

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES
FACULTÉ DES SCIENCES DE L'INGÉNIEUR



Département de génie des matériaux

Filière : génie des matériaux

Option : science des matériaux pour la construction durable

Mémoire fin d'étude master

THEME

**Etude expérimentale des propriétés physico-mécaniques
d'un béton bitumineux modifié à la chaux hydratée**

Présenté par :

TOUATI Nour islam

TAFAT Abd el madjid

Encadreur : Dr. GHERNOIUTI Youcef

Promotion 2015/2016

Résumé :

Les causes des dégradations des enrobés bitumineux peuvent être de natures très diverses. L'adhérence des liants bitumineux sur les granulats est un facteur qui a une influence prépondérante sur la durée de vie d'un béton bitumineux. Une bonne affinité du couple liant/granat favorise l'adhésivité (mouillabilité) avec pour effet une diminution du risque de désenrobage par l'eau et une réduction du risque d'arrachement des grains. Il existe plusieurs techniques, ou traitements, qui permettent d'améliorer l'adhésivité des enrobés bitumineux. Le but de ces techniques est d'améliorer artificiellement les conditions du contact liant granulat.

La présente étude consiste à intégrer la chaux hydratée aux granulats minéraux à des dosages variés : 1% 2% et 4%, pour améliorer les liens entre le liant et les granulats. La démarche s'est faite par deux méthodes, une méthode à sec qui consiste à ajouter la chaux hydratée sous forme de poudre au mélange granulaire. Dans la deuxième méthode la chaux est incorporée sous forme de lait.

Les résultats obtenus montrent que l'incorporation de la chaux dans les enrobés améliore considérablement la résistance au désenrobage, le rapport des résistances (τ/R) atteint la valeur 1. Les propriétés mécaniques telles que la stabilité Marshall et la traction indirecte sont améliorées légèrement.

Table des matières

Page	
Résumé.....	I
Remerciement.....	II
table des matières.....	III
Liste des tableaux.....	IV
Liste des figures.....	V
Liste des photos.....	VI
Introduction	1

PARTIE A : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : LES CHAUSSEES ROUTIERES ET LES ENROBES BITUMINEUX

I.1 LES CHAUSSEES ROUTIERES

I.1.1 Introduction	4
I.1.2 Constitution des chaussées routières	4
I.1.2.1 la couche anticontaminante	5
I.1.2.2 la couche de forme	5
I.1.2.3 la sous-couche	5
I.1.2.4 la couche de fondation	5
I.1.2.5 la couche de base	5
I.1.2.6 la couche de liaison	5
I.1.2.7 la couche de roulement	6
I.1.3 Familles de structures de chaussée	7
I.1.3.1 Les chaussées souples	7
I.1.3.2 Les chaussées semi-rigides	7
I.1.3.3 Les chaussées rigides	8
I.1.4 Sollicitation des couches en enrobés bitumineux	8
I.1.4.1 - Effet du trafic	9
I.1.4.2 -Effet de la température	10

I.2 LES ENROBES BITUMINEUX

I.2.1 Introduction	11
I.2.2 Définition de l'enrobé bitumineux	11
I.2.3 Composition des matériaux bitumineux	11
I.2.3.1 Liants hydrocarbonés	11
I.2.3.1.1 Définition	11
I.2.3.1.2 Fabrication industrielle et composition du bitume	12
I.2.3.1.3 Propriétés mécaniques et rhéologiques du bitume	14

I.2.3.1.4 Principales caractéristiques des bitumes routiers	15
I.2.3.2 Composants minéraux	18
I.2.3.2.1 Caractéristiques géométriques des granulats	19
I.2.3.2.2 Caractéristiques intrinsèques des granulats	19
I.2.4 Liaison bitume – granulat (l’adhésivité)	19
I.2.4.1 Adhésion de bitume sur un granulat sec	20
I.2.4.2 Paramètre influe sur l’adhésivité	21
I.2.5 Bitume dans les routes	22
I.2.5.1 Les enrobés bitumineux	22
I.2.5.2 Les enduits superficiels	22
I.2.6 Formulation des enrobes	22
I.2.6.1 Paramètres influençant sur le choix d'une formulation	23
I.2.6.2 Influence des caractéristiques des composants d'un mélange hydrocarbonés	23
I.2.6.2.1 Influence des granulats	23
I.2.6.2.2 Influence des fines	24
I.2.6.2.3 Influence du bitume	25
I.2.7 Etapes de formulation d’un enrobe bitumineux	26
I.2.7.1 Les classes granulaires	26
I.2.7.2 La teneur en bitume	26
I.2.7.3 La compacité	27
I.2.8 Les propriétés mécaniques des enrobes bitumineux	28
I.2.8.1 Essai de stabilité Marshall	28
I.2.8.2 Essai de la sensibilité à l’eau	29
I.2.9 Différent types des enrobés bitumineux pour la couche de roulement	30
I.2.9.1 Les enrobés à chaud	30
I.2.9.1.1 Les bétons bitumineux semi-grenus (BBSG)	30
I.2.9.1.2 Les bétons bitumineux à module élevé (BBME)	30
I.2.9.1.3 Les bétons bitumineux minces (BBM)	30
I.2.9.1.4 Les bétons bitumineux très minces (BBTM)	30
I.2.9.1.5 Les bétons bitumineux cloutés (BBC)	31
I.2.9.1.6 Les bétons bitumineux drainant (BBDr)	31
I.2.9.1.7 Les enrobés à module élevé (EME)	31
I.2.9.2 Les béton bitumineux à froid (BBF)	33
Conclusion	34

CHAPITRE II : L’UTILISATION DE LA CHAUX HYDRATEE DANS LES ENROBES BITUMINEUX

II.1. Introduction	36
II.2. Historique	36
II.3. La Chaux	37
II.3.1. Définition	37
II.3.2. Familles de chaux	37
II.3.3. Classification	37

II.3.4.Domains d’application	38
II.3.4.1. Dans le domaine du bâtiment	39
II.3.4.2.Dans le domaine du génie civil.....	40
II.3.4.3.Dans le domaine des enrobés bitumineux.....	40
II.4.Comment ajouter de la chaux hydratée a un enrobé bitumineux.....	40
II.4.1.Méthode a sec	40
II.4.2.Méthode de la chaux sèche sur le granulats humide	41
II.4.3.Méthode de la suspension (lait de chaux)	41
II.5. Amélioration apportées par la chaux hydratée aux enrobés bitumineux	41
II.5.1. Meilleure résistance au désenrobage	41
II.5.2. Meilleure résistance a l’orniérage.....	41
II.5.3.Ralentissement du vieillissement du bitume.....	42
II.5.4.Diminution de la fragilité.....	42
II.6. Utilisation actuelle de la chaux dans les mélanges bitumineux en Europe.....	42
Conclusion	44

PARTIE B: ETUDE EXPERIMENTALE

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISEE

ET FORMULATIONS

III.1 Introduction.....	46
III.2 Provenance des matériaux	46
III.2.1 Les granulats	46
III.2.2 Le bitume	47
III.2.3 La chaux	47
III.3 Identification des constituants	47
III.3.1 Caractéristiques intrinsèques des granulats	47
III.3.1.1 Masses volumiques (Nfp 18-301)	47
III.3.1.2 Equivalent de sable (Norme Nf P 18 598)	48
III.3.1.3 résistance a la fragmentation et a l'usure	49
III.3.2 Caractéristiques de fabrications des granulats	49
III.3.2.1 Analyse granulométrique (Nfp 18-560).....	49
III.3.2.3 Coefficient d’aplatissement : (Norme Nf En 933-3)	51
III.3.3 Caractéristique du bitume	53
III.4. Etude De la formulation.....	59
III.4.1 Courbe granulométrique du mélange.....	59
III.4.2 Détermination des teneurs en bitume.....	60
III.4.3 Détermination des mélanges des bétons bitumineux étudiés.....	62
Conclusion	65

CHAPITRE IV : RESULTAT D’ESSAIS ET INTERPRETATIONS

IV.1. ESSAIS REALISES ET DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

IV.1.1 Introduction.....	67
IV.1.2 Confection des éprouvettes.....	67
IV.1.2.1 Préparation des mélanges	67
IV.1.2.1.1 Préparation des mélanges granula.....	67
IV.1.2.1.2 : Conservation	69
IV.1.2.2. Préparation du liant	70
IV.1.2.3. Malaxage	70
IV.1.3. Confection des éprouvettes pour les essais réalisés	71
IV.1.3.1 : Remplissage des moules et compactage	72
IV.1.3.2 : Démoulage	73
IV.1.4 : Equipements et procédures d'essais	74
IV.1.4.1 Essai Marshall	74
IV.1.4.1.1 Principe de l'essai	74
IV.1.4.1.2 Déroulement de l'essai	75
IV.1.4.1.3 Formule de calcul	76
IV.1.4.2. Sensibilité a l'eau	76
IV.1.4.2.1.Principe de l'essai	76
IV.1.4.2.2. Déroulement de l'essai.....	77
IV.1.4.2.3.formule de calcul	80
IV.1.4.3 Détermination de la densité apparente (méthode géométrique).....	80
IV.1.4.3.1 Appareillage supplémentaire pour la méthode géométrique.....	80
IV.1.4.3.2 Formule de calcule	80
IV.1.4.4 Détermination de l'affinité granulat-bitume	81
IV.1.4.4.1 Définition de l'affinité granulat-bitume	81
IV.1.4.4.2 Principe de l'essai.....	81
IV.1.4.4.3 déroulement de l'essai.....	81

IV.2. RESULTATS ET DISCUSSION

IV.2.1 Essai de Marshall.....	84
IV.2.1.1 La densité apparente et la densité absolue.....	84
IV.2.1.2 Pourcentage des vides	85
IV.2.1.3 La compacité	88
IV.2.1.4 Stabilité Marshall.....	91
IV.2.2 Sensibilité a l'eau	95
IV.2.2.1 La densité apparente et la densité absolue.....	95
IV.2.2.2 Pourcentage des vides	96
IV.2.2.3 La compacité	97
IV.2.2.4 Détermination de la résistance à la traction indirecte et le rapport (r/R)....	98
IV.2.2.4.1 la résistance à la traction indirecte	98
IV.2.2.4.2 Le rapport (r/R)	100
IV.2.3. l'affinité granulat-bitume (l'adhésivité)	102

Liste Des Tableaux

CHAPITRE I : LES CHAUSSEES ROUTIERES ET LES ENROBES BITUMINEUX

Tab (I.1) : Les essais pour mesurer les propriétés des enrobées

Tab (I.2) : Synthèse des paramètres pouvant intervenir dans les mécanismes d'adhésivité liant- granulats

Tab (I.3): caractéristiques des zones climatiques en Algérie

Tab (I.4): Le choix de la classe de bitume selon le trafic et l'altitude

Tab (I.5): Relation entre les facteurs et les propriétés recherchées

Tab (I.6) : Les performances mécaniques des bétons bitumineux 0/14 selon CTPP

Tab (I.7) : Epaisseur d'utilisation des bétons bitumineux

CHAPITRE II : L'UTILISATION DE LA CHAUX HYDRATEE DANS LES ENROBES BITUMINEUX

Tab (II.1) : Utilisation actuelle de la chaux dans les mélanges bitumineux en Europe

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISEE ET FORMULATIONS

Tab(III.1) : Provenance des granulats utilisés.

Tab (III.2): La masse volumique absolue et apparente des granulats et de chaux utilisée.

Tab (III.3): ES de sable 0/3 utilisé

Tab (III. 4) : Résultats des essais LA et MDE

Tab (III.5) : Analyse granulométrique des granulats utilisés.

Tab(III.6) : Grilles à fentes

Tab(III.7) : Caractéristiques de fabrication des agrégats.

Tab (III.8) : Caractéristiques du bitume 35/50

Tab (III.9): Composition du mélange granulométrique.

Tab(III.10): Teneurs en liant

Tab(III.11) : poids de mélange d'enrobé bitumineux choisie

Tab(III.12) : mélanges étudiés

Liste Des Tableaux

CHAPITRE IV : RESULTAT D'ESSAIS ET INTERPRETATIONS

Tab (IV.1) : Variation de la densité apparente et absolue

Tab (IV.2) : Valeurs de V_v

Tab (IV.3) : Variation de la compacité

Tab (IV.4) : Variation de la stabilité Marshall

Tab (IV.5) : Variation de la densité apparente et absolue

Tab (IV.6) : Valeurs de V_v

Tab (IV.7) : Variation de la compacité

Tab (IV.8) : sensibilité à l'eau

Tab (IV.9) : résultats d'adhésivité des matériaux

Liste Des Figures

CHAPITRE I : LES CHAUSSEES ROUTIERES ET LES ENROBES BITUMINEUX

- Fig (I.1)** : principe de structure d'une chaussée
- Fig (I.2)** : structure de type souple.
- Fig (I.3)** : structure de type semi-rigide.
- Fig (I.4)** : structure de type rigide
- Fig (I.5)** : Sollicitations induites par le trafic.
- fig (I.6)** : effort transmis par une roue sur la chaussée
- Fig (I.7)** : formation d'une ornière sous l'effet d'une charge roulante
- Fig (I.8)** : fabrication des bitume par raffinage du béton (schéma de principe)
- Fig (I.9)** : schéma de séparation chimique des constituants du bitume.
- Fig (I.10)** : Mesure de la pénétrabilité.
- Fig (I.11)** : Mesure de la température de ramollissement Bille et Anneau.
- Fig (I.12)** : Mesure de la ductilité
- Fig (I.13)**: Représentation schématique de l'énergie de cohésion et d'adhésion.
- Fig (I.14)** : Procédés d'enrobage en fonction de la température de fabrication
- Fig (I.15)**: L'influence de l'ajout de filler
- Fig (I.16)**: L'influence sur le surdosage de filler

CHAPITRE II : L'UTILISATION DE LA CHAUX HYDRATEE DANS LES ENROBES BITUMINEUX

- Fig (II.1)** : classification de la chaux proposé par la norme NF EN 459-1
- Fig (II.2)** : représentation schématique des types de chaux et des domaines d'application.

