

République algérienne démocratique et populaire

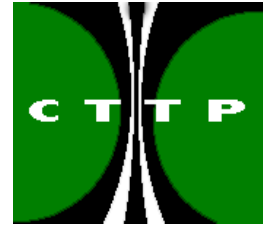
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Civil



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Projet de Fin d'Etudes

*Pour l'obtention du Diplôme
d'Ingénieur d'Etat en Génie Civil*

Thème

**Influence de l'Ajout de la Chaux sur le Phénomène de
Désenrobage des Enrobés Bitumineux**

promotrice : Mme MORSLI Meriem

Par

Le binôme d'élève ingénieur 3^{ème} Année:

Mlle DINE Hafsa et Mlle CHETTOUF Lynda

Promotion Juin 2014

Remerciements

*Nous tenons tout d'abord à remercier en premier lieu **DIEU**, le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force, la volonté et le courage nécessaires pour achever ce travail.*

Nous remercions nos très chers parents de leur soutien et de leur patience.

*Nous tenons à exprimer, notre gratitude et notre reconnaissance à **Mme MORSLI Meriem**, Professeur à l'ENP d'Alger et qui nous a encadré et guidé pour l'accomplissement de cette tâche, pour ses conseils instructifs et son soutien moral pendant la préparation de ce mémoire. Nous remercions les membres de jury qui nous ont fait l'honneur de présider et d'examiner notre Travail, à noter :*

Président : BALI ABDERRAHIM

Examineurs : R. KETTAB, Professeur, ENP

: ABD EL GUERFI

Promotrice : M. MORSLI, Professeur, ENP, Alger

Nous remercions aussi Mr MAGRAMANE Djamel chef de service produits noirs au CTTP, et Mr NAHI Samir ingénieur au CTTP, qui nous ont encadré et guidé durant la période du stage.

Nous adressons un grand remerciement à l'ensemble du personnel du laboratoire produits noirs du CTTP qui a contribué à la réalisation de la partie expérimentale, aussi nous a facilité rapidement l'intégration parmi eux, on citera en particulier :

GHELIS Islam, AZZOUZ Mustapha, et DJIDA Hicham.

***Enfin** nous tenons à examiner notre reconnaissance et nos respects à tous les enseignants de l'ENP qui ont contribué à notre bonne formation.*

Dédicace

Ce mémoire est dédié à ma chère famille qui s'est battue pour me voir arriver à ce jour.

Merci pour tous les efforts que vous avez accomplie.

Je tien aussi à remercier chaleureusement ma binôme Lynda pour sa patience et sa compréhension le long de notre cursus.

Dédicace

Au nom d'Allah le Clément le Miséricordieux

Tout d'abord je remercie le Dieu qui m'a donné le courage pour arriver à ce stade de fin d'études

Je dédie ce modeste travail A:

✚ *Mon père, qui a été toujours présent pour moi par son soutien et ses encouragements.*

✚ *La source de ma vie, ma mère qui m'a appris l'éducation avant le savoir et qui n'a pas cessé de me soutenir durant toutes mes études.*

Que ce travail soit pour eux le symbole de ma reconnaissance pour leur aide qu'ils m'ont apporté durant toute ma vie.

✚ *Mes chers frères et sœur : Mounir, Nadir, Hassan, Farida.*

✚ *Ma chère binôme : Hafsa.*

✚ *Tous mes amis (ies) : Zahra, Meriem.*

✚ *Tous mes camarades de classe.*

✚ *Tous ceux qui m'aiment.*

LYNDA

RÉSUMÉ

Cette étude consiste en la formulation un béton bitumineux semi grenu – BBSG0/14- avec des granulats locaux présentant une mauvaise adhésivité avec le bitume. La problématique est d'améliorer la tenue à l'eau de l'enrobé par une technique appropriée. Notre choix s'est porté sur l'ajout de chaux hydratée en tant que fillers à divers taux : 1%, 1.5%, 2% et 2.5% de la proportion pondérale du sable 0/3 et à partir d'une formule de base obtenue par la méthode Marshall. Le taux optimal d'ajout de chaux retenu dans cette étude est de 1.5%, à ce taux : la résistance au désenrobage passe de 0.61 à 0.90, la stabilité gagne 31%, le quotient Marshall, indice des déformations permanentes, augmente de 27% et la compacité s'est améliorée de 4.53%.

Mot clés : formulation, béton bitumineux, adhésivité, chaux hydratée, méthode Marshall, désenrobage.

ملخص

تتضمن هذه الدراسة تركيبية الاسفلت 14/0 عن طريق احجار محلية من الجنوب الجزائري التي تتميز بضعف تماسكها مع البتومين، الاشكالية تتمثل في امكانية تحسين مقاومة هذا الاسفلت للماء اختيارنا لمعالجة هذه المشكلة تمثلت في اضافة "الجير المطفأ" بنسب مختلفة 1% 1.5% 2% و 2.5% من نسبة الحصى 3/0 مع خليط اساسي مجهز بطريقة "مارشال" فوجدنا ان النسبة الامثل من "الجير المطفأ" هي 1.5% حيث تحسن المقاومة تجريد من 0.61 الى 0.9 و المقاومة ب 31% و الحاصل مرشال "الاستقرار" يفوز ب 27%

كلمات البحث : تركيبية, الاسفلت, مقاومة, الجير المطفأ, طريقة مارشال, تجريد

Abstract

This study is the formulation of a bituminous concrete semi grainy -BBSG0/14- with local aggregates with poor adhesion with bitumen. The problem is to improve the water resistance of the coating by an appropriate technique. Our choice fell on the addition of hydrated lime as fillers at various rates: 1%, 1.5%, 2% and 2.5% from a basic formula obtained by the Marshall method. The optimal rate of lime addition retained in this study is 1.5%, this rate: resistance to stripping password 0.61 to 0.90, stability wins 31%, the quotient Marshall; permanent deformation index increases 27% compactness and improved by 4.53%.

Keywords: formulation, bituminous, adhesion, hydrated lime, Marshall method, to stripping.

TABLES DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE1

CHAPITRE I : GENERALITES

I.1. Introduction3

I.2. Généralités sur les chaussées3

I.2.1. La chaussée3

I.2.2. Les différents types de structures de chaussée4

I.2.2.1. Les chaussées souples4

I.2.2.2. Les chaussées bitumineuses épaisses5

I.2.2.3. Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques (semi-rigides)5

I.2.2.4. Les chaussées à structure mixte6

I.2.3. Influence des actions appliquées à la chaussée6

I.2.3.1. Effet du trafic6

I.2.3.2. Effet de la température7

I.2.3.3. Effet de l'eau9

I.3. Généralités sur les Enrobés Bitumineux9

I.3.1. Définition9

I.3.2. Fabrication des Enrobés Bitumineux à chaud10

I.3.3 Les Moyens de Fabrication10

I.3.4. Qualités essentielles exigés à un enrobé12

I.3.5. Les types d'enrobés (enrobés classiques)13

I.3.5.1. Les bétons bitumineux BB13

I.3.5.2. Les graves bitumes GB13

I.3.5.3. Les sables bitumes SB13

I.4. Les principaux constituants de l'enrobé.....14

I.4.1. Le bitume14

I.4.1.1.Qu'est ce qu'un bitume ?14

I.4.1.2. Origine, fabrication, composition et structure de bitume14

1) Origine et applications du bitume14

2) Fabrication du bitume15

3) Composition chimique et structure des bitumes	17
I.4.1.3.Importance économique	20
I.4.1.4.Propriétés	20
I.4.1.5.Liants bitumineux	20
I.4.2.Les granulats routiers	21
I.4.2.1. Définitions et Présentation Générale	21
I.4.2.2. Les fuseaux granulométriques	22
I.4.2.3. L'approche macroscopique	22
I.4.2.4. Caractéristiques géométriques des granulats routiers	22
I.4. Conclusion	24

CHAPITRE II : ESSAIS D'IDENTIFICATION DES MATERIAUX

II.1. Introduction	25
II.2. Essais d'identification	25
II.2.1. Essais sur granulats	
II.2.1.1. Caractéristiques de fabrication	25
1) Essai analyse granulométriques (NF P 18-560)	25
2) Essai Propreté Superficielle (NF P18-591)	27
3) Essai coefficient d'aplatissement (NF P-18-561)	28
4) Essai équivalent de sable (NF P18-598)	29
5) Essai au bleu de méthylène (EN 933-9)	31
II.2.1.2. Caractéristiques intrinsèques	32
1) Essai masse volumique (NF P 18-554) (NF P 18-555)	33
2) Essai Los Angelos (NF P 18-573)	35
3) Essai Micro Deval humide (NF P 18-572)	37
II.2.2. Essais sur bitumes	38
1) Pénétrabilité à 25°C	39
2) Point de ramollissement	40
3) La densité relative à 25°C (NF EN ISO 2592)	41
II.3. Conclusion	41

CHAPITRE III : FORMULATION DES ENROBES BITUMINEUX

III.1. Introduction	42
III.2. Etude de formulation d'un enrobé bitumineux.....	42

III.2.1. Le mélange granulaire	43
III.2.2. Teneur en liant	43
III.3. Les méthodes de formulation	44
III.3.1. La méthode MARSHALL	44
III.3.1.1. Principe de la méthode.....	44
III.3.1.2. Essais de formulation	45
1) Essai Marshall - fluage et stabilité - (NF EN 12697-34)	45
2) Essai Marshall - tenue à l'eau - (NF EN 12697 -12)	47
3) Mesure de la masse volumique apparente par pesée hydrostatique (NF P 98-250-6)	48
4) Essai Duriez (NF P 98-251-4)	49
III.3.2. La méthode LCPC	50
III.3.2.1. Principe de la méthode	50
III.3.2.2. Niveaux de l'épreuve de formulation	51
III.3.2.3. Essais de formulation LCPC.....	52
1) Essai Presse à Cisaillement Giratoire PCG (NF P 98-252)	52
2) L'orniéreur du LCPC (EN 12697-22)	53
III.4. Propriétés d'un revêtement bitumineux	55
III.5. Conclusion	57

CHAPITRE IV : L'ADHERENCE GRANULATS - BITUME

IV.1. Introduction	58
IV.2. Pathologies de dégradations des enrobés	58
IV.2.1. Analyse des causes probables des dégradations	58
IV.3. Mécanismes de l'adhérence granulats – bitume	62
IV.3.1. Que est ce que c que l'adhérence bitume granulat ?	62
IV.3.2. Paramètres intervenant dans les mécanismes d'adhésivité granulat-liant	64
1) Aperçu des paramètres	64
IV.4. Le Désenrobage des enrobés bitumineux	69
IV.4.1. Définition de désenrobage	69
IV.4.2. Mécanismes de désenrobage	69
IV.5. La solution envisageable pour la problématique	70
IV.5.1. La chaux éteinte – Un agent anti-désenrobage supérieur	70
IV.5.2. Mode d'action de la chaux dans les enrobés	71
IV.5.3. Mécanismes de l'action de la chaux sur les enrobés	72

IV.5.4. Méthodes d'ajout de la chaux hydratée à l'enrobé bitumineux	74
1) Ajout en centrale d'enrobage	74
2) Ajout de chaux hydratée sèche au granulat	74
3) Ajout de lait de chaux au granulat	74
IV.5.5. Spécifications pour la chaux hydratée dans les enrobés bitumineux	74
IV.5.6. Quantités et recommandations	75
IV.6. Conclusion	76

CHAPITRE V : ETUDE EXPÉRIMENTALE

V.1. Problématique	77
V.2. Identification des matériaux	77
V.2.1. Les granulats	77
V.2.1.1. Analyse chimique de la roche	78
V.2.1.2. Les essais d'identification des granulats	78
1) Caractéristiques intrinsèques	78
2) Caractéristiques de fabrication	79
3) Caractéristiques d'adhérence	82
V.2.2. Le liant	82
V.2.2.1. Les essais d'identification du bitume	82
V.3. Etude de formulation de l'enrobé bitumineux BBSG 0/14	83
V.3.1. Choix du mélange granulaire	83
V.3.2. Teneurs en bitume	85
1) Calcul de la surface spécifique des granulats	86
2) Calcul de la masse volumique réelle des granulats MVRg	86
3) Calcul du coefficient α	86
V.3.3. Essais de performances mécaniques sur les différents mélanges	87
V.3.3.1. Stabilité et fluage Marshall	87
V.3.3.2. Le pourcentage des vides	89
V.3.3.3. Essai Marshall à la tenue à l'eau selon le mode opératoire de C.T.T.P	91
V.3.4. Première partie: Formulation de l'enrobé bitumineux BBSG 0/14.....	91
V.3.4.1. Résultats des essais de formulation	91
1) Mélange « A » avec TL1= 5.58 %	91
2) Mélange « B » avec TL2 = 5,82%	93

3) Mélange « C » avec TL3 = 6.06 %	95
V.3.4.2. Choix de la formule optimale du BBSG0/14	97
V.3.5. Deuxième partie : Formulation du BBSG0/14 avec ajout de chaux hydratée	100
V.3.5.1. Résultats des essais de formulation	100
1) Mélange « A' » : l'ajout de 1% de chaux hydraté	100
2) Mélange « B' » : l'ajout de 1.5 % de chaux hydraté	102
3) Mélange « C' » : l'ajout de 2 % de chaux hydraté	104
4) Mélange « D' » : l'ajout de 2.5 % de chaux hydraté	106
V.3.5.2. Influence du taux d'ajout de chaux sur les performances du BBSG 0/14.....	109
V.3.5.3. Choix du pourcentage de chaux optimal pour le BBSG 0/14	112
V.4. Conclusion	113
CONCLUSION GENERALE	114
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE	115
ANNEXES	
Annexe I : Les essais de dimensionnement rationnel des chaussées.....	119
Annexe II : La définition des termes difficiles	120
Annexe III : Classification des matériaux	121
Annexe IV : Les Spécifications Algériennes sur les Bétons Bitumineux	122

Liste des Figures

Figure I.1. Constitution d'une structure routière	4
Figure I.2. Chaussée souple	5
Figure I.3. Chaussée bitumineuse épaisse	5
Figure I.4. Chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques	5
Figure I.5. Chaussée à structure mixte	6
Figure I.6. Schématisation des sollicitations induites par le trafic	6
Figure I.7. Schématisation des sollicitations induites par la température	8
Figure I.8. Vue en coupe d'un enrobé bitumineux montrant les granulats formant un squelette granulaire (gris) et le bitume liant ce squelette (noir)	10
Figure I.9. Centrale d'enrobage discontinue	11
Figure I.10. Centrale d'enrobage continue.....	12
Figure I.11. Principe de fabrication des bitumes.....	16
Figure I.12. Composition chimique et structure des bitumes	18
Figure I.13. Macrostructure des asphaltènes du bitume	19
Figure II.1. Les tamis et la machine de tamisage	26
Figure II.2. Tamis à fentes	29
Figure II.3. Définition de l'équivalent de sable	30
Figure II.4. Matériel nécessaire pour l'essai bleu méthylène	31
Figure II.5. Machine de Los Angeles	36
Figure II.6. Appareillage de l'essai Micro-Deval	38
Figure II.7. Essai de pénétrabilité	39

Figure II.8. Essai bille et anneau.	40
Figure II.9. Essai densité relative	41
Figure III.1. Procédure de la formulation Marshall	44
Figure III.2. Principe de l'essai de compression.....	47
Figure III.3. Presse pour tenue à l'eau	48
Figure III.4. Mesure de masse volumique d'une éprouvette par pesée hydrostatique	48
Figure III.5. Essai DURIEZ	49
Figure III.6. Procédure de formulation LCPC	50
Figure III.7. Essais recommandés dans la méthode	51
Figure III.8. Presse à cisaillement giratoire PCG	53
Figure III.9. Ornièreur (Mesure de sensibilité à l'orniérage)	54
Figure III.10. Principe de l'orniéreur du LCPC	54
Figure IV.1. Fissuration par fatigue d'une chaussée	59
Figure IV.2. Circulation d'eau dans la plate-forme et la chaussée	60
Figure IV.3. L'effet de l'eau sur le couple granulat - bitume	61
Figure IV.4. Mécanisme d'action sur les enrobés	71
Figure IV.5. Essais d'orniérage sur un béton bitumineux semi grenu 0/14 à base d'un bitume 35/50 avec et sans ajout de chaux hydratée	73
Figure V.1. Les trois fractions granulaires	78
Figure V.2. Courbes granulométriques des fractions granulaires.....	80
Figure V.3. Fuseau spécifique de la courbe granulométrique du mélange BBSG 0/14.....	85
Figure V.4. Etuve de chauffage	88
Figure V.5. Enrobé après malaxage	88

Figure V.6. Remplissage des moules Marshall	88
Figure V.7. Dame Marshall	88
Figure V.8. Eprouvettes Marshall	88
Figure V.9. Bain – Marie	88
Figure V.10. Presse Marshall	89
Figure V.11. Histogrammes de l'évolution de l'affinité bitume - granulat	109
Figure V.12. Courbe de l'évolution de la stabilité en fonction de pourcentage de chaux hydraté ajoutée	110
Figure V.13. Courbe de l'évolution du quotient Marshall en fonction de pourcentage de chaux hydraté ajouté	110
Figure V.14. Courbe de l'évolution du pourcentage des vides en fonction de pourcentage de chaux hydraté ajoutée	111
Figure V.15. Courbe de l'évolution de la tenue à l'eau en fonction de pourcentage de chaux hydraté ajoutée	111

Liste des Tableaux

Tableau III.1. Les propriétés d'un revêtement performant	56
Tableau IV.1. Synthèse des paramètres pouvant intervenir dans les mécanismes d'adhésivité liant-granulat	65
Tableau V.1. Résultats de l'analyse chimique de la roche	80
Tableau V.2. Valeurs de masse volumiques des différentes fractions	80
Tableau V.3. Coefficient los Angeles	81
Tableau V.4. Coefficient micro Deval	81
Tableau V.5. Analyse granulométrique pour Fraction 0/3	82
Tableau V.6. Analyse granulométrique pour Fraction 3/8	82
Tableau V.7. Analyse granulométrique pour Fraction 8/15	82
Tableau V.8. Valeurs de l'équivalent de sable	83
Tableau V.9. Coefficient bleu de méthylène	83
Tableau V.10. Coefficient d'aplatissement	83
Tableau V.11. Résultats de l'essai AKZOO	84
Tableau V.12. Résultats des essais sur bitume	84
Tableau V.13. Fuseau granulaire du mélange BB 0/14	86
Tableau V.14. Les pourcentages des fractions granulaires pour le mélange	86
Tableau V.15. Calcul de la surface spécifique	88
Tableau V.16. Valeurs de Module de Richesse et Teneur en liant(%)	89
Tableau V.17. Valeurs de la Teneur en liant et MVR du mélange	92
Tableau V.18. Les quantités employées pour les différents constituants	93
Tableau V.19. Le % de vide (TL1)	94
Tableau V.20. Résultats de stabilité et fluage Marshall (TL1)	94

Tableau V.21. Résultats de la tenue à l'eau (TL1)	95
Tableau V.22. Le % de vide (TL2)	96
Tableau V.23. Résultats de stabilité et fluage Marshall (TL2)	96
Tableau V.24. Résultats de la tenue à l'eau (TL2)	97
Tableau V.25. Le % de vide (TL3)	98
Tableau V.26. Résultats de stabilité et fluage Marshall (TL3)	98
Tableau V.27. Résultats de la tenue à l'eau (TL3)	99
Tableau V.28. Résultat des essais Marshall et la tenue à l'eau de différents mélanges	100
Tableau V.29. Le % de vide (1% de chaux)	103
Tableau V.30. Résultats de stabilité et fluage Marshall (1% de chaux).....	103
Tableau V.31. Résultats de la tenue à l'eau (1% de chaux)	104
Tableau V.32. Résultat de l'essai AKZOO (1% de chaux).....	104
Tableau V.33. Le % de vide (1.5 % de chaux)	105
Tableau V.34. Résultats de stabilité et fluage Marshall (1.5 % de chaux)	105
Tableau V.35. Résultats de la tenue à l'eau (1.5 % de chaux)	106
Tableau V.36. Résultats de l'essai AKZOO (1.5 % de chaux)	106
Tableau V.37. Le % de vide (2 % de chaux)	107
Tableau V.38. Résultats de stabilité et fluage Marshall (2 % de chaux)	107
Tableau V.39. Résultats de la tenue à l'eau (2 % de chaux)	108
Tableau V.40. Résultats de l'essai AKZOO (1.5 % de chaux)	108
Tableau V.41. Le % de vide (2.5 % de chaux)	109
Tableau V.42. Résultats de stabilité et fluage Marshall (2.5 % de chaux)	109
Tableau V.43. Résultats de la tenue à l'eau (2.5 % de chaux)	110
Tableau V.44. Résultats de l'essai AKZOO (2.5 % de chaux)	110

Tableau V.45. Les résultats des essais Marshall, essai Marshall à la tenue à l'eau, et l'essai
AKZOO des différents mélanges111

Liste des Abréviations et des Symboles

CTTP : Organisme de Control Technique des Travaux Publics

PST : Partie Supérieure des Terrassements

CS₂ : le sulfure de carbone

CBR : Californian Bearing Ratio

TCR : Triaxial à Chargements Répétés

IC : L'indice de Concassage

RC : Le rapport de Concassage

VTM : Véhicule de Transfert de Matériaux

EG : Enrobés Grenus

ESG : Enrobés Semi-Grenus

BB : Béton Bitumineux

GB : Graves Bitumes

SB : Sables Bitumes

BBSG : Béton Bitumineux Semi Grenus

V.M.A : Voids in the Mineral Aggregate (vides inter granulaires)

MTQ : Ministère des Transports du Québec

PCG : Presse à Cisaillement Giratoire

VCB : Vide Comblé par le Bitume

NF : Norme Française

EN : Européen Norme

LCPC : Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées

Liste des Abréviations et des Symboles

PMT : Profondeur Moyenne de Texture

HSV : Hauteur au Sable Vraie

σ_t : La contrainte de traction

E_t : Le module élastique

P : Propreté superficielle

w : Teneur en eau

CA : Coefficient d'Aplatissement

ES : Equivalent de Sable

ρ_s : masse volumique absolue sèche

ρ_d : masse volumique apparente sèche

LA : Los Angeles

M.D.E : Micro Deval Humide

MVA : Masse Volumique Apparente

MVR : Masse Volumique Réel

S : Stabilité

F : Fluage

TL : Teneur en Liant

QM : Quotient Marshall

R : Résistance à l'air (compression)

r : Résistance à l'eau (immersion)

Σ : Surface Spécifique des granulats

G : Pourcentage de gros gravillons

S : Pourcentage de gros sable

Liste des Abréviations et des Symboles

s : Pourcentage de sable fin

f : Pourcentage de filler

α : Facteur dépendant du type de granulats

K : Module de richesse

% V : Pourcentage des Vides

PMT : Profondeur Moyenne de Texture

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les enrobés bitumineux constituent un élément majeur dans la construction des routes. Ils doivent répondre à plusieurs exigences :

- Etre maniable durant la mise en place et la compaction;
- Contribuer à la force de la structure de la route;
- Offrir une bonne résistance à l'orniérage, à la fissuration due à la fatigue et à la fissuration thermique résister aux effets de l'air et de l'eau (durabilité);
- Etre imperméable pour protéger la structure de la route de l'eau
- Assurer une bonne adhérence des pneus dans des conditions climatiques variées
- Offrir un niveau acceptable de bruit dû au frottement des pneus sur la chaussée;
- Offrir une douceur de roulement acceptable
- Etre facile entretien et à peu de frais.

Les mélanges bitumineux sont conçus pour satisfaire à ces exigences et leur formulation (proportions et caractéristiques des constituants) varie selon le rôle assuré par l'enrobé dans la chaussée, le type de trafic ainsi que les conditions climatiques. Les propriétés mécaniques et la durabilité des ces enrobés sont assurées par la « *stabilité de l'édifice granulaire* », par « *les propriétés cohésives du bitume* » c'est-à-dire son aptitude à rester stable sous l'action des forces internes et par « *une bonne adhésion entre le bitume et les granulats* ».

Avec des matériaux conventionnels, une formulation adéquate et une bonne mise en œuvre, l'enrobé répond généralement aux performances attendues.

Avec des matériaux non conventionnels, les granulats ne répondent pas toujours aux exigences formulées. Dans ces situations, un certain nombre de techniques sont proposées en fonction du problème relevé.

Dans le cadre de notre étude, les matériaux proposés par l'organisme de Contrôle Technique des Travaux Publics – CTTTP- sont des granulats issus du concassage d'une dolomie dont la teneur en calcaire reste relativement faible (< (50%). Ils sont chargés négativement (PH = 6), ce qui présage d'une mauvaise adhésivité liant-granulat, ce présage est confirmée par un essai d'adhésivité et les résultats obtenus lors de la formulation classique.

L'enrobé à élaborer est un béton bitumineux semi grenu destiné à la couche de roulement d'une chaussée sous un trafic moyen (moins de 300 PL/J), en zone saharienne.

Le bitume est un bitume conventionnel 40/50. Les granulats présentent des caractéristiques mécaniques à la limite des exigences normatives et les essais confirment le problème d'affinité avec le bitume. Les granulats peuvent à priori être retenus pour la formulation envisagée à condition d'améliorer l'adhésivité granulats-bitume à l'origine du désherbage, phénomène qui contribue à grande échelle dans l'apparition et la progression de plusieurs dégradations des revêtements routiers.

L'objet de notre Projet de fin d'étude est avant pédagogique : faire une immersion dans la vie professionnelle, acquérir les notions de base de formulation des enrobés, apprendre à travailler en équipe tout en traitant d'un sujet réel, d'actualité et entrant dans le cadre du développement durable et environnement : proposer une formulation d'enrobé à partir de granulats locaux présentant une défaillance relative à l'adhésivité granulats-bitume.

Le mémoire présente quatre chapitres en partie bibliographique et une partie expérimentale.

Ainsi :

Partie Bibliographique :

- Le premier chapitre porte des généralités, une sur la chaussée bitumineuse, et l'autre sur les enrobés, en citant les matériaux bitumineux constituants.
- Le deuxième chapitre nous parlons des essais d'identification des matériaux constituants d'un enrobé.
- Le troisième chapitre sur la formulation des enrobés bitumineux.
- Le quatrième chapitre apportera quelques notions sur l'affinité « liant-grulats » et les techniques préconisées en cas d'une insuffisance d'adhésivité entre les deux éléments.

Partie Expérimentale :

- Le cinquième chapitre concerne le programme expérimental, les résultats et l'analyse des essais.

CHAPITRE I

Généralités

CHAPITRE I.

GENERALITES

I.1. INTRODUCTION

Ce chapitre résume les connaissances acquises à ce jour la, sur les chaussées et les propriétés des matériaux bitumineux, afin d'établir le cadre général de cette étude.

Nous présentons brièvement quelques généralités tout d'abord, sur les chaussées, puis sur les enrobés bitumineux, citant la définition, la fabrication, le mode de fabrication, les qualités essentielles exigés à un enrobé, et les types d'enrobés. En fin on parlera des différents constituants d'enrobés bitumineux (les granulats routiers, le bitume).

I.2. GENERALITES SUR LES CHAUSSEES :

I.2.1. La chaussée [1]

Une chaussée est une structure composite qui se compose d'un empilement de couches de matériaux granulaires, liés ou non. Sur une coupe de chaussée, on associe à chacune des couches une fonction

- **La plate-forme support de chaussée** est constituée du sol terrassé, dit sol support ou partie supérieure des terrassements (PST), surmontée généralement d'une couche de forme en matériaux granulaires, sableux ou limoneux, traités ou non traités au liant hydraulique. Pendant la phase de travaux, la couche de forme a pour rôle d'assurer une qualité de nivellement permettant la circulation des engins pour la réalisation du corps de chaussée. Vis-à-vis du fonctionnement mécanique de la chaussée, la couche de forme permet d'augmenter la capacité portante de la plate-forme support de chaussée.
- **Les couches d'assises** sont généralement constituées d'une couche de fondation surmontée d'une couche de base. Elles apportent à la structure de chaussée l'essentiel de sa rigidité et répartissent (par diffusion latérale) les sollicitations, induites par le trafic, sur la plate-forme support afin de maintenir les déformations à un niveau admissible.

- **La couche de surface** est constituée d'une couche de roulement reposant éventuellement sur une couche de liaison intermédiaire. La couche de roulement assure la fonction d'étanchéité des couches d'assise vis-à-vis des infiltrations d'eau et des sels de déverglaçage, et à travers ses caractéristiques de surface, elle garantit la sécurité et le confort des usagers.

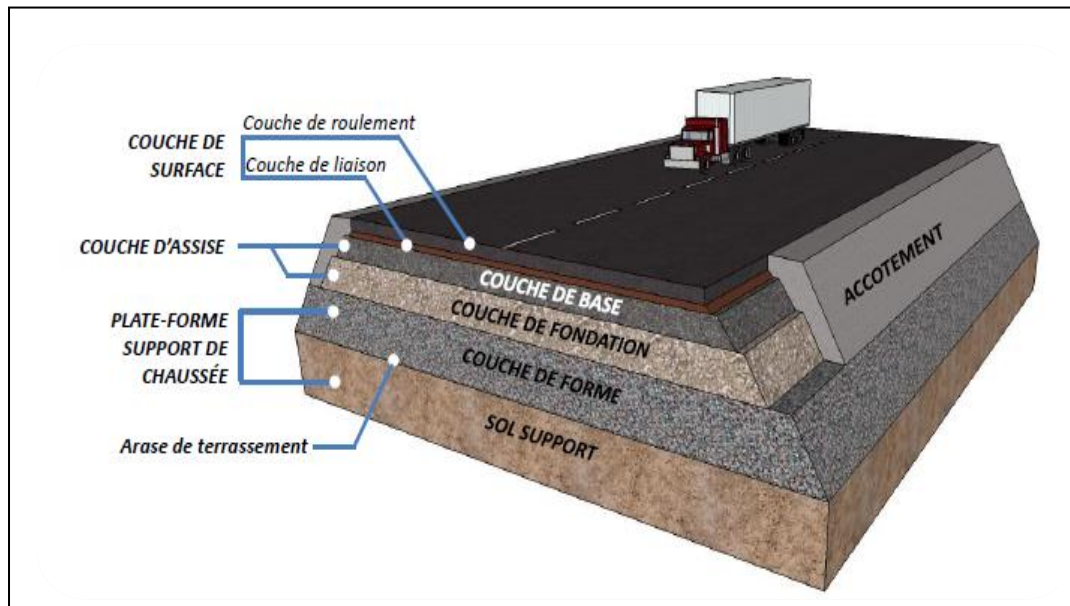


Figure I.1. Constitution d'une structure routière [1].

I.2.2. Les différents types de structures de chaussée [1]

Le réseau routier et autoroutier est composé de plusieurs types de structures de chaussée. Les différentes familles de chaussée, des chaussées noires (composées uniquement de matériaux bitumineux) aux chaussées blanches (composées uniquement de matériaux traités aux liants hydrauliques).

