development: DD 213)

Date: 29-05-2014 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	3.32	327.2	0.60	0.58	5	2.4	124	122.0	13387	13182
2	3.31	328.1	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

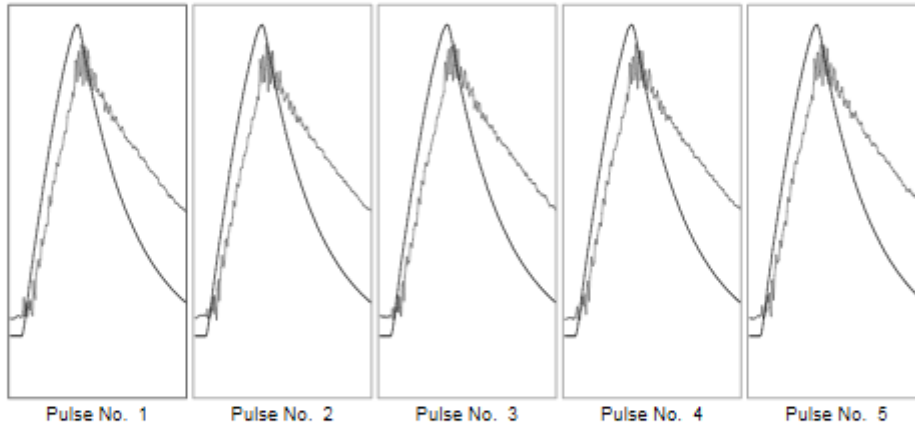
Note: Stiffness adjusted to a load area factor of 0.60

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:\natutils\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

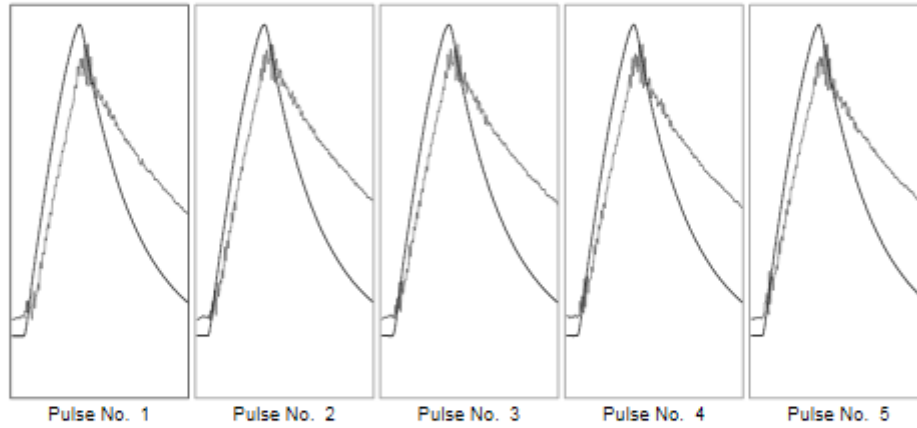
Note: Stiffness adjusted to a load area factor of 0.60

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	3.30	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

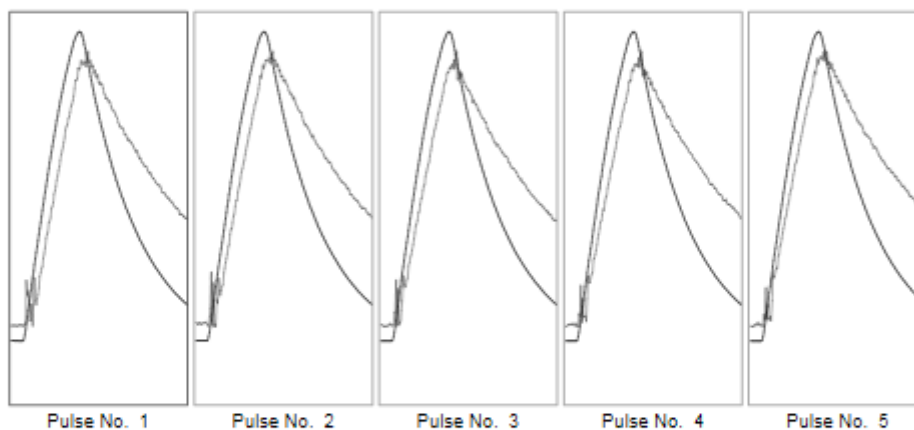
Note: Stiffness adjusted to a load area factor of 0.60