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISEE ET FORMULATIONS

- Fig(III.1)**: Principe d'essai d'équivalent de sable par piston
- fig (III.2)** : courbes granulométriques de différentes fractions granulaires utilisées
- Fig (III.3)**: Courbe granulométrique du mélange granulaire.
- Fig(III.4)** : schéma de travail

Liste Des Figures

CHAPITRE IV : RESULTAT D'ESSAIS ET INTERPRETATIONS

Fig (IV.1): Variation des vides en fonction des pourcentages de la chaux

Fig (IV.2): Variation des vides en fonction des pourcentages de la chaux

Fig (IV.3): Variation de la compacité en fonction des pourcentages de la chaux hydratée

Fig (IV.4): Variation de la compacité en fonction des pourcentages de la chaux hydratée

Fig(IV.5): Variation de stabilité Marshall en fonction des pourcentages de la chaux hydratée

Fig (IV.6): Variation de stabilité Marshall en fonction des dosages de lait de chaux

Fig (IV.7): pourcentage de gain de la stabilité Marshall

Fig (IV.8): Influence du pourcentage de la chaux sur la résistance à traction indirecte des enrobés sec et humide.

Fig (IV.9): Influence du dosage de lait de chaux sur la résistance à traction indirecte des enrobés sec et humide

Fig (IV.10): Influence du pourcentage de la chaux sur la sensibilité à l'eau des enrobés.

Fig (IV.11): Influence du dosage de lait de chaux sur la sensibilité à l'eau des enrobés.

Liste Des Photos

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISEE ET FORMULATIONS

Photo (III.1): fractions granulaires 0/3, 3/8 et 8/15 utilisées.

photo (III.2) : Bitume 35/50

Photo (III.3) : remplissage de moule

photo (III.4) : le moule dans le ductilimetre

photo (III.5) : opération d'étirage

photo (III.6) : remplissage des moules

photo(III.7) : assemblage de l'appareil

photo (III.8) : la bille touche la plaque

photo (III.9) : remplissage des gobelets

photo (III.10) : mesurer la profondeur d'enfoncement

CHAPITRE IV : RESULTAT D'ESSAIS ET INTERPRETATIONS

photo (IV.1) : granulats traitées par la chaux hydratée

photo (IV.2) : malaxage des constituants (chaux+granulats)

photo (IV.3) : préparation de lait de chaux

photo (IV.4) : opération de malaxage

photo (IV.5) : stockage et conservation des mélanges granulaires.

photo (IV.6) : bitume 35/50

photo (IV.7) : L'operation de malaxage .

Photo (IV.8) : béton bitumineux obtenu après malaxage.

Photo (IV.9) : Exemple d'éprouvette confectionnée pour les essais étudié

photo (IV.10) : pesage et remplissage

photo (IV.11) : L'opération de compactage

Photo (IV.12) : L'opération de démoulage

Photo (IV.12) : Principe de l'essai Marshall

Photo (IV.13) : éprouvettes dans le bain thermostatique réglé à $60^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$

Photo (IV.14) : L'éprouvette dans les mâchoires

Photo (IV.15) : éprouvettes conservé à l'air.

Photo (IV.16) : éprouvettes immergé dans l'eau.

Photo (IV.17) : éprouvettes protégés avec un sac de plastique

Photo (IV.18) : éprouvettes immergés dans l'eau

Liste Des Photos

Photo (IV.19) : opération d'essai de traction indirecte

Photo(IV.20) : Type d'éprouvette écrasé par traction indirecte (fendage).

Photo (IV.21) : pied à coulisse

Photo (IV.22) : granulats enrobés

Photo (IV.23) : Bouteille

Photo (IV.25) : Estimation de degré d'enrobage.

Photo (IV.24) : les bouteilles dans la jarrette de MDE

Introduction générale

Introduction générale

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

- Être 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);
- Être 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;
- Être facile d'entretien.

Les propriétés mécaniques et la durabilité des enrobés bitumineux sont assurées par la stabilité de l'édifice granulaire, par les propriétés cohésives du bitume et par une bonne adhésion entre le bitume et les granulats.

Les dégradations causées par l'eau sont fréquentes pour les mélanges bitumineux. Elles se manifestent habituellement par la perte progressive de granulats en surface (Le lien entre les granulats et le bitume s'affaiblit en présence d'eau), jusqu'au point où il n'est plus suffisant pour retenir les granulats. Ce phénomène est généralement qualifié de désenrobage. Ces dégradations peuvent entraîner la formation de nids de poule. Il existe plusieurs techniques, ou traitements, qui permettent d'améliorer l'adhésivité des enrobés bitumineux. Le but de ces techniques est d'améliorer artificiellement les conditions du contact liant granulat.

Il est scientifiquement prouvé que la chaux hydratée a des effets bénéfiques sur les mélanges bitumineux utilisés pour la construction des routes. Ce fait a été très largement étudié aux États-Unis, où la chaux hydratée est ajoutée à 10% des enrobés à chaud produits chaque année. En Algérie, l'utilisation de la chaux hydratée est donc moins répandue. Une étude expérimentale a été menée pour évaluer les propriétés physico-mécaniques, des bétons bitumineux étudiés .

A cet effet, cette étude vise à valoriser la chaux hydratée comme additif granulaire multifonctionnelle dans les enrobés bitumineux par deux méthodes d'incorporation

Le présent manuscrit est subdivisé en quatre (4) chapitres, répartie en deux chapitres pour la synthèse bibliographique et deux autres pour le travail expérimental.

Le **chapitre I** est consacré aux généralités sur les chaussées routières et les enrobes bitumineux;

Le **chapitre II** décrit un état de l'art sur l'utilisation de la chaux hydratée dans les enrobés bitumineux ;

Le **chapitre III** présente la caractérisation des matériaux utilisés, dont nous présentons les caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux utilisés (bitume, chaux hydratée, granulats, chaux vive). .

Le **chapitre V** donnera les résultats des différents essais réalisés et leurs interprétations.

Enfin on clôtura notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I

Les chaussés routières

et

les enrobes bitumineux

CHAPITRE I : LES CHAUSSEES ROUTIERES ET LES ENROBES BITUMINEUX

I.1 LES CHAUSSEES ROUTIERES

I.1.1 Introduction:

La chaussée est la partie de la route sur laquelle se fait la circulation des véhicules. Elle est constituée par la superposition de plusieurs couches résultant de travaux en déblai ou en remblai et transmettant les charges en sol support.

Dans la première partie de ce chapitre nous avons essayé de citer les composants d'une chaussée en suite nous parlons sur les familles de structure et finalement nous décrivons les principales cause de détérioration d'une chaussée.

I.1.2 Constitution des chaussées routières :

Les chaussées se présentent comme des structures multicouches (fig.I.1)

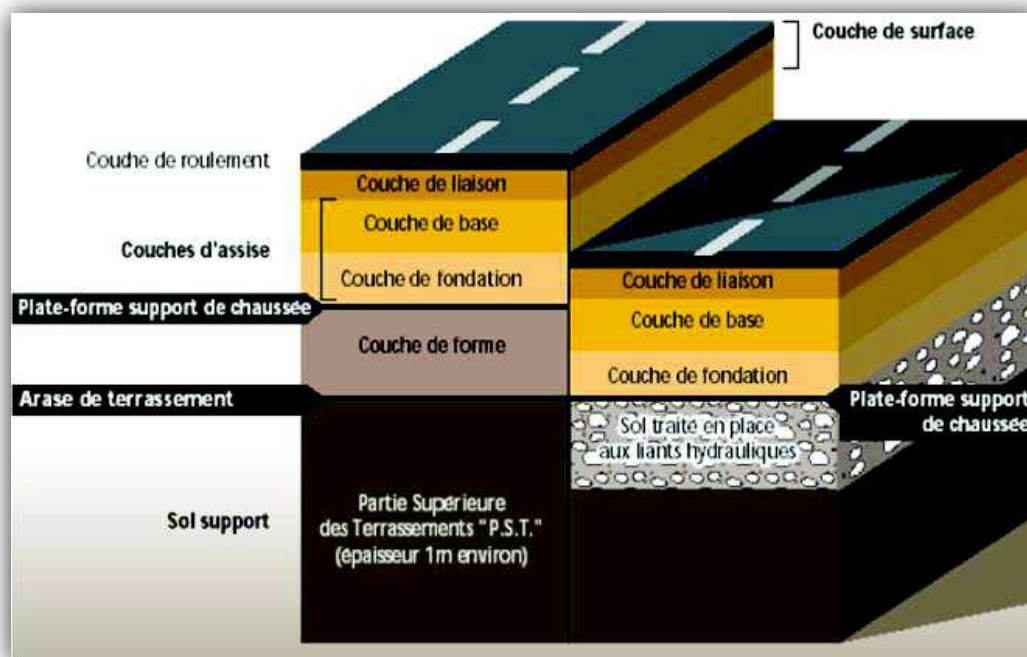


Fig. (I.1) : principe de structure d'une chaussée

Ces différentes couches ont un rôle répartiteur des contraintes. La chaussée doit avoir une épaisseur telle que la pression verticale transmise au sol soit suffisamment faible afin que celui-ci puisse la supporter sans dégradation.

Les différentes couches mises en œuvre successivement sont les suivantes [1] :

I.1.2.1 la couche anticontaminante :

La couche anticontaminante est constituée d'un géotextile non tissé ou, plus rarement d'une couche de sable de 5cm d'épaisseur .en présence de terrains argileux, elle évite la pollution de la chaussée par des remontées de terre, sous l'action combinée des charges roulantes et des intempéries.

I.1.2.2 la couche de forme :

La couche de forme constitue un élément de transition mis en œuvre à partir de l'arasement du terrassement, en fonction des caractéristiques du sol, remblai ou terrain en place. Elle assure une certaine homogénéisation afin de mieux répartir les charges sur le terrain support. Elle est réalisée à l'aide de matériaux prélevés sur place, ou de grave naturelle ou traitée.

I.1.2.3 la sous-couche :

La sous-couche est éventuellement rapportée sur la couche de forme lorsque le sol support est de faible résistance. Elle est constituée par un apport de matériaux traités ou non.

I.1.2.4 la couche de fondation :

La couche de fondation est l'élément de la structure de la chaussée placé au contact de la plate-forme ou de la couche de forme. Son rôle est de résister aux efforts verticaux transmis par la couche de base, et d'assurer un bon report des charges sur les couches inférieures afin que les pressions qui en résultent au niveau du support restent dans les limites admissibles. Selon la nature du trafic, elle est constituée de grave naturel ou traitée. Son épaisseur peut varier de 20 à 60cm en fonction de la qualité du sol d'assise, du type de trafic et des risques de gel.

I.1.2.5 la couche de base :

La couche de base est l'élément de structure soumis directement aux efforts provenant des couches de surface. Elle permet également le réglage des pentes de la chaussée. Selon la nature de trafic, elle se compose de grave naturelle ou traitée, ou de matériaux concassés.

I.1.2.6 la couche de liaison :

La couche de liaison correspond à la partie inférieure des éléments de surface. Couche intermédiaire anti-orniérage, elle doit avoir une bonne planimétrie et posséder des

caractéristiques et géométriques voisines de la couche de roulement. Elle est réalisée avec des bétons bitumineux ou en béton de gravillons. Dans ce dernier cas, elle fait partie intégrante du revêtement superficiel.

I.1.2.7 la couche de roulement :

La couche de roulement correspond au revêtement superficiel de la chaussée. Elle doit présenter les caractéristiques requises pour répondre aux contraintes dues à la circulation des véhicules : freinage et arrêts brusques, démarrages, virages serrés et main d'œuvres diverses. Elle possède également de bonne qualité de surface : être parfaitement unie, offrir une adhérence satisfaisante, ne pas constituer une source de nuisances sonores.

Le matériau retenu répond à cinq critères d'importance différente ; certains étant contradictoires entre-deux .ils dépendent de la localisation de la voie et de la nature du trafic et portent sur :

- les caractéristiques superficielles : planimétrie (écoulement des eaux de ruissellement), rugosité (qualité d'adhérence), acoustique (absence de bruits de roulement), étanchéité ;
- la durabilité : résistance au trafic (résistance à l'usure et à l'abrasion), aptitude aux répartitions, facilite d'entretien ;
- la facilité de mise en œuvre ;
- l'esthétique : couleur, forme, aspect ;
- l'aspect économique.

Plusieurs matériaux peuvent être retenus. Le choix est effectuée en fonction du type de voie et de trafic, un ou plusieurs des critères ci-dessus étant privilégiés.

Ces matériaux sont soit naturels (pavés ou dalles en pierre), soit à base de matériaux agglomérés à l'aide de liants hydrocarbonés (enrobés ou enduit superficiels, asphalte).ou de liants hydrauliques (béton coulé ou pavés en béton).

Remarque :

La constitution de la chaussée peut être simplifiée et ne pas comprendre la totalité des couches énoncées précédemment .c'est le cas lorsque le support est de bonne qualité, que le

trafic est faible ou que les matériaux utilisés sont à base de liant hydrauliques (la couche de roulement est confondue avec la partie supérieure de la couche de base) [1].