On peut regrouper les différents types de chaussées comme suit :

I.2.2.1. Les chaussées souples :

traditionnellement comportent une épaisseur d'enrobés bitumineux inférieure ou égale à 15 cm et une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités dont l'épaisseur totale courante varie de 20 à 50 cm, selon le trafic. Etant donnée leur faible rigidité, elles sont

utilisées sur les réseaux peu sollicités par le trafic poids lourd. Pour le dimensionnement, les couches sont considérées commettant collées entre elles.

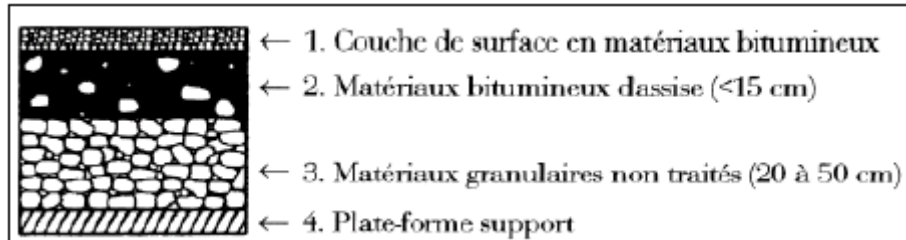


Figure I.2. Chaussée souple [1].

I.2.2.2. Les chaussées bitumineuses épaisses

Elles comportent une couche de roulement bitumineuse sur un corps de chaussée en matériaux bitumineux disposés en une ou deux, voire trois couches, dont l'épaisseur totale est comprise entre 15 et 40 cm.

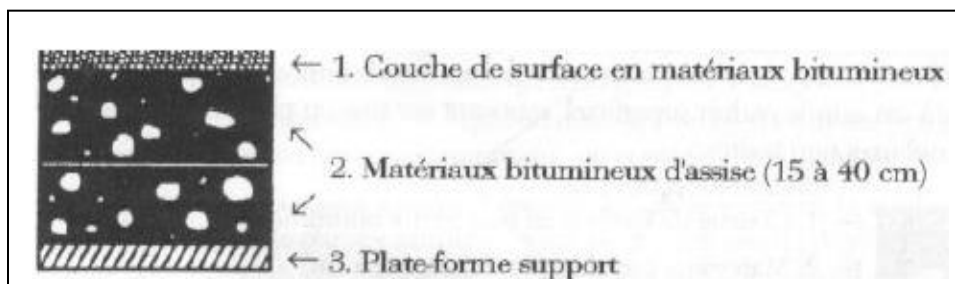


Figure I.3. Chaussée bitumineuse épaisse [1].

I.2.2.3. Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques (semi-rigides)

Elles comportent une couche de surface bitumineuse (d'épaisseur variable selon le trafic supporté) sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques disposés en une ou deux couches (base et fondation) dont l'épaisseur totale est de l'ordre de 20 à 50 cm.

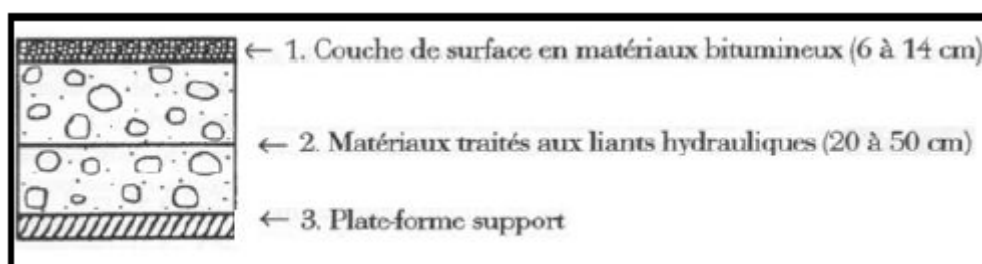


Figure I.4. Chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques [1].

I.2.2.4. Les chaussées à structure mixte :

Elles comportent une couche de roulement et une couche de base en enrobés bitumineux (épaisseur de base 10 à 20 cm) sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40 cm).

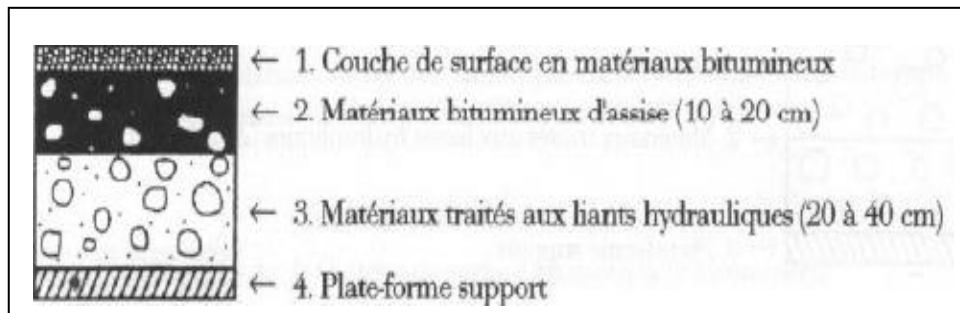


Figure I.5. Chaussée à structure mixte [1].

I.2.3. Influence des actions appliquées à la chaussée

I.2.3.1. Effet du trafic [2]

Chaque couche de chaussée subit des écrasements et des flexions sous l'effet du trafic (Figure I.6). Le calcul des efforts et des déformations qui s'effectue traditionnellement en considérant des multicouches élastiques linéaires isotropes, nécessite, en premier lieu, la connaissance du module de Young et éventuellement du coefficient de Poisson.

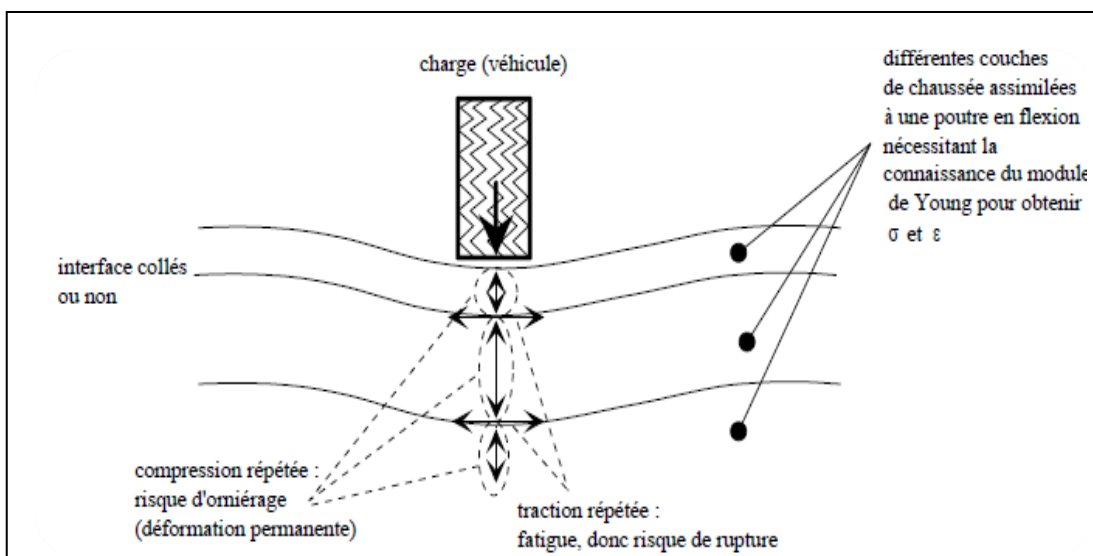


Figure I.6. Schématisation des sollicitations induites par le trafic [3].

C'est précisément à partir de ces deux coefficients, le modèle de Burmister (1943) permet la résolution du problème considéré comme élastique.

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

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

I.2.3.2. Effet de la température [3]

A basse température le bitume possède un comportement fragile. La chaussée est, par voie de conséquence, susceptible de se fissurer sous l'effet conjugué des conditions climatiques et des contraintes de trafic. Cependant, la fissuration thermique peut être facilement évitée à basse température, si l'on utilise un bitume de grade élevé, c'est-à-dire un bitume moins "dur", et donc moins "cassant" à basse température.

Néanmoins, un bitume de grade trop élevé se révèle néfaste vis-à-vis des problèmes d'orniérage (déformations permanentes de la chaussée) à température élevée. Le bitume idéal doit donc être à la fois le moins susceptible possible aux phénomènes de fissuration thermique (à basse température) et d'orniérage (à température élevée).

Plus simplement, on doit donc exiger des enrobés deux qualités principales en rapport direct avec la dépendance du liant utilisé vis-à-vis de la température :

- La stabilité : i.e. la résistance à la déformation permanente qui est aggravée à haute température ;
- La flexibilité : soit l'aptitude à supporter sans fissures thermiques les basses températures.

Ces conditions ont notamment amené les différents groupes pétroliers à développer de nouveaux bitumes pour couvrir ce large intervalle de température (-30°C à 60°C) : les bitumes modifiés aux polymères.

Pour résumer, outre le vieillissement du matériau, la température a deux effets mécaniques principaux:

- Changement du module du matériau. Un béton bitumineux que l'on chauffe devient plus "mou". Plus généralement, ces matériaux sont dits "thermo-sensibles", c'est-à-dire que leur comportement viscoplastique change selon la température considérée,
- Création de contraintes et déformations au sein du matériau en raison des dilatations ou contractions thermiques lors des changements de température (Figure I.7).

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

Le deuxième effet est particulièrement néfaste :

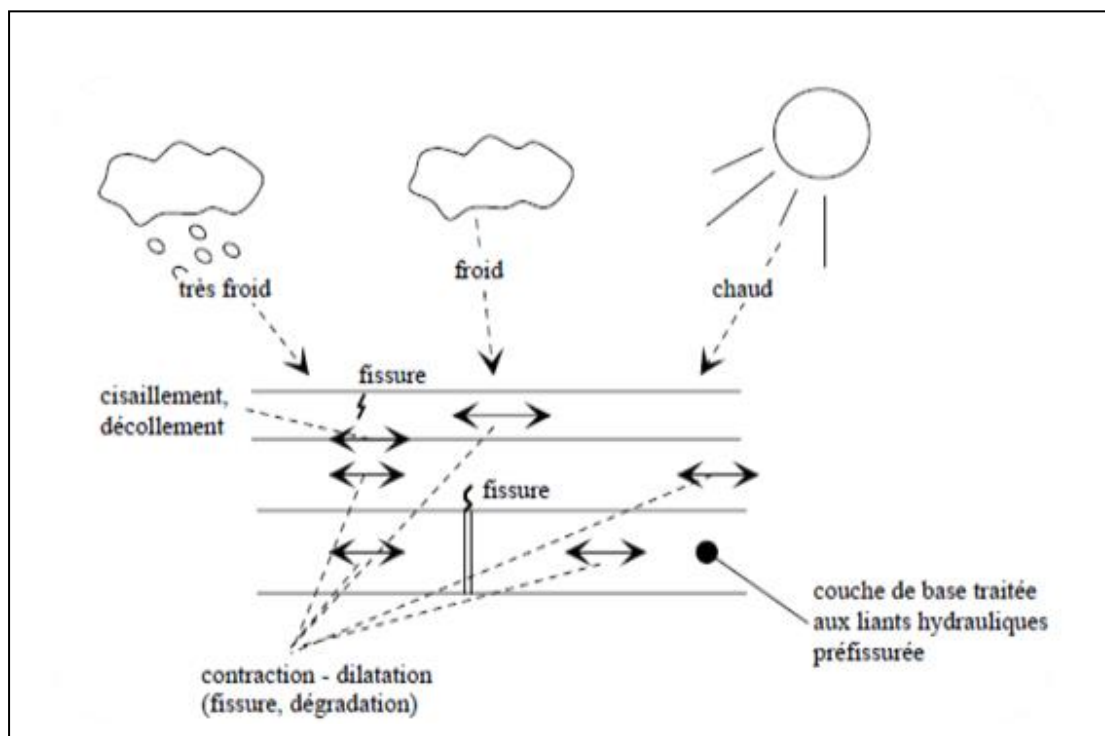


Figure I.7. Schématisation des sollicitations induites par la température [3].

- Lors d'un refroidissement, par exemple, la chaussée a tendance à se contracter. Or, les mouvements de contraction sont empêchés dans le sens longitudinal de la chaussée. Cela revient donc à exercer une traction sur cette chaussée dans le sens longitudinal, d'où

l'amorçage éventuel de fissures transversales. Ces dernières sont ensuite susceptibles de se propager à travers la structure lors de cycles thermiques (journaliers ou autres).

- Lorsqu'une couche de base traitée aux liants hydrauliques existe dans la chaussée (structures semi-rigides). En effet, cette couche traitée aux liants hydrauliques est sujette au retrait thermique et de prise. Le retrait, empêché par le frottement à l'interface, peut provoquer une fissure dans la couche en béton bitumineux. Cette fissure évolue avec les cycles thermiques et peut progressivement traverser la couche.

I.2.3.3. Effet de l'eau [4]

L'action de l'eau et la mauvaise affinité entre le liant et le granulat favorise le désenrobage.

Dans le cas des fillers qui contiennent de l'argile et en présence d'eau, cette dernière a tendance à gonfler et diminuer la stabilité.

I.3. GENERALITES SUR LES ENROBES BITUMINEUX

I.3.1. Définition [6] [5]

Les enrobés bitumineux se composent de granulats formant un squelette granulaire calibré lié par un liant bitumineux dans des proportions massiques maîtrisées de l'ordre de 95 à 93 % de granulats pour environ 5 à 7 % de liant qui assure la cohésion, les granulats assurent la rigidité de l'ensemble. Un additif peut éventuellement être associé à la composition.

De la couleur du liant bitumineux, les enrobés bitumineux ont hérité du nom générique de « produits noirs ». Cette dénomination est utilisée par opposition aux matériaux traités au liant hydraulique appelés « produits blancs ».

L'obtention des enrobés par mélange des granulats et du bitume fait appel à des propriétés bien spécifiques aux liants hydrocarbonés en général et donc au bitume en particulier :

- Un pouvoir d'adhésion aux granulats,
- Une consistance variable avec la température.

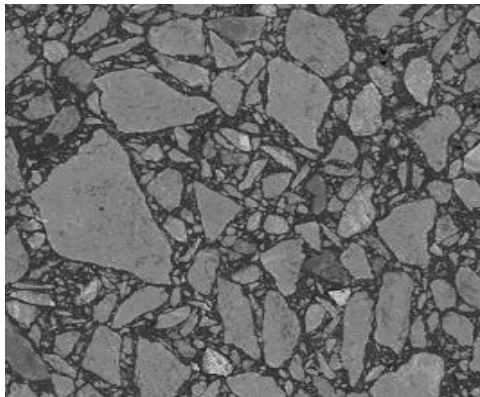


Figure I.8. Coupe d'un enrobé bitumineux montrant les granulats formant un squelette granulaire (gris) et le bitume liant ce squelette (noir) [5].

I.3.2. Fabrication des Enrobés Bitumineux à chaud [5]

Bien que d'autres méthodes existent, telles que la mise en émulsion ou le moussage, les bitumes sont majoritairement (à 70 %) utilisés dans des applications dites « à chaud », où le liant est fluidifié par élévation de la température autour de 160°C, afin d'être mélangé dans des malaxeurs industriels, à des granulats calibrés préalablement séchés. La fabrication des enrobés bitumineux se décompose en différentes étapes :

- stockage des constituants pour préserver leurs propriétés ;
- dosage ;
- chauffage du bitume pour atteindre sa température d'application dans un malaxeur ou un pétrin calorifugé et éventuellement séchage des granulats dans un sécheur ;
- mélange du bitume chaud et des granulats éventuellement préchauffés et séchés dans le malaxeur ou pétrin, ou coulée du bitume chaud sur les granulats mis en place, ou coulée des granulats sur le bitume chaud répandu, selon l'application (fabrication de chaussée, ...).
- transport et mise en place ; les enrobés sont surtout fabriqués sur place. Ces deux étapes se résument donc souvent à une coulée de l'enrobé du malaxeur au lieu d'utilisation.

I.3.3 Les Moyens de Fabrication [4]

La fabrication des enrobés bitumineux s'est développée de manière industrielle à partir des années 1930. Les principes fondamentaux de l'enrobage restent, depuis l'origine, marqués par la coexistence de deux systèmes de fabrication : continu ou discontinu.

Discontinu (figure I.9)

- granulats et bitume sont pesés par gâchée
- le malaxage se fait par gâchée
- centrale fixe
- fourniture avec multiples formules de type épïc

Continu (figure I.10)

- granulats et bitume sont dosés en continu
- le malaxage se fait en continu
- centrale fixe ou mobile
- formule unique à grand rendement

La production industrielle des enrobés à chaud est réalisée dans une centrale d'enrobage.

Cette méthode comprend le séchage et le chauffage des granulats à l'aide de tambour sécheur rotatif.



Figure I.9. Centrale d'enrobage discontinue [7].



Figure I.10. Centrale d'enrobage continue [7].

I.3.4. Qualités essentielles exigés à un enrobé [8]

Les qualités essentielles auxquelles doit répondre un enrobé bitumineux sont :

- **La stabilité**

La stabilité est la résistance à la déformation permanente de la couche sous l'effet des charges statiques et dynamiques. L'insuffisance de stabilité se traduit par fluage avec formation de dépression, d'ornièrre et d'ondulation. La stabilité augmente avec l'angle de frottement interne des granulats, la dureté du liant et le compactage si bien que la tendance actuelle pour la chaussée à trafic lourd réside dans l'emploi des bétons bitumineux constitués de liants durs et de granulats durs et anguleux.

- **La flexibilité**

On entend par flexibilité l'aptitude de l'enrobé bitumineux à admettre sans fissuration ces déformations d'ensemble qui peuvent être imposées par la déflexion des couches inférieures. L'insuffisance de flexibilité dépend au premier lieu de la ductilité du liant qui doit demeurer suffisante aux basses températures pendant toute la vie de l'enrobé.

Pour obtenir un enrobé à la fois flexible et stable, il faut donc un liant qui reste visqueux en été sans devenir fragile en hiver et qui de plus résiste bien au vieillissement.

- **Absence de sensibilité à l'eau**

Une bonne affinité entre le liant et les granulats permet une bonne résistance au risque de désherbage des matériaux sous l'action de l'eau. Celle-ci peut, d'autre part altérer les éléments fins de l'enrobé, par conséquent les fillers doivent contenir peu d'argile. Cette dernière réduit considérablement la stabilité de l'enrobé humide.

I.3.5. Les types d'enrobés (enrobés classiques) [4]

Plusieurs techniques routières ont été envisagées pour la réalisation des routes en Algérie citons parmi elles :

I.3.5.1. Les bétons bitumineux BB

Ce sont des matériaux enrobés à chaud, dont le squelette minéral est en général une grave concassée 0/10 ou 0/14 avec un bitume pur généralement de classe 40/50.

L'épaisseur d'utilisation des bétons bitumineux varie de 6 à 8 cm.

Ce type de matériaux est bien adapté aux chaussées à trafic moyen et fort ils représentent la majeure partie des enrobés pour couche de roulement en Algérie que ce soit en travaux neufs ou en renforcement.

I.3.5.2. Les graves bitumes GB

Les graves bitumes sont obtenus à partir d'un mélange à chaud de grave concassé et du bitume pur qui peut être un bitume de classe 80/100 ou 40/50, le choix dépend des conditions climatiques.

En Algérie on utilise essentiellement un bitume dur en raison des fortes températures et des longues périodes d'ensoleillement.

On a généralement deux types de grave bitume, selon leur granularité :

- Grave bitume 0/20 : utilisé en couche de base ;
- Grave bitume 0/31.5 : utilisé en couche de fondation.

L'épaisseur d'utilisation des graves bitumes varie de 10 à 15 cm.

I.3.5.3. Les sables bitumes SB

Le sable bitume est un mélange d'un ou de plusieurs sables avec du bitume pur.

Généralement, le mélange nécessite l'ajout de fines provenant soit des matériaux de concassage-broyage (sable fillérisé, fines calcaires), soit des pulvérulents industriels (chaux, ciment).

Le bitume utilisé doit être assez dur, de classe 40/50 ou 20/30 afin d'assurer une rigidité et une stabilité convenable. La fabrication du mélange (sable + bitume) se fait en centrale d'enrobage à chaud.

L'emploi des matériaux locaux, et notamment les sables, est intéressant en Algérie en particulier au Sud, vu le problème de déficit des agrégats dans certaines régions et du transport des agrégats sur des distances très grandes entre les carrières des agrégats et le site des projets. L'utilisation des sables bitumes est réservée aux routes à faible trafic en raison de leurs performances mécaniques fiables, leur emploi est intéressant pour les routes sahariennes.

I.4. LES PRINCIPAUX CONSTITUANTS DE L'ENROBE

L'enrobé est constitué principalement de bitume, de granulats et éventuellement d'additifs.

I.4.1. Le bitume

I.4.1.1. Qu'est ce qu'un bitume [9] ?

C'est une gamme d'hydrocarbures lourds, cohésifs et adhérents, obtenus soit comme produit de fin de distillation soit par extraction au solvant lors de la distillation des pétroles bruts. Ils se présentent sous forme liquide ou solide de couleur noirâtre, pouvant être pâteux ou cassants.

Les bitumes sont solubles dans la plupart des solvants habituels, et entièrement dans le sulfure de carbone (CS₂). Ils se ramollissent pour devenir liquides si la température à laquelle ils sont soumis est suffisamment élevée.

I.4.1.2. Origine, fabrication, composition et structure de bitume [10] [6]

1) Origine et applications du bitume

Les bitumes sont surtout composés de carbone et d'hydrogène, d'où leur nom d'hydrocarbure. 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, en effet, 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.

En outre, il convient de distinguer les termes de bitume et de liant hydrocarboné trop souvent confondus. En effet, le liant hydrocarboné peut être bitumineux, goudronneux, à base de bitume fluidifié.

2) Fabrication du bitume

Concernant les principaux modes de fabrication des bitumes, citons la distillation en raffinerie des pétroles bruts lourds contenant suffisamment de fractions lourdes pour produire du bitume. La première étape de ce processus consiste en une distillation atmosphérique qui permet de séparer les fractions légères du pétrole (essences, kérosène, gaz) des fractions lourdes, ces dernières étant ensuite distillées sous vide pour produire fuels, huiles et bitume. Outre la distillation, citons encore les procédés de soufflage et de désasphaltage. Le premier procédé consiste à oxyder les résidus sous vide par soufflage d'air chaud à 250 °C. Le deuxième procédé est, quant à lui, utilisé pour des résidus sous vide ayant une teneur en fractions lubrifiantes trop importante et consiste à traverser le résidu sous vide par un courant ascendant de solvant : la différence de solubilité des fractions bitumineuses vis-à-vis du solvant employé permet alors d'obtenir le bitume souhaité. Dans ce dernier cas, le bitume présente une faible pénétrabilité.

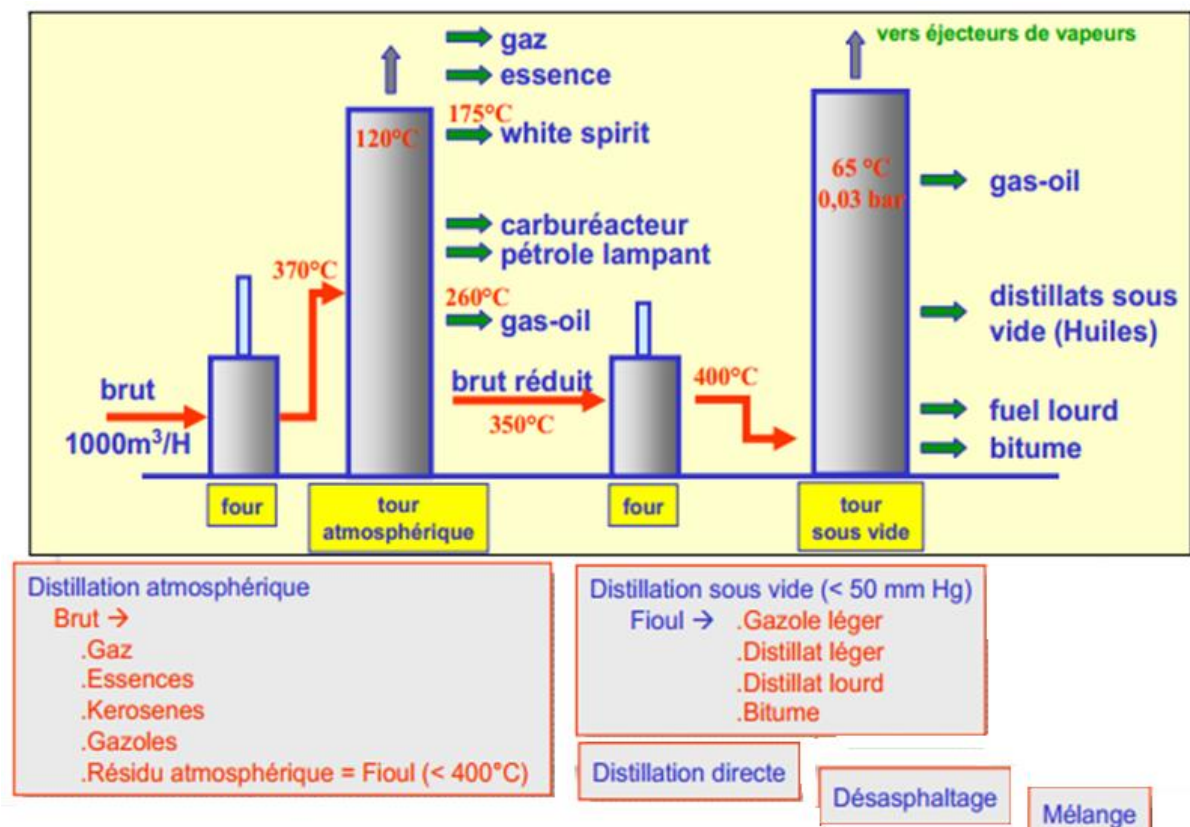


Figure I.11. Principe de fabrication des bitumes [6].

Il existe plusieurs techniques pour fabriquer le bitume, reposant principalement sur la distillation directe du pétrole (Figure I.11). Lorsque le choix d'un brut et celui d'une technique ont été décidés, le fabricant suit rigoureusement le processus et s'y maintient. Ces choix font l'objet pour chaque fabricant de procédures d'homologation très sévères, dans le souci de fournir des produits industriels d'une qualité constante et conformes aux spécifications

En Algérie, il existe trois procédés de fabrication des bitumes routiers :

✓ **La distillation sous vide ou directe :**

Consiste à créer un vide de 30 à 10 mm Hg obtenu à l'aide d'éjecteurs de vapeur. La température est de l'ordre de 340°C à 360°C et ne doit jamais dépasser 400°C à la sortie du four. Ce procédé existe aux 02 raffineries de Skikda et Arzew qui fabriquent tous les grades de bitumes.

✓ **Le semi-soufflage :**

Le résidu appelé « *base molle* » récupéré du procédé sous vide est traité dans la colonne de soufflage où l'air est injecté à des températures comprises entre 240-280°C et un débit de 1 000 Nm³/h pour obtenir un bitume routier. Ce procédé existe à la raffinerie de Arzew (Algérie) ;

✓ **Le désasphaltage au solvant :**

Il est employé comme complément dans le raffinage des bruts à huile, il est souvent effectué sur le fond de distillation sous-vide qui ne peut être employé comme bitume étant donné sa forte teneur en fractions lubrifiantes. Ce procédé existe à la raffinerie de Arzew, le brut à bitume ainsi que l'asphalte récupéré par désasphaltage au propane sont fractionnés en gazoles et sont traités ensuite dans la section de soufflage à l'air pour obtenir un bitume routier 40/50.

Les bitumes issus de la distillation directe présentent la plus faible susceptibilité au vieillissement en comparaison aux bitumes fabriqués selon les autres procédés et dont la susceptibilité est plus grande à cause de leur faible homogénéité colloïdale (voir annexe II). Il existe un quatrième procédé utilisé dans d'autres pays, qui est le procédé des bitumes reconstitués (mélange de résidus lourds avec des concentrâtes aromatiques résultant de l'extraction des lubrifiants).

3) Composition chimique et structure des bitumes

Chimiquement, les bitumes sont essentiellement composés de Carbone et d'Hydrogène. Génériquement, on distingue deux grandes familles de composés du bitume :

- ✓ Les asphaltènes.
- ✓ Les maltènes.

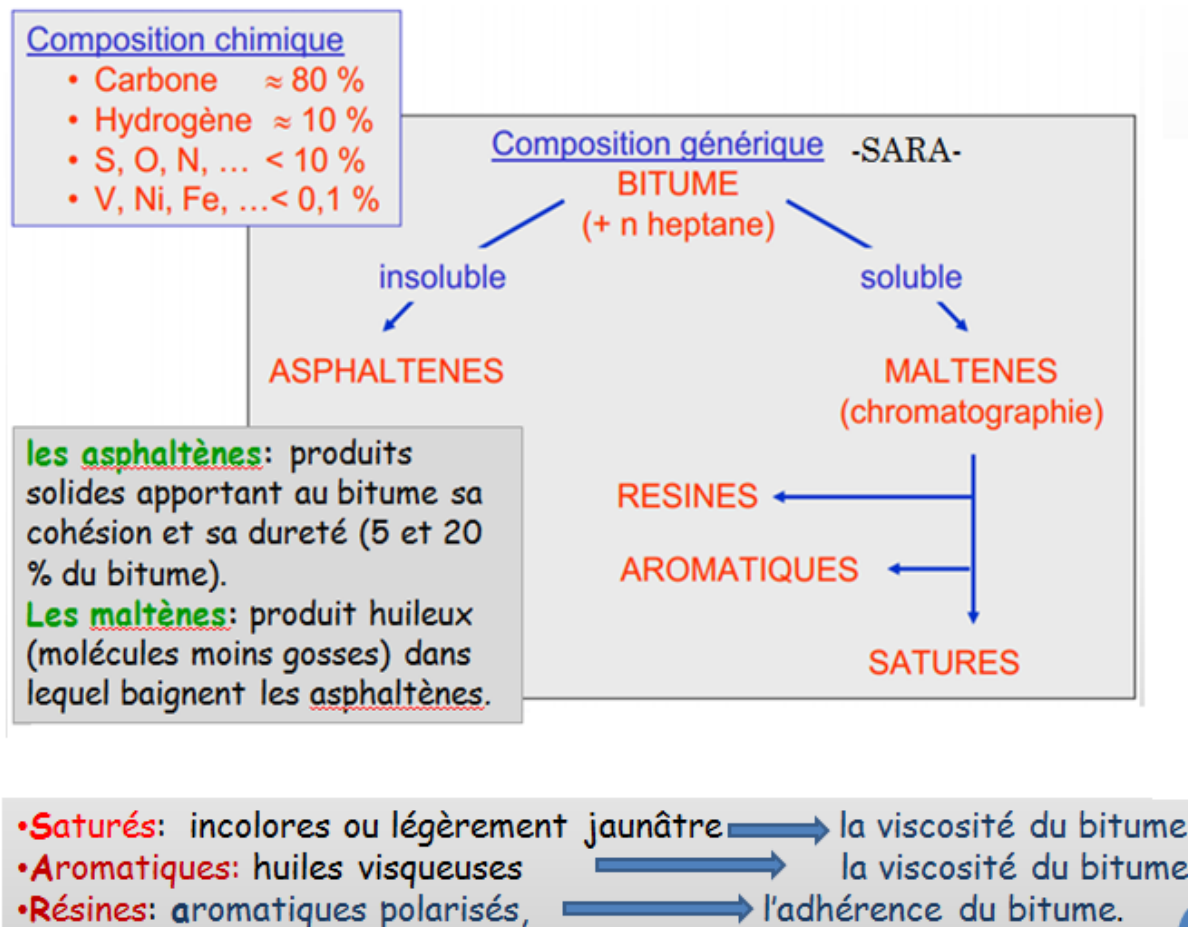


Figure I.12. Composition chimique et structure des bitumes.