Figure 3: Résultats du module complexe pour l'enrobé tiède 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

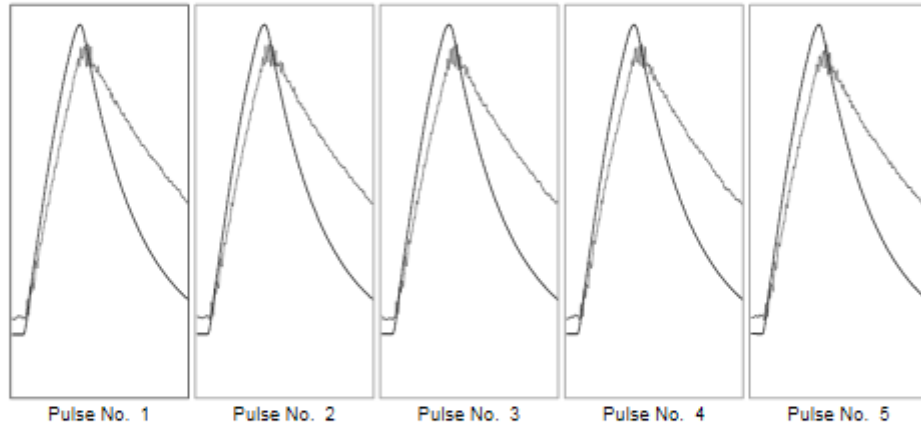
Note: Stiffness adjusted to a load area factor of 0.60

Figure 4: Résultats du module complexe pour l'enrobé tiède 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

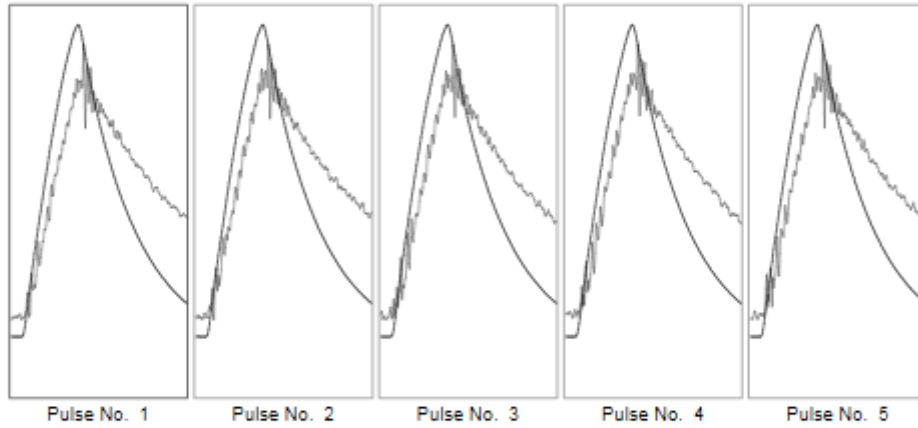
Note: Stiffness adjusted to a load area factor of 0.60

Figure 5: Résultats du module complexe pour l'enrobé tiède 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