A fin d'éviter toute déformation anormale de la chaussée, les voies ou les aires recevant une circulation lourde font l'objet d'un traitement particulier, tant pour la fondation que pour le revêtement superficiel

I.1.3 Familles de structures de chaussée :

Les chaussées sont constituées selon l'un des trois principes suivants : les chaussées souples, rigides ou semi-rigides. [1]

I.1.3.1 Les chaussées souples :

Les chaussées souples admettent de légères déformations sous l'action des charges avant de reprendre leur aspect initial. Elles comportent des matériaux traités avec des liants hydrocarbonés. L'épaisseur de différentes couches assure une bonne répartition des efforts au niveau du sol support à condition de ne pas dépasser les contraintes admissibles (fig.I.2)

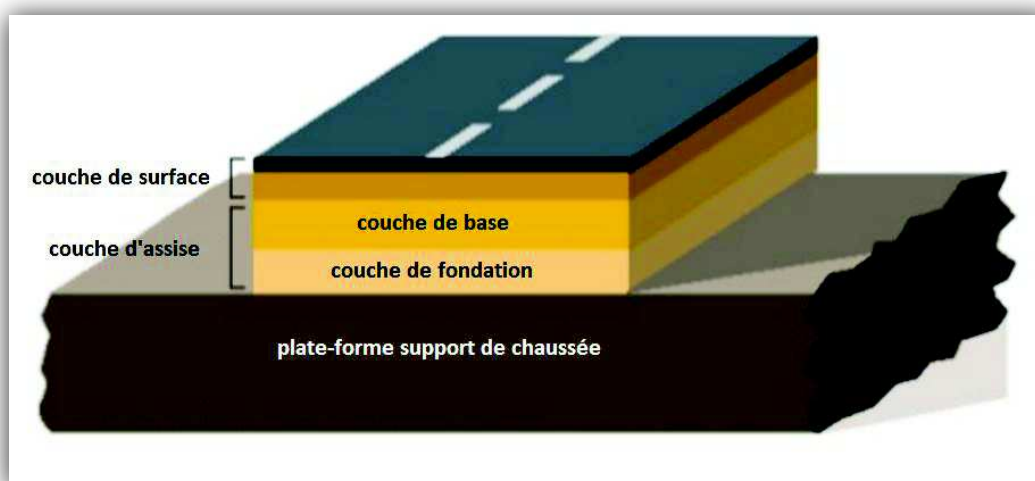


Fig (I.2) : structure de type souple.

I.1.3.2 Les chaussées semi-rigides :

Les chaussées semi-rigides ont une composition mixte. Les couches d'assise sont réalisées avec des matériaux à base de liants hydrauliques, alors que les couches de surface sont traitées aux liants hydro- carbonés. (fig.I.3)

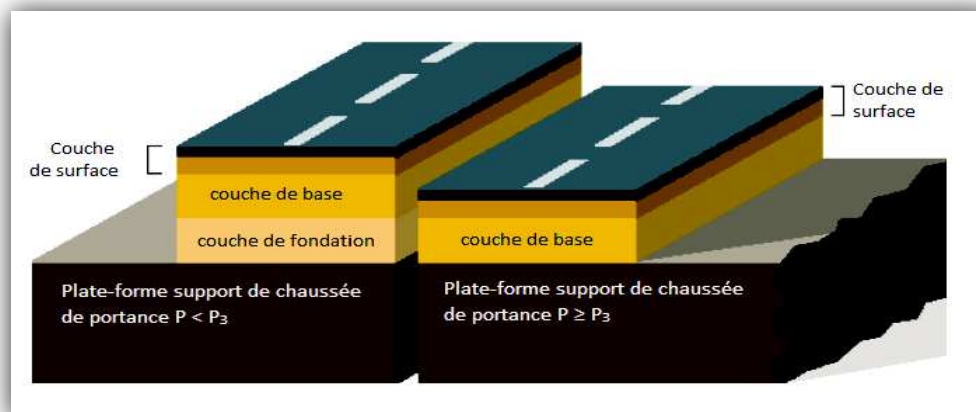


Fig (I.3) : structure de type semi-rigide.

I.1.3.3 Les chaussées rigides:

Les chaussées rigides sont réalisées avec des matériaux à base de ciment. Elles présentent une grande rigidité, ce qui permet d'intéresser une plus grande surface de chaussée sous l'action des charges, et de réduire les sollicitations au niveau du sol support. Leur épaisseur est donc moins importante que celle des chaussées souples (fig. I.4)

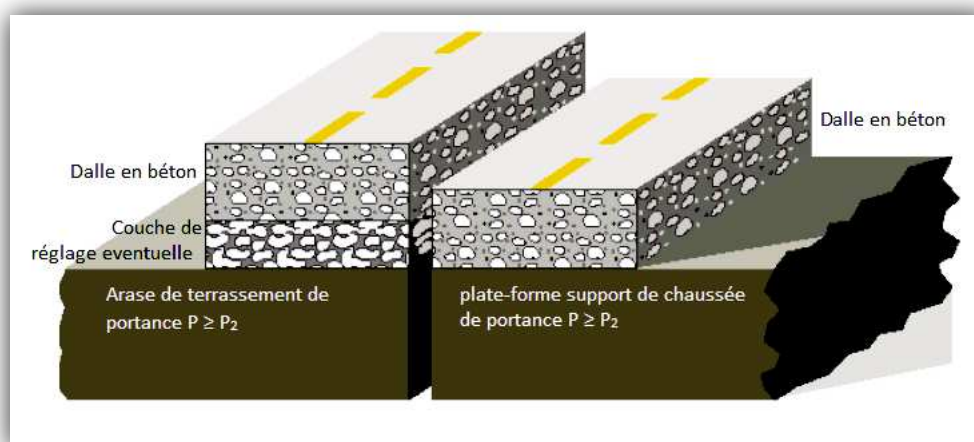


Fig (I.4) : structure de type rigide

I.1.4 Sollicitation des couches en enrobés bitumineux :

Les chaussées sont soumises à différentes contraintes qui entraînent une dégradation plus ou moins rapide (Fig. I.5). Afin d'apporter une réponse adéquate, elles sont constituées par plusieurs couches de matériaux qui reportent les efforts sur le sol sous-jacent.

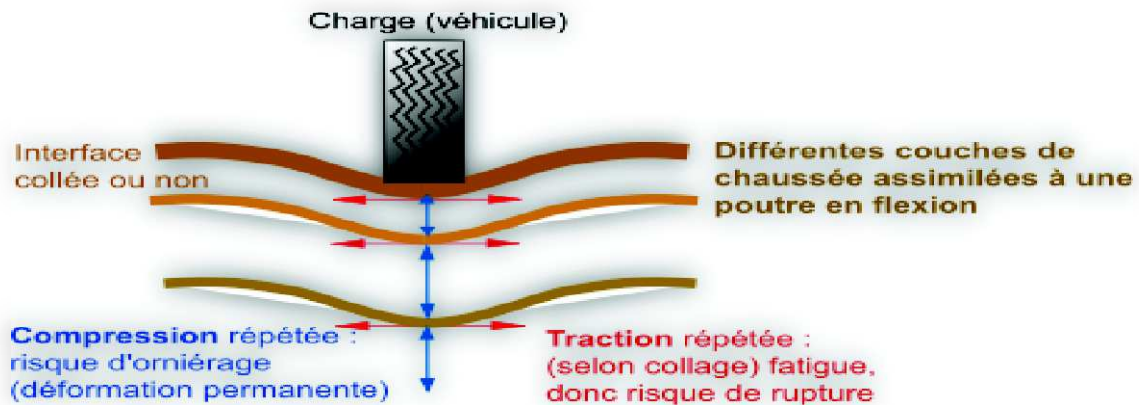


Fig (I.5) : Sollicitations induites par le trafic.

Les contraintes sont de deux ordres : mécaniques, par l'action répétée d'une charge roulante, un essieu de véhicule léger ou de poids lourds (le trafic) ; physiques, par l'action alternée des intempéries et du rayonnement solaire (effet de température).

I.1.4.1 - Effet du trafic:

Dans les conditions normales de circulation la partie de surface des chaussées en contact avec la roue est soumise à trois séries de sollicitations

- un effort normal vertical correspondant à la charge ; (N)
- un effort tangentiel correspondant à un effet de glissement dans le sens de la marche, dans le cas de freinage par exemple ; (T)
- un effort transversal dû à un effet de vent latéral ou de charge excentrée, entre autres. (G)

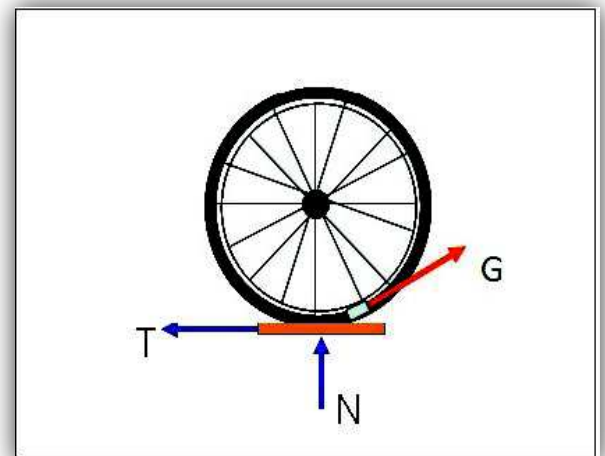


fig (I.6) : effort transmis par une roue sur la chaussée

Sous cette action répétée. Quatre types de dommages risquent d'apparaître, correspondant chacun à des actions différentes :

- l'usure superficielle de la couche de roulement due aux efforts tangentiels
- la formation d'ornières occasionnées par le fluage des différentes couches sous l'action des efforts verticaux et tangentiels (fig.I.7) ;
- la fatigue des couches provoquée par leur flexion sous l'effet de charges ;

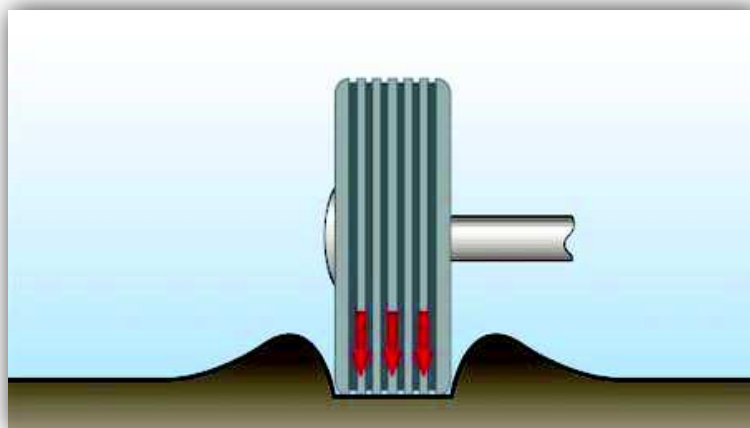


Fig (I.7) : formation d'une ornière sous l'effet d'une charge roulante

I.1.4.2 -Effet de la température : [2]

Outre les chargements mécaniques, les chaussées subissent des chargements consécutifs aux variations de la température. Ces variations thermiques entraînent des changements de la rigidité du mélange : à température basse le mélange bitumineux est rigide et fragile tandis qu'à haute température la rigidité du mélange chute et sa ductilité augmente.

D'autre part, le changement de température peut entraîner des contraintes et des déformations au sein des matériaux en raison des contractions-dilatations thermiques.

Ces actions diverses, agissant simultanément sur le revêtement bitumineux conduisent aux dégradations couramment observées [2], notamment:

- Les fissurations de surface sous la forme de fissures isolées ou, dans les cas les plus graves, sous la forme de faïençage généralisé,
- Les déformations permanentes (ou orniéage) suite à l'accumulation de déformations irréversibles,
- Les dégradations de surface sous la forme de polissage des granulats, les désenrobage et perte de gravillons, les pelades et les nids de poule.

Conclusion:

L'analyse dans les paragraphes précédents, a permis de souligner la nécessité d'interposer, entre le véhicule et le sol, un écran qui aura pour but de répartir les charges sur une plus grande surface et de réduire ainsi les pressions transmises au sol jusqu'à une valeur admissible. La chaussée constitue cet écran.

Une couche granulaire traitée au bitume présente l'inconvénient d'avoir un module variable en fonction de la température et de la durée d'application de la charge. Son comportement dépend beaucoup du climat et de la déformabilité des couches inférieures.

I.2 LES ENROBES BITUMINEUX :

I.2.1 Introduction:

Dans ce chapitre nous allons définir les enrobés bitumineux. Tout d'abord nous présentons brièvement quelques généralités sur l'enrobé bitumineux et ses composants (bitume et granulats) avec les caractéristiques appropriés de chacun d'eux.

Ensuite, nous étudions la formulation de l'enrobé en considérant les paramètres suivant: la teneur du bitume, la dureté du bitume et la grosseur des granulats...qui ont des influences sur la compacité, la mise en œuvre et la durabilité..., ainsi que les principaux essais de caractérisation selon les normes pour obtenir un enrobé selon le choix désiré.

Enfin, quelques types de bétons bitumineux utilisés dans la couche de roulement.

I.2.2 Définition de l'enrobé bitumineux:

L'enrobé bitumineux est un mélange dans une proportion choisie de granulats et de liant hydrocarboné. Dans ce mélange, le liant hydrocarboné est principalement responsable de la cohésion tandis que le squelette minéral constitué par les granulats assure la rigidité de l'ensemble.

I.2.3 Composition des matériaux bitumineux :

I.2.3.1 Liants hydrocarbonés

I.2.3.1.1 Définition:

C'est un mélange complexe d'hydrocarbures naturels non volatils de poids moléculaire élevé [3], appartenant en majorité aux groupes aliphatiques à chaînes linéaires ou ramifiées, naphténiques ou cycliques et saturés. Il contient en moyenne 80 à 85 % de carbone, 10 à 15 % d'hydrogène, 2 à 3 % d'oxygène et, en moindre quantité, du soufre et de l'azote ainsi que divers métaux à l'état de traces, mais liés chimiquement aux molécules les plus lourdes. A la température ambiante, il est très visqueux, presque solide, et présente deux caractéristiques importantes : c'est un agglomérant à fort pouvoir adhésif, en particulier sur les minéraux destinés aux ouvrages, et il est totalement imperméable à l'eau. Ces propriétés sont exploitées dans la construction routière, sa principale utilisation, où il fournit le liant pour les enrobés, et dans diverses applications pour les travaux publics et l'industrie qui mettent principalement à profit son étanchéité pour les toitures, les terrasses ou les bassins.