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

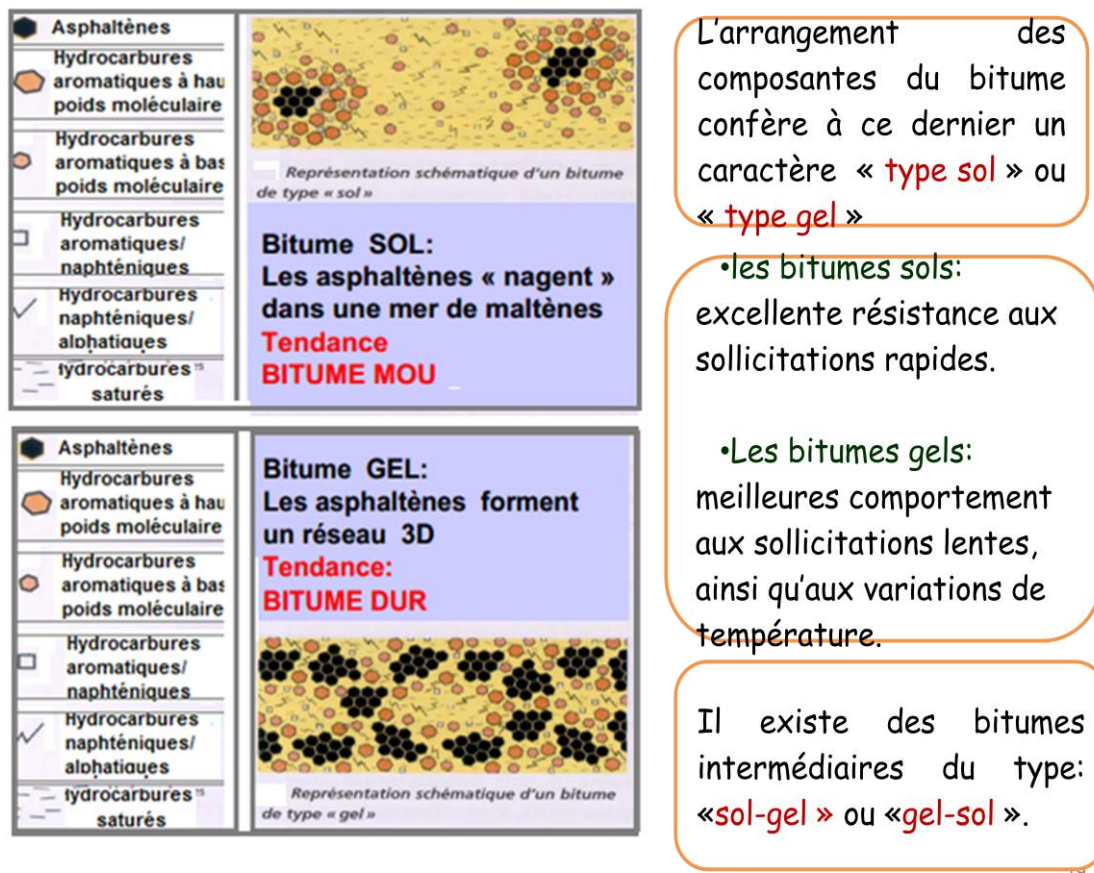


Figure I.13. Macrostructure des asphaltènes du bitume [10].

L'ensemble forme un système colloïdal constitué par une suspension de micelles d'asphaltènes peptisés par les résines dans un milieu huileux (Figure I.13). En effet, les résines s'absorbent sur les asphaltènes et permettent leur dispersion dans le mélange huileux (hydrocarbures aromatiques et saturés). On dit qu'il y a peptisation. Les aromatiques assurent le rôle de solvant, tandis que les saturés assurent le rôle de flocculant.

La dispersion des agglomérats d'asphaltènes est plus ou moins forte selon la composition de la phase maltène (huiles + résines) : la structure du bitume est, en effet, différente selon que les asphaltènes forment ou non un réseau flocculé, baignant

Dans un milieu dispersant faiblement structuré par les résines. Dans ce cas, on parle de structure "gel" (élastoplastique). Dans le cas d'une structure où les asphaltènes forment une suspension diluée et bien stabilisée dans un milieu dispersant fortement structuré par les résines, les asphaltènes ne peuvent interagir. On parle alors de structure "sol" (visqueuse). Une classe intermédiaire, appelée "sol-gel", correspond aux bitumes intermédiaires.

I.4.1.3. Importance économique [11]

L'emploi du bitume dans sa conception actuelle commença vers la fin du 19^e siècle, surtout dans les travaux d'étanchéité, d'isolation et de construction routière. Son usage à grande échelle commença au 20^e siècle avec la mise au point des méthodes d'extraction par distillation des huiles minérales brutes qui permettaient de produire des bitumes ayant les caractéristiques appropriées à chaque usage.

I.4.1.4. Propriétés [11]

Le bitume sous l'influence de la chaleur se ramollit, se liquéfie et entre les températures de 125 à 225°C il devient suffisamment fluide pour permettre sa mise en œuvre dans la construction routière, etc. Dès qu'il est à la température ambiante, il reprend des caractéristiques originales.

Le bitume est particulièrement résistant à l'action des acides, des sels et à l'oxygène de l'air. Dans l'eau, il est complètement insoluble. Tout ceci lui donne une grande résistance aux influences climatiques. Dans certains cas, il est nécessaire de faire baisser la température et de les utiliser à froid. Cette nécessité peut être satisfaite en ajoutant des solvants aux bitumes ou bien en les émulsionnant. Ces solvants ou l'eau des émulsions n'ont d'autre but que de rendre les bitumes utilisables à froid ou à faible température.

Après la mise en œuvre, le solvant ou l'eau s'évapore et il ne reste qu'une couche de bitume pur. Les émulsions servent traditionnellement à la réalisation des enduits superficiels. Le bitume est aussi souvent rendu fluide non par la chaleur ou l'eau, mais par un solvant hydrocarboné. Si ce solvant est le pétrole, on parle de cut back ou de bitume fluidifié.

I.4.1.5. Liants bitumineux [11]

Les bitumes servent aussi de matière première pour fabriquer des mélanges (préparations) permettant d'améliorer la manipulation et les caractéristiques d'application ou pour rehausser les propriétés physiques. Dans ces produits, le bitume est souvent le composant principal mais ils peuvent aussi contenir des proportions importantes d'autres matériaux. Ces produits, souvent appelés liants bitumineux ou produits bitumineux, rentrent dans la classification chimique des préparations bitumineuses.

Les trois plus courantes sont :

▪ Le bitume fluidifié

Les bitumes fluidifiés (cut-backs) sont des préparations bitumineuses où la viscosité du liant a été réduite par l'ajout d'un solvant volatil, normalement d'origine pétrolière. Les solvants généralement utilisés sont le white-spirit et le kérosène. D'ordinaire, les produits fluidifiés sont utilisés pour la vaporisation et pour certains mélanges.

▪ Le bitume fluxé

Les bitumes fluxés sont des préparations bitumineuses où la viscosité du liant a été réduite par l'ajout d'huiles relativement peu volatiles. Le diesel et les huiles d'origine végétale font partie des fluxants courants.

▪ Le bitume modifié

Les bitumes modifiés sont des liants bitumineux dont les propriétés de performances (l'élasticité, l'adhésivité ou la force de cohésion, etc.) ont été modifiées au moyen d'un ou plusieurs agents chimiques. Ces agents peuvent être, entre autres, des polymères, de la poudre de caoutchouc, du soufre et de l'acide polyphosphorique. Les bitumes modifiés sont très répandus dans la production du feutre bitumé pour toitures et dans les applications routières.

I.4.2. Les granulats routiers**I.4.2.1. Définitions et Présentation Générale [12]**

La norme française définit le granulat comme un ensemble de grains minéraux, de dimensions comprises entre 0 et 80 mm, destiné notamment à la confection des mortiers et des bétons ainsi qu'à celle des couches de roulement, de base et de fondation des chaussées et aux voies ferrées. Ils sont appelés fillers, sablons, sables, gravillons, graves ou ballasts suivant leurs dimensions.

Les granulats peuvent être d'origines diverses :

- Naturelles comme les alluvions ou les formations résiduelles,
- Provenir du concassage des roches massives comme (basalte, calcaire, grès, etc.);
- Artificiels ou provenant de sous-produits industriels.

I.4.2.2. Les fuseaux granulométriques :

Le fuseau granulométrique est la zone délimitée par deux courbes granulométriques enveloppes .

On distingue :

- Le fuseau de spécification propre à la technique considérée, qui définit la zone dans laquelle doivent se situer les fuseaux de tolérance,
- Le fuseau de fabrication, qui contient 95 % des courbes granulométriques du matériau fabriqué. Un fuseau de fabrication est entièrement inclus dans le fuseau de régularité. Sa définition requière au moins 15 valeurs afin d'être suffisamment représentatif et est établi par le producteur de granulats ;
- Le fuseau de régularité, ou de tolérance, qui définit l'étendue de la zone dans laquelle doivent se situer 95 % des courbes obtenues au cours du contrôle.

I.4.2.3. L'approche macroscopique

L'échelle de l'observation est celle d'un échantillon homogène dont les dimensions sont suffisamment supérieures au diamètre maximal des grains afin de pouvoir assimiler l'échantillon à un milieu continu. Grâce à cette approche, il est facile de simuler des sollicitations et de relever les réponses de l'échantillon. Cette approche est l'une des bases des méthodes de dimensionnement rationnel des chaussées. Parmi les essais utilisés, il y a l'essai CBR (Californian Bearing Ratio) et l'essai triaxial à chargements répétés (TCR)(voir annexe I).

I.4.2.4. Caractéristiques géométriques des granulats routiers

Les matériaux constituant les différentes couches d'une chaussée peuvent être des matériaux concassés ou roulés. Cependant, afin de disposer d'un angle de frottement le plus fort possible, il est nécessaire d'exiger un indice de concassage d'autant plus élevé que le trafic est plus important et la charge légale à l'essieu plus lourde.

Les caractéristiques géométriques principales des granulats routiers sont : l'état de surface, l'angularité, la forme et la granularité.

▪ L'état de surface

Dans le cas des roches polycristallines ($\varnothing > 1$ mm), la rugosité dépend de la structure de la roche. Si le grain est monominéral ($\varnothing < 1$ mm), la surface est généralement lisse.

Pour les roches polycristallines, la rugosité dépend de la dimension « d » des cristaux. Plus une roche a un « grain fin », plus sa cassure est lisse. Par contre, les roches à « gros grain » ont toujours des surfaces rugueuses.

L'état de surface des grains joue un rôle au niveau de la maniabilité des matériaux, de la stabilité des assises non traitées et de la microrugosité des couches de surface. Cependant, l'action du trafic tend à polir la surface des grains, mais il est admis qu'une bonne microrugosité assure généralement une bonne adhérence à faible vitesse.

▪ Angularité des granulats

Elle joue un rôle important pour les gravillons de la couche de roulement, en améliorant l'adhérence, et pour ceux des assises de chaussées, dont elle améliore la stabilité.

- Pour un granulat concassé de roche massive, elle est égale à 100 %.
- Pour un granulat d'origine alluvionnaire, elle est définie par deux données :
 - L'indice de concassage IC , proportion en poids d'éléments supérieurs à la dimension D du granulat élaboré,
 - Le rapport de concassage RC , rapport entre d du matériau soumis au concassage et D du granulat obtenu.

Pour les assises de chaussées non traitées, l'angularité favorise les propriétés mécaniques en augmentant l'angle de frottement interne : celui-ci augmente d'environ 12° dans un essai triaxial quand on passe des billes de verre entièrement roulées aux billes de verre concassées. Pour les couches de roulement, ce facteur favorise l'adhérence pneumatique, la rupture du film d'eau et le drainage.

La maniabilité et la compactibilité sont également liées à l'angularité : le déplacement relatif des grains et leur mise en place sont facilités lorsqu'ils sont arrondis.

I.5. CONCLUSION

Les constituants de l'enrobé bitumineux sont les granulats et le bitume. Ce dernier sert de liant entre les granulats. Pour la fabrication des enrobés, la pierre concassée est utilisée pour l'angularité de sa surface. Cette angularité augmente la stabilité du squelette granulaire et la résistance à l'orniérage. La température et les charges de circulation influent presque toutes les propriétés du bitume et, par conséquent, le comportement des enrobés bitumineux.

La température influence sa rigidité, son comportement en fatigue et son comportement à l'orniérage, et également l'oxydation du bitume qui dépend aussi du temps d'exposition et de l'épaisseur du film de bitume effectif. *« Connaitre les caractéristiques des composants d'un matériau nous éclaire le chemin vers une meilleure connaissance de son comportement »*

Chaque type d'enrobés est défini selon la nature et le dosage de ses constituants, par ses performances particulières et par la couche de la chaussée à laquelle il est destiné.

CHAPITRE II

Essais d'Identification des Matériaux

CHAPITRE II.

ESSAIS D'IDENTIFICATION DES MATERIAUX

II.1. INTRODUCTION

La fabrication d'un enrobé bitumineux passe par une identification de ses constituants (granulats, bitume, additifs s'il y'a lieu) et par des essais de performance sur l'enrobé.

Un essai de laboratoire sur un matériau permet de mesurer un ou plusieurs paramètres caractéristiques de son comportement dans des conditions très précises .Cela paraît évident et pourtant, en matière de granulats, le paramètre étudié dans certains essais n'a pas toujours été clairement défini, ou du moins les techniques routières évoluant, on a peu à peu oublié la portée réelle de l'essai.

Dans le cas des granulats, l'identification portera sur des essais destinés à mesurer certains paramètres géométriques tels que la granularité, la forme, l'angularité, l'attrition, la résistance et la propreté.

Pour le bitume, il s'agit de vérifier la classe du bitume par des essais de pénétrabilité et de ramollissement.

Pour le produit final, ce sont les essais relatifs à la formulation par la méthode Marshall (Stabilité et fluage Marshall, et Duriez pour la tenue à l'eau). Ces essais sont passés en revue dans le chapitre formulation.

II.2. ESSAIS SUR GRANULATS

II.2.1. Caractéristiques de fabrication

Elles résultent en général des conditions de fabrication. Entrent dans ce type de caractéristiques : granularité, aplatissement, propreté des sables, propreté superficielle des gravillons, teneur en chlore, absorption, etc.

1) Essai analyses granulométriques (NF P 18-560)

But : L'analyse granulométrique consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulats dont les dimensions sont comprises entre **0,063** et **125 mm**.

On appelle :

- **Refus** sur un tamis : la quantité de matériau qui est retenue sur le tamis.
- **Tamisat** (ou **passant**) : la quantité de matériau qui passe à travers le tamis.

Principe :

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes.

Les masses des différents refus et tamisats sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme graphique.

Matériel utilisé :

Les dimensions de mailles et le nombre de tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue.

La norme actuelle (EN 933-2) préconise, pour l'analyse granulométrique, la série de tamis suivante en (mm): 0.063, 0.125, 0.25, 0.50, 1, 2, 4, 8, 16, 31.5, 63, 125.



Figure II.1. Les tamis et la machine de tamisage [13].

Résultats :

- Peser le refus du tamis ayant la plus grande maille : soit R_1 la masse de ce refus.
- Poursuivre la même opération avec tous les tamis de la colonne pour obtenir les masses des différents refus cumulés ...
- Les masses des différents refus cumulés R_i sont rapportées à la masse totale de l'échantillon m_1 .
- Les pourcentages de refus cumulés ainsi obtenus, sont inscrits sur la feuille d'essai. Le pourcentage des tamisats cumulés sera déduit.

Tracé de la courbe granulométrique :

Il suffit de porter les divers pourcentages des tamisats cumulés sur une feuille semi-logarithmique :

- en abscisse : les dimensions des mailles, échelle logarithmique
- en ordonnée : les pourcentages sur une échelle arithmétique.
- La courbe doit être tracée de manière continue.

Interprétation des courbes :

La forme de la courbe granulométrique obtenue apporte les renseignements suivants :

- Les dimensions **d** et **D** du granulat,
- La plus ou moins grande proportion d'éléments fins,
- La continuité ou la discontinuité de la granularité.

2) Essai propreté Superficielle (NF P18-591)**Principe :**

La propreté superficielle (P) est définie comme étant le pourcentage pondéral de particules de dimensions inférieures à 0,5 mm adhérentes à la surface ou mélangées à un granulat de dimension supérieure à 2 mm.

Les éléments fins contenus dans le granulat à tester sont séparés par lavage sur un tamis d'ouverture 0,5 mm. Leur pourcentage est déterminé par pesée après séchage du refus.

Matériels utilisés:

- un tamis de mailles de 0,5 mm.
- une étuve réglée à une température de 105°C ±5°C.
- une balance de portée 5 kg, précision 0,1g.

Procédure de l'essai:

- échantillonner le granulat en 2 fractions égales de masses M_1 et M_2 comprises entre 200 D et 600 D (D la dimension maximale des grains en mm, M en g) ;
- déterminer la teneur en eau w sur la fraction M_1 de l'échantillon ;

$$\text{Rappel: teneur en eau : } w = \frac{\text{Masse d'eau}}{\text{Masse sèche}} \text{ en \%} \quad \text{Equation II.1}$$

- en déduire la masse sèche contenue dans la fraction M_2

$$\text{Masse sèche : } M_{2s} = \frac{\text{Masse humide}}{(1+w)} = \frac{M_2}{(1+w)} \text{ en g} \quad \text{Equation II.2}$$

- procéder au lavage de la fraction M_2 sur le tamis de 0,5 mm jusqu'à ce que l'eau qui s'écoule au travers du tamis soit claire ;
- sécher la fraction lavée jusqu'à masse constante et déterminer M_3 .

Résultats :

Masse sèche des éléments inférieurs à 0,5 mm : $M_4 = M_{2s} - M_3$ **Equation II.3**

Propreté superficielle : $P = \frac{M_4}{M_{2s}}$ en % **Equation II.4**

3) Essai coefficient d'aplatissement (NF P-18-561)**But :**

La réalisation des corps de chaussées et des couches de roulement, nécessitent de n'utiliser que des granulats ayant une forme assez ramassée, à l'exclusion des granulats plats. En effet, en technique routière, ils ne peuvent être utilisés car ils conduisent à des couches de roulement trop glissantes. La détermination du coefficient d'aplatissement est l'un des tests permettant de caractériser la forme plus ou moins massive des granulats.

Principe : l'essai consiste en une double opération de tamisage :

Le tamisage classique sur une colonne de tamis normalisés à mailles carrées afin de séparer les granulats en une succession de classes granulaires d/D dont les dimensions sont telles que $D = 1,25d$.

De ce fait, les classes de grosseurs G ainsi définies sont telles qu'elles suivent la progression géométrique des ouvertures des tamis utilisés au cours de l'analyse granulométrique.

Les différentes classes granulaires d/D ainsi isolées sont tamisées une à une sur une grille à fentes parallèles d'écartement $e=d/1,58$ (ce qui correspond aussi à : $E=d/2$).

On peut donc associer à chaque classe granulaire d/D un tamis fente correspondant de largeur E , ce qui permet de définir des coefficients d'aplatissement A_i partiels. Il est ensuite possible de déterminer un coefficient d'aplatissement global A .

Matériel nécessaire :

Le coefficient d'aplatissement s'obtient en faisant une double analyse granulométrique, en utilisant successivement, et pour le même échantillon de granulat.

- une série de tamis normalisés à mailles (essai analyse granulométrique).
- une série de tamis à fentes de largeurs normalisées.



Figure II.2. Tamis à fentes [14].

Procédure de l'essai : l'essai consiste en un double tamisage :

- peser et éliminer tous les grains de la fraction inférieure à 4 mm et supérieure à 80 mm;
- peser et retenir séparément tous les grains de fraction d_i/D_i comprise entre 4 mm et 80 mm ;
- tamiser chaque classe granulaires d_i/D_i à l'aide d'une grille à fentes parallèles d'écartement $E = D_i/24$.
- peser les passants à travers chaque fente.

Expression du coefficient d'aplatissement : Pour une classe granulaire d_i/D_i donnée, on peut définir un coefficient d'aplatissement partiel comme suit :

$$CA_i = 100m_i/M_i \quad \text{Equation II.5}$$

Avec :

$M_i = \sum R_i$ = somme des masses des classes granulaires d_i/D_i

m_i = masse passant à travers le tamis à fente d'écartement $E = D_i/2$

Le coefficient d'aplatissement global CA s'exprime en intégrant les valeurs partielles déterminées sur chaque classe granulaire :

$$CA = 100 \times \sum m_i / \sum M_i \quad \text{Equation II.6}$$

Vérifiant la relation $G/E > 1,58$

4) Essai équivalent de sable (NF P18-598)

But : l'essai d'équivalent de sable a 10 % de fines, permettant de mesurer la propreté d'un sable, est effectuée sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 2 mm et dont la proportion des éléments passant au tamis à mailles carrées de 0,08 mm a été ramenée à 10 % à l'aide d'un sable correcteur (si cette teneur en fines est supérieure à 11 %).

Il rend compte globalement de la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent. Cet essai permet de déduire la nature et la qualité d'un sable donné dont le but est de choisir des granulats pour les enrobés hydrocarbonés (par exemple).

Matériel utilisé :

- solution lavante,
- spatule et cuillère,
- cylindre,
- entonnoir, réglet de 500 mm, gradué en millimètres,
- chronomètre donnant la seconde.

Procédure de l'essai : la procédure d'essai est la suivante :

- la solution lavante ayant été siphonnée dans l'éprouvette cylindrique, jusqu'au trait repère, on verse soigneusement à l'aide de l'entonnoir dans l'éprouvette posée verticalement ;
- Frapper fortement à plusieurs reprises la base de l'éprouvette sur la paume de la main pour déloger les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon ;
- laisser reposer dix minutes ; à la fin de cette période de dix minutes, boucher l'éprouvette à l'aide du bouchon de caoutchouc, puis fixer l'éprouvette sur la machine d'agitation ; faire subir à l'éprouvette 90 cycles \pm 1 cycle en 30 s \pm 1 s ; remettre l'éprouvette en position verticale sur la table d'essais ; ôter le bouchon de caoutchouc et le rincer avec la solution lavante ;
- laisser reposer pendant 20 min \pm 10 s ; au bout de ces 20 min,
- mesurer la hauteur h_1 du sable sédimenté au fond de l'éprouvette ; mesurer également la hauteur totale h_2 (sable sédimenté + flocculat).

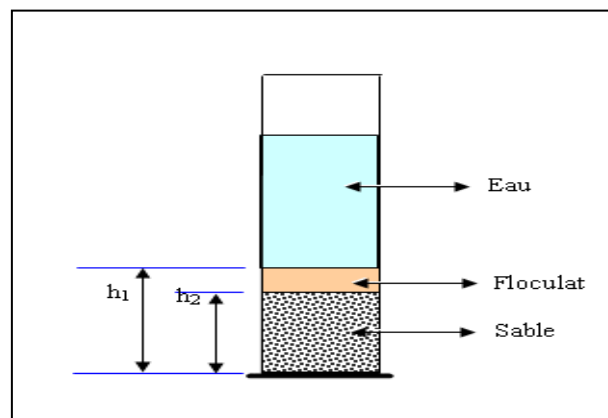


Figure II.3. Définition de l'équivalent de *sable* [15].

L'équivalent de sable est donné par la formule :

$$ES = \frac{h_1}{h_2} \times 100$$

Equation II.7

5) Essai au bleu de méthylène (EN 933-9)

Principe : des doses d'une solution de bleu de méthylène sont ajoutées successivement à une suspension de la prise d'essai dans l'eau. L'adsorption de la solution colorée par la prise d'essai est vérifiée après chaque addition de solution en effectuant un test à la tache sur du papier filtre pour déceler la présence de colorant libre. Lorsque la présence de colorant libre est confirmée, la valeur de bleu de méthylène (MB ou VB) est calculée et exprimée en grammes de colorant adsorbé par kg de la fraction granulaire testée.

Matériel utilisé

- Burette, d'une capacité de 100 ml ou de 50 ml et graduée en 1/10 ml ou 1/5 ml.
- Papier-filtre, quantitatif et sans cendres (< 0,010 %).
- Tige de verre, longueur : 300 mm ; diamètre : 8 mm.
- Agitateur à ailettes, capable de vitesses de rotation contrôlées.
- Balance, précise à 0,1 % de la masse de la prise d'essai.
- Chronomètre, gradué en secondes.
- Bécher, en verre ou en plastique, d'une capacité d'environ 1 l à 2 l.
- Fiole en verre d'une capacité de 1 l.
- Étuve ventilée, thermostatée pour maintenir une température de $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$.
- Thermomètre gradué en degré Celsius.
- Spatule.
- Dessiccateur.



Figure II.4. Matériel nécessaire pour l'essai bleu méthylène.

Mode opératoire

- Verser (500 ± 5) ml d'eau distillée ou d'eau déminéralisée dans le bécher et ajouter la prise d'essai séchée en remuant bien avec la spatule ;
- Agiter la solution de colorant. Remplir la burette de solution colorée et placer la solution restante dans un endroit sombre.
- Régler l'agitateur sur la vitesse de 600 tr/min et positionner les ailettes à environ 10 mm du fond du bécher.
- Mettre en marche l'agitateur et déclencher le chronomètre, agiter le contenu du bécher pendant 5 min à (600 ± 60) tr/min, puis agiter continuellement à (400 ± 40) tr/min pendant la poursuite de l'essai.

Après chaque injection de colorant, le test à la tache consiste à prélever à l'aide de la tige de verre une goutte de la suspension et de la déposer sur le papier filtre. La tache qui se forme est composée d'un dépôt central de matériau, en général d'une couleur bleue foncée, entouré d'une zone humide incolore.

La quantité de suspension prélevée par la goutte doit permettre d'obtenir un dépôt dont le diamètre est compris entre 8 mm et 12 mm.

Le test est considéré comme positif si, dans la zone humide, une auréole bleue claire persistante d'environ 1 mm apparaît autour du dépôt central.

Résultats

La valeur de bleu de méthylène, MB, exprimée en grammes de colorant par kilogramme de fraction 0/2 mm est obtenue à l'aide de l'équation suivante :

$$MB = \frac{V1}{M1} \times 10$$

Avec :

M1 : est la masse de la prise d'essai, en grammes ;

V1 : est le volume total de solution de colorant injectée, en millilitres.

II.2.1.2. Caractéristiques intrinsèques

Elles sont liées en général à la qualité de la roche exploitée. Entrent dans ce type de caractéristiques : masse volumique réelle, Los Angeles, micro-Deval, résistance au polissage, friabilité des sables, etc....

1) Essai masse volumique (NF P 18-554) (NF P 18-555)**➤ Essai masse volumique apparente (NF P 18-554)****Principe :**

La masse volumique apparente sèche ρ_d est la masse de granulats secs (M_s) occupant un volume apparent (= volume de solides : V_s + volume de vides : V_v).

La masse volumique apparente prend en compte le volume des vides.

La détermination de la masse volumique se fait donc simplement en mesurant, la masse et le volume correspondant des matériaux.

Matériels utilisé :

- un récipient cubique ou cylindrique de volume connu et dont la taille est adaptée aux granulats:
 - granulats de dimension maximale $D = 20$ mm : récipient de capacité 1 L
 - granulats de dimension maximale $D > 20$ mm : récipient de capacité > 1 L
- une règle à araser métallique.
- une main écope pour le remplissage.
- une balance de portée 5 kg, précision 1 g.
- des bacs en plastique pour effectuer les essais.

Mode opératoire :

- déterminer le volume du récipient = V ;
- noter la masse du récipient propre et vide = M_0 ;
- placer le récipient dans le bac en plastique ;
- verser les granulats secs, par couches successives et sans tassement : utiliser les mains comme entonnoir naturel ;
- araser à l'aide de la règle métallique, à laquelle on imprime un mouvement horizontal de va et vient, le récipient étant attaqué le long d'une diagonale horizontale ;
- noter la masse du récipient rempli = M_1 ;
- vider le granulat dans un bac en plastique et jeter son contenu dans la benne extérieure ;
- renouveler l'opération 2 fois.

La masse volumique apparente sèche ρ_d est donnée par:

$$\rho_d = \frac{\text{Masse des granulats secs}}{\text{Volume du récipient}} = \frac{M_1 - M_0}{V} \quad \text{Equation II.8}$$

➤ Essai masse volumique absolue (NF P 18-555)**Principe :**

La masse spécifique s ou masse volumique absolue est la masse de granulats secs (M_s) rapportée au volume absolu (= uniquement volume de solides) (V_s). La mesure du volume des solides ne tient pas compte des pores fermés contenus par les granulats.

Matériels utilisé :

- des éprouvettes graduées en plastique.
- un pycnomètre.
- une pissette.
- une tige agitateur.
- un entonnoir pour le remplissage.

A - Utilisation d'une éprouvette :

- placer l'éprouvette dans le bac en plastique ;
- verser de l'eau dans l'éprouvette (demi hauteur) et noter V_1 ;
- préparer un échantillon de granulats secs de masse M_1 (environ 300 g) ;
- verser l'échantillon dans l'éprouvette à l'aide de l'entonnoir et provoquer le départ des vides (= air) en remuant le mélange avec la tige agitateur ;
- noter le nouveau volume d'eau dans l'éprouvette V_2 ;
- vider le granulat dans un bac en plastique et jeter son contenu dans la benne extérieure ;
- renouveler l'opération 2 fois.

B - Utilisation d'un pycnomètre :

- verser de l'eau dans le pycnomètre jusqu'au trait repère et déterminer M_1 (pycnomètre essuyé) ;
- vider une partie du pycnomètre et déterminer m_2 ;
- préparer un échantillon de granulats secs (50 g environ) ;
- verser l'échantillon dans le pycnomètre à l'aide de la main écope et provoquer le départ des vides (= air) en remuant le mélange avec la tige agitateur. Noter la nouvelle masse m_2 ;
- compléter le niveau d'eau dans le pycnomètre jusqu'au trait repère. Noter la nouvelle masse M_3 ;
- vider le granulat dans un bac en plastique et jeter son contenu dans la benne extérieure ;
- renouveler l'opération 2 fois.