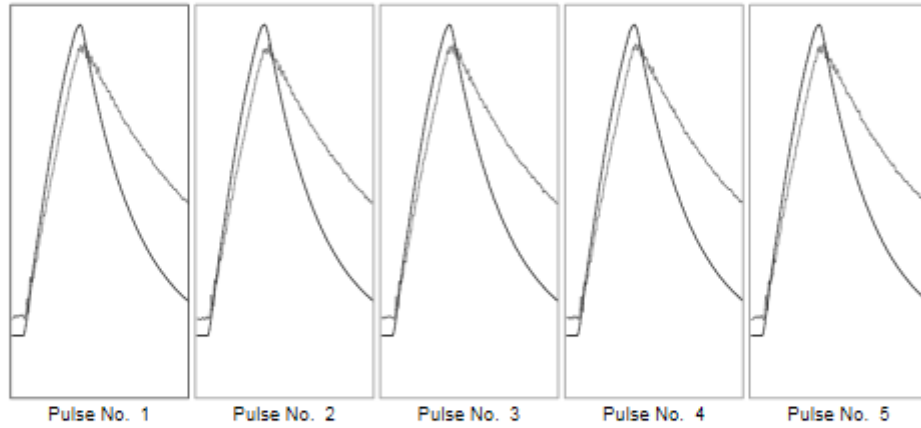
Note: Stiffness adjusted to a load area factor of 0.60

Figure 6: Résultats du module complexe pour l'enrobé tiède 2 conservation C2

INDIRECT TENSILE STIFFNESS MODULUS TEST

(According to Draft for development: DD 213)

Date: 29-05-2014 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	3.25	320.0	0.60	0.58	5	2.7	124	125.0	11767	11620
2	3.22	317.2	0.60	0.58	5	2.7	124	125.0	11650	11511
3	3.23	318.2	0.60	0.59	5	2.7	124	126.0	11763	11637
4	3.25	319.6	0.60	0.58	5	2.7	124	126.0	11718	11582
5	3.23	318.4	0.60	0.59	5	2.7	124	126.0	11668	11546
Mean	3.24	318.7	0.60	0.58	5	2.7	124	125.6	11713	11579

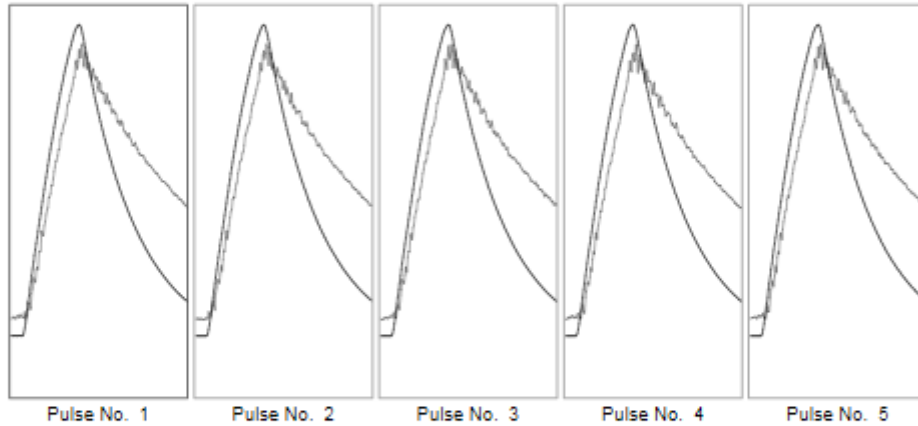
Note: Stiffness adjusted to a load area factor of 0.60

Figure 7: Résultats du module complexe pour l'enrobé tiède avec chaux 1 conservation C1

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	3.27	322.4	0.60	0.58	5	2.8	124	124.0	11523	11368
2	3.27	321.6	0.60	0.58	5	2.8	124	126.0	11458	11311
3	3.25	320.5	0.60	0.59	5	2.7	124	126.0	11539	11417
4	3.24	319.3	0.60	0.58	5	2.7	124	125.0	11426	11289
5	3.25	320.5	0.60	0.59	5	2.8	124	126.0	11451	11329
Mean	3.26	320.9	0.60	0.58	5	2.7	124	125.4	11479	11343