On distingue trois familles de liants hydrocarbonés:

- **Les liants naturels**, qui se trouvent dans la nature le plus souvent, associés à des matières minérales, et qui sont utilisés depuis très longtemps .C'est la roche asphaltique qui se présente dans le gisement et qui après broyage donne asphaltite ou bitume naturel.
- **Les goudrons**, qui proviennent de la pyrogénéation, à l'abri de l'air, de matières d'origine végétal: houille, tourbe, bois, lignite...etc. [2]
- **les bitumes**, qui sont obtenus par raffinage des pétroles bruts et des résidus pétroliers.

I.2.3.1.2 Fabrication industrielle et composition du bitume:

a. Fabrication industrielle :

Le bitume utilisé de nos jours est obtenu par traitement de certains pétroles bruts, appelés “bruts à bitume”, dont il constitue la partie la plus dense et la plus visqueuse [3]. Sur les 1 300 bruts environ référencés dans le monde, seuls 10 % sont choisis par les pétroliers pour la fabrication du bitume.

Le bitume est obtenu en fractionnant le pétrole brut par distillation atmosphérique puis par distillation “sous-vide”. Voir le schéma

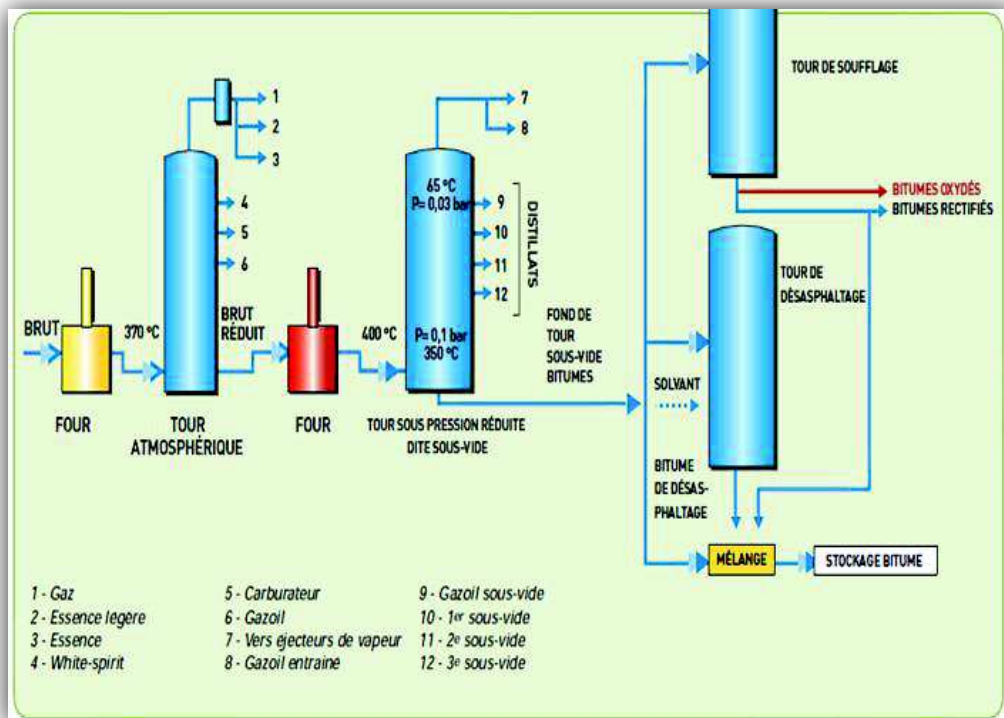


Fig (I.8) : fabrication des bitume par raffinage du béton (schéma de principe)

b. Composition du bitume:

On peut, à l'aide de solvants sélectifs, séparer le bitume en plusieurs fractions qui appartiennent principalement à quatre familles : asphaltènes, résines, huiles naphténo-aromatiques et huiles saturées. Par précipitation à l'heptane normal, on recueille les asphaltènes, insolubles. A la température ambiante, les asphaltènes se présentent sous l'aspect d'un corps solide, noir, cassant, à point de ramollissement élevé.

Le pourcentage d'asphaltènes sera d'autant plus élevé que le bitume sera plus dur. La fraction soluble dans l'heptane correspond aux maltènes, d'aspect huileux, que l'on peut séparer en trois phases par passage sur une colonne chromatographique. Une première élution à l'heptane normal permet de récupérer les huiles saturées. Une deuxième élution à l'aide de toluène conduit à récupérer les huiles aromatiques et naphténo-aromatiques, enfin, une troisième élution au moyen d'un mélange toluène/méthanol permet d'extraire les résines.

Il faut noter que les hydrocarbures dits "aromatiques" et "naphténo-aromatiques" ne renferment pas de composés aromatiques purs, mais les noyaux sont toujours substitués par des chaînes aliphatiques ou des cycles saturés. Le bitume de distillation, se présente comme un système colloïdal dans lequel les asphaltènes peptisés par les résines constituent les micelles, tandis que les huiles représentent la phase inter micellaire. Ce système peut être considéré comme un sol présentant les caractéristiques des liquides newtoniens. Les asphaltènes peuvent être plus ou moins floclés, ce qui explique que le bitume puisse se comporter comme un gel et présenter les caractéristiques des liquides non-newtoniens. C'est en particulier le cas des bitumes dits "soufflés" ou "oxydés" dans lesquels des phénomènes de déshydrogénation, de polymérisation des asphaltènes et des résines leur donnent quelquefois le comportement des composés thixotropes. Suivant le caractère sol ou gel, les propriétés diffèrent. C'est ainsi que les bitumes sols présentent une excellente résistance aux sollicitations rapides, en contrepartie ils seront plus sensibles que les bitumes gels aux sollicitations lentes ainsi qu'aux variations de température, mais entre ces deux types de comportements extrêmes, il existe toutes les variantes intermédiaires possibles.

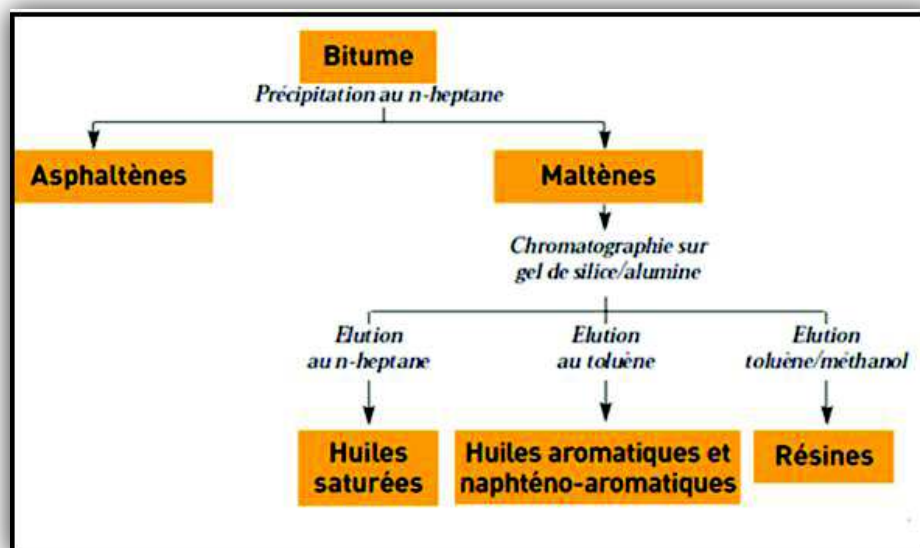


Fig. (I.9) : schéma de séparation chimique des constituants du bitume.

I.2.3.1.3 Propriétés mécaniques et rhéologiques du bitume :

Les propriétés rhéologiques d'un bitume dépendent de façon importante de sa teneur en asphaltènes et de la masse moléculaire de ces molécules.

A température constante, la viscosité du bitume s'accroît lorsque la concentration en asphaltènes augmente dans une même matrice maltènes. De plus, l'accroissement en viscosité est significativement plus important que ce qui serait attendu si les asphaltènes étaient sphériques. En fait, les asphaltènes peuvent interagir entre eux ainsi qu'avec le milieu solvate. Des études conduites à l'aide de la cryofracture suivie d'une observation au microscope électronique font apparaître la propension des asphaltènes à se rassembler en feuillets. Lorsque la température augmente, la viscosité diminue en même temps que les associations formées disparaissent. Inversement, lorsque la température décroît, les interactions se produisent et le bitume présente un caractère de plus en plus non-newtonien. Lorsque le bitume est soumis à des efforts de cisaillement, ces associations se déforment ou se défont d'une façon qui n'est pas décrite convenablement selon les concepts newtoniens classiques. Ainsi, aux températures ambiantes et intermédiaires, on conçoit que la rhéologie des bitumes est dominée par le degré d'association des asphaltènes et par la proportion relative des autres composants dans le système afin de stabiliser ces associations.

En maintenant constante la teneur en asphaltènes dans le bitume et en faisant varier les autres constituants, on constate que :

- l'accroissement de la teneur en aromatiques, pour un rapport maintenu constant de saturés sur résines, a peu d'effet sur la rhéologie,
- l'accroissement de la teneur en saturés, pour un rapport résines sur aromatiques maintenu constant, ramollit le bitume,
- l'addition de résines durcit le bitume, accroît la viscosité mais réduit l'indice de pénétration et la susceptibilité au cisaillement.

I.2.3.1.4 Principales caractéristiques des bitumes routiers:

Le bitume doit d'abord être pompable et maniable à température élevée (vers 160°C). Ensuite, il doit être suffisamment rigide aux températures élevées de service. Enfin, il doit être suffisamment mou aux basses températures de service.

C'est pourquoi différents types de bitumes sont disponibles et divers critères rhéologiques permettent de les caractériser et de les classer. Les essais pour mesurer ces propriétés sont donnés dans le tableau suivant : [14].

Tab (I.1) : Les essais pour mesurer les propriétés des enrobées

	Unité	Norme d'essai	Classes								
			20/30	35/50	40/50	50/70	60/70	70/100	80/100	100/150	160/220
Pénétrabilité à 25°C	X 0,1 mm	NA 5192	20-30	35-50	40-50	50-70	60-70	70-100	80-100	100-150	160-220
Point de ramollissement	°C	NA 2617	55-63	52-60	47-61	46-54	46-56	43-51	41-51	39-47	35-43
Résistance au durcissement à 163 °C											
- Variation de masse, max +/-	%	NA 5313	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8	0,8	1	1	1
- Pénétrabilité restante minimum	%		55	53	50	50	50	46	46	43	37
Point de ramollissement après durcissement, minimum	°C	NA 2617	57	52	49	48	48	45	45	41	37
- Augmentation du point de ramollissement, maximum	°C	NA 2617	8	8	9	9	9	9	9	10	11
- Augmentation de l'indice de pénétrabilité - minimum - maximum	°C	Annexe A de cette norme	-1,5 +0,7	-1,5 +0,7	-1,5 +0,7	-1,5 +0,7	-1,5 +0,7	-1,5 +0,7	-1,5 +0,7	-1,5 +0,7	-1,5 +0,7
Point d'éclair, minimum	°C	NA 1440	250	250	250	230	230	230	230	230	220
Solubilité, minimum	% (m/m)	NA 5271	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0
Teneur en paraffines, max	% (m/m)	NA 11071	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
		NA 5225	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Ductilité 25°C	Cm	NA 5236	>=25	-	>=60	-	>=80	-	>=100	>=100	>=100
Densité		NA 5224	1-1,100	1-1,100	1-1,100	1-1,100	1-1,100	1-1,070	1-1,070	1-1,070	1-1,070

A - Pénétrabilité à l'aiguille (NF EN 1426) :

La pénétrabilité à l'aiguille est la profondeur d'enfoncement, exprimée en dixièmes de millimètre, d'une aiguille normalisée de **1 mm** de diamètre, sous une charge de **100 g**, appliquée pendant **5 s** sur un échantillon de bitume maintenu à **25°C**. Fig. (I.10)

La pénétrabilité est une des deux caractéristiques fondamentales qui permettent de définir un bitume, où est définis par leur classe de pénétrabilité (la pénétrabilité exprimé en **1/10ème** de millimètre) dont l'appellation correspond à sa borne inférieure et à sa borne supérieure par exemple un bitume de classe 40/50. Plus un bitume est dur, plus sa valeur de pénétrabilité est faible.

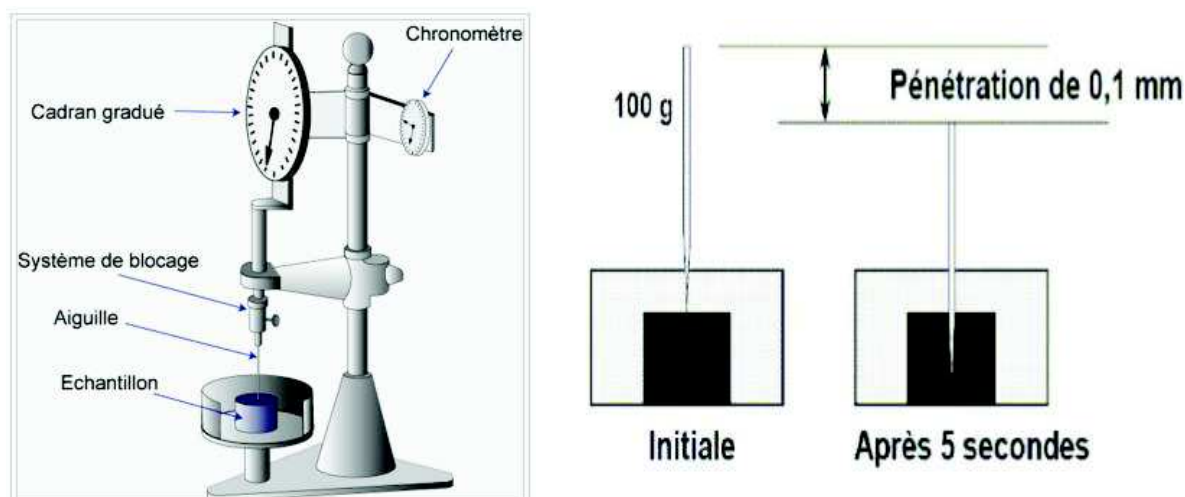


Fig. (I.10) : Mesure de la pénétrabilité.