Résultats :

A - Utilisation d'une éprouvette : La masse spécifique ρ_s ou masse volumique absolue sèche est donnée par :

$$\rho_s = \frac{M_1}{V_2 - V_1} \quad \text{Equation II.9}$$

B - Utilisation d'un pycnomètre :

On pose:

$M_2 = m_2 - m_3 =$ masse de granulats secs introduits dans le pycnomètre

$M = M_1 + M_2 - M_3 =$ masse de l'eau "supprimée" par l'introduction du granulat

La masse volumique de l'eau étant sensiblement égale à 1g/cm^3 à température ambiante, on a :

$$V \approx M$$

$$\rho_s = \frac{M_2}{V} \quad \text{Equation II.10}$$

2) Essai Los Angeles (NF P 18-573)**But :**

L'essai permet de mesurer les résistances combinées à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat.

Il s'applique aux granulats utilisés pour la constitution des assises de chaussée, y compris les couches de roulement.

Le matériau évolue pendant l'essai, d'une part par suite du choc des boulets sur le granulat (rupture fragile des éléments), d'autre part par frottement des éléments les uns sur les autres, sur le cylindre de la machine et sur les boulets.

Principe :

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés et aux frottements réciproques dans la machine Los Angeles.

La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi six granularités-types, de la classe granulaire 4/6,3 mm – 6,3/10 mm – 10/14 mm – 10/25 mm – 16/31,5 mm et 25/50 mm, se rapprochant au mieux de la granularité du matériau tel qu'il sera mis en œuvre.

Le poids de la charge de boulets varie en fonction du type de granularité.

Selon le type de granularité, la masse de la charge de boulets varie si M est la masse du matériau soumis à l'essai, M_1 est la masse des éléments supérieurs à 1,6 mm produits au cours de l'essai qui est égouttée et séchée à l'étuve jusqu'à poids constant. On définit alors le **coefficient Los Angeles LA** qui est un pourcentage en masse du rapport des éléments passant aux tamis de 1,6 et la masse initiale sèche.

Matériels utilisé : La machine Los Angeles, elle comporte :

- un cylindre creux en acier de 12 mm d'épaisseur, fermé à ses deux extrémités ayant un diamètre intérieur de 711 mm et une longueur intérieure de 508 mm. le cylindre est porté par deux axes horizontaux fixés à ses deux parois latérales, mais ils n'entrent pas à l'intérieur du cylindre. sur toute la longueur du cylindre, on trouve une ouverture de 150 mm de largeur qui permet d'introduire l'échantillon. au cours de l'essai, cette ouverture est bouchée hermétiquement aux poussières par un couvercle immobile tel que la surface intérieure reste cylindrique.
- une tablette en saillie placée à 40 cm du rebord du couvercle. elle est démontable, en acier dur et de section rectangulaire. elle repose suivant un plan diamétral, le long d'une génératrice et est fixée par des boulons sur les parois latérales ;
- un moteur assurant au tambour de la machine une vitesse de rotation comprise entre 30 et 33 tours par minute.
- un bac destiné à ramasser les matériaux après l'essai.
- un compte-tours de type rotatif, arrêtant au nombre de tours voulu.
- une charge qui est constituée par des boulets sphériques de 47 mm de diamètre et pesant 420 et 445 g. ces boulets ne doivent pas s'user de façon asymétrique.



Figure II.5. Machine de Los Angeles [16].

Procédure de l'essai : l'essai est mis en route en exécutant à la machine 500 rotations à une vitesse comprise entre 30 et 35 tr/min pour toutes les classes sauf la classe 25-50 mm où le nombre de rotation est de 1000 ; après l'essai on emporte les granulats et on les ramasse dans le bac placé sous l'appareil pour éviter les pertes des granulats, il faut apporter l'ouverture au-dessus de ce bac ;

On blute le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1,6 mm puis on lave le refus à 1,6 mm dans un autre bac et on le verse dans le bac troué. Dès que le refus est séché à l'étuve alors on détermine les poids de la pesée **M1**, et on calcule alors le coefficient Los Angeles :

$$LA = 100 \times (M - M1) / M$$

Equation II.11

3) Essai Micro Deval humide M.D.E (NF P 18-572)

But :

Cet essai permet de mesurer la résistance à l'usure d'un échantillon de granulats. En règle générale, l'échantillon est soumis à l'essai en présence d'eau, mais il peut aussi être effectué à sec.

Principe :

Il mesure la résistance à l'usure par frottement des matériaux.

La prise d'essai, constituée par 500 g d'une classe granulaire (4/6 - 6/10 ou 10/14 mm), est placée, avec une charge constituée de billes d'acier de 10 mm de diamètre, dans un cylindre métallique.

La rotation du cylindre autour de son axe placé horizontalement entraîne une usure par frottement granulats-billes et la formation d'une proportion de fines d'autant plus grande que le matériau est plus tendre. Le pourcentage de ces éléments fins produits au cours de l'essai constitue le coefficient micro-Deval.

Matériel utilisé :

- Balance, contrôle de pesée mensuel.
- Jeu de tamis, contrôle annuel.
- Enceinte thermique, contrôle thermique mensuel.
- Moyens nécessaire au lavage de l'échantillon tamisé.
- Equipement nécessaire à la réduction de l'échantillon.
- Eprouvette graduée pour la mesure du volume d'eau.

- L'appareil Micro-Deval (quatre cylindres creux en acier inox, couvercles des cylindres avec leurs joints, des billes sphériques pour la charge, moteur pour la rotation des cylindres et un compteur).



Figure II.6. Appareillage de l'essai Micro-Deval [17].

▪ **Procédure de l'essai :**

- L'échantillon doit être réduit afin que le granulat soit passant au tamis 14mm et retenu sur celui de 10 mm tout en respectant une certaine proportion de passant au tamis 12.5 mm (60 % à 70 %).
- Chaque fraction est lavée séparément et ensuite séchée pour la pesée.
- L'échantillon est ensuite placé dans le tambour de la machine ainsi que les onze boulets d'acier et on met ensuite en route la rotation de la machine.
- Enfin on termine par le lavage, tamisage à 1,6 mm et séchage du granulat récupéré.
-

II.2.2. ESSAIS SUR BITUME

On prépare de grandes quantités de bitumes dont les propriétés mécaniques variées doivent répondre aux spécifications routières et industrielles.

Pour caractériser ces qualités et pour vérifier si un bitume donné répond aux spécifications d'une certaine qualité, différentes méthodes d'essais ont été mises au point. Au début, elles ne visaient qu'à mesurer une propriété mécanique arbitraire permettant de sélectionner les bitumes :

- La pénétration, dans le domaine quasi-solide ;
- La température de ramollissement Bille et Anneau, au début du domaine fluide.

1) L'essai de Pénétrabilité à 25°C (NF EN 1426)**Principe :**

On mesure la pénétration d'une aiguille de référence dans l'échantillon d'essai conditionné. Les conditions opératoires qui s'appliquent aux pénétrations inférieures ou égales à $500 \times 0,1$ mm, sont : température 25 °C, charge appliquée 100 g, durée d'application de la charge 5 s. Plus la valeur de pénétration est grande et plus le bitume est mou ; c'est une mesure de dureté, elle sert de base à la classification des bitumes.

Matériel utilisé :

- aiguille de pénétration.
- récipient d'échantillon d'essai.
- bain-marie.
- dispositif de chronométrage, précis à $\pm 0,1$ s.
- thermomètres, à tige solide.

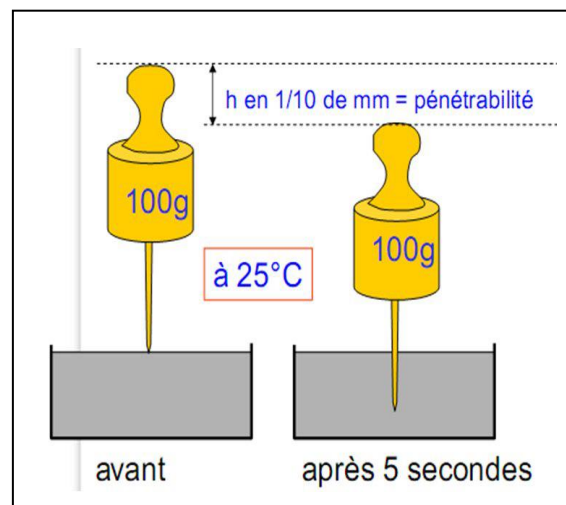


Figure II.7. Essai de pénétrabilité.

Procédure de l'essai :

- Dans le cas d'un produit bitumeux, l'échantillon à tester porté à une température de 25 °C;
- Les échantillons sont ensuite placés dans un bain-marie à température constante (25 °C) ;
- L'aiguille est abaissée lentement jusqu'à ce que sa pointe coïncide avec son image réfléchie par la surface de l'échantillon, puis le porte-aiguille est libéré pendant le laps de temps prescrit et descend par gravité. L'aiguille s'enfonce alors dans l'échantillon de bitume. On mesure la profondeur d'enfoncement à l'issue du temps prescrit (voir figure II.7).

Résultats :

Les profondeurs de pénétration sont exprimées en dixièmes de millimètre.

L'essai de pénétrabilité à l'aiguille permet, par le calcul d'un indice de pénétrabilité, d'accéder à la susceptibilité thermique d'un bitume. Notons que l'indice de pénétrabilité (IP) peut se calculer par la mesure de pénétrabilités à deux températures différentes, et l'application de la formule :

$$(\log P_1 - \log P_2) / (T_1 - T_2) = 1/50 * (20 - IP) / (10 + IP) \quad \text{Equation II.12}$$

L'IP nécessite la détermination de la pénétrabilité à plusieurs températures.

Le résultat permet de déterminer dans quelle classe se situe l'échantillon de bitume testé.

Neufs classes sont déterminées en Europe pour les bitumes routiers à la température 25 °C : 20-30, 30-45, 35-50, 40-60, 50-70, 70-100, 100-150, 160-220 et 250-330.

2) Point de ramollissement (NF EN 1427)

La consistance des bitumes décroît progressivement lorsque leur température augmente. Ils se transforment graduellement et de façon à peine perceptible, de matériaux excessivement épais et d'une fluidité lente à des matériaux mous et d'une fluidité moins visqueuse.

La température de ramollissement, donnée par la méthode « bille et anneau » est la température à laquelle une bille d'acier placée sur un petit disque de bitume.

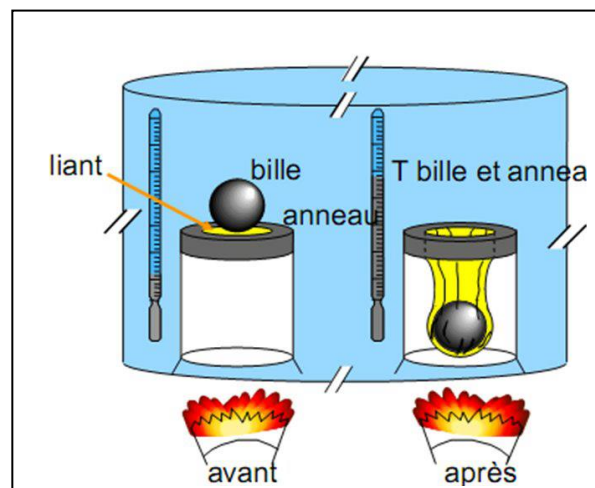


Figure II.8. Essai bille et anneau.

3) La densité relative à 25°C (NF EN ISO 2592)

Méthode au pycnomètre

On pèse un pycnomètre de 24 à 30 ml rempli d'eau distillée à 25°C et maintenu dans un bain d'eau à cette température. On remplit ensuite le pycnomètre de bitume à 25°C et on calcule le rapport de sa masse à celle de l'eau.

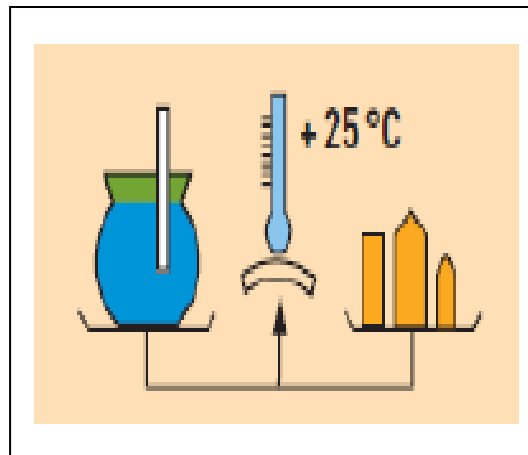


Figure II.9. Essai densité relative.

II.3. CONCLUSION

On pourrait s'efforcer de définir des essais qui simuleraient des conditions d'évolution plus ou moins bien connues et certainement complexes comme celles existant dans une couche de chaussée. Une telle démarche ne peut que conduire à des essais difficiles à définir, et à se heurter aussi à la difficulté d'accélérer suffisamment l'évolution afin d'obtenir des résultats dans un temps raisonnable.

Les résultats des essais décrits ci-dessus restent déterminants dans le choix des matériaux en comparaison avec les valeurs fixées par spécifications et normes.

CHAPITRE III

Formulation des Enrobés Bitumineux

CHAPITRE III.**FORMULATION DES ENROBES BITUMINEUX****III.1. INTRODUCTION**

La formulation des enrobé bitumineux a toujours été une étape importante dans la confection des mélanges bitumineux, et plus particulièrement pour veiller aux performances, la durée de vie d'une chaussée et réduire le risque pour l'utilisateur.

L'objectif principal de la formulation pour un mélange est de déterminer une composition optimale de granulats, de liant et de vides qui permettent d'atteindre les performances visées. Cinq principales méthodes sont utilisées actuellement pour déterminer les proportions des constituants des enrobés bitumineux : la méthode HVEEM, la méthode Marshall, la méthode Superpave, la méthode Française et la méthode du Ministère des Transports du Québec. Dans cette synthèse bibliographique, nous ferons une présentation succincte la méthode Marshall et la méthode française dite LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussée). La première, à caractère empirique, est basée sur les performances des matériaux entrant dans la composition des mélanges ; elle est toujours en vigueur en Algérie et en Amérique du Nord ; la deuxième est caractérisée par une approche fondée le plus possible sur les performances du mélange avec des essais plus proches de la réalité du chantier ; elle est en vigueur dans plusieurs pays d'Europe.

III.2. ETUDE DE FORMULATION D'UN ENROBE BITUMINEUX

L'étude de la formulation des enrobés bitumineux consiste à chercher la teneur optimale en liant pour assurer un certain seuil de stabilité, de compacité, de résistance à l'eau (désenrobage) et au fluage. Les démarches d'une formulation, après avoir fixé la classe de l'enrobé à concevoir, passent par trois étapes :

Etape 1 : Identification des constituants (les granulats et le bitume), et détermination des proportions des composants du mélange de base.

Etape 2 : Détermination des teneurs en liants de différents mélanges hydrocarbonés.

Etape 3 : Détermination de la teneur en liant optimale par des essais de performances mécaniques.

III.2.1. Le mélange granulaire [4]

Le mélange granulaire est obtenu par l'addition de plusieurs fractions granulaires à des proportions convenables en fonction de l'objectif recherché, ces différentes fractions constituent la courbe granulométrique du mélange. Cette dernière doit s'insérer dans un fuseau de spécification donné.

III.2.2. Teneur en liant [18]

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

Pour déterminer cette teneur en liant optimale, on introduit la notion de surface spécifique des granulats, notée Σ et exprimée en m^2/kg , c'est-à-dire la surface développée qu'auraient les granulats assimilés à des sphères. Pour un mélange granulométrique donné, la formule suivante permet d'avoir une approximation de la surface spécifique Σ :

Avec

$$100 \Sigma = 0.17 G + 0.33 g + 2.3 S + 12 s + 135 f \quad \text{Equation III.1}$$

G : pourcentage de gros gravillons ($\emptyset > 11$)
 g : pourcentage de petits gravillons ($\emptyset 6/11$)
 S : pourcentage de gros sable ($\emptyset 0,3/6$)
 s : pourcentage de sable fin ($\emptyset 0,08/0,3$)
 f : pourcentage de filler ($\emptyset < 0,08$)

La teneur en liant optimale, fonction de la surface spécifique des granulats, est donnée par la formule expérimentale suivante :

$$P = \alpha \cdot k \cdot \sqrt[5]{\Sigma} \quad \text{Equation III.2}$$

Avec :

p : teneur en liant (%)
 α : facteur dépendant du type de granulats (2,65/masse volumique des granulats)
 Σ : surface spécifique des granulats (m^2/kg)
 k : module de richesse (k variant de 2,75 pour les enrobés donnant le maximum de résistance à la déformation, à 3,5 pour les enrobés les plus souples)

Plus globalement, la teneur en liant à retenir peut être définie à partir d'une étude en laboratoire tenant compte du trafic, de l'épaisseur de la couche d'enrobé, des compacités in situ exigées et de l'usage envisagé de la chaussée. En particulier, dans le cas d'un trafic Poids Lourds important –supérieur à 200 PL/j- la teneur en bitume doit diminuer.

III.3. METHODES DE FORMULATION

III.3.1. METHODE MARSHALL [11]

III.3.1.1. Principe de la méthode

La méthode Marshall, élaborée à la fin des années 30. Depuis son apparition jusqu'à aujourd'hui, ces critères de design ont constamment évolué et ont su s'adapter à l'augmentation des charges de circulation et des pressions pneumatiques d'aujourd'hui. Actuellement, cette méthode demeure toujours très répandue en Amérique du Nord.

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.

Les exigences de base essentiellement recherchées sont : la stabilité, la déformation (fluage) et le volume des vides. Les étapes sont données dans l'organigramme de la figure III.1.

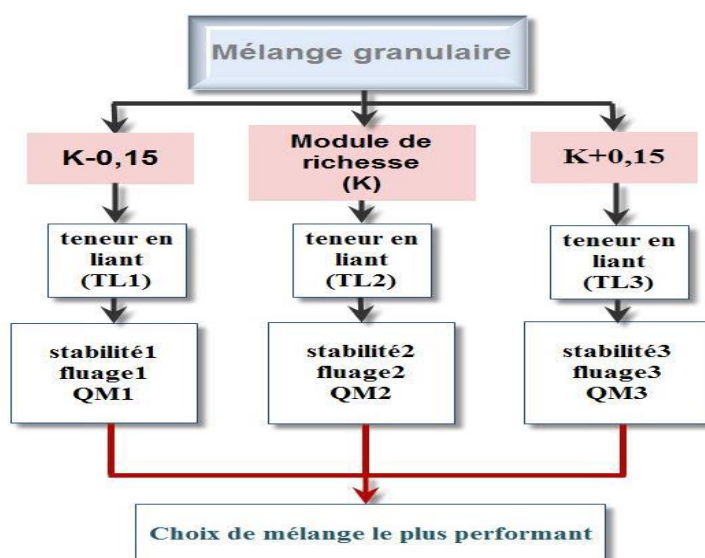


Figure III.1. Procédure de la formulation Marshall [4].

La teneur en liant optimale correspond à la teneur donnant la stabilité maximale et la masse volumique maximale. De plus, la valeur optimale obtenue doit être validée quant aux exigences relatives à l'indice de fluage et le pourcentage des vides du squelette granulaire (V.M.A. : voids in the mineral aggregate ou V.A.M.: vides inter granulaires). Cette méthode de formulation est un procédé simple, rapide, peu coûteux et relativement complet compte tenu de la détermination des vides, de la stabilité et du fluage de l'enrobé. Le point critique de cette méthode demeure sans équivoque la méthode de fabrication des éprouvettes (compaction par impact), laquelle est non représentative des conditions de chantier.

III.3.1.2. Essais de formulation

La formulation suit l'organigramme de la figure III.1 : détermination du squelette granulaire, choix de trois teneurs en liant donc trois formulations basées sur l'essai Marshall et Duriez.

1) Essai Marshall - fluage et stabilité - (NF EN 12697-34)

Le but de l'essai est la détermination de la teneur en vides, la stabilité et le fluage Marshall. L'essai consiste à compacter des éprouvettes par damage selon un processus déterminé, puis à les soumettre à un essai de compression simple.

➤ Préparation des éprouvettes

- On doit disposer d'au moins 3 moules de compactage comportant chacun une base, un corps de moule, une hausse, deux pistons extracteurs, un bain thermostatique, une presse équipée d'un dispositif permettant de mesurer l'effort au cours de l'essai,
- La température de préparation des éprouvettes de mélanges à base de bitume pur 40/50 est de 160°C.
- Les moules sont portés à la température de préparation des éprouvettes,
- La masse de prélèvement est de 1200g par moule.
- Après avoir placé un disque de papier au fond de moule et mis en place la hausse, on introduit le mélange en une seule fois dans le moule.
- Un disque est mis en place à la surface du mélange hydrocarboné.
- La dame est maintenue perpendiculairement au moule. Le mélange est compacté en appliquant 50 coups de marteau de la dame.

- La durée de compactage ne doit pas excéder 3 minutes,
- Le moule est placé ensuite pendant au moins 15 minutes, sous un jet d'eau de telle façon à ne pas mouiller l'éprouvette.
- Le moule est conservé 1h au moins à la température ambiante avant démoulage.
- Le démoulage est effectué en faisant passer l'éprouvette du moule dans la hausse à l'aide d'un piston extracteur.
- Après démoulage les éprouvettes sont numérotées puis pesées.
- Les dimensions de l'éprouvette sont mesurées en 6 zones différentes pour la hauteur et 3 zones pour le diamètre.
- La masse volumique apparente est calculée à partir des mesures géométriques.
- La mesure de la masse volumique apparente par pesée hydrostatique est réalisée sans paraffinage.
- Les éprouvettes sont conservées 6h au moins à la température ambiante après leur compactage.

➤ **Déroulement de l'essai**

- Les éprouvettes et les mâchoires d'écrasement sont d'abord immergées dans le bain à 60°C pendant 30 min.
- Elles sont ensuite placées dans les mâchoires d'écrasement. L'ensemble est porté entre les plateaux de la presse pour être soumis à l'essai de compression.
- Vitesse de l'essai.
- La stabilité Marshall est la valeur de la charge maximale à la rupture de l'éprouvette (exprimé en daN).
- Le fluage Marshall est la valeur de l'affaissement de l'éprouvette (exprimé en 1/10mm).
- Pourcentage des vides est calculé par l'expression suivante :

$$V\% = 100 \times (1 - MVA / MVR)$$

Equation III.3

- MVA : masse volumique apparente
- MVR : masse volumique réel
- Le quotient Marshall c'est le report S / F
- S : la stabilité
- F : Le fluage

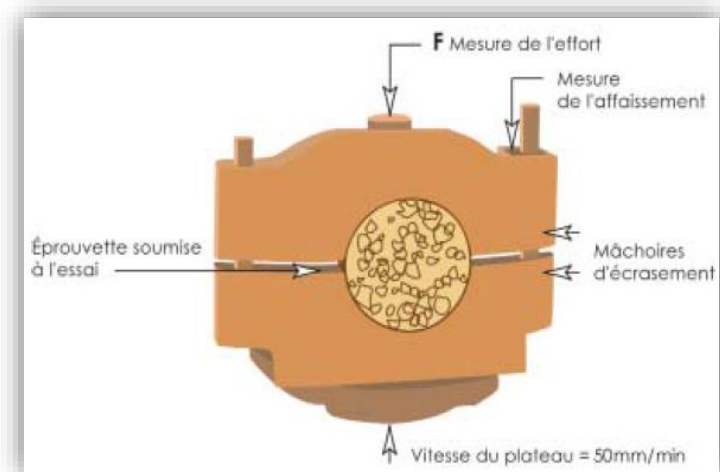


Figure III.2. Principe de l'essai de compression [19].

2) Essai Marshall - tenue à l'eau - (NF EN 12697 -12)

La tenue à l'eau est habituellement mesurée au moyen de l'essai Duriez dans le cadre de la normalisation française et algérienne. Cependant, en Algérie, l'essai Duriez est de moins en moins utilisé remplacé par l'adaptation de l'essai Marshall à la tenue à l'eau.

Depuis les recommandations de CTTP février 2004 et vue que le mode opératoire de l'essai Marshall ne renseigne pas sur la tenue à l'eau de l'enrobé, une méthode de travail a été développée, elle consiste à introduire l'immersion ainsi que le calcul du gonflement, elle est pratiquée par les laboratoires Algériens comme suit :

On prépare un mélange hydrocarboné qu'on mettra dans des moules cylindriques, on fait subir à l'enrobé un compactage en appliquant 50 coups de la dame sur les deux surfaces de l'éprouvette, on fait refroidir les éprouvettes à l'air pendant 2 à 3 heures, chaque éprouvette est démoulée à l'aide d'une presse, conservé ensuite pendant 24 heures (phase de maturation).

On prépare 4 éprouvettes de même composition :

- (02) éprouvettes conservées sans immersion (conservé sept jours à l'air).
- (02) éprouvettes immergées pendant 2 heures sous une pression normalisée, on calculera le volume, puis on fait immerger de nouveau pendant 7 jours (la température varie de 18 à 25 °C).

A l'issue, les éprouvettes sont écrasées à l'aide d'une presse, la vitesse du plateau de la presse est réglée à 0,85 mm/s (Figure III.3).

- Résistance de l'éprouvette stockée en immersion est notée : RC_{imm}
- La résistance de l'éprouvette stockée dans l'air est notée : RC_{sec}
- Le rapport RC_{imm} / RC_{sec} est le résultat du test qui donne la tenue à l'eau de l'enrobé et qui sera comparé aux spécifications des normes en vigueur.



Figure III.3. Presse pour tenue à l'eau [20].

3) Mesure de la masse volumique apparente par pesée hydrostatique (NF P 98-250-6) :

On détermine la masse de l'éprouvette puis son volume apparent par pesée hydrostatique. En application de la loi d'Archimède, on déduit la masse volumique apparente de l'éprouvette.

PS : cet essai est effectué sur les éprouvettes confectionnés en laboratoire (Duriez ou Marshall).



Figure III.4. Mesure de masse volumique d'une éprouvette par pesée hydrostatique.

4) Essai Duriez (NF P 98-251-4)

L'essai Duriez a pour but de déterminer, pour une température et un compactage donnés, la tenue à l'eau d'un mélange hydrocarboné à partir du rapport des résistances à la compression avec et sans immersion des éprouvettes.

Il permet également de déterminer le pourcentage des vides du mélange hydrocarboné dans des conditions de compactage données et d'appréhender une forme de susceptibilité thermique. L'essai s'effectue sur des éprouvettes cylindriques en les soumettant à la compression simple, à une vitesse de 1 mm/sec, et à la température de 18°C (figure III.5).



Figure III.5. Essai DURIEZ [21].

La charge à la rupture donne la résistance à la compression de l'enrobé confectionné à chaud ; elle est déterminée après 8 jours de conservation à sec pour la moitié des éprouvettes et avec immersion pour l'autre moitié. Le rapport résistance en immersion, sur résistance à sec exprime la tenue à l'eau du mélange hydrocarboné testé. Plus ce rapport est élevé, meilleure est la tenue à l'eau du mélange.

PS : la tenue à l'eau est testée soit par l'essai Duriez soit par l'essai Marshall.

III.3.2. LA METHODE LCPC [4]

III.3.2.1. Principe de la méthode

C'est une méthode de formulation basée sur les essais mécaniques « modernes », Les essais « modernes » ont pour but de déterminer les caractéristiques du comportement du matériau. Ces essais peuvent être classés en fonction de quatre propriétés appréhendées à différents temps pour les enrobés bitumineux à savoir : l'aptitude au compactage pour le court terme, l'orniérage et la fatigue pour le moyen terme et la durabilité pour le long terme. Les essais les plus utiles sont: l'essai de module complexe, l'essai de fatigue et l'essai de fluage dynamique.

Dans cette approche, la teneur en liant et l'enveloppe de la courbe ne sont pas fixées. L'épreuve de formulation est caractérisée par une approche fondée le plus possible sur les performances du mélange. Les considérations volumétriques sont prises en compte au moyen de la presse à cisaillement giratoire. Cet essai est le pivot de la méthode car il est utilisé pour tous les types d'enrobés à chaud. L'organigramme suivant représente la procédure de formulation en France.

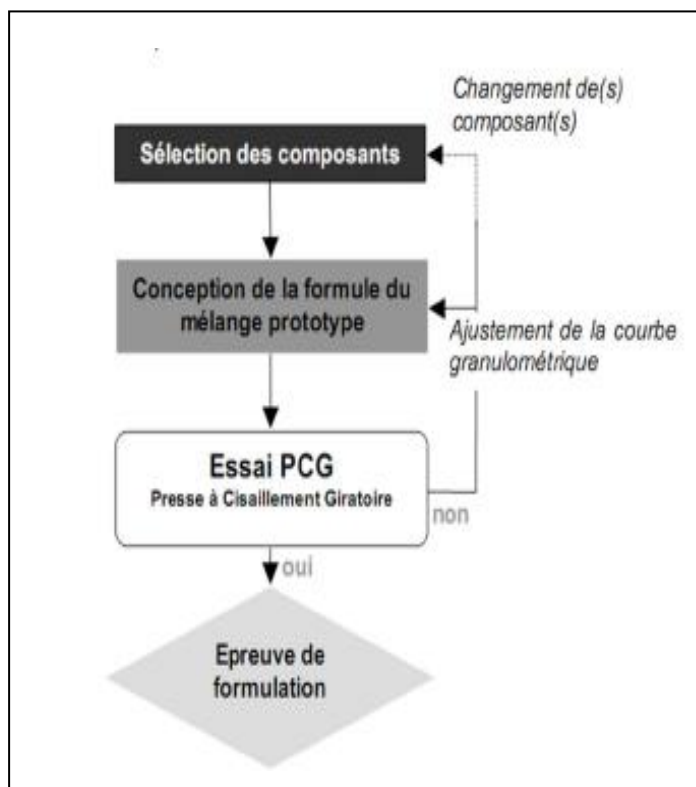


Figure III.6. Procédure de formulation LCPC [4].

III.3.2.2. Niveaux de l'épreuve de formulation

La séquence d'essais est choisie en fonction du niveau d'épreuve (1 à 4) requis par le donneur d'ordre et éventuellement des essais complémentaires. Le niveau dépend généralement du type de mélange, de la position de la couche de mélange hydrocarboné dans la chaussée, de son épaisseur, du trafic prévu, des sollicitations particulières (rampes, carrefour, température), de l'objectif recherché par l'application de cette couche et de la nature des couches inférieures et de la taille du chantier.

Les différents niveaux de l'épreuve varient du plus simple (niveau 1) au plus complet (niveau 4), les niveaux supérieurs englobant les exigences des niveaux inférieurs.