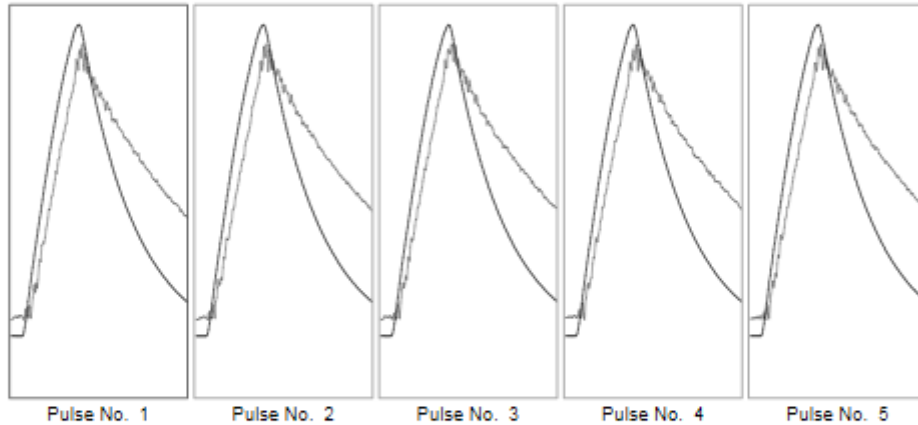
Note: Stiffness adjusted to a load area factor of 0.60

Figure 8: Résultats du module complexe pour l'enrobé tiède avec chaux 2 conservation C1

INDIRECT TENSILE STIFFNESS MODULUS TEST

(According to Draft for development: DD 213)

Date: 29.05.2014 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	3.27	321.6	0.60	0.58	5	2.5	124	125.0	12741	12572
2	3.25	319.8	0.60	0.59	5	2.5	124	126.0	12441	12316
3	3.27	321.8	0.60	0.58	5	2.5	124	126.0	12430	12265
4	3.25	320.1	0.60	0.58	5	2.6	124	125.0	12229	12074
5	3.25	320.1	0.60	0.59	5	2.6	124	126.0	12179	12050
Mean	3.26	320.6	0.60	0.58	5	2.5	124	125.6	12404	12255

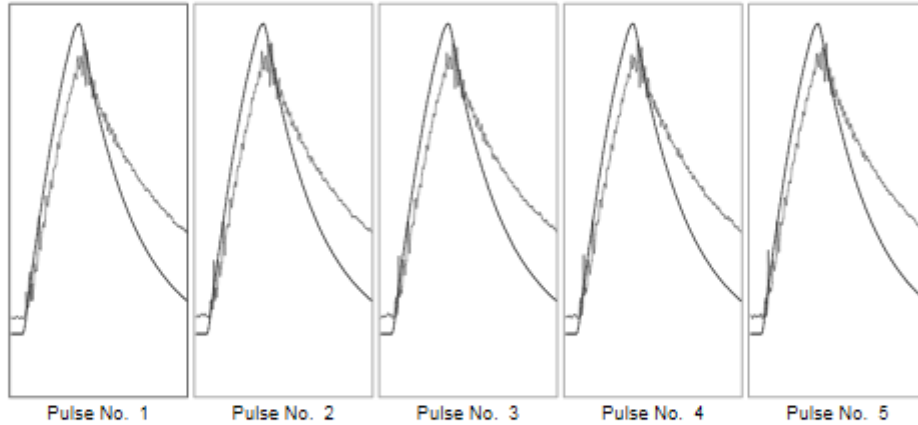
Note: Stiffness adjusted to a load area factor of 0.60

Figure 9: Résultats du module complexe pour l'enrobé tiède avec chaux 1 conservation C2

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: 84 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	3.30	325.3	0.60	0.59	5	2.4	124	124.0	13185	13051
2	3.26	321.4	0.60	0.59	5	2.4	124	125.0	13075	12950
3	3.26	320.9	0.60	0.59	5	2.4	124	125.0	13083	12952
4	3.26	321.5	0.60	0.59	5	2.4	124	125.0	13050	12919
5	3.27	322.0	0.60	0.59	5	2.4	124	125.0	12945	12816
Mean	3.27	322.2	0.60	0.59	5	2.4	124	124.8	13067	12938

Note: Stiffness adjusted to a load area factor of 0.60

Figure10: Résultats du module complexe pour l'enrobé tiède avec chaux 2 conservation C2