B - La Température de ramollissement Bille et Anneau (TBA), (NF EN 1427):

Ce test consiste à déterminer la température pour laquelle la poche de bitume, formée pendant la chute de la bille, touche la plaque de référence placée à 25,4 mm sous l'anneau de bitume. Le bain est chauffé à une vitesse constante de 5 °C/min.

Le point de ramollissement est la deuxième caractéristique fondamentale d'un bitume. Dans cet essai, plus le point de ramollissement est élevé plus le bitume est dur.

T début = 5° C

T fin = mesurée °C.

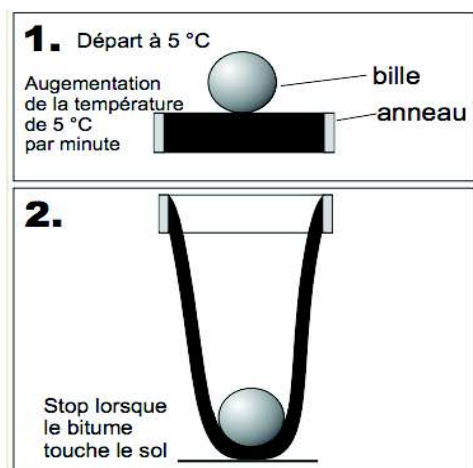


Fig. (I.11) : Mesure de la température de ramollissement Bille et Anneau.

C- ductilité (NA 5236) :

Est un essai de laboratoire qui permet de déterminer l'aptitude d'un bitume à résister à la traction, et à évaluer ainsi sa cohésivité.

Le principe consiste à mesurer l'allongement à la rupture d'une éprouvette de forme déterminée que l'on étire à une vitesse et à une température imposée.

Habituellement la température d'essai est de 5 °C, mais selon la fragilité du liant testé, elle peut être augmentée par paliers de 5 °C.

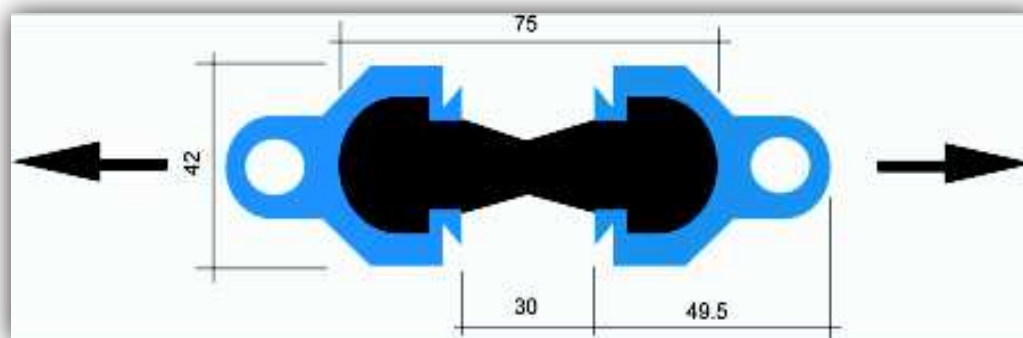


Fig. (I.12) : Mesure de la ductilité

D -la densité :

Rapport de la masse volumique du liant bitumineux, ρ , exprimé par rapport à la masse volumique du liquide d'essai, ρT , déterminées dans les mêmes conditions, à 25,0 °C

$$d_{25/25} = \rho / \rho T$$

La masse d'un échantillon de bitume et la masse du liquide d'essai correspondant à des volumes identiques sont comparées. L'égalité des volumes est assurée par le remplissage du pycnomètre et par le débordement du liquide lorsqu'on le place dans un bain à la température de l'essai jusqu'à l'obtention de l'équilibre thermique (approximativement 30 min).

Le pycnomètre calibré est rempli approximativement aux trois quarts de sa capacité avec le liant bitumineux dont on cherche la masse volumique ; il est pesé avec le bouchon. Le pycnomètre est rempli avec un liquide d'essai et pesé à nouveau. La densité et la masse volumique doivent être calculées par comparaison entre les deux masses.

I.2.3.2 Composants minéraux:

Définition : selon la norme P18-540.

Ensemble de grains de dimensions comprises entre 0 mm et 125 mm.

Les granulats sont dits [8] :

- naturels lorsqu'ils sont issus de roches meubles ou massives et qu'ils ne subissent aucun traitement autre que mécanique ;
- artificiels lorsqu'ils proviennent de la transformation à la fois thermique et mécanique de roches ou de minerais ;
- recyclés lorsqu'ils proviennent de la démolition d'ouvrages ou lorsqu'ils sont réutilisés ;
- courants lorsque leur masse volumique réelle MVR est supérieure ou égale à 2 Mg/m³ (ou t/m³) ;
- légers lorsque leur masse volumique réelle MVR est inférieure à 2 Mg/m³ (ou t/m³).

Ils sont désignés par d/D dans lequel d et D représentent respectivement la plus petite et la plus grande des dimensions du produit, Ces dimensions correspondent à la grosseur des grains déterminée par l'analyse granulométrique on distingue :

- Filler 0/D ou $D < 2$ mm avec au moins 70%de passant à 0.063 mm ;
- Sablons 0/D ou $D \leq 1$ mm avec au moins 70%de passant à 0.063 mm ;
- Sable 0/D ou $1 < D \leq 6.3$ mm ;
- Graves 0/D ou $D > 6.3$ mm ;
- Gravillons d/D ou $d > 1$ et $D \leq 125$ mm ;
- Ballasts d/D ou $d \geq 25$ mm et $D \leq 50$ mm.

I.2.3.2.1 Caractéristiques géométriques des granulats :

La géométrie d'un grain peut théoriquement être étudiée à l'aide deux principales caractéristiques, à savoir : l'angularité, la granularité.

➤ **La granularité :**

La granularité est la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat. Elle est appréciée par l'analyse granulométrique à l'aide de tamis et passoirs.

➤ **L'angularité :**

Le grain de granulat est limité par des faces plus moins rugueuses, faisant entre elles des angles plus ou moins aigus. L'angularité est un paramètre important qui favorise la résistance mécanique et l'adhérence des pneumatiques avec la couche de roulement.

I.2.3.2.2 Caractéristiques intrinsèques des granulats :

Il s'agit des caractéristiques régies par la qualité propre de la roche mère. Elles concernent la dureté, la résistance à l'usure par frottement et la résistance au polissage. Les essais les plus fréquents utilisés pour déterminer ces caractéristiques sont [4] :

➤ **Résistance à la fragmentation (chocs) :**

Elle est mesurée par le coefficient de "Los Angeles". Cette mesure est destinée à évaluer la résistance des granulats à la fragmentation sous l'action du trafic.

➤ **Résistance à l'attrition et à l'usure:**

L'essai utilisé est le Micro Deval à sec ou en présence d'eau. Cette mesure ayant pour but de chiffrer l'usure qui se produit d'une part entre les gravillons entre eux dans une assise et d'autre part entre le pneumatique et le granulat à la surface des revêtements. Comme l'usure est très influencée par la présence d'eau, l'essai le plus représentatif est le Micro Deval en présence d'eau.

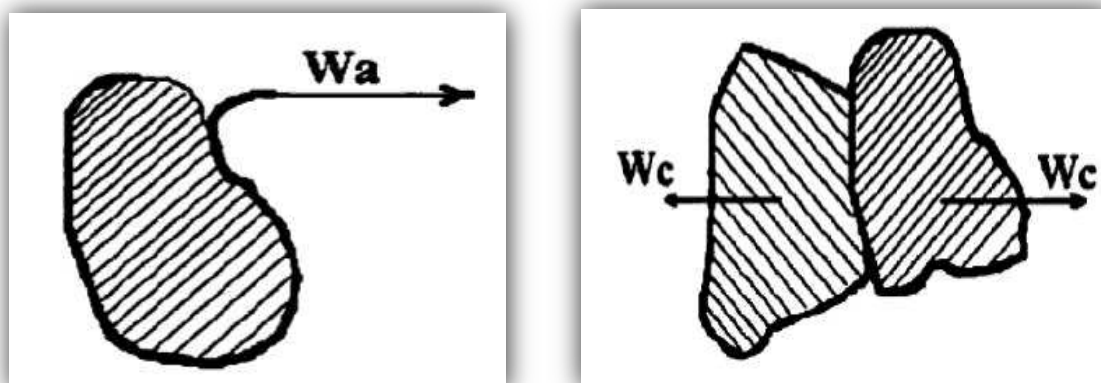
➤ **Résistance au polissage:**

Cet essai permet de chiffrer la résistance au polissage des gravillons utilisés pour les couches de surface. On utilise une machine à tambour sur lequel sont disposées des plaques support de granulat.

I.2.4 Liaison bitume – granulat (l'adhésivité):

Les propriétés mécaniques et la durabilité des enrobés bitumineux sont assurées par la stabilité de l'édifice granulaire, par les propriétés cohésives du bitume et par une bonne

adhésion entre le bitume et les granulats. La figure ci-dessous illustre les différentes énergies d'adhésion et de cohésion.



a) énergie d'adhésion

b) énergie de cohésion

Fig (I.13): Représentation schématique de l'énergie de cohésion et d'adhésion.

Wa: énergie d'adhésion = énergie dépensée pour arracher un film de bitume fortement adsorbé sur la surface du granulat.

Wc: énergie de cohésion = énergie dépensée pour décoller deux granulats unies par un film de bitume.

I.2.4.1 Adhésion de bitume sur un granulat sec :

Pour qu'il y ait adhésion du bitume au granulat, il doit y avoir contact entre le bitume et les granulats. L'enrobage s'effectue à haute température pour rendre le bitume fluide et lui permettre de recouvrir efficacement la surface irrégulière des granulats. Cependant, en présence d'obstacles physiques tels que de la poussière ou de l'argile à la surface des granulats, il peut y avoir recouvrement sans qu'il y ait adhésion [6]

L'adhésion est assurée par les interactions intermoléculaires entre le liant bitumineux et la surface des granulats. Il peut s'agir de liens électrostatiques, en raison de la surface généralement électriquement chargée des granulats, de liaisons hydrogènes lorsque des groupements hydroxyles sont présents en surface, ou de liens dispersifs (type van der Waal), qui sont toujours présents [6].

La force totale du lien adhésif est alors fonction du nombre de liaisons intermoléculaires et de la force de chacune de ces liaisons [6]. Ces interactions sont généralement suffisantes pour obtenir l'adhésivité souhaitée sur une surface propre et sèche.

Un ancrage mécanique, résultant d'une pénétration de l'adhésif dans les aspérités du substrat, peut également contribuer à l'adhérence, surtout dans le cas d'une surface poreuse [6].

I.2.4.2 Paramètre influe sur l'adhésivité :

Les paramètres, classés par familles, qui interviennent dans les mécanismes d'adhésivité sont énumérés dans le tableau ci-après (Tableau I.2) Cette liste, non exhaustive, reprend les paramètres prépondérants. [9]

Tab (I.2) : Synthèse des paramètres pouvant intervenir dans les mécanismes d'adhésivité liant- granulats

	Famille de paramètres	Paramètres
Granulats minéraux	Pétrographie	Caractères structuraux, minéralogiques et chimiques : Acidité- alcalinité, hydrophiles -hydrophobes, charges à la surface, polarité, etc.
	Granularité	Courbe granulométrique continue -discontinue, taille des granulats, etc.
	Rugosité de surface	Surface de contact- surface réelle, porosité (teneur en pores, taille et profondeur des pores et aspérités), angularité, etc.
	Constituants externes adsorbés à la surface	Constituants chimiques, saletés adsorbées, poussière, humidité, etc.
Liants hydrocarbonés / formulation	Type de liant / Charges à la surface	Type de liant, composition chimique, charges à la surface, polarité, etc.
	Viscosité	Viscosité du liant, température, etc.
	Formulation	Dosage (teneur en liant), teneur en air (vides), humidité, filler, etc.
Fabrication, stockage, transport, mise en place	Fabrication	Concassage des granulats, température du liant, traitement des granulats, 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.
Autres	Dopage	Type de dope, teneur, chronologie du dopage, efficacité, etc.
	Additifs	Types d'additifs, dosage, etc.
	Humidité	Humidité relative de l'air, présence d'eau, vapeur d'eau, pH de l'eau, composants chimiques dans l'eau, etc.

I.2.5 Bitume dans les routes

L'utilisation du bitume dans les routes se fait selon la mise en œuvre en deux axes : [5]

I.2.5.1 Les enrobés bitumineux :

On distingue plusieurs types d'enrobés bitumineux que l'on peut classer en fonction de leur température de fabrication : les enrobés à chaud, les enrobés tièdes ou semi- tièdes et les enrobés à froid (**fig.I.11**). Les enrobés tièdes et semi-tièdes, sont élaborés à des températures 30°C à 50°C de moins que les enrobés à chaud. Ces nouveaux procédés sont nés de la volonté de réduire la consommation d'énergie et de limiter les rejets de gaz à effet de serre lors de l'élaboration des enrobés bitumineux.