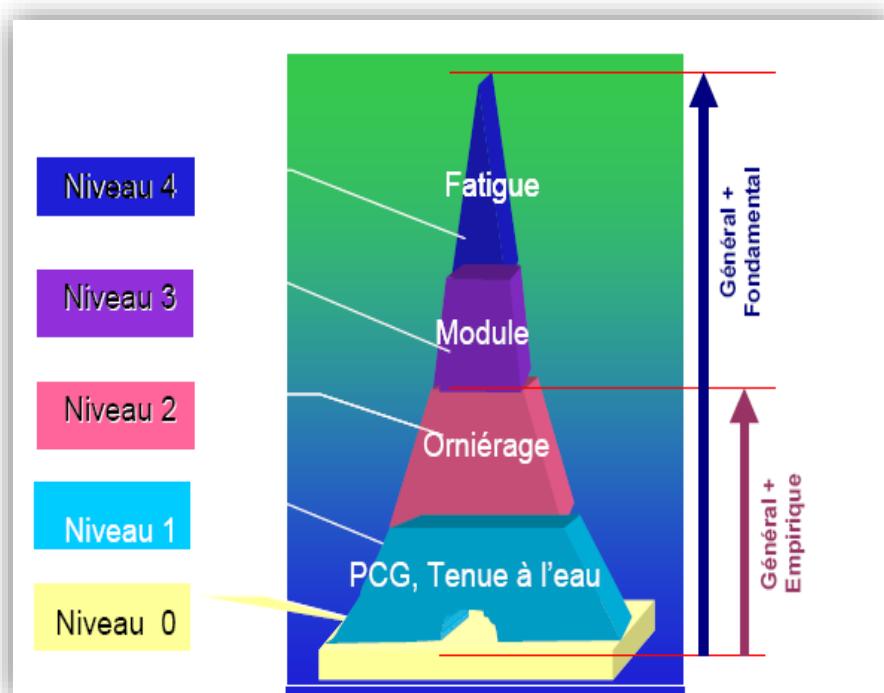


Figure III.7. Essais recommandés dans la méthode [4].

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

Niveau 1 : Ce niveau comporte l'essai de Presse à Cisaillement Giratoire PCG (NF EN 12697-31) ainsi que l'essai de tenue à l'eau à 18°C (NF EN 12697-12) ;

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

Niveau 2 : Ce niveau comporte les essais Presse à Cisaillement PCG (NF EN 12697-31) et Essai de tenue à l'eau à 18°C (NF EN 12697-12) ainsi que l'Essai d'orniérage (NF EN 12697-22) ;

Niveau 3 : Ce niveau comporte les essais Presse à Cisaillement PCG (NF EN 12697-31) et Essai de tenue à l'eau à 18°C (NF EN 12697-12), l'Essai d'orniérage (NF EN 12697-22) ainsi que l'Essai de module complexe (NF EN 12697-26) ;

Niveau 4 : Ce niveau comporte les essais Presse à Cisaillement PCG (NF EN 12697-31) et Essai de tenue à l'eau à 18°C (NF EN 12697-12), l'Essai d'orniérage (NF EN 12697-22), l'Essai de module complexe (NF EN 12697-26) et Essai de fatigue (NF EN 12697-24).

III.3.2.3. Essais de formulation LCPC

1) Essai Presse à Cisaillement Giratoire PCG (NF P 98-252)

- Détermination de l'aptitude au compactage des enrobés
- Optimiser la formulation d'enrobé

Plus la résistance au compactage (lors de la mise en œuvre) est grande, plus la résistance aux déformations sous trafic est grande: ainsi celle-ci peut être évaluée avec la presse à cisaillement giratoire.

Le mélange hydrocarboné préparé en laboratoire, est placé, foisonné et à la température d'essai (130 °C à 160 °C environ) dans un moule cylindrique de 150 mm ou 160 mm de diamètre. On applique sur le sommet de l'éprouvette une pression, verticale de 0,6 MPa. En même temps, l'éprouvette est inclinée d'un angle faible de l'ordre de 1.25° et soumise à un mouvement circulaire. Ces différentes actions exercent un compactage par pétrissage. On observe l'augmentation de compacité (diminution du pourcentage de vides) en fonction du nombre de tours.

Conditions d'essai : Pression 600 kPa. ; Angle 1.25° et Vitesse 30 t/min.

On obtient des Teneurs en vides pour les énergies de compactage différentes selon le nombre de girations (d'une classe de trafic donné).

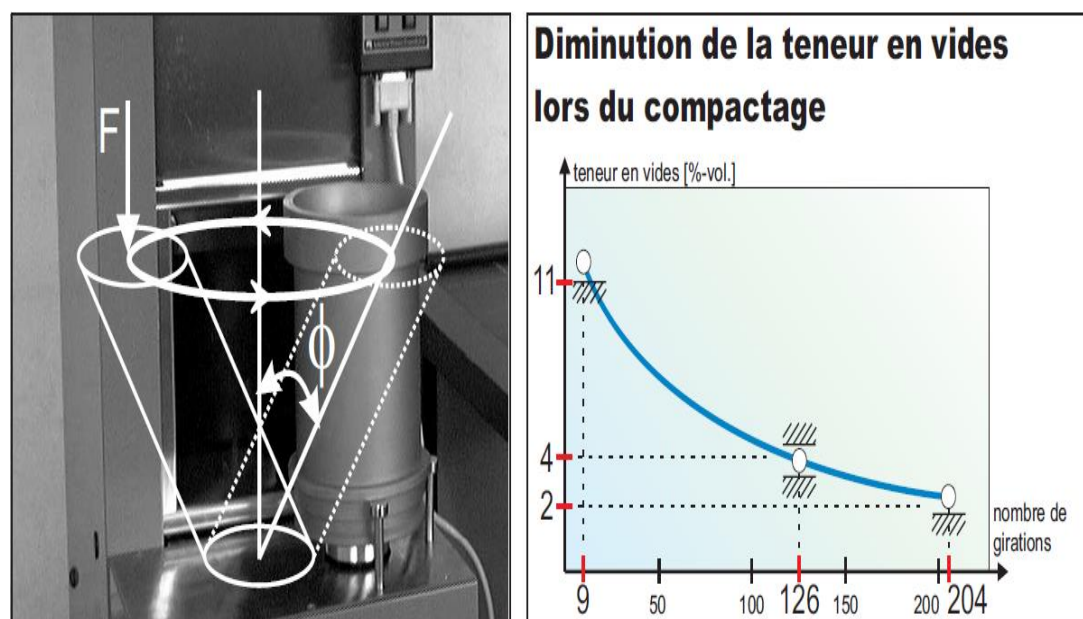


Figure III.8. Presse à cisaillement giratoire PCG [22].

2) L'orniéreur du LCPC (EN 12697-22)

Le matériel de laboratoire est conçu pour étudier la résistance à l'orniérage d'enrobés hydrocarbonés dans des conditions comparables aux sollicitations sur chaussées, selon la norme NF EN 12697-22. Des éprouvettes parallélépipédiques d'enrobés sont soumises aux passages répétés d'une roue équipée d'un pneumatique, roue solidaire d'un chariot animé d'un mouvement alternatif sinusoïdal, provoquant ainsi des déformations permanentes

Ainsi, le mouvement de rotation continu d'un groupe moto - réducteur est transformé en mouvement alternatif par un pallier oscillant portant un bras télescopique. Ce bras transmet son mouvement à un chariot mobile sur deux rails solidaires d'un bâti caréné. Le chariot simule l'action d'un essieu de véhicule. Il porte deux roues, chacune montée sur une fusée articulée sur un pivot. Le plan moyen de chaque roue passe, pour une orientation nulle de son pivot, par l'axe longitudinal de l'éprouvette.

L'action de pression de chaque pneumatique sur le matériau est obtenue par la mise en charge d'un vérin agissant sur le support de l'éprouvette guidé sur le bâti. Un système de chauffage par circulation d'air et régulateur maintient la température constante durant l'essai.



Figure III.9. Orniéreur (Mesure de sensibilité à l'orniérage) [23].

Ainsi, les contraintes induites dans le matériau résultent de l'application de la charge sur chacun des supports des éprouvettes. Un résultat est la moyenne de l'évolution de l'ornière constatée sur au moins deux éprouvettes. Le nombre final de cycles est variable suivant les matériaux, la température, le but de l'étude.

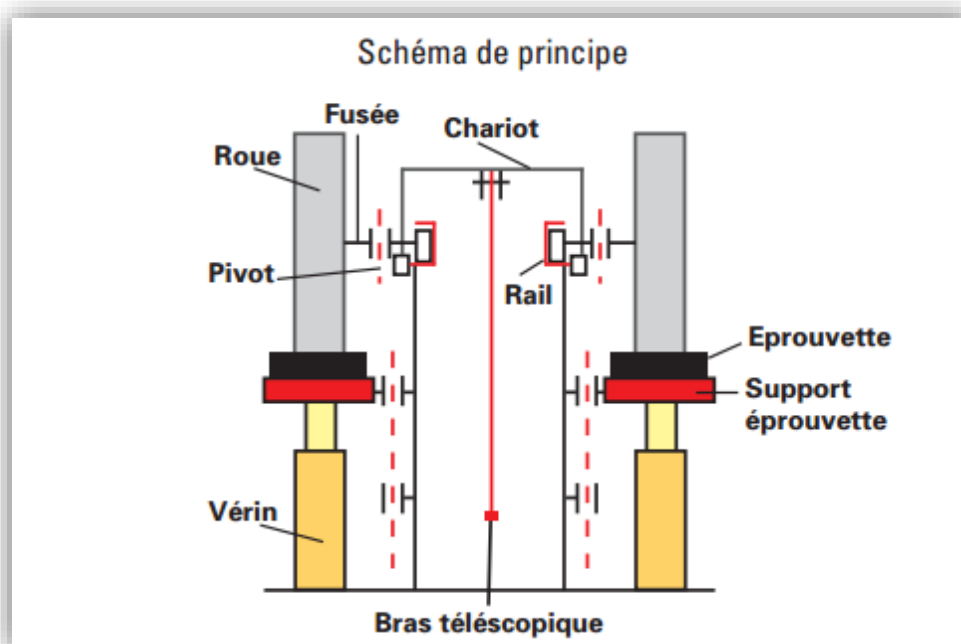


Figure III.10. Principe de l'orniéreur du LCPC [23].

Ce dispositif sert à :

- Étudier l'aptitude à l'orniérage de matériaux hydrocarbonés destinés aux couches de roulement ou de base, selon la norme NF EN 12697-22, dispositif de grandes dimensions ;
- Étudier également des enduits superficiels normaux ou anti- dérapant. Dans ce cas, il est possible de faire déraper latéralement la roue pour augmenter les effets d'arrachement ;
- Étudier l'évolution de la texture sous trafic.

III.4. PROPRIETES D'UN REVETEMENT BITUMINEUX [24]

Les chaussées autoroutières et la majorité des routes urbaines sont composées de deux couches d'enrobés soit celle de base et celle de surface. Le choix de ces matériaux et l'épaisseur des différentes couches sont dictés par des considérations économiques et par l'étude de dimensionnement.

Pour tous les types d'usages, un revêtement bitumineux performant doit assurer la sécurité et le confort des usagers. La performance est aussi fonction de la durée de vie anticipée du revêtement tout en ayant un minimum d'interventions pour son entretien. Le tableau III.1 synthétise les paramètres majeurs requis pour les différentes propriétés d'un revêtement, soit la résistance à l'orniérage, la résistance à l'arrachement et au désenrobage, la résistance à la remontée des fissures, la résistance à la fatigue, la résistance à l'abrasion et à l'usure et des performances d'imperméabilité et de texture.

Figure III.1. Les propriétés d'un revêtement performant [24].

Propriétés	Définition	Paramètres majeurs
Résistance à L'orniérage	Résistance aux déformations par fluage	<ul style="list-style-type: none"> • Rigidité et quantité du bitume • Compacité • Granulométrie combinée des granulats • Angularité des granulats • Épaisseur des couches d'enrobés
Résistance à L'arrachement et Au désenrobage	Propriété des enrobés permettant la conservation du lien d'adhésivité entre les granulats et le bitume	<ul style="list-style-type: none"> • Quantité et nature du bitume • Affinité granulats-bitume • Taux de compactage du revêtement • Qualité des joints
Résistance à la remontée de fissures	Résistance à la fissuration thermique et aux efforts de retrait thermique	<ul style="list-style-type: none"> • Quantité et nature du bitume • Épaisseur des couches d'enrobés • Compacité • Choix des composants et formulation des enrobés • Additifs dans le mélange
Résistance à la Fatigue	Résistance à la fissuration dans les pistes de roues sous l'effet de charges répétées en tension en bas de couches	<ul style="list-style-type: none"> • Modification et grade du bitume • Épaisseur des couches d'enrobés • Compacité • Adhésivité du bitume • Quantité et nature du bitume • Granulométrie et teneur en fines • Additifs dans le mélange
Résistance à L'abrasion et à L'usure	Résistance aux effets du vieillissement dû aux facteurs environnementaux, à l'usure et à l'abrasion par la circulation	<ul style="list-style-type: none"> • Résistance et dureté des granulats • Granulométrie combinée des granulats • Compacité • Quantité et nature du bitume • Sensibilité aux effets de l'eau • Qualité des joints
Imperméabilité	Empêcher l'infiltration d'eau à travers les couches d'enrobés	<ul style="list-style-type: none"> • Compacité • Teneur en vides des enrobés • Qualité de la couche d'accrochage et du liant d'imprégnation • Granulométrie combinée des granulats • Quantité et nature du bitume • Qualité des joints

III.5. CONCLUSION

Un enrobé bitumineux performant doit assurer la sécurité et le confort des usagers et la pérennité de la chaussée.

L'objet de l'étude de formulation est de définir les dosages des divers constituants capables d'atteindre et d'assurer, au cours de la vie de l'ouvrage réalisé, le maintien à un niveau satisfaisant des performances. Il existe plusieurs méthodes de formulation.

La méthode Marshall, bien que d'essence empirique, demeure toujours très répandue en Amérique du Nord, Canada et Afrique du Nord dont l'Algérie. Les exigences de base essentiellement recherchées sont la stabilité, la déformation (fluage) ainsi que le volume des vides. Le procédé de formulation est simple, rapide, peu coûteux et relativement complet mais on n'a pas d'essai pour le comportement à long terme. Elle a tendance à être retenue pour le contrôle des chantiers.

La méthode LCPC est une méthode de formulation basée sur les « essais mécaniques modernes » qui ont pour but de déterminer les caractéristiques du comportement du matériau à différents temps : l'aptitude au compactage pour le court terme, l'orniérage et la fatigue pour le moyen terme et la durabilité pour le long terme. Elle a de plus en plus d'audience auprès des laboratoires de différents pays. L'équipement est assez conséquent.

CHAPITRE IV

L'adhérence Granulats - Bitume

CHAPITRE III.**ADHERENCE GRANULATS - BITUME****III.1. INTRODUCTION**

Le phénomène de dégradation des réseaux routiers est sans aucun doute à l'origine de nombreux accidents de la circulation. Dans ce chapitre on va passer en revue les causes probables des dégradations et les mécanismes d'endommagement susceptibles de se produire à court et long terme..

Nous insisterons ensuite sur une des causes de dommages qui est le phénomène de désenrobage. On traitera de la problématique de « l'adhérence granulats –bitume » et des quelques techniques proposées pour solutionner le problème de désenrobage lorsque se pose un problème d'adhésivité liant-grulats.

À la fin comme solution au désenrobage, la chaux est très répandue ; ses caractéristiques son impacte sur enrobés bitumineux, les méthodes de son ajout et aussi sa normalisation et spécifications sont tous présentés dans cette partie.

III.2. PATHOLOGIES DE DÉGRADATIONS DES ENROBES**III.2.1. Analyse des causes probables des dégradations [25]**

Il est généralement admis que les chaussées se dégradent sous l'action du trafic lourd, du climat, et que les cycles de gel et dégel contribuent à aggraver les dommages. Il est cependant plus difficile de quantifier l'effet de ces fluctuations saisonnières et d'en tenir compte adéquatement à l'étape du dimensionnement d'une nouvelle chaussée ou du renforcement d'une chaussée existante.

L'endommagement des chaussées se manifeste principalement par l'apparition de fissures transversales (retrait thermique du béton bitumineux à basse température), d'ondulations ou de soulèvements différentiels dus au gel et à l'hétérogénéité des matériaux, ainsi que de fissures de fatigue ou d'ornières produites par le passage répété des véhicules lourds. De plus, les fissures permettent l'infiltration de l'eau, ce

qui entraîne de nouveaux mécanismes d'endommagement et la diminution du confort de roulement.

Les mécanismes de fissuration par fatigue et de déformation permanente sont ceux qui font généralement l'objet des études de portance parce qu'ils sont associés au trafic lourd.

III.2.1.1. Le rôle du trafic :

Principalement la circulation des véhicules répétés le long de la période d'exploitation de la chaussée, fatigue cette dernière se qui est la source de plusieurs dommages parmi les phénomènes résultant de la fatigue il ya :

- L'apparition et la croissance des défauts microstructuraux puis macrostructuraux dans le matériau du au cumul de nombre de cycle de sollicitation $>10^4$; se qui entraîne les fissurations dans le sens longitudinal et transversal de la base qui se propage vers la surface.
- Le phénomène de l'orniérage qui provient souvent de déformations irréversibles au sein des couches bitumineuses supérieures. Des situations de trafic lourd intense et lent ainsi que des températures élevées favorisent ce type de dégradation.



Figure IV.1. Fissuration par fatigue d'une chaussée [25].

- La fissuration entraîne l'amorce de faïençage, c'est une caractéristique de dégradations par fatigue très avancée.
- Dans les cas de la formation des nids de poules, le facteur de la fatigue joue sans doute un rôle lors de la phase de son évolution rapide, comme en atteste la localisation des nids de poule, situés essentiellement en bandes de roulement.

Vue l'importance de la prise en compte des effets de fatigues sur la détermination des épaisseurs des différentes couches de la chaussée ; un essai de fatigue normalisé a été créé pour qualifier les matériaux bitumineux vis-à-vis des sollicitations par fatigue.

III.2.1.2. Le rôle de l'eau :

La présence systématique d'eau dans les sections des chaussées dégradées, ceci préalablement à l'apparition des désordres. On peut donc penser que l'eau, à l'état liquide ou à l'état de glace, joue un rôle moteur important à long et/ou court termes pour des pathologies considérées. Rappelons que l'accumulation d'eau dans une chaussée bitumineuse peut se produire de différentes façons (Figure III.2).

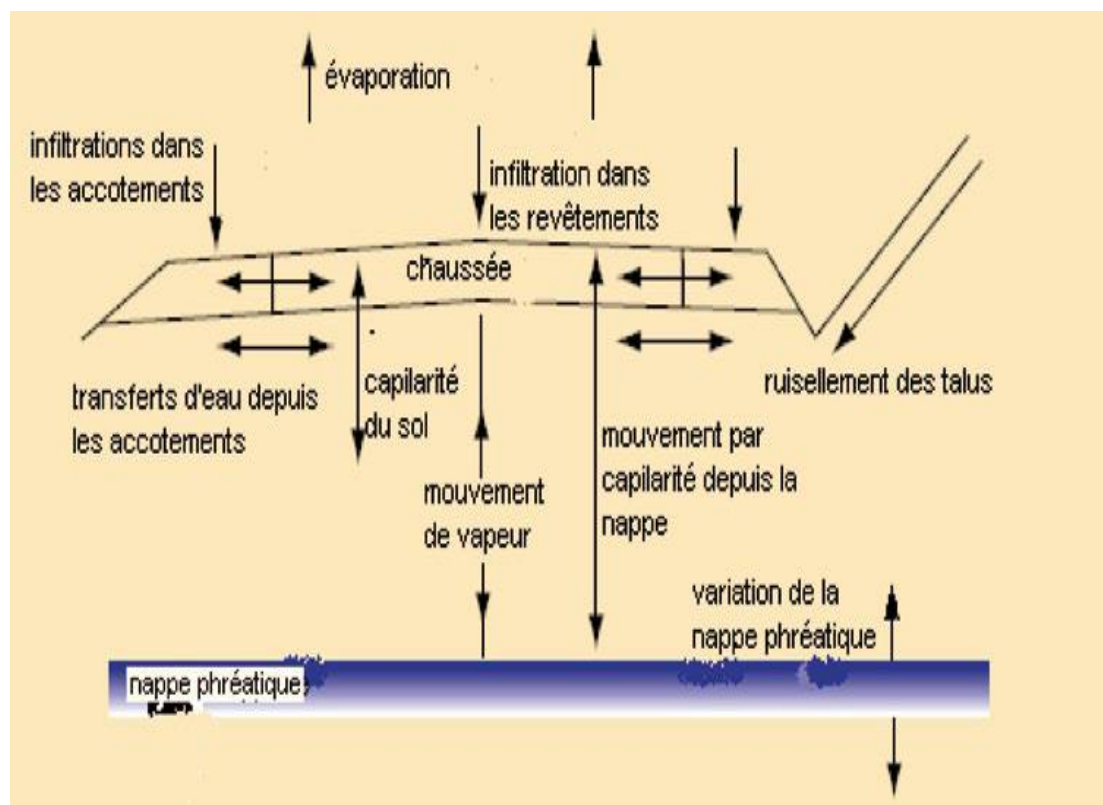


Figure III.2. Circulation d'eau dans la plate-forme et la chaussée [25] .

La cause la plus courante est par précipitation puis infiltration à des degrés plus ou moins importants au travers du revêtement de surface de la chaussée, qu'il soit sain ou dégradé. On peut assister également à des infiltrations depuis les bords de la structure (eaux venues des coteaux, des fossés...) ou par absorption capillaire de l'eau des nappes phréatiques ou remontée de ces dernières.

Un système d'évacuation des eaux défaillant, mal positionné ou absent, une géométrie mal étudiée ou mal respectée - notamment lors des travaux d'entretien - à l'échelle de la chaussée ou de la superposition des couches, un tracé défavorable, la présence d'une source, la multiplication des interfaces lors d'entretiens successifs, sont donc autant de facteurs qui peuvent provoquer l'arrivée et/ou la stagnation de l'eau de ruissellement dans les chaussées.

Des zones entières peuvent devenir gorgées d'eau de façon temporaire ou permanente et conduire à plus ou moins long terme à un désenrobage du matériau (Figure III.3). Mais on verra aussi qu'à cette action physico-chimique de sape peuvent s'ajouter en période hivernale des effets mécaniques subits, possiblement sources de désordres, lors du changement de phase liquide/glace de l'eau contenue dans l'espace poral des enrobés bitumineux.



Figure III.3. L'effet de l'eau sur le couple granulats - bitume [25].

Autres conséquences dus à la présence d'eau dans la chaussée :

- Le désenrobage que se produisent lorsque le lien physique entre le bitume et le granulats s'affaiblit, généralement en conséquence d'une mauvaise tenue à l'eau (adhésivité passive déficiente). Cela débouche sur des dégradations telles que l'arrachement de granulats qui peuvent dégénérer en nids de poule.
- Le vieillissement chimique du bitume qu'implique notamment des réactions d'oxydation au sein du bitume, génère un durcissement du liant qui diminue la capacité de l'enrobé à relaxer les contraintes. Des fissures se développent alors et la qualité de roulement se dégrade.

III.3. MECANISMES DE L'ADHERENCE GRANULATS - BITUME

On observe sur le réseau routier algérien des phénomènes de désenrobage de la chaussée dus probablement à une mauvaise adhésion liant-granulat. Bien que ces phénomènes soient observés à des degrés divers sur l'ensemble du réseau routier, la connaissance des mécanismes d'adhésion impliquant le bitume et les granulats sont nécessaire pour diagnostiquer le problème de désenrobage, ce qui rendrait plus facile l'application de mesures préventives efficaces.

Le faite de démineur le problème de désenrobage réduire les dépenses d'entretien, se qu'il fait que les mètres de l'ouvrage sont directement concernés, pour en tenir compte.

III.3.1. Qu'est ce que l'adhérence bitume granulats [26]

Dans le cas des enrobés bitumineux, on parle d'affinité d'un liant bitumineux par rapport aux granulats minéraux, ou d'adhérence d'un liant hydrocarboné aux granulats minéraux. Il convient de distinguer entre l'adhésivité active (« *aptitude d'un liant à se fixer sur un granulats, qu'il soit sec ou humide* ») et l'adhésivité passive (« *aptitude d'un liant vis-à-vis d'un granulats à résister au désenrobage sous l'action de l'eau ou d'un autre élément physique ou chimique*»). L'adhésivité peut être caractérisée par les forces d'adhésion qui correspondent aux forces reliant les molécules d'un corps 1 aux molécules d'un corps 2.

Le terme « d'adhésion mécanique », qui décrit la force (par unité de surface) nécessaire pour rompre l'assemblage liant granulat, est utilisé plus couramment.

L'adhésivité en soi n'est pas une caractéristique spécifique d'un matériau, en effet, elle n'est reconnaissable que lorsque deux matériaux sont mis en contact.

III.3.2. Paramètres intervenant dans les mécanismes d'adhésivité granulati- liant [26]

Ils sont nombreux et l'implication de chacun de ces paramètres n'a pas encore pu être établie de manière universelle. Il convient de distinguer entre plusieurs familles de paramètres qui touchent soit les matériaux, soit les conditions extérieures lors de la fabrication, du stockage, du transport ou de la mise en place de l'enrobé. Un aperçu des paramètres connus à nos jours est donné dans ce paragraphe, puis chaque famille est décrite plus en détail.

1) Aperçu des paramètres

L'affinité entre un liant hydrocarboné et un granulat minéral est un mécanisme très complexe qui fait intervenir des caractéristiques des granulats, du liant et de leur mélange, ainsi que des paramètres externes. De manière générale, les propriétés des granulats jouent un rôle plus grand que celles des liants, ce qui a été prouvé à maintes reprises. Les paramètres, classés par familles, qui interviennent dans les mécanismes d'adhésivité sont énumérés dans le tableau ci-après (Tableau III.1). Cette liste, non exhaustive, reprend les paramètres prépondérants.

Tableau III.1. Synthèse des paramètres pouvant intervenir dans les mécanismes d'adhésivité liant- granulats [26].

	Famille de paramètre	Paramètres
	Péetrographie	Caractères structuraux, minéralogiques et chimiques : acidité-alcalinité, hydrophiles-hydrophobes, charge à la surface, polarité...
	Granularité	Courbe granulométrique continue-discontinue, taille des granulats
	Rugosité de surface	Surface de contact-surface réelle, porosité, angularité, etc.
	Constituants externes adsorbés à la surface	Constituants chimiques, saletés adsorbées, poussière, humidité, etc.
	Type de liant/charges à la surface	Type de liant, composition chimique, charge à la surface, polarité, etc.
	Viscosité	Viscosité du liant, température, etc.
	Formulation	Teneur en liant, teneur en air, humidité, fillers, etc.
	Fabrication	Concassage des granulats, température du liant, etc.
	Stockage	Temps de stockage, température, processus de vieillissement, effets environnementaux, etc.
	Transport	Temps de transport, température, etc.
	Mise en place	Température de mise en place, effets environnementaux, etc.
	Dopage	Type de dope, teneur, chronologie du dopage, etc.
	Additifs	Types d'additifs, dosage, etc.
	Humidité	Humidité relative de l'air, présence d'eau, vapeur d'eau, pH d'eau, composants chimiques dans l'eau.

a) Paramètres des granulats minéraux

L'adhésivité entre un liant hydrocarboné et des granulats minéraux est fortement dépendant des caractéristiques des granulats. La nature pétrographique joue un rôle prépondérant dans les mécanismes d'adhésivité. De même, d'autres paramètres

interviennent tels que la granularité des matériaux utilisés, la texture de la surface des granulats et la présence de constituants adsorbés par le matériau.

- **Pétrographie**

La pétrographie est un des paramètres dominant dans l'affinité liant granulat. Elle indique les caractères structuraux, minéralogiques et chimiques d'un granulat. Les propriétés structurelles décrivent les arrangements des minéraux au sein du matériel, les caractéristiques minéralogiques indiquent les types de minéraux présents dans le granulat et les propriétés chimiques donnent des indications sur les composants chimiques formant les minéraux.

De par le passé, il a souvent été admis que les granulats acides (p.ex. granite, quartzite, grès – teneur en silice élevée) aient un faible degré d'enrobage, alors que l'enrobage des granulats basiques (p.ex. calcaire, basalte – teneur en silice faible) soit plus aisé. Cette idée a néanmoins été révélée inexacte à plusieurs reprises, même si en règle générale elle est conforme.

Il existe des exceptions aussi bien parmi les granulats acides que basiques qui ne suivent pas cette idée ancienne.

La même constatation peut être faite par rapport aux propriétés hydrophobes ou hydrophiles des granulats et par rapport à la teneur en carbonates de calcium (famille de minéraux à base de calcium et de carbonates (CaCO_3)) et en silicates (famille de minéraux à base de tétraèdre de silicium et d'oxygène (SiO_4)).

Même si en règle générale les matériaux basiques soient hydrophobes et présentent un meilleur enrobage, et que les matériaux acides soient hydrophiles avec un enrobage moins bon, il existe des exceptions qui contredisent cette idée. De même, une teneur en carbonates élevée équivaut pour la plupart du temps à un bon enrobage, alors qu'une teneur en silicates élevée se solde le plus souvent par un faible enrobage. Mais ici aussi, la corrélation n'est pas parfaite et des exceptions existent.

La pétrographie détermine aussi les composants chimiques qui se rencontrent sur la surface des granulats. Ces composants peuvent avoir une grande influence sur l'adhésivité entre les granulats et un liant. Ils définissent les charges à la surface du matériau qui peuvent réagir avec les molécules des liants hydrocarbonés. Les charges à la surface peuvent avoir des valeurs très différentes d'un type de granulat à un autre. Les composants chimiques déterminent de même la polarité des granulats. Celle-ci joue un rôle prépondérant dans la formation de liens de type électrostatique.

- ***Granularité***

La granularité des matériaux utilisés, à travers la courbe granulométrique employée, intervient aussi dans les mécanismes d'adhésivité. Le fait d'utiliser une courbe continue ou discontinue, avec des dimensions maximales et minimales définies, peut faciliter l'enrobage des granulats par le liant ou alors compliquer ce mécanisme. Surtout la présence de fines en quantités importantes peut avoir des conséquences néfastes sur l'adhésivité comme pour le cas des poussières et saletés présentes à la surface des granulats.

- ***Rugosité de surface***

La rugosité de surface des granulats intervient principalement dans le mécanisme d'adhésivité mécanique. Elle est définie par sa teneur en pores ou aspérités, par la taille et la profondeur de ces pores et par l'augmentation de la surface de contact qui en résulte. Les granulats ayant des surfaces avec une rugosité marquée permettent de tisser des liens plus performants par intrusion du liant dans les aspérités. Par contre, de l'air et de l'humidité peut être piégé à l'intérieure de ces aspérités au moment de l'enrobage si les pores sont trop petits pour que le liant arrive à y pénétrer.

Ceci peut avoir des conséquences néfastes pour l'adhésivité liant-granulat. La rugosité de surface peut donc influencer les mécanismes d'adhésivité d'une manière positive et négative à la fois.

L'angularité des granulats intervient aussi dans les mécanismes d'adhésivité. Le phénomène de désenrobage a été prouvé plus fréquent pour des granulats présentant des surfaces plus angulaires car les angles vifs peuvent être à l'origine d'une rupture de film de liant enveloppant le granulat, et ainsi ouvrir une brèche pour l'eau.