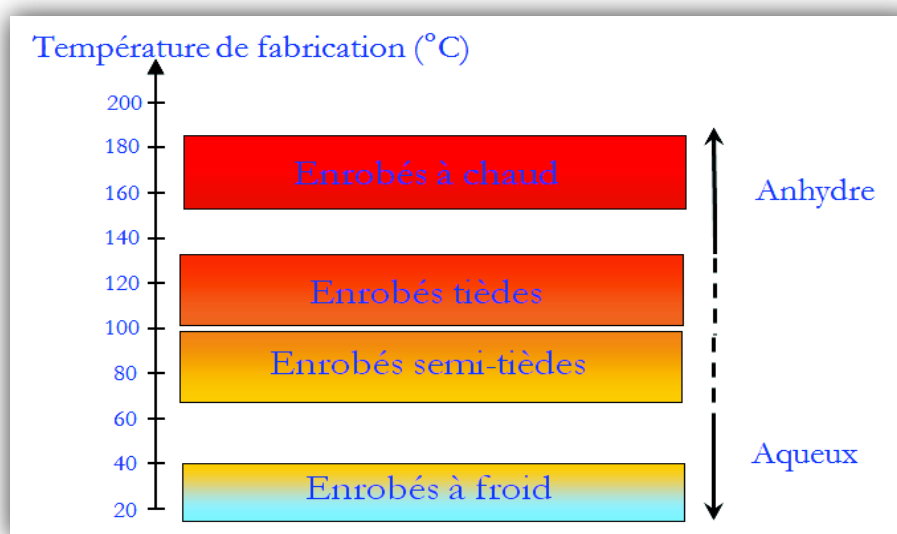


Fig (I.14) : Procédés d'enrobage en fonction de la température de fabrication

I.2.5.2 Les enduits superficiels :

Concernent les bitumes fluidifiés (par addition de solvant) et fluxés (mélange de bitume avec des huiles de houille et des dérivés pétroliers) et les émulsions de bitumes obtenues par mélange avec des coupes plus légères, pour rendre le bitume fluide à température ambiante. Ces bitumes fluidifiés et fluxés sont utilisés directement en épandage ou encore en enrobage de granulats. [2] (couche de granulat puis couche de bitume ainsi de suite selon les types des enduits superficiels).

I.2.6 Formulation des enrobés :

Formuler un enrobé hydrocarboné, est de déterminer le meilleur mélange de granulats de diverses dimensions et d'un liant (le bitume) permettant d'atteindre des performances visées : imperméabilité, rugosité, résistance mécanique (à l'orniérage et la fatigue). Donc l'objectif de

formulation est de déterminer un mélange de différentes classes granulaires qui constitue un squelette granulaire ayant un pourcentage de vides ni trop faible ni trop élevé. Un faible pourcentage de vide empêche l'introduction d'une quantité du liant suffisante pour enrober l'ensemble des grains sans saturer le mélange, et un pourcentage de vides élevé favorise le développement des déformations permanentes par post-compaction.

I.2.6.1 Paramètres influençant sur le choix d'une formulation :

Les principaux caractères à prendre en compte lors du choix d'une formule d'enrobé sont les suivants

- Le choix de l'enrobé dépend de la fonction que doit remplir : couche de base, de liaison, de surface, etc.
- Le trafic
- Le type de structure: chaussée souple ou semi-rigide
- L'épaisseur d'enrobé adéquate de résister aux différentes sollicitations.
- La qualité des matériaux utilisés
- Les conditions climatiques.

Le découpage géographique de l'Algérie donne trois zones climatiques I, II et III, leurs caractéristiques sont illustrées dans le tableau suivant [15] :

Tab (I.3): caractéristiques des zones climatiques en Algérie [15]

Caractéristiques Zones	Température maximale	Température minimale	Hauteur de précipitation annuelle
I	$\leq 45^{\circ}\text{c}$	$-2.5^{\circ}\text{c} \leq T \text{ min} \leq 2.5^{\circ}\text{c}$	$H \geq 600\text{mm}$
II	$45^{\circ}\text{c} < T \text{ max} < 50^{\circ}\text{c}$	$< -2.5^{\circ}\text{c}$	$H < 600\text{mm}$
III	$> 50^{\circ}\text{c}$	$\geq -5^{\circ}\text{c}$	$H < 100\text{mm}$

I.2.6.2 Influence des caractéristiques des composants d'un mélange hydrocarbonés:

Les propriétés des enrobés hydrocarbonés peuvent dépendre selon les caractéristiques de différentes compositions que sont les granulats, les fines, le liant

I.2.6.2.1 Influence des granulats:

Il y a plusieurs types de béton bitumineux. Cependant, il est possible de formuler un concept d'un agrégat selon les performances désirées. Le choix d'un agrégat idéal à

granulométrie voulue rempli les conditions suivantes: l'agrégat sera dur et résistant, constitué des particules angulaires ayant une porosité modérément faible, et les surfaces seront propres, rugueuses et hydrophobes.

I.2.6.2.2 Influence des fines :

Le rôle principal des fines est de remplir les vides du squelette granulaire conduisant ainsi à une augmentation de la compacité et à une meilleur imperméabilité de l'enrobé (figure (I.15)). Les fines (ou filler) agissent par leur dosage sur les caractéristiques mécaniques de l'enrobé notamment sur la rigidité et la résistance à l'orniérage à haute température. La figure (I.16) ci-dessous illustre le surdosage des fines qu'il conduise au desserrement entre les granulats [2].

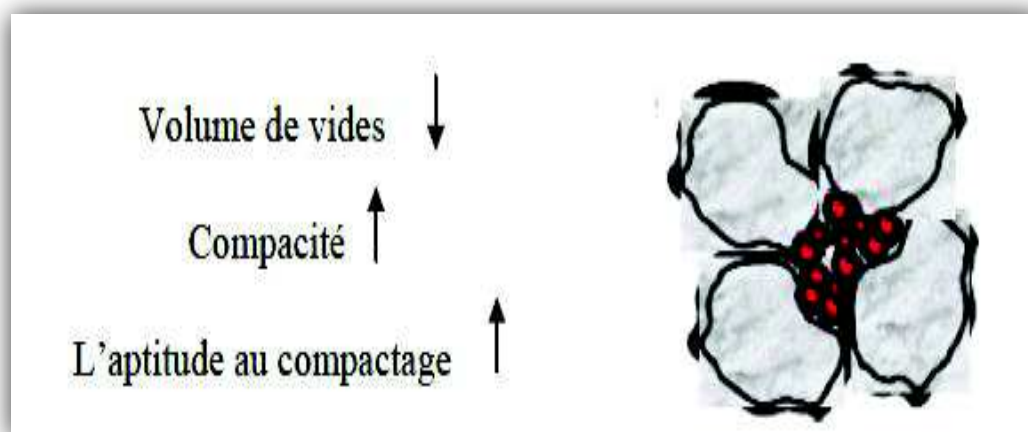


Fig (I.15): L'influence de l'ajout de filler

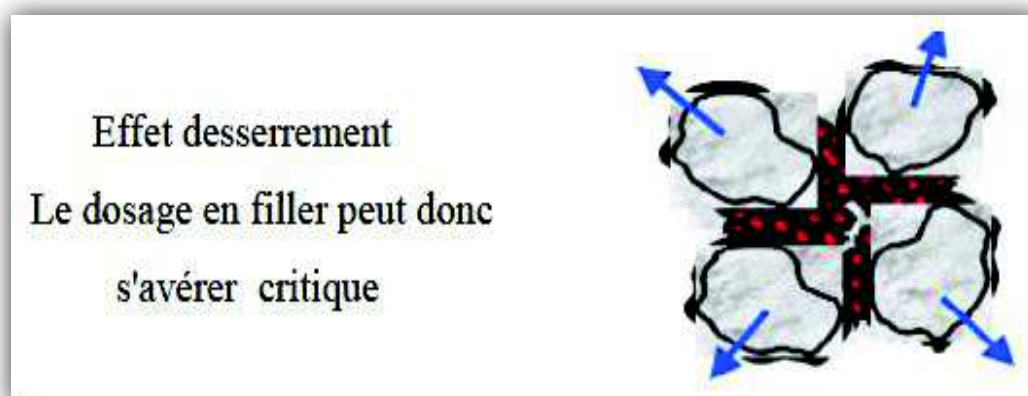


Fig (I.16): L'influence sur le surdosage de filler

I.2.6.2.3 Influence du bitume:

Le bitume doit être de bonne qualité et conforme aux spécifications. L'influence du bitume dans les enrobés intervient par sa dureté et par son dosage

- Effet de la dureté du bitume, L'utilisation de bitume plus dur, sans que le seuil de sa fragilité à basse température soit dépassé, se traduit par une augmentation importante de la rigidité de l'enrobé, la résistance à la fatigue et à l'orniérage
- Effet de la teneur en bitume, la majoration de la teneur en bitume provoque la chute de la compacité par augmentation de l'effet de lubrification des granulats et par le remplissage des vides.

Le choix de la classe du bitume dépend de l'altitude et du trafic en poids lourds illustrés dans le tableau ci-dessous selon le protocole de contrôle revêtement béton bitumineux de CTTP et les recommandations de CTTP sur l'utilisation des bitumes et des enrobés bitumineux à chaud:

Tab (I.4): Le choix de la classe de bitume selon le trafic et l'altitude

Zone	altitude	Classe		
I	Alt ≤ 500m	60/70	40/50	40/50
	Alt > 500m	80/100	80/100	60/70
II	Alt ≤ 500m	40/50	40/50 ou 20/30	20/30
	500m < alt ≤ 1000m	60/70	40/50	40/50
	1000m < alt	80/100	80/100	60/70
III	500m ≤ alt ≤ 1000m	40/50	40/50 ou 20/30	20/30
	1000m < alt	60/70	40/50	40/50
	trafic	PLMJA < 150	150 ≤ PLMJA < 500	PLMJA ≥ 500

PLMJA : le nombre de poids lourds en moyenne journalière annuelle

Le tableau suivant présente la relation entre les facteurs et les propriétés recherchées afin de déduire un meilleur enrobé.

Tab (I.5): Relation entre les facteurs et les propriétés recherchées

propriété	Facture		
	Teneur en bitume	Granulométrie	Compacité
Cohésion	Elevée	Dense	Elevée
Confort	Elevée	Dense – fermée	Elevée
Sécurité	Basse	Dense – ouverte	Elevée
Maniabilité	Elevée	Ouverte	-
compactibilité	Elevée	Dense	-

Pour des enrobés cohésifs doivent posséder une teneur en bitume élevée, une granulométrie dense et une compacité élevée. Pour obtenir des enrobés sécurisés doivent posséder une teneur en bitume basse, une granulométrie dense-ouverte et une compacité élevée... Ces propriétés, qui sont souvent en opposition, nécessitent d'optimiser les choix concernant les dosages de bitume et la formulation à utiliser.

I.2.7 Etapes de formulation d'un enrobe bitumineux:

Une étude de formulation d'un enrobé comporte les étapes suivantes:

- Les classes granulaires
- La teneur en bitume
- Les caractéristiques d'un enrobé

I.2.7.1 Les classes granulaires:

Le squelette granulaire d'un mélange bitumineux est composé de plusieurs fractions homogènes qui sont:

- sable: 0/2 ou 0/4
- gravillon: 2/6,3; 4/6,3; 4/10; 6,3/10; 6,3/14 et 10/14
- filler: élément < 0,08

La formulation d'un enrobés bitumineux repose essentiellement sur les caractéristiques géométriques des granulats (90% environ en masse du mélange) qui désigner par le choix de la courbe granulométrique selon les propriétés recherchées. La Directive SETRA et LCPC prévoit deux types de bétons bitumineux : [7]

- Les bétons bitumineux grenus 0/10 et 0/14
- Les bétons bitumineux semi-grenus 0/10 et 0/14

En fait, seules les mélanges semi-grenus sont utilisés car les mélanges grenus sont difficiles à mettre en œuvre.

I.2.7.2 La teneur en bitume:

La teneur en liant TL est le rapport de la masse du liant, à la masse des granulats secs, exprimé en pour cent. Duriez a établi une formule pour déterminer la teneur en bitume des enrobés en fonction de la surface spécifique du mélange sec : [16]

$$TL = K \times \alpha \times 5\sqrt{\Sigma}$$

K : module de richesse

est un coefficient proportionnel à l'épaisseur conventionnelle du film de liant enrobant le granulat varier entre 3,50 et 5 selon le type d'enrobés. [16]

α : coefficient correcteur

Ce coefficient permet de tenir en compte la masse volumique réelle des granulats.

$$\alpha = 2,65 / M_v \text{ où}$$

M_v : la masse volumique des granulats utilisés.

Σ : surface spécifique conventionnelle du mélange en m^2/kg

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

G: surface spécifique des éléments $> 6,3$ mm

S: surface spécifique des éléments compris entre 0,315 et 6,3 mm

s: surface spécifique des éléments compris entre 0,315 et 0,008 mm

f: surface spécifique des fines $< 0,008$ mm

I.2.7.3 La compacité:

La compacité "C" est une conséquence directe de la formulation:

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

Pour ce calcul, il faut connaître la densité apparente de l'éprouvette, la densité du bitume, la densité de chacun des agrégats, les pourcentages en poids de chacun des constituants rapportés à 100(liant et filler compris).

Soit :

- γ_{app} : la densité apparente de l'éprouvette;
- γ_b : la densité du bitume ;
- γ_{G1} : la densité de l'agrégat 1;
- $\gamma_{G2}, \gamma_{G3}, \dots$ celles des agrégats 2, 3...etc.
- P_b : le pourcentage en poids du bitume;
- $PG_1, PG_2, PG_3 \dots$ ceux des agrégats.

Donc la densité réelle γ_{rel} du matériau enrobé est:

$$\gamma_{rel} = \frac{100}{(P_b/\gamma_b) + (PG_1/\gamma_{G1}) + (PG_2/\gamma_{G2}) + \dots}$$

Le pourcentage volumétrique des vides V_v de l'éprouvette est:

$$V_v = \frac{100 (\gamma_{rel} - \gamma_{app})}{\gamma_{rel}}$$

Et la compacité C :

$$C = 100 - V_v$$

Une bonne compacité conditionne les performances mécaniques des enrobés et leur durée de vie. La compacité est influencée par la nature et la forme des granulats. Elle joue un rôle déterminant dans l'obtention de bonnes caractéristiques mécaniques : module de rigidité, comportement en fatigue, mais un compromis doit être fait pour que le comportement à l'orniérage soit satisfaisant.

En modulant ces différents paramètres, il est ainsi possible de formuler un enrobé ayant les caractéristiques nécessaires pour l'usage et pour sa place dans la chaussée.

Pour une couche de roulement, les granulats seront anguleux et la courbe granulométrique sera le plus souvent discontinue mais l'enrobé devra être imperméable.