- ***Constituants à la surface***

Les surfaces des granulats adsorbent des constituants volatiles en tout moment, lorsqu'elles sont en contact avec l'air, avec de l'eau, etc. Ces constituants peuvent être de nature très diverses. Les composants chimiques adsorbés peuvent réagir avec les molécules des granulats pour altérer les énergies de surface et ainsi entraver l'adhésivité liant-granulat. Les composants de type poussiéreux peuvent former un film mince enveloppant le granulat et entravant le liant lors de l'enrobage et d'accéder à la surface même du granulat. Le liant aura donc tendance de former d'avantage de liens avec les poussières ou avec les saletés qu'avec les granulats.

Les composants poussiéreux peuvent aussi être accompagnés de constituants chimiques qui réagissent avec les molécules des granulats. En plus, certains composants peuvent avoir des

Tendances à gonfler en présence d'eau, ce qui peut entraîner des interruptions de liens déjà existants entre le liant et les granulats.

L'humidité peut aussi être adsorbée par la surface des granulats surtout lorsque des nouvelles surfaces se créent lors du concassage. Etant donné que l'air ambiant possède toujours un certain degré d'humidité, les granulats non traités ne sont donc pas tout à fait sec au moment de l'enrobage. Cette humidité complique l'enrobage et peut réagir avec certains composants des granulats, du liant ou des constituants se trouvant à la surface des granulats. La présence d'humidité peut être évitée en chauffant les granulats lors de l'enrobage.

b) Paramètres des liants hydrocarbonés

- *Type de liant / Charges à la surface*

Le type de liant joue un rôle secondaire dans les mécanismes d'adhésivité. En effet, un changement de liant de type similaire influence l'adhésivité à moindre mesure qu'un changement de granulats au sein d'un enrobé bitumineux. Néanmoins, il convient quand même de prendre ces paramètres en considération pour une étude poussée, surtout si le type de liant change (p.ex. liant modifié aux polymères, etc.).

Les molécules d'un liant hydrocarboné se composent principalement d'atomes de carbone et d'hydrogène. Par contre les atomes restants (p.ex. oxygène, azote, etc.) sont très actifs au sein des mécanismes d'interaction entre les molécules d'un liant, et jouent donc un rôle important pour la performance globale d'un liant. La surface d'un liant n'est pas chargée de manière homogène ce qui implique la présence de certains points faibles dans un enrobé bitumineux. Le type de liant agit principalement sur la force d'adhésivité liant-granat à travers les différentes compositions chimiques de ce liant. Ce sont effectivement les composants chimiques qui influencent des caractéristiques de surface tels que les tensions superficielles ou la polarité du liant, qui à leur tour déterminent les forces d'attraction liant-granat. L'enrobage des granulats est facilité par une baisse de la tension superficielle à l'intérieur du liant et par la présence de molécules avec une polarité élevée.

Les molécules non polaires de leurs côtés forment des liens moins forts et peuvent mener à des performances faibles des liants à température basse.

c) Facteurs d'influence de l'adhésivité en présence de l'humidité [27]

L'eau, de nature très polaire, interagit de façon plus favorable que le bitume avec les granulats. Cette compétition est à la base des problèmes de désenrobage des chercheurs ont évalué ce phénomène du point de vue thermodynamique. Selon eux, les tensions inter faciales entre le bitume pur, l'eau et la surface d'un granulat sont telles que le désenrobage devrait se produire spontanément lorsque les trois phases sont mises en contact.

D'autre part, La chaleur de mouillage, plus élevée pour l'eau sur la silice que pour le benzène sur la silice, illustre le caractère hydrophile de la roche. Les composés polaires provenant du bitume qui sont fortement adsorbés à la surface des granulats entrent en compétition pour les mêmes sites que l'eau, les rendant vulnérables en présence d'eau.

Les composés modèles polaires et les acides carboxyliques en solution diluée sont facilement désorbés en présence d'eau, mais les composés basiques sont moins facilement déplacés.

Les bitumes contenant une plus grande proportion d'asphaltènes sont aussi plus sensibles à l'humidité.

Le type de granulat influence également l'adhésion en raison des différences d'affinité avec le bitume. Le potentiel de désenrobage est supérieur pour certains granulats. Le désenrobage est moins commun avec le calcaire et les laitiers de haut fourneau.

Les granulats qui ont un contenu élevé en silice (électronégatif) sont généralement plus susceptibles au désenrobage que ceux qui ont un contenu élevé en carbonate (électropositif).

III.4. DESENROBAGE DES ENROBES BITUMINEUX

III.3.3.1. Définition de Désenrobage :

Opération qui consiste à décoller un mince film de liant hydrocarboné d'un granulats minéral en présence d'eau. Les mécanismes de désenrobage permettent d'apprécier l'adhésivité liant - granulats

III.3.3.2. Mécanismes de désenrobage [26]

Il existe plusieurs mécanismes qui permettent d'expliquer le processus de désenrobage liant - granulats : Détachement, déplacement, émulsification spontanée, rupture du film de liant, pression dans les pores, décapage hydraulique et instabilité du PH. Ces mécanismes peuvent agir séparément ou alors, ce qui semble plus correct, en même temps. Les causes fondamentales liées au désenrobage sont en effet très complexes et pas encore complètement comprises de nos jours. Voir tableau III.2.

Tableau III.2. Synthèse des mécanismes de désenrobage [26].

Mécanismes de désenrobage	Description
Détachement	Séparation de film de liant de la surface du granulats par l'action de l'eau sans rupture de film de liant
Déplacement	Séparation de film de liant de la surface du granulats par l'action de l'eau avec ouverture dans le film de liant
Emulsification	Formation d'une émulsion entre le liant et l'eau qui attaque les liaisons liant - granulats
Rupture de film de liant	Rupture mécanique du film de liant le long des angles vifs des granulats
Pression dans les pores	Rupture mécanique des liaisons liant - granulats à cause de l'eau piégée dans les pores de l'enrobé
Décapage hydraulique	Rupture mécanique de la liaison liant - granulats dans la couche de roulement à cause de l'action des pneus des véhicules
Instabilité du PH	Réaction chimiques effectuant l'adhésivité à cause du PH de l'eau en contact avec l'interface liant - granulats

III.4. SOLUTIONS AU DESENROBAGE : CHAUX HYDRATEE

Il existe plusieurs techniques pour remédier aux problèmes d'adhésivité « granulats-bitume », nous ne citerons dans ce projet que celles relatives à l'ajout de chaux.

III.4.1. La chaux hydratée – Un agent anti - désenrobage supérieur [28] [29]

La chaux éteinte est l'agent anti-désenrobage disponible le plus efficace; elle fait souvent partie des spécifications des gouvernements aux prises avec de sérieux problèmes de désenrobage. Le désenrobage se produit lorsque le lien entre le ciment bitumineux et le granulats se rompt à cause de la présence d'humidité; le liant se sépare alors du granulats. Certains types de granulats sont particulièrement vulnérables au désenrobage, et certaines conditions environnementales telles que la chaleur, les fortes pluies, les cycles de gel-dégel et la circulation jouent un rôle important dans le désenrobage. Lorsqu'on ajoute de la chaux à l'asphalte, elle réagit avec les granulats et renforce le lien entre le bitume et la pierre. Tout en traitant le granulats, la chaux réagit également avec l'asphalte lui-même. La chaux réagit avec les molécules fortement polaires qui pourraient autrement réagir dans le mélange et former des savons hydrosolubles qui favorisent le désenrobage. Lorsque ces molécules réagissent avec la chaux, elles forment des sels insolubles qui n'attirent plus l'eau.

De plus, la dispersion des minuscules particules de chaux éteinte à travers tout le mélange le rend plus résistant et plus dur, réduisant la probabilité que le lien entre le ciment d'asphalte et le granulats se brise mécaniquement, même en l'absence d'eau.

La chaux hydratée, principalement composée d'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$, est obtenue par hydratation de la chaux vive, elle-même produite par calcination à température élevée ($> 900\text{ }^\circ\text{C}$) de roches calcaires (CaCO_3).



Synonymes : Hydroxyde de calcium, chaux éteinte, hydrated lime, slakedlime

Du fait de ses origines minérales et de sa forme pulvérulente, la chaux hydratée peut être considérée comme une fine (*filler*) : la norme EN 13108-1 concernant les enrobés énonce explicitement que les fines comprennent « des matériaux comme le ciment ou la chaux hydratée ».

La chaux est fortement basique : elle neutralise l'acidité des granulats.

III.4.2. Mode d'action de la chaux dans les enrobés

Effets de la chaux

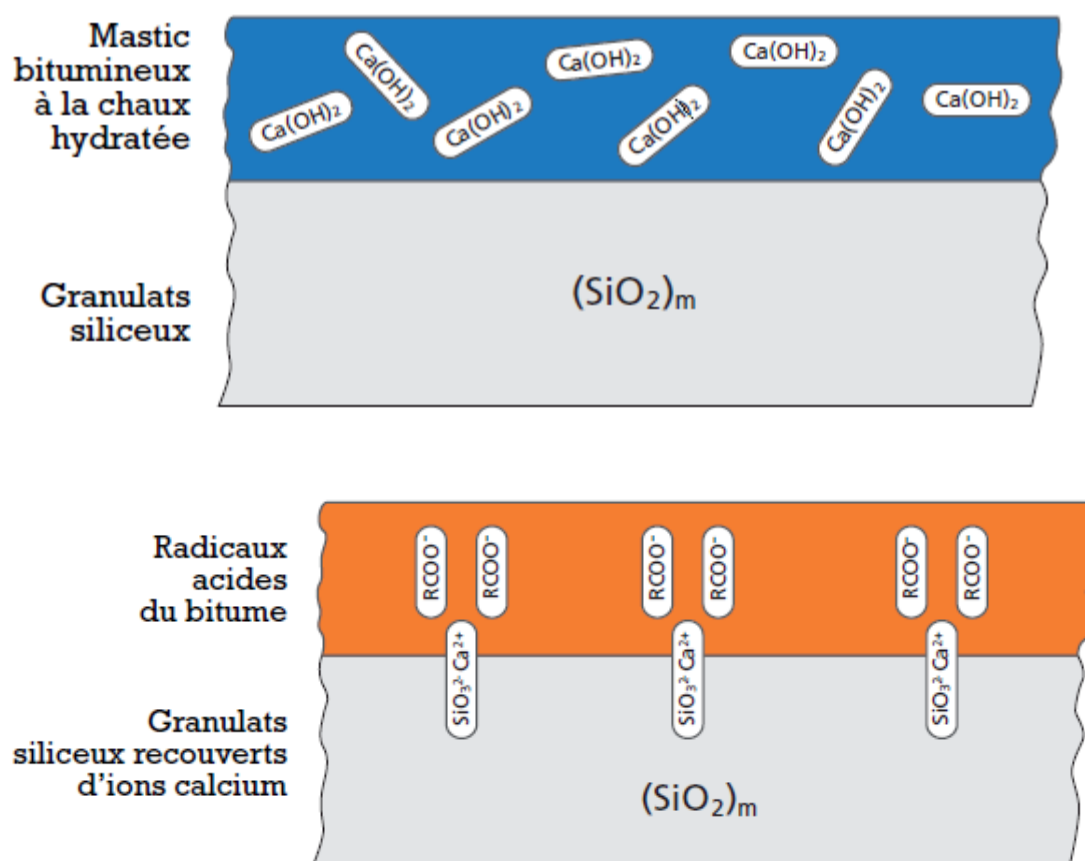


Figure III.4. Mécanisme d'action sur les enrobés [29].

Introduites dans les enrobés bitumineux, les fines de chaux hydratée améliorent leur cohésion (effet sur la tenue à l'eau et au gel), augmentent leur résistance au vieillissement chimique (ralentissement du vieillissement du bitume) et en modifient un certain nombre de propriétés mécaniques (module, rigidité, résistance à l'orniérage

et à la fissuration). Par quels mécanismes physico-chimiques peut-on expliquer ces effets multiples, constatés en vraie grandeur et corroborés par de nombreux essais en laboratoire ?

III.4.3. Mécanismes de l'action de la chaux sur les enrobés

- Lorsque la chaux hydratée est ajoutée à l'enrobé, elle réagit avec le granulats, améliorant la liaison bitume - granulats. *« Sur les granulats, on sait que le bitume préfère le calcium au silicium : en mettant de la chaux, on provoque des échanges ioniques entre les particules de chaux et le bitume qui favorisent l'ancrage du bitume, explique Didier Lesueur. On maximise ce mécanisme, on peut aller jusqu'à faire localement des précipités de carbonate de calcium qui constituent autant de points d'ancrage additionnels pour le bitume, ce qui est très favorable au collage du bitume. On neutralise les éventuelles argiles par floculation, comme dans le traitement de sol, ce qui est également très favorable au collage du bitume. »*
- Contrairement à des fines classiques, la chaux hydrate présente une réactivité chimique. Lorsqu'on l'ajoute à l'enrobé, elle réagit avec le bitume, neutralisant certains composés indésirables. La chaux hydratée réagit en outre avec certains composés polaires du bitume, limitant la quantité de composés hydrophiles. Ces composés sont facilement déplacés par l'eau, et contribuent ainsi au désenrobage. Au contraire, la chaux provoque la formation de sels de calcium insolubles qui maintiennent l'eau hors du système. Elle augmente également le module élastique à haute température, ce qui signifie un moindre risque d'orniérage. à basse température, l'effet rigidifiant ne provoque pas de risque additionnel de fissuration, puisqu'il devient alors similaire à celui obtenu avec des fines inertes.
- La chaux hydratée limite le vieillissement des enrobés en ralentissant celui de la plupart des bitumes. Cela provient des réactions acido-basiques entre les composés polaires du bitume et la chaux hydratée. Ces réactions isolent les composés polaires qui sont plus sensibles à l'oxydation, limitant ainsi la quantité d'espèces chimiques oxydables. En conséquence, la chaussée maintient sa souplesse originale plus longtemps et voit son niveau de résistance à la fissuration plus longtemps conservé en présence de chaux hydratée.

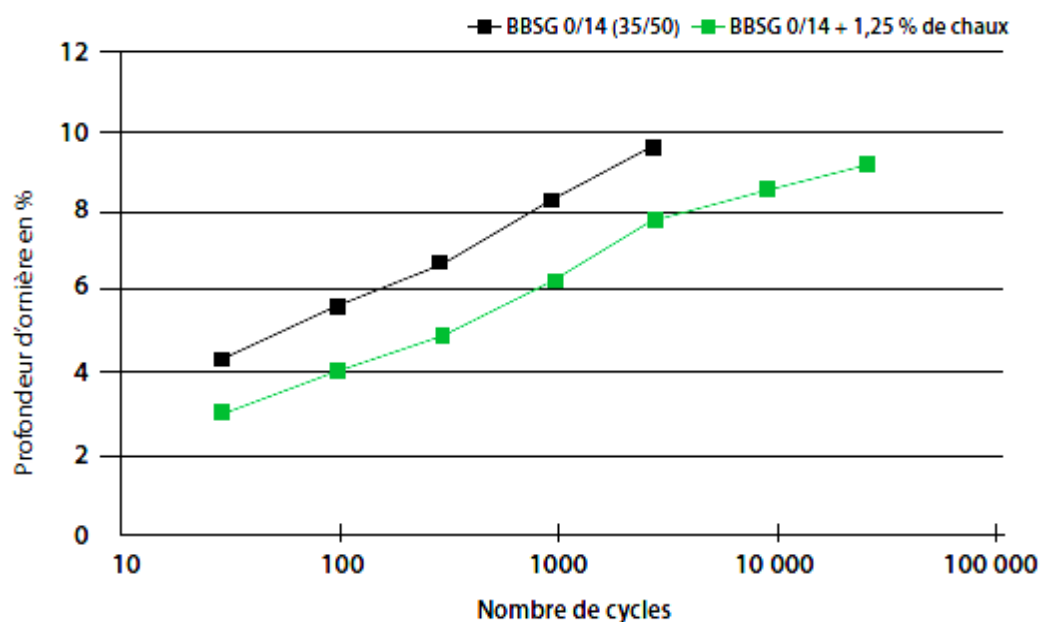


Figure III.5. Essais d'ornièrerie sur un béton bitumineux semi grenu 0/14 à base d'un bitume 35/50 avec et sans ajout de chaux hydratée [29].

« Si on veut comprendre l'action sur le vieillissement du bitume, il faut s'intéresser aux mécanismes d'action des acides sur les bases, poursuit Didier Lesueur. Ces réactions acides/bases ont d'autres effets car la plupart des acides du bitume sont des composés tensioactifs, qui ont tendance à se déposer à la surface des granulats. Ce sont des composés anioniques, très solubles dans l'eau : s'il y a de l'eau, ils migreront de préférence vers l'eau plutôt que de rester avec le granulat, sauf avec le granulat calcaire où se produisent des liaisons covalentes avec le calcium, insolubles dans l'eau, qui assurent la permanence du collage. Si ces composés anioniques présents dans le bitume vont sur le granulat, c'est défavorable pour la liaison. La chaux les filtre et les récupère, ce qui fait que le granulat récupère d'autres composés moins déplaçables par l'eau. Par ces mécanismes acide/base, non seulement on diminue le vieillissement du bitume, mais on favorise l'adhésion. »

« Pour comprendre l'amélioration des propriétés mécaniques des enrobés à la chaux hydraulique, une propriété physique de la chaux hydratée, en particulier sa forte porosité, ajoute encore D. Lesueur. Dans une particule de chaux hydratée il y a autant de matière que de vide. Quand on met de la chaux dans le bitume, les vides se remplissent de bitume et l'effet physique revient à avoir mis plus de particules, donc à être plus viscosifiant que si l'on avait mis des fines non poreuses.

III.4.4. Méthodes d'ajout de la chaux hydratée à l'enrobé bitumineux [30]

La chaux hydratée peut être ajoutée à l'enrobé bitumineux de différentes manières. Les plus courantes sont :

1) Ajout en centrale d'enrobage

Dans le Monde entier, la chaux hydratée est surtout utilisée dans sa forme sèche pure, mais peut également être mélangée à un filler calcaire pour former un filler actif. Selon le type de centrale utilisée, la chaux peut être incorporée directement dans le tambour ou le malaxeur de la même manière qu'un filler d'apport (voir annexe II).

2) Ajout de chaux hydratée sèche au granulats

Cette méthode consiste à ajouter des quantités contrôlées de chaux hydratée sèche au granulats humides sur les tapis convoyeurs. La chaux hydratée adhère à la surface humide du granulats.

3) Ajout de lait de chaux au granulats [31]

Cette méthode utilise un lait de chaux, mélange de chaux et d'eau, qui est ajouté en quantités contrôlées au granulats. Cette méthode garantit une excellente répartition de la chaux hydratée à la surface des granulats. Le granulats traité peut alors être envoyé directement dans la centrale d'enrobage, où il peut être stocké quelques temps, permettant une meilleure réaction de la chaux avec les surfaces granulaires et les particules argileuses.

Selon les nombreuses études qui comparent les différentes méthodes d'ajout de la chaux, avec des conclusions divergentes concernant la meilleure façon de réaliser cet ajout, mais il reste que toutes les méthodes se sont avérées être également valides et permettent de profiter des bienfaits de la chaux hydratée.

III.4.5. Spécifications pour la chaux hydratée dans les enrobés bitumineux [31]

La chaux hydratée est utilisée depuis plusieurs décennies aux Etats-Unis où elle est incorporée dans environ 50 millions de tonnes d'enrobé bitumineux chaque année. Certains états rendent son ajout obligatoire. Aux Etats-Unis, les chercheurs et les

gestionnaires considèrent que la chaux hydratée prolonge la durée de vie d'un enrobé d'environ 38%.

En Europe, la chaux hydratée est également employée depuis de nombreuses années. Des développements récents montrent son rôle polyvalent dans des enrobés à chaud comme à froid, ainsi que dans des opérations de retraitement en place. Son usage évite des dégradations prématurées et augmente la durée de vie.

La chaux hydratée est définie selon la norme Européenne :

EN 459 : Chaux de construction

La chaux hydratée peut être spécifiée :

- Comme un additif selon la norme Européenne :

EN 13108 : Mélanges bitumineux. Spécifications des Matériaux

- Comme un filler mixte selon la norme Européenne :

EN 13043 : Granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels utilisés dans la construction des chaussées, aéroports et d'autres zones de circulation.

Suite à un long travail de recherche, certains pays Européens ont décidé de rendre obligatoire, que ce soit à l'échelle locale ou nationale, l'ajout de chaux hydratée dans des formules d'enrobé bitumineux pour leur réseau routier.

III.4.6. Quantités et recommandations [31]

Selon les façons d'ajouter de la chaux hydratée dans une centrale d'enrobage. La teneur en chaux hydratée est généralement comprise entre 1 et 2,5% des granulats secs, avec un fort consensus autour de 1-1,5%. La plupart des méthodes de formulation des enrobés considèrent la chaux hydratée comme un filler minéral. Aussi, la proportion de filler est réduite de la même quantité que celle de chaux hydrate ajoutée, de sorte que la proportion massique totale de filler reste constante.

III.5. CONCLUSION

La dégradation et l'usure des enrobés bitumineux sont le résultat de plusieurs phénomènes qui surviennent pendant la durée de vie de la chaussée. Les causes sont nombreuses et les modes de dégradation varient selon ces causes ;

Le phénomène de désenrobage est souvent à l'origine des dégradations menant jusqu'à la ruine de la chaussée. Cette question peut être prise en charge lors de la phase de conception de la chaussée et lors du choix de ses constituants. Lorsque les matériaux sont imposés et que le problème d'adhésivité liant-granulats est posé, alors il faut y remédier par des techniques appropriées.

L'ajout de chaux dans le squelette granulaire semble être une solution souvent envisagée dans ces cas, elle englobe souplesse, qualité et durabilité.

La teneur en chaux hydratée est généralement comprise entre 1 et 2,5% des granulats secs, avec un fort consensus autour de 1-1,5%. La plupart des méthodes de formulation des enrobés considèrent la chaux hydratée comme un filler minéral. Aussi, la proportion de filler est réduite de la même quantité que celle de chaux hydrate ajoutée, de sorte que la proportion massique totale de filler reste constante.

CHAPITRE V

Etude Expérimentale

CHAPITRE V.**ETUDE EXPERIMENTALE****V.1. PROBLEMATIQUE**

Dans cette partie, nous allons procéder à la formulation d'un enrobé bitumineux semi grenu : un BBSG0/14 avec des granulats provenant d'une dolomie calcaire concassée. Les granulats proviennent de la Zone II (Wilaya de LAGHOUAT) pour la réalisation de la couche de roulement d'une chaussée à 2 voies de circulation assurant 50% du trafic total PL dans chaque sens, un trafic de classe **TPL₃** avec un Trafic poids lourd journalier moyen annuel (**PLJMA**) ≥ 150 .

Les granulats utilisés proviennent de l'entreprise ALTRO (Société Algérienne des Travaux Routiers) installée dans la Wilaya de SKIKDA. Ce sont des granulats non conventionnels, qui posent entre autre un problème d'adhésivité liant-granulats.

Pour tenter de résoudre ce problème nous avons suggéré dans notre étude l'ajout de la chaux hydratée selon notre recherche bibliographique (voir chapitre IV) ; par ailleurs l'ajout de la chaux devra améliorer les performances mécaniques de notre enrobé.

Notre étude expérimentale est donc divisée en deux parties. Dans la première partie, nous procédons à la formulation du BBSG0/14, par la méthode Marshall (voir chapitre III) dans la deuxième partie, on incorpore à différents taux de la chaux hydratée à la formulation retenue dans la première partie en vue d'améliorer l'adhésivité liant-granulat.

V.2. IDENTIFICATION DES MATERIAUX**V.2.1. LES GRANULATS**

Les granulats utilisés dans le cadre de la présente étude sont les fractions couramment utilisées en Algérie pour la fabrication des enrobés bitumineux destinés aux couches de roulement. Les différentes fractions granulaires (0/3, 3/8 et 8/15) proviennent du concassage d'une dolomie comme le confirment les résultats de l'analyse chimique sont donnés dans le tableau V.1.



Figure V.1. Les trois fractions granulaires

V.2.1.1. Analyse chimique de la roche :

Tableau V.1. Résultats de l'analyse chimique de la roche.

Essai	Norme	Résultat
Teneur SO ₄ (%)	NA 461	0.1612
PH	NA 10390-2005	6.00
Teneur Cl (%)	NA 9297-1989	0.259
Teneur en carbonate (%)	XP P 94-048	26.25
Classification	XP P 94-011	Une dolomie calcaire

Les granulats sont classés dans la catégorie de la dolomie calcaire, avec cependant une teneur en calcaire relativement faible (< 50%). Par ailleurs son PH = 6 < 7, donc les granulats sont chargés négativement, ce qui présage d'une mauvaise adhésivité liant-granat.

V.2.1.2. Les essais d'identification des granulats

1) Caractéristiques intrinsèques

- Masses volumiques (NF P 18-554)

Tableau V.2. Valeurs de masse volumiques des différentes fractions.

Fractions granulaire	0/3	3/8	8/15
Masse volumique réelle (t/m ³)	2.67	2.66	2.64

- **Essai Los Angeles (NF P 18-573)**

Fraction 3/8 - 8/15

Tableau V.3. Valeurs de coefficient los Angeles.

Classe granulaire	Coefficient los Anglos (%)	Seuils limites du coefficient los Anglos (%)
4/6.3	24.46	25
10/14	20.82	25

- **Essai Micro Deval humide (NF P 18-572)**

Fraction 3/8 - 8/15

Tableau V.4. Valeurs de coefficient micro Deval.

Classe granulaire	Coefficient micro Deval (%)	Seuils limites du coefficient micro Deval (%)
4/6.3	19	20
10/14	18.28	20

Commentaires :

Du point de vue caractéristique intrinsèque des granulats : les résultats obtenus en fonction de leur utilisation en béton bitumineux semi grenue sont conformes aux spécifications de la classe « **B** », donc ils sont admis pour une couche de roulement et un trafic faible selon la norme **NF P18-101**.

2) Caractéristiques de fabrication

- **Essai analyse granulométrique (NF P 18-560)**

Fraction 0/3

Poids humide: $M_h = 1000g$
Poids sec: $M_{s1} = 981.8g$

Tableau V.5. Analyse granulométrique de la fraction 0/3.

(mm)	0.08	0.16	0.25	0.315	0.63	1	2	3.15	4	5
%	18	21	27	31	42	53	74	97	100	100

Fraction 3/8

Poids humide : $M_h = 1628g$

Poids sec : $M_{s1} = 1584g$

Tableau V.6. Analyse granulométrique pour Fraction 3/8.

(mm)	1	2	3.15	4	5	6.3	8
%	4	5	19	40	72	89	100

Fraction 8/15

Poids humide: $M_h = 3002g$

Poids sec: $M_{s1} = 2982g$

Tableau V.7. Analyse granulométrique pour Fraction 8/15.

(mm)	5	6.3	8	10	12.5	14	16
%	2	3	10	36	79	94	99

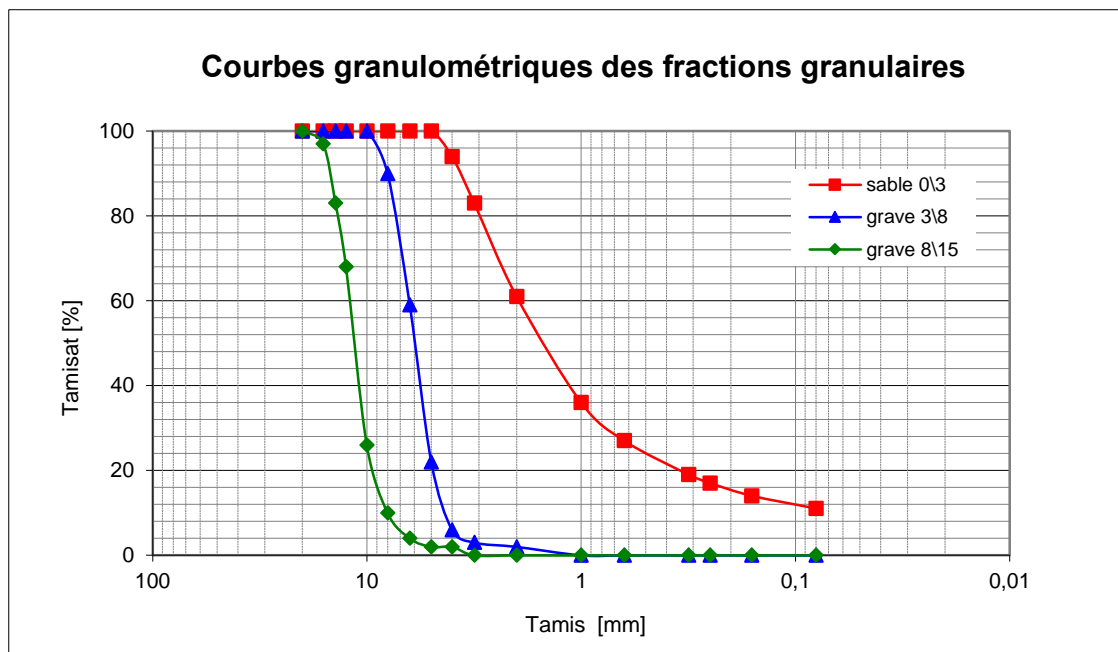


Figure V.2. Courbes granulométriques des fractions granulaires.

- **L'équivalent de sable (NF EN 933-8)**

Sable 0/3*Tableau V.8. Valeurs de l'équivalent de sable.*

Essai	Résultat	Spécification
Equivalent de sable à 10% de fines [%]	69,6	≥ 60

- **Essai bleu de méthylène (NF EN 933-9)**

Sable 0/3*Tableau V.9. Valeurs de coefficient bleu de méthylène.*

M1 (masse sèche de prise d'essai en g)	200
V1 : (quantité totale de la solution colorante ajoutée en ml)	20
MB	$MB = V1 \times 10 / M1 = 1$
Spécifications	< 2

- **Essai coefficient d'aplatissement (NF P-18-561)**

Tableau V.10. Valeurs de coefficient d'aplatissement.

Fraction granulaire	Coefficient d'aplatissement (%)	Spécification
3/8	19.18	≤ 25
8/15	21.44	

Commentaires :

Pour ce qui est des caractéristiques de fabrication des granulats : les résultats sont conformes aux spécifications exigées vis-à-vis de la forme, la propreté, la granulométrie, les granulats sont classés dans la catégorie « **III** » selon la norme (NF P 18-545).

Les caractéristiques de fabrication du sable répondent aux spécifications de la catégorie « **a** » selon la même norme.

Conclusion

De ce fait, les granulats analysés peuvent être utilisés dans la confection d'un béton bitumineux semi grenu BBSG 0/14.

3) Caractéristiques d'adhérence

- **Essai AKZOO**

Tableau V.11. Résultats de l'essai AKZOO.

Fraction granulaire	Taux de granulats recouverts par le liant (%)	Spécification (%)
10/14	63	≥ 90

Commentaire :

L'adhésivité en soit même n'est pas une caractéristique spécifique d'un matériau, en effet, elle n'est reconnaissable que lorsque deux matériaux sont mis en contact.

Elle est évaluée selon la méthode AKZOO et qui a donné les résultats représentés dans le tableau précédent et qui signifient la mauvaise adhésivité de ces granulats avec le bitume.

V.2.2. LE LIANT

C'est un bitume pur commercialisé par NAFTAL.

V.2.2.1. Les essais d'identification du bitume

- Pénétrabilité à 25°C (NF EN 1426).
- Point de ramollissement (NF EN 1427).
- Densité relative - méthode au pycnomètre (EN ISO 3838).

Tableau V.12. Résultats des essais sur bitume.

Type d'essai	Résultats	Spécification
Pénétrabilité à 25 °C (1/10 mm)	48.66	35 - 50
Point de Ramollissement « TBA » (°C)	52.75	50- 58
Densité relative à 25°C (g/cm ³)	1.02	1.0-1.1

Commentaire :

Les résultats obtenus confirment la classe du bitume analysé. C'est un bitume 40/50. (Spécifications des bitumes purs). (voir annexe III).

Conclusion

Du point de vue caractéristique intrinsèque des granulats, les résultats obtenus sont à la limite des seuils admis pour leur utilisation en couche de roulement pour un faible trafic. La composition chimique et le test de désenrobage prédisent un matériau présentant une mauvaise adhésivité avec le bitume. Ces granulats, si les résultats d'une formulation conventionnelle le confirment ne pourront pas être utilisés en « état » pour une formulation d'un BBSG0/14.

V.3. FORMULATION DE L'ENROBE BITUMINEUX BBSG 0/14 [40]

L'étude de la formulation consiste à choisir la courbe granulométrique qui s'insère dans un fuseau, la compacité du mélange, la stabilité, la tenue à l'eau, et la teneur en liant optimale. Le mélange granulaire étant fixé, la méthodologie consiste à concevoir plusieurs formules avec des modules de richesses différents en vue d'avoir une bonne stabilité du mélange hydrocarboné et une bonne tenue au désenrobage. Ainsi seuls les essais stabilité Marshall et Marshall à la tenue à l'eau sont au programme.

Les étapes de travail suivis par les laboratoires Algériens sont :

1. Choix du mélange granulaire ;
2. Calcul des teneurs en bitume ;
3. Détermination des performances mécaniques des différents mélanges :
 - Essai Marshall (stabilité et fluage Marshall)
 - % de vide
 - Essai Duriez (tenue à l'eau) ; (l'essai Duriez est remplacé par l'adaptation de l'essai Marshall à la tenue à l'eau.
4. Choix de la formule optimale.

V.3.1. Choix du mélange granulaire

L'objectif visé est de maîtriser la disposition de squelette granulaire pour avoir la meilleure aptitude de compactage et qui pourrait conférer à une stabilité du mélange.

Celui-ci se fait par combinaison des fractions granulaires utilisées de manière à ce que le mélange s'insère dans un fuseau de référence.

Le fuseau de référence utilisé est celui d'un béton bitumineux semi grenu 0/14 (BBSG 0/14), dont les valeurs limites sont données dans le tableau ci-dessous ;

Fuseau granulométrique :*Tableau V.13. Fuseau granulaire du mélange BBGS 0/14.*

Tamis	Tamisat	Fuseau	
14	98	94	100
10	74	72	84
6,3	59	50	66
4	48	40	54
2	31	28	40
0,315	12	11	18
0,08	7	7	10

A partir des analyses granulométriques des différentes fractions (0/3, 3/8, 8/15), on attribue un pourcentage pour chaque fraction, ensuite on fait une combinaison des fractions granulaires utilisées de manière à ce que la courbe de mélange s'insère dans le fuseau de référence.

Tableau V.14. Les pourcentages des fractions granulaires pour le mélange.

Fractions	Pourcentage des constituants (%)
Fillers	0
sable 0/3	40
gravier 3/8	20
gravier 8/15	40
Total	100

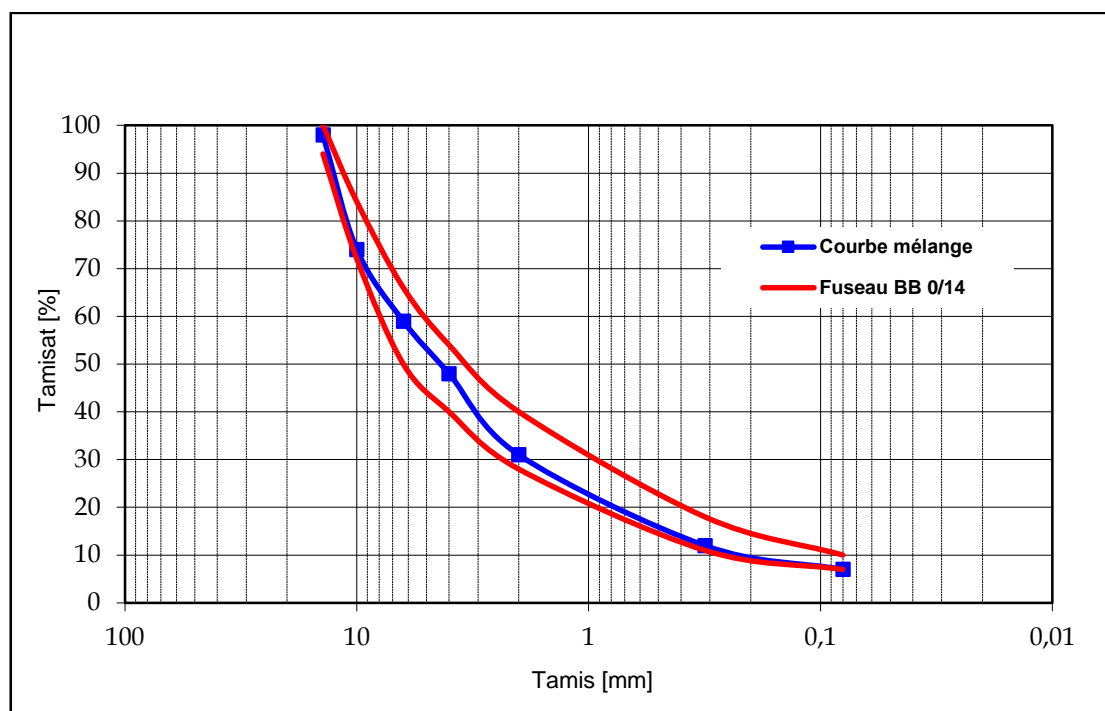


Figure V.3. Fuseau spécifique de la courbe granulométrique du mélange BBSG 0/14.

V.3.2. Teneurs en bitume

On appelle teneur en bitume la masse de liant sur la masse des granulats secs exprimé en pourcentage, pour déterminer cette teneur en liant, on introduit la notion de surface spécifique des granulats notée Σ en m^2/kg selon l'équation **III.1**.

Pour un BBSG le module de richesse varie entre les valeurs : $3.45 < k < 3.9$ selon les Recommandations de C.T.T.P sur l'utilisation des bitumes et des enrobés bitumineux à chaud. Le dosage en liant est calculé avec les trois modules de richesse, on aura donc trois formulations.

1) Calcul de la surface spécifique des granulats:

Tableau V.15. Calcul de la surface spécifique.

Tamis	Mélange proposé	Paramètre de calcul de Σ
20	100,00	G=45%
16	98,00	
14	93,00	
12,5	88,00	
10	74,00	
8	64,00	
6,3	55,00	S=44%
5	48,00	
4	43,00	
3,15	42,00	
2	34,00	
1	24,00	
0,63	18,00	s=6%
0,315	12,00	
0,25	0,00	
0,16	9,00	f=5
0,08	7,00	
Σ		11.13
${}^5\sqrt{\Sigma}$		1.62

2) Calcul de la masse volumique réelle des granulats MVRg:

$$\text{MVRg} = \frac{\text{densité}_{0/3}}{\% 0/3} + \frac{\text{densité}_{3/8}}{\% 3/8} + \frac{\text{densité}_{8/15}}{\% 8/15}$$

$$\text{MVRg} = \frac{2.67}{40} + \frac{2.66}{20} + \frac{2.64}{40} = 2.657 \text{ t/m}^3$$

3) Calcul du coefficient α :

$$\alpha = \frac{2.65}{\text{MVRg}} = \frac{2.65}{2.657} = 0.997 \approx 1.00$$

$$100\Sigma = 0.25G + 2.3S + 12s + 135f$$

$$P = \alpha \cdot k \cdot {}^5\sqrt{\Sigma}$$

On constate que la formulation ayant la composition granulaire du mélange établit trois formulations correspondant aux modules de richesse cités ci-dessus.

Le tableau ci-dessous représente les valeurs de module de richesse et les teneurs en liant résiduel correspondants :

Tableau V.16. Valeurs de module de Richesse et les teneurs en liants correspondants.

Formule	A	B	C
Module de richesse	3,45	3,6	3,75
Teneur en liant (%)	5,58	5,82	6,06
Poids du bitume (g)	536	559	582

V.3.3. Essais de performances mécaniques sur les différents mélanges

Les essais réalisés pour tester les performances mécaniques et déterminer la formulation optimale du BBSG 0/14 sont uniquement les essais MARSHALL réalisés selon le mode opératoire des « Recommandations Algériennes pour l'utilisation des Bitumes et Enrobés Bitumineux » de Février 2004.

On mesure :

- Stabilité et fluage Marshall
- % de vide
- Tenue à l'eau

V.3.3.1. Stabilité et fluage Marshall

Voilà quelques images qui sont prise au cours de l'exécution de l'essai Marshall pour calculer la stabilité et le fluage, elles représentent l'étuve de chauffage, l'enrobé après malaxage, la façon de remplissage des moules Marshall, dame Marshall, bain – Marie, et la presse Marshall,



Figure V.4. Etuve de chauffage.



Figure V.5. Enrobé après malaxage.



Figure V.6. Remplissage des moules Marshall.



Figure V.7. Dame Marshall.



Figure V.8. Epreuves Marshall.



Figure V.9. Bain – Marie.

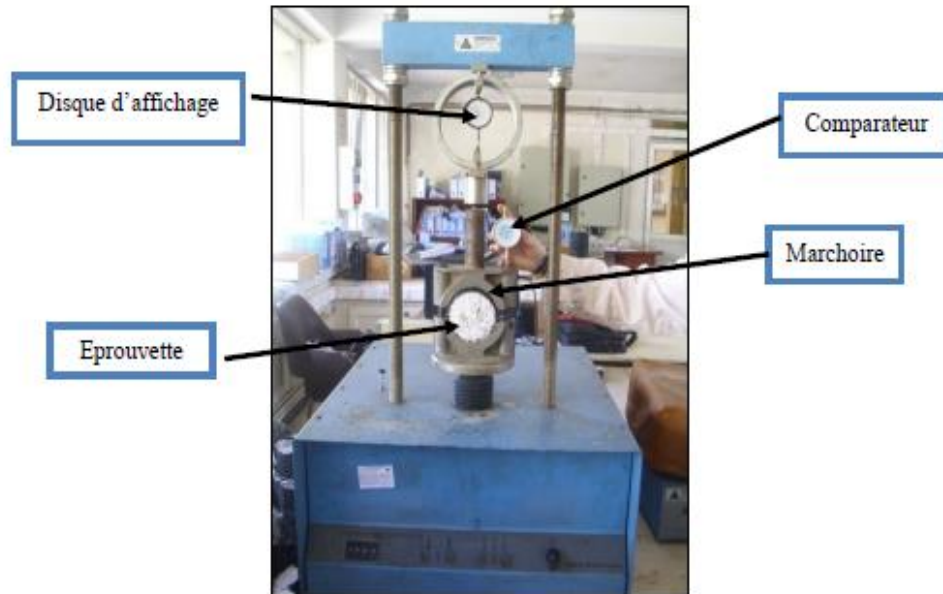


Figure V.10. Presse Marshall.

V.3.3.2. Le pourcentage des vides

Le pourcentage de vide se calcule à partir de l'équation suivante :

$$\% \text{ vides} = 100 - MVA / MVR$$

Avec :

MVA : la masse volumique apparente = masse (kg) / volume (m³).

MVR : la masse volumique réelle correspond à la masse volumique qu'aurait l'enrobé sans vides peut être déterminé à partir des masses volumiques des composants.

La compacité se calcule à partir de l'équation suivante :

$$\text{Compacité \%} = 100 - V \%$$

Avec :

V % : pourcentage des vides

Calcul des masses volumiques :

1) Masse volumique réelle

Masse volumique réelle des granulats MVR (NF EN 1097-6) :

Calculée par la méthode du pycnomètre sur sables et granulats de D = 0,063 à 31,5 mm lavés à et destinés aux mélanges bitumineux, cette méthode est résumée comme suit :

- On lave d'abord la prise d'essai à 0,063 mm ;
- On fait sécher la prise d'essai en étuve ;

- On pèse le pycnomètre avec son bouchon (M1) ;
- On pèse l'ensemble pycnomètre + bouchon + prise d'essai (M2) ;
- On remplit le pycnomètre d'eau à 22°C jusqu'à 3cm environ sous le col. Il faut éliminer les bulles d'air, on remplace le bouchon et on ajoute de l'eau jusqu'à 20 mm environ du repère ;
- Le pycnomètre est placé après dans un bain à 22°C au moins pendant 12 heures. On complète le niveau d'eau jusqu'au repère et on pèse (M3).

La masse volumique de granulats prêts séchés sera calculée par la formule suivante :

$$\text{MVRg} = (\text{M2-M1}) / [\text{V} - (\text{M3-M2}) / \tilde{n}_w] \text{ en Mg/m}^3$$

Avec :

V : volume du pycnomètre prédéterminé selon la norme.

\tilde{n}_w : 0,9978 Mg/m³

Masse volumique réelle MVR :

Correspond à la masse volumique qu'aurait l'enrobé sans vides peut être déterminé à partir des masses volumiques des composants, par la formule suivante :

$$\text{MVR} = 100 / [(\% \text{ G1}/\tilde{n}_1) + (\% \text{ G2}/\tilde{n}_2) + \dots + (\text{Pb}/\text{Db})]$$

% Gi : pourcentages de fractions granulaires.

% Pb : pourcentage en poids du bitume.

\tilde{n}_i : masses volumiques des granulats.

Db : masse volumique du bitume.

Le tableau ci-dessous représente les valeurs des teneurs en liants et des masses volumiques réelles correspondantes des trois mélanges (A, B, et C).

Tableau V.17. Valeurs de la teneur en liant et MVR du mélange.

teneur en liant (%)	MVR du mélange (t/m ³)
5,58	2,45
5,82	2,44
6,06	2,43

2) Masse volumique apparente MVA (NF P 98-250-6) :

C'est le rapport entre la masse de l'échantillon et son volume apparent déterminé par mesure géométrique, on obtient alors MVA, par pesée hydrostatique, les masses volumiques apparentes seront calculés et représentés dans la partie résultats des essais qui vient par la suite.

V.3.3.3. Essai Marshall à la tenue à l'eau selon le mode opératoire de C.T.T.P

(RC imm = Stabilité avec 7 jours en immersion) / (RC sec = Stabilité avec 7 jours sans immersion).

V.3.4. Formulation de l'enrobé bitumineux BBSG 0/14**V.3.4.1. Résultats des essais de formulation**

Le tableau ci-dessous représente le nombre de moule nécessaire pour chaque essai, la quantité de chaque fraction granulaire du mélange et les teneurs en liants pour chaque formulation :

Tableau V.18. Les quantités employées pour les différents constituants.

Essais demandés		Nombre de moules
Essais Marshall		3
Essais Duriez		4
Essais masse volumique		1
Fraction granulaire		Poids (g)
Fillers		0
0/3		3840
3/8		1920
8/15		3840
Total		9600
	Teneur en bitume 40/50 (%)	Poids (g)
Teneur TL1 (A)	5,58	536
Teneur TL2 (B)	5,82	559
Teneur TL3 (C)	6,06	582

Chaque formulation nécessite 8 éprouvettes numérotées de 1 à 8.

1) Mélange « A » avec TL1= 5.58 %

Module de richesse de mélange : $K = 3.45$

Les résultats des essais effectués sur cet enrobé sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau V.19. Le % de vide (TL1).

N° Epreuve	8
Caractéristique	
Masse de l'éprouvette (gr)	1201.7
Volume de l'éprouvette (cm ³)	514.95
Densité apparente (t/m ³)	2.23
Densité réelle (t/m ³)	2.45
Compacité (%)	91.02
% Vide	8.97

Tableau V.20. Résultats de stabilité et fluage Marshall (TL1).

N° de l'éprouvette	1	2	4	Moyenne
Lecteur anneau	59	60	55	-
Stabilité Marshall (KN)	13.69	13.92	12.97	-
Stabilité après corrélation(S) (KN)	13.69	13.92	12.97	13.52
Fluage Marshall (F) (mm)	2.60	2.90	2.80	2.76
Quotient Marshall (S/F) (KN/mm)	5.26	4.80	4.63	4.90

Tableau V.21. Résultats de la tenue à l'eau (TL1).

N° de l'éprouvette	3	5	6	7
Lecture presse	72	78	45	47
RC sec (MPa)	16.70	18.09	-	-
RC sec moyenne (MPa)	17.40			
RC imm (MPa)	-	-	10.44	10.90
RC imm moyenne (MPa)	10.67			
Rapport RCimm/RCsec	0.61			

2) Mélange « B » avec TL2 = 5,82 %

Module de richesse de mélange : K=3,6

Les résultats des essais effectués sur cet enrobé sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau V.22. Le % de vide (TL2).

N° Epreuve	8
Caractéristique	
Masse de l'éprouvette (g)	1205.4
Volume de l'éprouvette (cm ³)	518.15
Densité apparente (t/m ³)	2.22
Densité réelle (t/m ³)	2.44
Compacité (%)	90.98
% Vide	9.01

Tableau V.23. Résultats de stabilité et fluage Marshall (TL2).

N° de l'éprouvette	3	4	5	Moyenne
Lecteur anneau	49	48	49	-
Stabilité Marshall (KN)	11.36	11.13	11.36	-
Stabilité après corrélation(S)(KN)	10.91	10.69	10.91	10.83
Fluage Marshall (F) (mm)	2.90	2.75	2.85	2.83
Quotient Marshall (S/F) (KN/mm)	3.76	3.88	3.82	3.82

Tableau V.24. Résultats de la tenue à l'eau (TL2).

N° de l'éprouvette	1	2	6	7
Lecture presse	53	56	83	72
RC sec (MPa)	-	-	18.81	16.42
RC sec moyenne (MPa)	17.61			
RC imm (MPa)	12.30	12.71	-	-
RC imm moyenne (MPa)	12.50			
Rapport RCimm/RCsec	0.71			

3) Mélange « C » avec TL3 = 6.06 %

Module de richesse de mélange : K= 3.75

Les résultats des essais effectués sur cet enrobé sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau V.25. Le % de vide (TL3).

N° Epreuve	8
Caractéristique	
Masse de l'éprouvette (gr)	1203.5
Volume de l'éprouvette (cm ³)	513.31
Densité apparente (t/m ³)	2.22
Densité réelle (t/m ³)	2.43
Compacité (%)	91.35
% Vide	8.64

Tableau V.26. Résultats de stabilité et fluage Marshall (TL3).

N° de l'éprouvette	2	3	4	Moyenne
Lecteur anneau	53	51	50	-
Stabilité Marshall (KN)	12.30	11.83	11.60	11.91
Stabilité après corrélation(S)(KN)	11.80	11.83	11.13	11.58
Fluage Marshall (F) (mm)	3.85	3.80	3.90	3.85
Quotient Marshall (S/F) (KN/mm)	3.06	3.11	2.85	3.01

Tableau V.27. Résultats de la tenue à l'eau (TL3).

N° de l'éprouvette	1	5	6	7
Lecture presse	65	83	69	88
RC sec (MPa)	-	19.25	-	19.97
RC sec moyenne (MPa)	19.61			
RC imm (MPa)	14.91	-	16.01	-
RC imm moyenne (MPa)	15.46			
Rapport RCimm/RCsec	0.78			

V.3.4.2. Choix de la formule optimale du BBSG0/14

Les résultats des essais stabilité, fluage et tenue à l'eau des différents mélanges sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau V.28. Résultat des essais Marshall et tenue à l'eau de différents mélanges.

Formule granulaire	A	B	C	Spécifications
Teneur en bitume (%)	5.58	5.82	6.06	-
Densité apparente (t/m ³)	2.23	2.22	2.22	-
Densité réelle (t/m ³)	2.45	2.44	2.43	-
% Vide	8.97	9.01	8.64	3 - 5
Stabilité Marshall (KN)	13.52	10.83	11.58	≥ 10.5
Fluage (mm)	2.76	2.83	3.85	2 - 4
Quotient Marshall(S/F) (KN/mm)	4.90	3.82	3.01	-
RCsec (KN)	17.40	17.61	19.61	> 7
RCimm (KN)	10.67	12.50	15.46	-
Rapport RCimm / RCsec	0.61	0.71	0.78	0.75 – 1

Commentaire :

D'après les résultats des essais Marshall stabilité, fluage et tenue à l'eau effectués, nous remarquons que :

- ✓ Les pourcentages de vide des trois éprouvettes des différents mélanges « A », « B » et « C », ne sont pas acceptables, ils dépassent tous le 5%, ce qui n'est pas conformes aux spécifications.

- ✓ Les stabilités et les résistances aux fluages Marshall sont conformes aux spécifications.
- ✓ Le quotient Marshall du mélange hydrocarboné « A » représente la plus grande valeur du quotient ce qui indique que le mélange « A » est plus résistants aux déformations permanentes.
- ✓ La résistance à la compression à sec, et le rapport résistance immersion sur résistance à sec sont acceptables pour la formule « A » par rapport aux spécifications SETRA-LCPC.
- ✓ Les mélanges hydrocarbonés ont montré une tenue à l'eau non satisfaisante à l'exception du mélange hydrocarboné « C ».
- ✓ La formule « A » présente des bonnes performances en termes de stabilité, fluage et quotient Marshall.

Conclusion :

Les essais de performance mécaniques ont révélé que les meilleures performances (stabilité, fluage, quotient Marshall) ont été obtenues avec :

La formule « A » c'est-à-dire la teneur en bitume est de 5.58 % pour le béton bitumineux semi grenu 0/14.

NB : Le quotient Marshall est un indicateur pour la résistance aux déformations, permanentes, contraintes de cisaillement et aussi pour l'orniérage des enrobés bitumineux.

Les plus grandes valeurs du quotient indiquent que les mélanges sont plus résistants aux déformations permanentes.

Formule optimale retenue pour notre BBSG0/14

- **Sable 0/3 : 40%**
- **Grave 3/8 : 20%**
- **Grave 8/ 15 : 40%**
- **Bitume 40/50 : 5.58%**

Cette formulation sera retenue pour l'étude de l'enrobé avec l'ajout de la chaux hydratée à différents taux en vue de l'amélioration de sa tenue à l'eau et la réduction du pourcentage de vides.

V.3.5. Formulation du BBSG0/14 avec ajout de chaux hydratée

La modification des enrobés par l'ajout d'un additif (chaux hydratée), offre une solution pour corriger le problème d'adhésivité, elle consiste à ajuster les caractéristiques du liant d'apport et des granulats d'apports.

Les étapes de formulation sont les suivantes :

- On reprend la formule optimale obtenue dans la première partie soit :
 - **Sable 0/3 : 40%**
 - **Grave 3/8 : 20%**
 - **Grave 8/ 15 : 40%**
 - **Bitume 40/50 : 5.58%**
- On incorpore la chaux respectivement taux suivants : **1, 1.5, 2, et 2.5% du poids total du sable (0/3).**
- On maintient la même méthode de formulation : méthode Marshall.
- On estime l'effet de la chaux, pour chaque taux d'ajout, sur l'adhésivité des mélanges par l'essai AKZOO.
- On choisit le pourcentage de chaux hydratée qui donne les meilleures performances mécaniques ainsi que la meilleure adhésivité granulats – liant.

V.3.5.1. Résultats des essais :

1) Mélange « A' » : l'ajout de 1% de chaux hydraté

Les résultats des essais effectués (essai Marshall, essai Marshall selon CTTP et l'essai AKZOO) sur un béton bitumineux avec l'ajout de 1 % de chaux hydraté, sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau V.29. Le % de vide (1% de chaux).

N° Eprouvette	8
Caractéristique	
Masse de l'éprouvette (gr)	1200
Volume de l'éprouvette (cm ³)	514.14
Densité apparente (t/m ³)	2.33
Densité réelle (t/m ³)	2.45
Compacité (%)	95.10
% Vide	4.89

Tableau V.30. Résultats de stabilité et fluage Marshall (1% de chaux).

N° de l'éprouvette	1	2	7	Moyenne
Lecteur anneau	63	62	66	-
Stabilité Marshall (KN)	14.61	14.38	15.31	-
Stabilité après corrélation(S)(KN)	14.61	14.38	15.31	14.76
Fluage Marshall (F) (mm)	3.20	3.20	3.72	3.37
Quotient Marshall (S/F) (KN/mm)	4.56	4.49	4.11	4.38

Tableau V.31. Résultats de la tenue à l'eau (1% de chaux).

N° de l'éprouvette	3	4	5	6
Lecture presse	85	92	100	95
RC sec (MPa)	-	-	22.73	21.43
RC sec moyenne (MPa)	22.08			
RC imm (MPa)	19.19	20.74	-	-
RC imm moyenne (MPa)	19.97			
Rapport RCimm/RCsec	0.90			

Tableau V.32. Résultat de l'essai AKZOO (1% de chaux).

Fraction granulaire	Taux de granulats recouverts par le liant (%)	Recommandation (%)
0/14	97.22	≥ 90

2) Mélange « B' » : l'ajout de 1.5 % de chaux hydraté :

Les résultats des essais effectués (essai Marshall, essai Marshall selon CTTP et l'essai AKZOO) sur un béton bitumineux avec l'ajout de 1.5 % de chaux hydraté, sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau V.33. Le % de vide (1.5 % de chaux).

N° Eprouvette	8
Caractéristique	
Masse de l'éprouvette (gr)	1199.1
Volume de l'éprouvette (cm ³)	518.96
Densité apparente (t/m ³)	2.34
Densité réelle (t/m ³)	2.45
Compacité (%)	95.51
% Vide	4.48

Tableau V.34. Résultats de stabilité et fluage Marshall (1.5 % de chaux).

N° de l'éprouvette	1	3	7	Moyenne
Lecteur anneau	88	85	83	-
Stabilité Marshall (KN)	20.41	19.72	19.25	-
Stabilité après corrélation(S)(KN)	20.41	19.72	19.25	19.79
Fluage Marshall (F) (mm)	3.00	3.00	2.80	2.90
Quotient Marshall (S/F) (KN/mm)	6.80	6.57	6.87	6.74

Tableau V.35. Résultats de la tenue à l'eau (1.5 % de chaux).

N° de l'éprouvette	2	4	5	6
Lecture presse	102	102	91	93
RC sec (MPa)	23.07	23.03	-	-
RC sec moyenne (MPa)	23.05			
RC imm (MPa)	-	-	20.66	21.07
RC imm moyenne (MPa)	20.86			
Rapport RCimm/RCsec	0.90			

Tableau V.36. Résultats de l'essai AKZOO (1.5 % de chaux).

Fraction granulaire	Taux de granulats recouverts par le liant (%)	Recommandation (%)
0/14	97.37	≥ 90

3) Mélange « C' » : l'ajout de 2 % de chaux hydraté :

Les résultats des essais effectués (essai Marshall, essai Marshall selon CTTP et l'essai AKZOO) sur un béton bitumineux avec l'ajout de 2% de chaux hydraté, sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau V.37. Le % de vide (2% de chaux hydraté).

N° Epreuve	8
Caractéristique	
Masse de l'éprouvette (gr)	1200
Volume de l'éprouvette (cm ³)	520.76
Densité apparente (t/m ³)	2.34
Densité réelle (t/m ³)	2.45
Compacité (%)	95.58
% Vide	4.42

Tableau V.38. Résultats de stabilité et fluage Marshall (2% de chaux hydraté).

N° de l'éprouvette	1	2	3	Moyenne
Lecteur anneau	56	56	61	-
Stabilité Marshall (KN)	12.99	12.99	14.15	-
Stabilité après corrélation(S)(KN)	12.99	12.99	14.15	13.56
Fluage Marshall (F) (mm)	3.90	3.90	3.60	3.75
Quotient Marshall (S/F) (KN/mm)	3.33	3.33	3.93	3.61

Tableau V.39. Résultats de la tenue à l'eau (2% de chaux hydraté).

N° de l'éprouvette	4	5	6	7
Lecture presse	90	87	105	100
RC sec (MPa)	-	-	23.68	22.21
RC sec moyenne (MPa)	22.95			
RC imm (MPa)	20.30	19.62	-	-
RC imm moyenne (MPa)	19.96			
Rapport RCimm/RCsec	0.86			

Tableau V.40. Résultats de l'essai AKZOO (2% de chaux hydraté).

Fraction granulaire	Taux de granulats recouverts par le liant (%)	Recommandation (%)
0/14	97.27	≥ 90

4) Mélange « D' » : l'ajout de 2.5 % de chaux hydraté :

Les résultats des essais effectués (essai Marshall, essai Marshall selon CTPP et l'essai AKZOO) sur un béton bitumineux avec l'ajout de 2.5% de chaux hydraté, sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau V.41. Le % de vide (2.5 % de chaux).

N° Eprouvette	8
Caractéristique	
Masse de l'éprouvette (gr)	1202
Volume de l'éprouvette (cm ³)	520.68
Densité apparente (t/m ³)	2.34
Densité réelle (t/m ³)	2.45
Compacité (%)	95.60
% Vide	4.40

Tableau V.42. Résultats de stabilité et fluage Marshall (2.5 % de chaux).

N° de l'éprouvette	1	2	3	Moyenne
Lecteur anneau	46	47	43	-
Stabilité Marshall (KN)	10.67	10.90	9.97	-
Stabilité après corrélation(S)(KN)	10.67	10.90	9.97	10.51
Fluage Marshall (F) (mm)	3.90	3.30	3.10	3.43
Quotient Marshall (S/F) (KN/mm)	2.76	3.30	3.21	3.06

Tableau V.43. Résultats de la tenue à l'eau (2.5 % de chaux).

N° de l'éprouvette	4	5	6	7
Lecture presse	58	64	78	85
RC sec (MPa)	-	-	17.90	19.50
RC sec moyenne (MPa)	18.70			
RC imm (MPa)	13.26	14.68	-	-
RC imm moyenne (MPa)	13.97			
Rapport RCimm/RCsec	0.74			

Tableau V.44. Résultats de l'essai AKZOO (2.5 % de chaux).