I.2.8 Les propriétés mécaniques des enrobés bitumineux:

Pour connaître les propriétés mécaniques d'un enrobé bitumineux ; on fait un essai ou le plus souvent une série d'essais normalisés ; ces méthodes ou essais diffèrent sur plusieurs points comme le mode de préparation, les dimensions des éprouvettes, les paramètres mesurés, l'appareillage utilisé et la température de réalisation des essais...etc.

En Algérie, la méthode de formulation est basée sur les essais mécaniques traditionnels qui sont l'essai Marshall et l'essai à la traction indirecte [la sensibilité de l'eau]. Ces méthodes traitent un seul aspect du comportement mécanique des enrobés à savoir la rupture plastique d'une éprouvette dans des conditions normalisés de température, d'humidité et de charges basées sur le principe que le choix de la composition appropriée doit répondre à des exigences de résistance .

I.2.8.1 Essai de stabilité Marshall (Norme NA5227) :

a. Principe et définition :

L'essai de stabilité Marshall est un essai de compression exercé suivant la génératrice d'une éprouvette cylindrique. Cette compression est appliquée sur l'éprouvette après ½ heure d'immersion dans l'eau à 60°C et à la vitesse de 50mm/mn.

On appelle « stabilité Marshall » : la résistance maximale a la déformation en kilo newton(KN) d'une éprouvette moulée d'enrobé. [Norme NA5227].

On appelle « déformation Marshall » la diminution du diamètre vertical qui est atteinte au moment de la rupture de l'éprouvette.

On appelle « proportion des vides occupés par le liant » le pourcentage volumétrique des vides de l'agrégat comblé par le liant.

b. Domaine d'application :

L'essai Marshall peut être effectué pour tout les enrobés.

I.2.8.2 Essai de la sensibilité à l'eau :

a. Principe et définition :

La sensibilité à l'eau définie par le rapport de résistance en traction indirecte, calculé comme étant le quotient de la résistance d'éprouvettes humides (après immersion) sur celle d'éprouvettes sèches, exprimé en pourcent.

L'essai de sensibilité diffère de l'essai Marshall par deux caractéristiques importantes :

- Température de l'essai, qui est de 40°C au lieu de 60°C dans l'essai Marshall
- Le temps d'immersion qui est 72heur au lieu de 1/2heur dans l'essai Marshall

b. Domaine d'application :

L'essai à la traction indirecte peut être effectué pour tout les enrobés.

Le tableau suivant présente les performances demandées, selon les recommandations de CTPP, pour obtenir un meilleur enrobé résistant aux différentes sollicitations conformément aux normes, sachant que les performances présentées concernant un béton bitumineux semi grenu 0/14 les plus utilisé en Algérie en couche de roulement:

Tab (I.6) : Les performances mécaniques des bétons bitumineux 0/14 selon CTPP

caractéristique	Classe de bitume							
	80/100		60/70		40/50		20/30	
	min	max	min	max	min	max	min	max
Stabilité Marshall (KN)	8.5	-	9.5	-	10.5	-	12.5	-
Fluage Marshall (mm)	-	4	-	4	-	4	-	4
% de vide	3	5	3	5	3	5	3	5
Tenue à l'eau	> 0.75							
Teneur en bitume (%)	Agrégat absorbant		6.4 à 6.8					
	Agrégat compact		5.6 à 6.0					
Teneur en fine (%)	6 à 10							

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

I.2.9 Différent types des enrobés bitumineux pour la couche de roulement :

I.2.9.1 Les enrobés à chaud :

Les enrobés à chaud sont des bétons bitumineux fabriqués à chaud dans une centrale d'enrobage[1]. Ce sont des matériaux denses dont le pourcentage des vides est de l'ordre de 5 à 12 %. Leur composition varie selon l'utilisation : en couche de roulement ou en couche de liaison. Leur excellente résistance mécanique permet de les utiliser en revêtement des chaussées recevant une circulation lourde. Ils regroupent plusieurs produits, certains étant couramment utilisés, d'autres, plus performants qui ont un emploi plus spécifique (tab. 4.10).

I.2.9.1.1 Les bétons bitumineux semi-grenus (BBSG) :

(BBSG) sont utilisés en couche de roulement ou en couche de liaison. La granulométrie est de 0/10 ou de 0/14, selon l'utilisation et l'épaisseur de la couche, comprise entre 5 et 9 cm. Avant la mise en œuvre des BBSG, une couche d'accrochage est appliquée de manière continue et uniforme à l'aide d'un engin mécanique de répannage afin d'assurer une meilleure liaison entre les différentes couches.

I.2.9.1.2 Les bétons bitumineux à module élevé (BBME) :

(BBME) sont des bétons bitumineux dont le module de rigidité est supérieur à celui des bétons bitumineux semi-grenus. Ils sont répartis en deux classes, selon la granulométrie :

BBME 0/10 ; granularité 0/10 mm.

BBME 0/14 ; granularité 0/14 mm.

Utilisés en couche de roulement ou de liaison, l'épaisseur est de 5 à 7 cm selon la classe. En couche de fondation ou de base, elle est comprise entre 7 et 15 cm

I.2.9.1.3 Les bétons bitumineux minces (BBM) :

Trouvent leur emploi en couche de roulement ou en couche de liaison d'une épaisseur comprise entre 3 et 5 cm. La granulométrie est de 0/10 ou 0/14, continue ou discontinue selon le type de produits.

I.2.9.1.4 Les bétons bitumineux très minces (BBTM) :

(BBTM) sont réservés à la couche de roulement. D'une épaisseur moyenne de l'ordre de 20 à 25 mm, l'épaisseur minimale en tout point ne doit pas être inférieure à 15 mm. La granulométrie peut être continue ou discontinue les granularités retenues étant 0/6,3, 0/10 et

0/14. Ils sont appliqués sur un support dont la planimétrie est parfaite, avec interposition d'une couche d'accrochage.

I.2.9.1.5 Les bétons bitumineux cloutés (BBC) :

Sont des enrobes hydrocarbonés avec incorporation de gravillons (les clous) pré enrobés a chaud avec un liant hydrocarboné Les clous sont incorporés au cours de la mise en œuvre, immédiatement après le passage du finisseur et avant le compactage.

Selon la granulométrie, ils sont répartis en deux classes :

BBC 0/6 : granularité 0/6,3 mm ;

BBC 0/10 : granularité 0/10 mm.

L'épaisseur de la couche est comprise entre 3 et 6 cm, en fonction de la classe et de l'utilisation.ils sont réservés aux voies devant subir un trafic lourd et important.

I.2.9.1.6 Les bétons bitumineux drainant (BBDr) :

À l'inverse des produits précédents, sont des enrobés hydrocarbonés caractérisés par une proportion élevée de vides communicants qui permettent la circulation interne des eaux pluviales. Il en résulte une grande perméabilité et une efficacité contre les projections d'eau et les bruits de roulement. C'est pourquoi ils sont préconisés en couche de surface sur les voies à fort trafic ou ils assurent une bonne pénétration de l'eau dans le corps du revêtement. Ils sont obligatoirement répandus sur une couche d'accrochage qui a également une fonction d'étanchéité en rejetant les eaux en dehors de l'emprise de la chaussée. Du fait de leur structure, ils sont déconseillés dans les régions à hiver rigoureux.

Ils sont répartis en deux classes, selon la granulométrie :

BBDr 0/6 granularité 0/6.3 mm ;

BBDr 0/10 : granularité 0/10 mm.

Selon la classe et l'utilisation, l'épaisseur de la couche est comprise entre 3 et 5 cm.

I.2.9.1.7 Les enrobés à module élevé (EME) :

Sont des produits enrobés a chaud en centrale, dont la rigidité est supérieure à celle des graves bitumes Ils servent à réaliser des couches d'assise, de fondation ou de base, avec des épaisseurs moindres pour de meilleurs résultats Ils sont répartis en trois classes :

EME 0/10 granularité 0/10 ;

EME 0/14 granularité 0/14 ;

EME 0/20 granularité 0/20.

Chapitre I : LES CHAUSSEES ROUTIERES ET LES ENROBES BITUMINEUX

Selon la classe retenue, l'épaisseur de la couche en enrobés à module élevé est comprise entre 6 et 15 cm, en fonction du trafic et de la portance du sol.

Tab (I.7) : Epaisseur d'utilisation des bétons bitumineux

Matériaux	granularité (mm)	Epaisseur	
		Moyenne d'utilisation (cm)	Minimal en tout point
Produits courants			
Béton bitumineux semi-grenue(BBSG)			
BBSG 0/10	0/10	5 à 7	4
BBSG 0/14	0/14	6 à 9	5
Béton bitumineux a module élevé (BBME)			
BBME 0/10	0/10	5 à 7	4
BBME 0/14	0/14	6 à 9	5
Béton bitumineux minces (BBM)			
BBM A,B ou C 0/10	0/10	3 à 4	2.5
BBM A ou B 0/14	0/14	3.5 à 5	3
Produite a utilisation spécifique			
Béton bitumineux très minces (BBTM)			
BBTM 0/6	0/6.3	2 à 2.5	1.5
BBTM 0/10	0/10	2 à 2.5	1.5
BBTM 0/14	0/14	2 à 2.5	1.5
Béton bitumineux cloutes (BBC)			
BBC 0/6	0/6.3	3	2
BBC 0/10	0/10	6	4
Béton bitumineux drainant (BBDr)			
BBDr 0/6	0/6.3	3 à 4	2
BBDr 0/10	0/10	4 à 5	3
Enrobés à module élevé (EME)			
EME 0/10	0/10	6 à 8	5
EME 0/14	0/14	7 à 13	6
EME 0/20	0/20	9 à 15	8

I.2.9.2 Les béton bitumineux à froid (BBF) :

Les bétons bitumeux à froid (BBF) sont des matériaux denses composés avec des granulats 0/10 ou 0/14 et un liant hydrocarboné [1], émulsion de bitume pur ou de bitume modifié. Ils sont malaxés à froid dans une centrale d'enrobage utilisés en couche de roulement, ils ont une épaisseur de l'ordre de 5 à 8 cm, pour des chaussées supportant un trafic faible ou moyen. Ne pouvant pas être stockés, ils doivent être répandus et compactés dans les vingt-quatre heures, directement sur la couche de liaison, sans couche d'accrochage.

Ils forment également une excellente sous- couche destinée à recevoir un enrobé à chaud sur de grandes superficies, l'emploi d'un matériel lourd et encombrant est nécessaire. À l'inverse, ils sont généralement utilisés pour de petites surfaces inaccessibles ou pour des travaux d'entretien et de réparation qui demandent une mise en œuvre manuelle.

Conclusion :

Comme nous avons vu précédemment que l'enrobé est constitué de deux éléments principaux : les granulats et le bitume. La liaison entre les granulats et le bitume est très complexe et pour formuler un enrobé convenable plusieurs critères sont à prendre en considération tels que le trafic, les conditions climatiques et les matériaux existants...etc.

Le mélange bitume-agrégat obtenu doit avoir:

- Suffisamment de bitume pour donner un pavage durable
- Une stabilité suffisante pour satisfaire les exigences de trafic
- Suffisamment des vides pour pallier aux phénomènes d'expansion liés aux propriétés spécifiques du bitume (dilatation thermique)
- Une maniabilité suffisante pour permettre une mise en place efficace du mélange.

Chapitre II

l'utilisation de la chaux hydratée dans les enrobés bitumineux

CHAPITRE II : L'UTILISATION DE LA CHAUX HYDRATEE DANS LES ENROBES BITUMINEUX

II.1 introduction :

Dans le présent chapitre, nous allons parler sur l'incorporation de chaux hydratée dans les enrobés bitumineux et leur applications.

On va voir les points suivants :

- Rappelle sur l'utilisation de chaux hydratée dans les enrobés bitumineux (historique).
- La chaux de construction.
- Familles de chaux:
- Classification de la chaux.
- Propriétés physiques et mécaniques.
- Domaine d'application.
- Amélioration apportées par la chaux hydratée aux enrobés bitumineux.
- Comment ajouter de la chaux hydratée à un enrobé bitumineux.

II.2 Historique :

L'utilisation de chaux hydratée dans les enrobés bitumineux est une pratique éprouvée qui remonte à leur apparition au début du XXe siècle. L'usage s'est réellement développé à la fin des années 1970 aux Etats-Unis en réponse à l'apparition généralisée et prématurée de dégâts liés au désenrobage, en partie dus à une baisse de qualité des bitumes survenue après la crise pétrolière de 1973 [10]. Actuellement, environ 10 % des enrobés bitumineux aux Etats-Unis contiennent de la chaux hydratée. En Europe, l'usage est croissant, principalement (mais pas uniquement) en couche de roulement, et les Pays-Bas possèdent la plus grande expérience puisque les enrobés drainants, qui recouvrent 70 % de leur réseau autoroutier, y contiennent systématiquement 2 % de chaux hydratée associée à un bitume 70/100 non modifié depuis les années 1990 [10].

D'autres pays, tels que l'Angleterre, l'Autriche, la France et la Suisse, commencent à y recourir à plus grande échelle. Dans ce contexte, les effets de la chaux hydratée sur les enrobés ont fait l'objet de nombreuses études et il est acquis qu'elle contribue à améliorer non seulement la tenue à l'eau des matériaux bitumineux, mais aussi leur résistance au vieillissement et certaines propriétés mécaniques comme la résistance à l'orniérage.

Ce rôle multifonctionnel augmente la durabilité des matériaux bitumineux utilisés en couche de roulement d'environ 25 %, selon les retours d'expériences des maîtres d'ouvrage.