Fraction granulaire	Taux de granulats recouverts par le liant (%)	Recommandation (%)
0/14	97.33	≥ 90

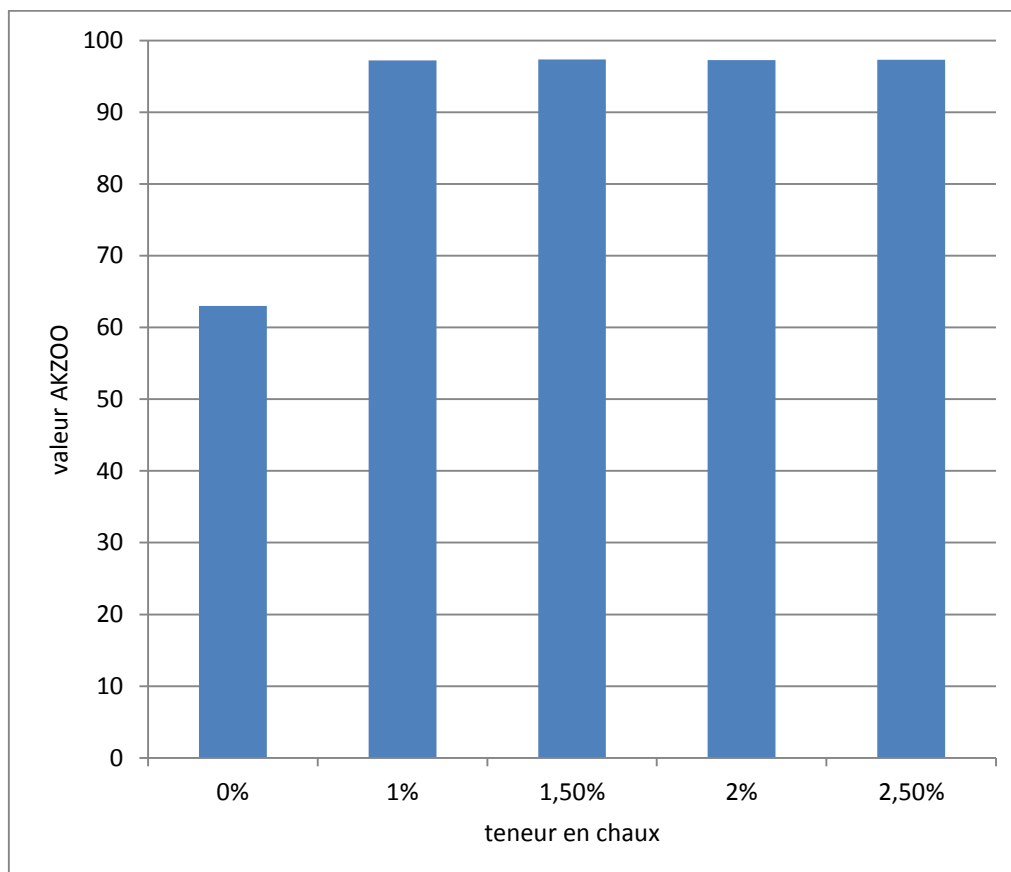
V.3.5.2. Influence du taux d'ajout de chaux sur les performances du BBSG 0/14**a) Résultats AKZOO**

Figure V.11. Histogrammes de l'évolution de l'affinité bitume –granulats.

On remarque une nette amélioration des résultats du test AKZOO, au premier taux d'ajout soit à 1% de chaux hydratée.

A partir de ce taux, les résultats sont quasi identiques.

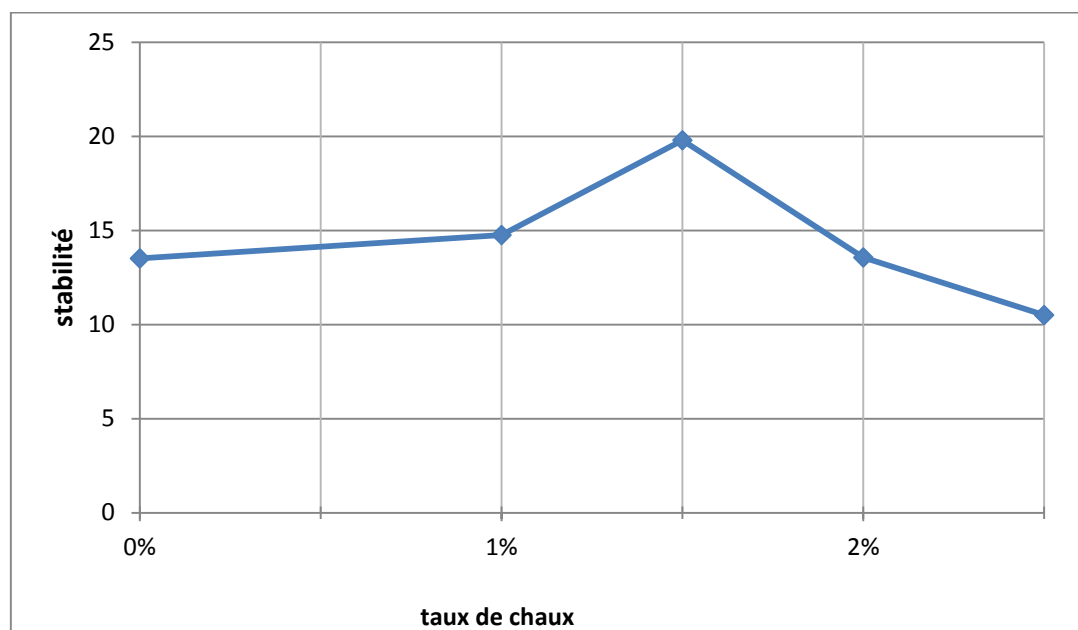
b) Stabilité Marshall

Figure V.12. Courbe de l'évolution de la stabilité en fonction de pourcentage de chaux hydratée ajoutée.

On observe une légère amélioration de la stabilité à 1% d'ajout, un pic à 1.5% puis une chute de la stabilité Marshall.

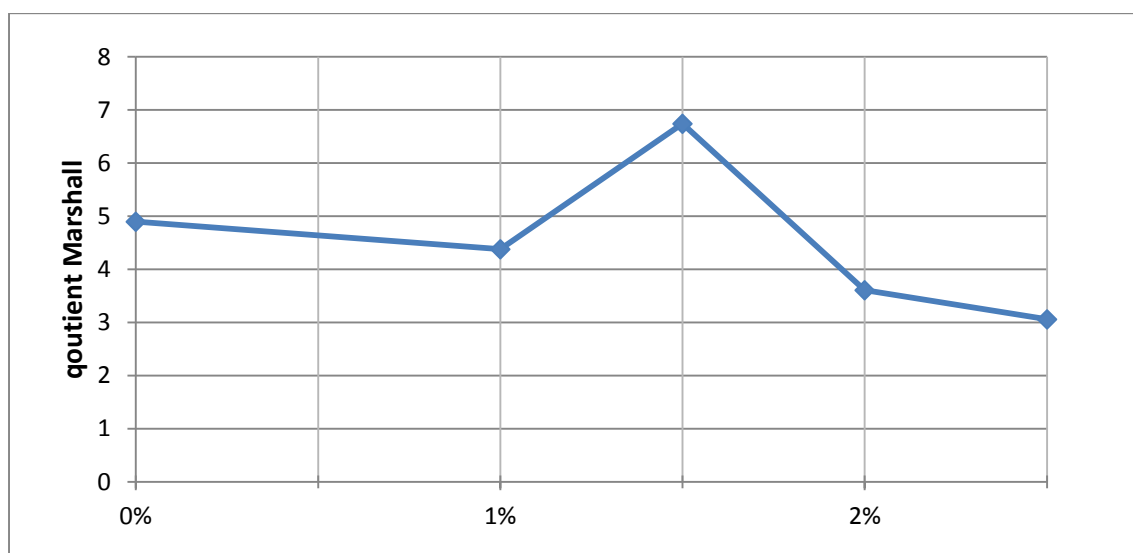
c) Quotient Marshall

Figure V.13. Courbe de l'évolution du quotient Marshall en fonction de pourcentage de chaux hydratée ajoutée.

Le Quotient Marshall, indicateur de l'orniérage, suit la même courbe que la stabilité.

d) Pourcentage de vides

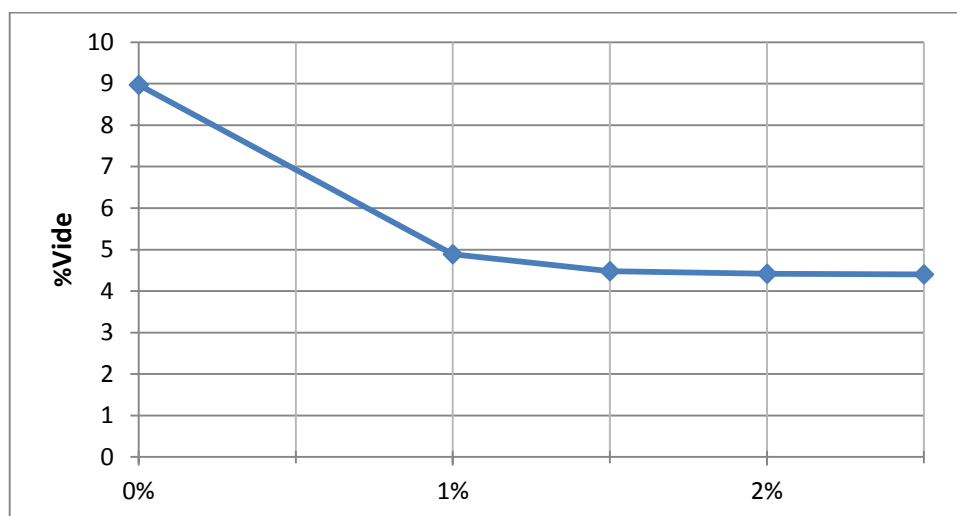


Figure V.13. Courbe de l'évolution du pourcentage des vides en fonction de pourcentage de chaux hydratée ajoutée.

Le % de vides diminue avec l'augmentation de la teneur en chaux avec une tendance à la stabilisation pour les teneurs comprises entre 1.5 et 2.5% ;

e) Tenue à l'eau

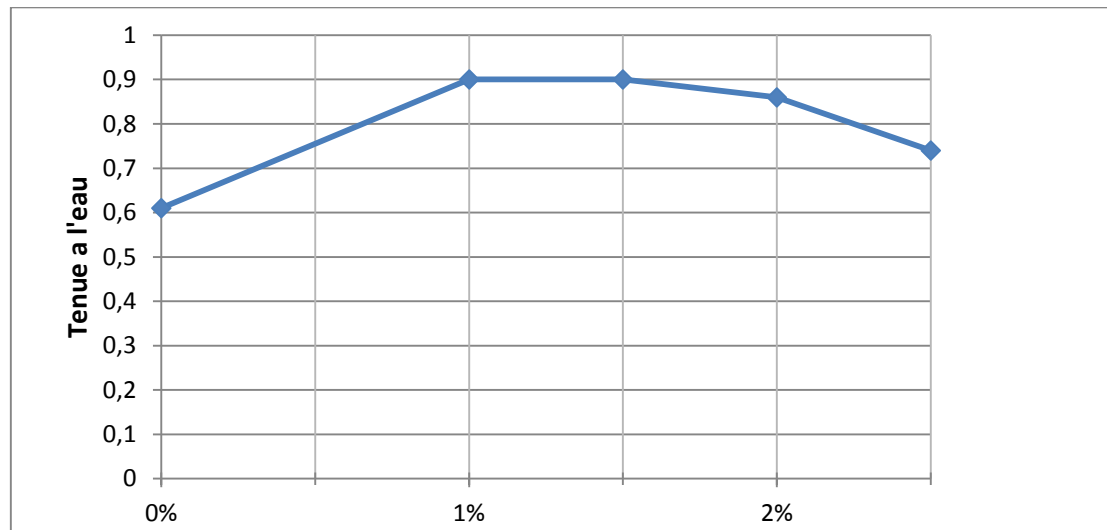


Figure V.14. Courbe de l'évolution de la tenue à l'eau en fonction de pourcentage de chaux hydratée ajoutée.

On observe une nette amélioration entre jusqu'à 1% d'ajout, puis un quasi palier entre 1 et 2% puis une diminution.

L'ajout de chaux, dans l'intervalle de 1 à 2%, a un effet bénéfique sur les performances mécaniques de l'enrobé en comparaison à l'enrobé sans ajout.

V.3.5.3. Choix du pourcentage de chaux optimal pour le BBSG 0/14

L'évolution des caractéristiques mécaniques et l'adhésivité selon différents taux de chaux hydraté est représenté dans le tableau ci-dessous :

Tableau V.45. Récapitulatif des résultats d'essais Marshall et AKZOO des différents mélanges.

Formule granulaire	Formule Optimale	A'	B'	C'	D'	Spécifications
% de chaux hydraté	0%	1	1.5	2	2.5	-
Densité apparente (t/m ³)	2.23	2.33	2.34	2.32	2.34	-
% de Vides	8.97	4.89	4.48	4.42	4.40	3 - 5
Stabilité Marshall (kN)	13.52	14.76	19.79	13.56	10.51	> 10.5
Fluage (mm)	2.76	3.37	2.90	3.75	3.43	2 - 4
Quotient Marshall (KN/mm)	4.90	4.38	6.74	3.61	3.06	-
Tenue à l'eau (rapport RCimm/RCsec)	0.61	0.90	0.90	0.86	0.74	0.75 - 1
Taux de granulats recouverts par le liant (%) (Essai AKZOO d'adhésivité)	63%	97.22	97.37	97.27	97.33	≥ 90

La teneur optimale en chaux hydratée est de 1.5% (comme souligné dans la littérature), à ce taux :

- le % de vide est ramené à un taux acceptable par les recommandations CTPP,
- la tenue à l'eau est également bonne (> 90%) comme le laissait présager le test AKZOO qui passe de 63% à 97.33%.
- La stabilité Marshall gagne 31 %.

V.3.5.6. Conclusion

Les granulats utilisés dans cette étude sont issus du concassage d'une roche dolomie présentant une certaine acidité ($\text{PH} < 7$). Cette caractéristique est un mauvais présage pour l'adhésivité granulat-liant bitumineux. Le test AKZOO a confirmé cette crainte ($0.63 < 0.90$). Les essais de formulation par la méthode Marshall ont confirmé cette problématique (tenue à l'eau = $0.61 < 0.70$) Ils ont révélé par ailleurs un autre problème : le % de vides est trop élevé (> 8) alors qu'il devrait être compris entre 3 et 5%.

L'ajout de chaux hydratée a amélioré la tenue à l'eau. Le % de vide est ramené à un taux acceptable. Les stabilités et les résistances aux fluages sont améliorées. Ainsi, les corrections attendues par la présence de la chaux dans l'enrobé ont été confirmées par les résultats des différents essais réalisés sur nos enrobés.

Le taux optimal d'ajout de chaux retenu est de 1.5%, pour ce taux, le pourcentage de désenrobage accepté par la Méthode Marshall est respecté et la stabilité gagne 31%.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Dans cette étude, il s'agit de formuler par la méthode Marshall, un béton bitumineux semi grenu –BBSG0/14- destiné à la couche de roulement d'une route implantée au Sud Algérien, dans une zone où les matériaux conventionnels font défaut.

Les granulats imposés sont issus d'une roche –dolomie- présentant une mauvaise affinité avec le liant bitumineux. La problématique était d'améliorer la tenue à l'eau de l'enrobé par une technique appropriée. Le choix s'est porté sur l'ajout de chaux hydratée en tant que fillers ; choix dictée par la bibliographie. La méthodologie est de chercher la teneur optimale qui améliore à la fois les performances mécaniques et qui ramène le désenrobage au seuil minimal fixé par la réglementation.

Les essais de formulation par la méthode Marshall sans ajout ont confirmé la problématique posée par ces granulats (tenue à l'eau = $0.61 < 0.70$) et ont montré que le % de vides était trop élevé $> (8)$ alors qu'il devrait être compris entre 3 et 5%.

Le taux optimal d'ajout de chaux retenu dans cette étude est de 1.5%, à ce taux :

- La résistance au désenrobage passe de 0.61 à 0.90 (0.75 est la valeur seuil de la méthode Marshall) ;
- La stabilité gagne 31% ;
- Le quotient Marshall, indice des déformations permanentes, augmente de 27%, ce qui prédit un meilleur comportement à long terme ;
- La compacité s'est améliorée de 4.53%.

Ainsi, l'utilisation de la chaux hydratée a un impact considérable sur la durabilité des enrobés. On peut évoquer un rôle d'agent modifiant multifonctionnel, qui dépasse le simple phénomène de l'amélioration de l'adhésivité bitume-granulats, et ce à des dosages relativement faibles de l'ordre de 1% à 2% de chaux par rapport à la masse globale des agrégats dans le mélange. Ces performances expliquent le regain d'attention à travers le monde sur l'utilisation de la chaux qui reste un produit bon marché.

Enfin, on peut dire que notre projet de fin d'Etude nous a permis de nous familiariser avec les produits noirs, de faire une immersion dans le monde du travail et d'acquérir un certain savoir faire en la matière.

Références Bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. **Catalogue** : « Structures et Types de Chaussées Neuves », LCPC-SETRA, 1998.
- [2]. **BALAY, J., ODÉON, H.**, « Dimensionnement des Structures de Chaussées », Cours de 3^{ème} année de l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, 1999.
- [3]. **DI BENEDETTO, H.**, « Modélisation : écart entre état des connaissances et applications », Journée LAVOC, 23 p, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 16 septembre 1998.
- [4]. **NAHI Samir, LATEF Hassan.** « Application avec les enrobés à module élevé. Etude technico-économique », Projet fin d'étude à Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics. Garidi. Kouba. 2011.
- [5] **NAVARO, J** : « Cinétique de mélange des enrobés recyclés et influence sur les performances mécaniques» thèse de doctorat à l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Bordeaux, 2011.
- [6]. **EL BEZE, L** : « Recyclage à chaud des agrégats d'enrobés bitumineux : Identifiati.on de traceurs d'homogénéité du mélange entre bitume vieilli et bitume neuf d'apport », thèse de doctorat université Aix-Marseille, 2008.
- [7]. **MADANI, T** : «Caractérisation du fonctionnement des tambours sécheurs enrobeurs en vue de leur commande», Thèse de Doctorat l'Université de Versailles Saint-Quentin en Yvelines, 2005.
- [8] **DIEYE CHEIKH** « Simulation de la fatigue des enrobés bitumineux sous l'effet de la fatigue », mémoire d'ingénieur d'état, école nationale des travaux publics, Juin 2001.
- [9]. http://www.memoireonline.com/07/08/1346/m_comparaison-formulation-enrobés-a-chaud-roulement-chausées-tres-circulées0.html
- [10]. **SHELL BITUMES**, « Techniques et Utilisations », Ed. Société des Pétroles Shell, 1991.

Références Bibliographiques

[11]. http://www.eurobitume.eu/fr/national/benelux/types-de-bitume_preparations-et-liants-bitumineux

[12]. http://www.memoireonline.com/08/09/2521/m_Identification-geotechnique-de-materiaux-concasses-types-en-corps-de-chaussees-et-evaluation-de2.html

[13]. **M. GHOMARI F. & Mme BENDI-OUIS A.** « Science des Matériaux de Construction, Analyse granulométrique », Travaux Pratiques, Université Aboubekr Belkaid Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Département Génie Civil, 2007 - 2008.

[14]. **M. GHOMARI F. & Mme BENDI-OUIS A.** « Science des Matériaux de Construction, Formes des granulats », Travaux Pratiques, Université Aboubekr Belkaid Faculté des Sciences de L'ingénieur, Département Génie Civil, 2007 - 2008.

[15]. **labobtp.fr**, « Granulats : Essais normalisés », équivalent de sable, nf p18-598.

[16]. **F.Gabrysiak**, « Matériaux de Construction : Les granulats », chapitre 2, chapitre 3.

[17]. **labobtp.fr**, « Granulats : Essais normalisés », micro Deval, nf en-1097-1.

[18] **LCPC**, « Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés », Septembre 2007

[19]. **Référence d'essai marshall**

[20]<http://www.pr-industrie.com/f-laboratory.html>

[21]. **Mr. BRARA Ali**, « Contribution à l'Etude du Comportement d'un Béton Bitumineux Modifié à la Poudrette de Caoutchouc », Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger ,28/04/2004.

[22]. **HARKAT, B:** « Technique innovant en construction routière pour assise de chaussée ». Mémoire d'ingénieur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger ENP, juin 2010.

[23]. **LCPC**, « Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés », Septembre 2007.

[24]. **GUIDE DE BONNES PRATIQUES**, « La mise en œuvre des enrobés », Bibliothèque et Archives Nationales du Québec, Novembre 2008.

[25]. **Valéry MAUDUIT, Caroline MAUDUIT, Nelly VULCANO-GREULLET, Nathalie COULON, Ferhat HAMMOUM, Hamon DAVID, Jean Pierre KERZREHO, Jean Michel PIAU, Armelle CHABOT.**, « Dégradation Subite Des Enrobés Bitumineux par Période de Gel/Dégel : Analyse de Cas de Terrain et

Références Bibliographiques

Recherche Exploratoire en Laboratoire », Manuscrit, publié dans "Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 279 pp 47-63", 2013.**chapitre IV**

[26]. **P. Rychen, Ing. Civil dipl. EPF, M. Pittet, Techno. Chef de Laboratoire, A-G. Dumont, professeur EPF** « Détermination de La Présence et de l'Efficacité de Dope dans les Bétons Bitumineux », Mandat de recherche VSS 2005/402 sur demande de l'Office Fédéral des Routes (OFROU), École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) Laboratoire des voies de circulation (LAVOC), Février 2010.**chapitre IV**

[27]. **Carmel Jolicoeur PhD., Nathalie Otis, MSc.**, « Etude du Mécanisme d'Adhésion entre un Liant Bitumineux et un Granulat », Réalisé pour le compte du ministère des Transports du Québec, Département de Chimie Université de Sherbrooke, Octobre 2006.**chapitre IV**

[28]. **GRAYMONT**, « Des Produits de Chaux et de Pierre de Qualité qui Améliorent notre Monde », Canada 2012.

[29]. **Bitume.info**, « Recherche et Développement Durable », Septembre 2012.

la littérature, mai 2012.

[30]. **EuLA - L'association Européenne de La Chaux**, « La Chaux Hydratée : un Additif Epruvé pour des Chaussées Bitumineuses Plus Durables », UP chaux.

[31]. **EuLA - L'association Européenne de La Chaux**, « La Chaux Hydratée : un Additif Reconnu pour des Enrobes Bitumineux Plus Durables », revue critique de

Références Bibliographiques

[9]. FONTANA, M., DI BENEDETTO, H., DUMONT, G., « Voies de circulation II », chapitre 5, Cours de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1998.

[13]. THOMAS Romain, « Première Approche de La Capacité Isolante des Enrobes à Forte Porosité » Projet Fin d'Études de l'École Technologie Supérieure de Montréal, Jeudi 16 juin 2011.

[18]. Laboratoire – Matériaux, « Essais sur les granulats », CESSA TP n° 2, STS bâtiment.

[20]. labobtp.fr, « Granulats : Essais normalisés », Pénétrabilité à l'aiguille, point de ramollissement.

[35]. http://www.totalsenegal.com/Os/ossenegal.nsf/V5_OPM/D0B73C987A1AE42BC125_7169005E9AC7?OpenDocument

[36]. Presse à cisaillement giratoire PCG **Méthode SHRP**

C BN CH IV [40] http://www.memoireonline.com/07/08/1346/m_comparaison-formulation-enrobes-a-chaud-roulement-chaussees-tres-circulees12.html

C BN CH II

C BN CH II

[42] http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:http://www.bitumequebec.ca/assets/application/events/files/61281f146822375_file.pdf

Annexes

Annexe I :

*Les essais de dimensionnement
rationnel des chaussées*

ESSAI CBR IMBIBE :

Principe :

On compacte avec une dame standard dans un moule standard, l'échantillon de sol recueilli sur le site, selon un processus bien déterminé, à la teneur en eau optimum (Proctor modifié) avec trois (3) énergies de compactage 25 c/c ; 55 c/c ; 10 c/c et imbibé pendant quatre (4) jours.

Les passants sur le tamis inférieur à 20 mm dans le moule CBR

But :

L'essai C.B.R a pour but de déterminer pour un compactage d'intensité donnée la teneur en eau optimum correspondant, elle permet d'évaluer la portance du sol en estimant sa résistance au poinçonnement.

Domaine d'utilisation :

Cet essai C.B.R est utilisé pour dimensionnement des structures des chaussées et orientation les travaux de terrassements.

ESSAI TRIAXIAL A CHARGEMENTS REPETES (TCR) :

But et Principe :

L'essai triaxial cyclique est utilisé entre autre pour évaluer le comportement contraintes déformations des matériaux granulaires non liés. En effet, ces derniers présentent un comportement fortement non-linéaire dépendant des contraintes appliquées et du nombre de cycles de chargements. Même si cet essai ne prend pas en compte la rotation des contraintes, il simule bien les différentes sollicitations subies par la chaussée lors du passage d'un véhicule.

Mode opératoire:

L'essai consiste à placer une éprouvette cylindrique du matériau à étudier dans une cellule et à lui appliquer un grand nombre de cycles de chargements qui sont la résultante d'une pression de confinement variable σ_3 et d'une contrainte axiale variable σ_1 . Des capteurs de déplacements mesurent les déformations de l'éprouvette suivant l'axe et dans le plan diamétral moyen, ce qui permet de déterminer l'évolution des déformations permanentes en fonction des contraintes appliquées et du nombre de cycles.

Annexe II :

La définition des termes difficiles

DEFINITION DE QUELQUES TERMES DIFFICILES :

Groupements hydroxyles : c'est un groupement -OH, appelé aussi hydroxy, qui se rencontre en particulier dans les alcools et les phénols.

Liens dispersifs (type van der Waal) ou liaison de van der : Waals est une interaction électrique de faible intensité entre atomes, molécules, ou entre une molécule et un cristal.

Un hétéroatome : est un atome d'une molécule organique possédant au moins un doublet d'électrons, mais qui n'est ni du carbone, ni de l'hydrogène et non métallique.

Acide carboxylique : désigne une molécule comprenant un groupement carboxyle (-C(O) OH). La pyridine ou azine, de formule brute C₅H₅N.

Colloïdales : sont les intermédiaires entre les suspensions (particules de taille supérieure à 200 nm) et les solutions vraies (particules de taille inférieure à 2 nm), c'est aussi le mélange d'un liquide et d'une suspension de particules solides de si petites tailles qu'elles se répartissent de façon homogène. Le mélange peut rester liquide ou prendre la consistance d'une pâte ou d'un gel.

Une isotherme d'adsorption : est la courbe reliant l'activité de l'adsorbat contenu dans une atmosphère donnée et connue à la quantité d'adsorbat adsorbée sur un solide en équilibre avec cette atmosphère.

Filler d'apport : c'est un Filler d'origine minérale qui à été produit séparément en usine suivant un processus contrôlé, par opposition au filler présent à l'état de fraction fine dans toute autre classe granulaire.

Annexe III :

Classification des matériaux

LES CATEGORIES DE SABLE ET DE GRAVILLON

Les différentes catégories des sables et des gravillons sont présentés dans les tableaux 1 et 2 selon la norme NF P 18- 545 :

Tableau 1. Les catégories de sables.

Catégorie	Granularité		ES 10%	VB si ES 10% non obtenu
	Position du fuseau	Etendue maximale du fuseau		
a	Refus à $1.58D = 0$	10% à D et à 0.5 mm 15% à 2 mm et 4mm	≥ 60	≤ 1
b	Refus à D=1 à 15%	4% à 0.08mm si fines <12% 6% à 0.08mm si fines \geq 12%	≥ 50	≤ 1.5
c			≥ 40	≤ 2

Tableau 2. Les catégories des gravillons.

Catégorie	Passants (%) à						A ³⁾	P
	2D	1.58D	D	$(d+D)/2^2)$	d	0.63d		
I	Vsi 100	Vsi 99				Vss 5	10	0.5
II			Li 85 ¹⁾	Li 30	Li 1		15	1
III			Ls 99 e 10	Ls 70 e 25	Ls 15 ¹⁾ E 10		20	2

1) Si $D \leq 1.6 d$, Li = 80 à D et Ls = 20 à.
2) Ne s'applique que si $D \geq 2 d$ (voir paragraphe 5.4).
3) Les Vss de A sont majorées de 5 points si $D \leq 10$ mm.

CLASSEMENT DES GRANULATS :

A partir des essais de **Los Angles** et **Micro-Deval** sur les granulats destinés aux travaux routiers, les granulats sont classés suivant cinq catégories :

L'appartenance à une catégorie, nécessite de satisfaire simultanément :

- à la somme des valeurs de **LA** et de **MDE**.
- et aux valeurs de **LA** et **MDE** du tableau.

Tableau 3. Classement des granulats selon la norme P18-101.

Catégories	LA+MDE	LA	MDE
A	≤ 25	≤ 20	≤ 15
B	≤ 35	≤ 25	≤ 20
C	≤ 45	≤ 30	≤ 25
D	≤ 55	≤ 35	≤ 30
E	≤ 80	≤ 45	≤ 45
F	> 80	> 45	> 45

CLASSIFICATIONS DES BITUMES PURS :

Le tableau 4 présente la classification des bitumes purs suivant leur pénétrabilité

Tableau 4. Classification des bitumes routiers purs.

Spécifications des bitumes routiers de grade 20/30 à 160/220	Désignation des classes appropriées				
	Normes	20/30	35/50	50/70	70/100
Pénétrabilité à 25 °C (1/10mm)	NF EN 1426	20 à 30	35 à 50	50 à 70	70 à 100
Température bille et anneau (°C)	NF EN 1427	55 à 63	50 à 58	46 à 54	43 à 51
Densité à 25 °C	EN ISO 2592	1 à 1.1	1 à 1.1	1 à 1.1	1 à 0.07

Annexe IV :

Les Spécifications Algériennes sur les Bétons Bitumineux

LES SPECIFICATIONS ALGERIENNES SUR LES BETON BITUMINEUX

Les spécifications relatives aux caractéristiques mécaniques des bétons bitumineux à chaud sont données, selon la classe du bitume, dans le tableau 5 :

Caractéristiques	Classes du bitume							
	80/100		60/70		40/50		20/30	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Sm	8.5	-	9.5	-	10.5	-	12.5	-
Fm	-	4	-	4	-	4	-	4
% vide des BB 0/14 (couche de roulement)	3	5	3	5	3	5	3	5

Tableau 5. Les performances mécaniques des BB 0/14.

Les spécifications liées à la tenue à l'eau des enrobés bitumineux à chaud sont données, en fonction des zones climatique et du trafic.

Type d'enrobé	Caractéristiques	Zones I et II	
		Trafic (PL.JMA) < 150	Trafic (PL.JMA) ≥ 150
BB 0/14	RCimm/RCsec	> 0.70	> 0.75

Tableau 6. Performances liées à la tenue à l'eau des BB 0/14 (Zones I et II).

Type d'enrobé	Caractéristiques	Zone III	
		Trafic (PL.JMA) < 150	Trafic (PL.JMA) ≥ 150
BB 0/14	RCimm/RCsec	> 0.40	> 0.45

Tableau 7. Performances liées à la tenue à l'eau des BB 0/14 (Zone III).

LES SPECIFICATIONS ALGERIENNES SUR LES BBSG 0/14 UTILISENT DANS LE PROJET :

· **Les classes de BBSG selon le trafic :**

Classe 1 \leq T4 / T5

Classe 2 \leq T1

Classe 3 \leq Tex

· **Épaisseur**

BBSG 0/14 mm de 6 à 9 cm

· **Module de richesse**

K (BBSG 0/14) \leq 3.2

· **Granularité**

Continue en général