II.3 La chaux :

II.3.1 Définition :

terme générique désignant toutes les formes physiques et chimiques dans lesquelles peuvent apparaître l'oxyde de calcium et de magnésium (CaO et MgO) et/ou l'hydroxyde de calcium et/ou de magnésium (Ca(OH)_2 et Mg(OH)_2) produits par la décomposition thermique (calcination) de carbonate de calcium d'origine naturelle (par exemple : calcaire, craie, coquilles) ou de carbonate de calcium et de magnésium d'origine naturelle (par exemple : calcaire dolomitique, dolomie). [11]

II.3.2.Familles de chaux:

a. Chaux aérienne :

Chaux qui se combine et durcit avec le dioxyde de carbone présent dans l'air. Les chaux aériennes n'ont pas de propriété hydraulique. Elles sont divisées en deux sous-familles, la chaux calcique (CL) et la chaux dolomitique (DL). La chaux aérienne peut se trouver sous deux états :

- Soit de la chaux vive CaO , désignée par Q
- Soit de la chaux hydratée - aussi appelée chaux éteinte - Ca(OH)_2 , désignée par S, S PL ou S ML

b. Chaux ayant des propriétés hydrauliques :

chaux de construction constituées principalement d'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2), mais aussi de silicates de calcium et d'aluminates de calcium. Ces chaux ont la propriété de faire prise et de durcir lorsqu'elles sont mélangées à l'eau et/ou sous l'eau. La réaction avec le dioxyde de carbone présent dans l'air contribue au durcissement. Les chaux ayant des propriétés hydrauliques sont divisées en trois sous-familles, la chaux hydraulique naturelle (NHL), la chaux formulée (FL) et la chaux hydraulique (HL).

II.3.3.Classification :

Les chaux aériennes doivent être classées en fonction de leur teneur en ($\text{CaO} + \text{MgO}$), et les chaux hydrauliques, en fonction de leur résistance à la compression.

Le schéma suivant présente la classification de la chaux proposée par la norme NF EN 459-1

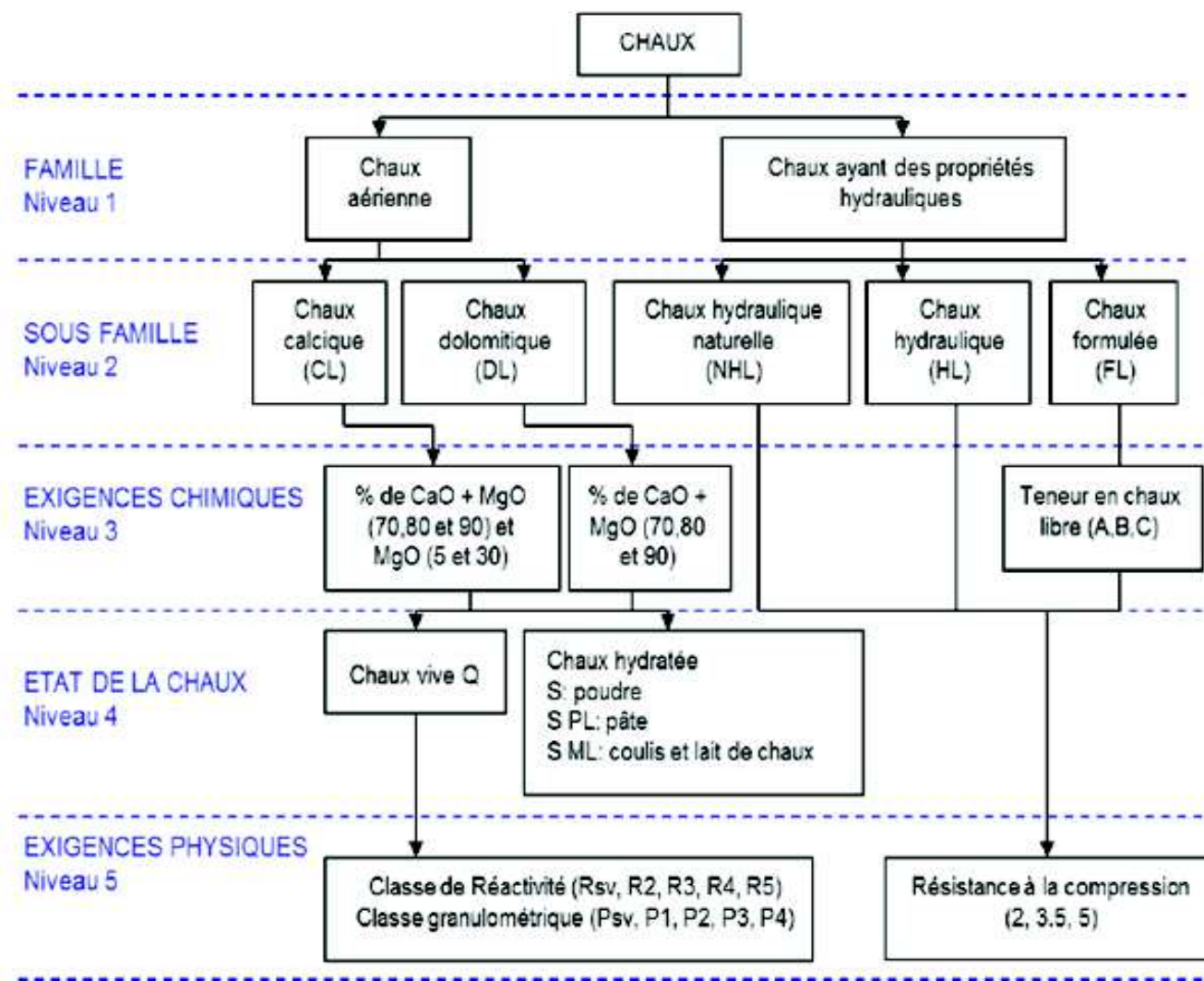


Fig (II.1) : classification de la chaux proposé par la norme NF EN 459-1

II.3.4. Domaines d’application :

Les chaux aériennes et les chaux ayant des propriétés hydrauliques sont destinées au domaine de la construction en général (bâtiment et génie civil). Cependant, leurs caractéristiques, leurs propriétés, et donc leur domaine d'application, diffèrent d’une famille à l’autre. Fig(II.2)

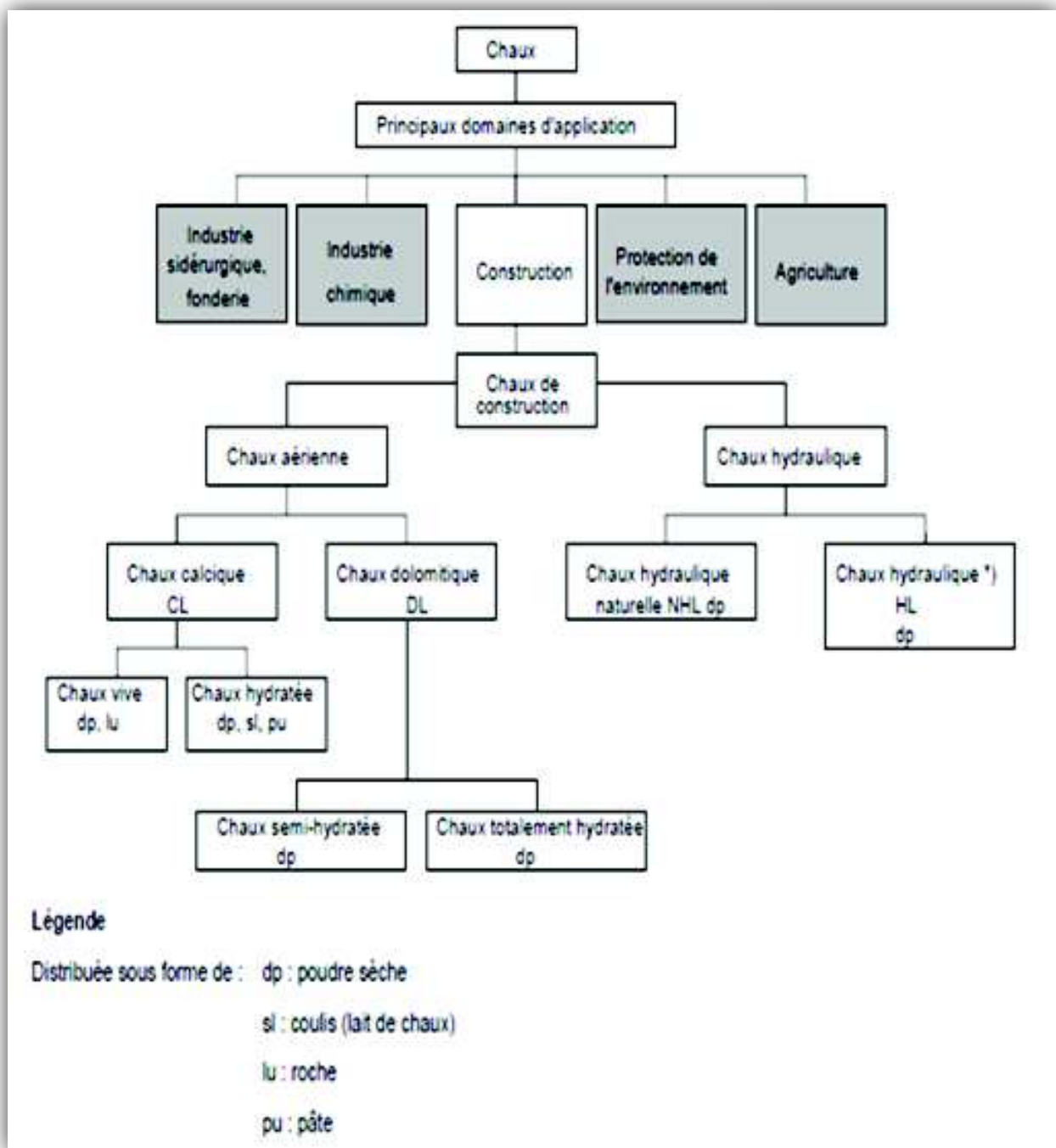


Fig (II.2) : représentation schématique des types de chaux et des domaines d'application.

II.3.4.1. Dans le domaine du bâtiment :

Les chaux aériennes, sous forme hydratée, et les chaux ayant des propriétés hydrauliques sont principalement utilisées dans la confection de mortiers, enduits et badigeons ainsi que dans la fabrication du béton de chanvre. Les chaux aériennes calciques sous forme vive entrent dans la composition du béton cellulaire et des briques silico-calcaires.

[11]

II.3.4.2. Dans le domaine du génie civil :

Les chaux aériennes, principalement calciques à l'état vive, sont utilisées pour le traitement des sols et des matériaux (recyclage, valorisation, réemploi). La chaux aérienne calcique, sous forme vive ou hydratée, est utilisée comme composant, et éventuellement activateur, dans des liants à base de ciments, laitiers, cendres volantes, etc.

La chaux aérienne calcique sous forme hydratée entre dans la composition des mortiers techniques (mortiers d'injection, mortiers de bourrage de tunnels, etc.) [11]

II.3.4.3. Dans le domaine des enrobés bitumineux :

La chaux aérienne calcique, sous forme hydratée peut être utilisée comme additif multifonctionnel dans les enrobés bitumineux.

Les laits de chaux calciques, trouvent une application en protection des couches d'accrochages. Ces dernières, répandues avant la pose de l'enrobé bitumineux, restent fragiles vis-à-vis de la circulation des engins de chantier. Les laits de chaux les protègent contre l'arrachement des roues et des chenilles d'engins. [11]

II.4. Comment ajouter de la chaux hydratée à un enrobé bitumineux :

Il est possible d'ajouter de la chaux éteinte à l'asphalte par une multitude de moyens. Règle générale, la dose est de un pour cent du poids de l'asphalte, bien que dans les cas où l'on prévoit un désenrobage grave, la quantité peut augmenter. [13]

Il existe plusieurs 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% [12].

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 hydratée ajoutée, de sorte que la proportion massique totale de filler reste constante.

Les méthodes les plus couramment utilisées pour l'ajout de la chaux sont décrites ci-dessous.

II.4.1. Méthode à sec :

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 (filler mixte). 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.

II.4.2.Méthode de la chaux sèche sur le granulat humide :

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

II.4.3.Méthode de la suspension (lait de chaux) :

Cette méthode utilise un lait de chaux, mélange de chaux et d'eau, qui est ajouté en quantités contrôlées aux granulats. Cette méthode garantit une excellente répartition de la chaux hydratée à la surface des granulats. Les granulats traités peuvent alors être envoyés directement dans la centrale d'enrobage, où ils peuvent être stockés en tas quelques temps, permettant une meilleure réaction de la chaux avec les surfaces granulaires et les particules argileuses.

II.5. Amélioration apportées par la chaux hydratée aux enrobes bitumineux :

II.5.1. Meilleure résistance au désenrobage

Le désenrobage se produit lorsque le lien physique entre le bitume et le granulat s'affaiblit, phénomène accentué en présence d'eau et lors de la formation de composés hydrosolubles. Cela débouche sur des dégradations telles que l'arrachement de granulats, ce qui peut dégénérer en nids de poule. Lorsque de la chaux hydratée est ajoutée à l'enrobé, elle réagit avec le granulat, améliorant la liaison bitume-granulat. De plus, la chaux hydratée réagit 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 hydratée provoque la formation de sels de calcium insolubles qui maintiennent l'eau hors du complexe.

II.5.2. Meilleure résistance à l'orniérage

L'orniérage correspond à l'apparition de déformations permanentes au niveau des couches supérieures de la chaussée. Des circonstances de trafic lourd intense et lent ainsi que des températures élevées favorisent ce type de dégradation. A la différence de la plupart des fillers minéraux, la chaux hydratée est poreuse. Lorsqu'elle se retrouve dans l'enrobé, sa porosité se remplit de bitume, générant une rigidifiassions de l'enrobé, et améliorant de ce fait sa résistance à l'orniérage. A 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.

II.5.3. Ralentissement du vieillissement du bitume

Le vieillissement chimique du bitume se développe dans le temps en grande partie suite à des réactions d'oxydation, ce qui fragilise l'enrobé. En particulier, les groupements polaires du bitume réagissent, ce qui rigidifie l'enrobé et diminue sa capacité à relaxer les contraintes. Fissuration et baisse générale de la qualité de roulement sont des symptômes courants des enrobés vieillis. Les charges lourdes liées au trafic deviennent d'autant plus dommageables sur des chaussées déjà fragilisées. La chaux hydratée limite le vieillissement des enrobés en ralentissant celui de la plupart des bitumes. Ceci 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 originelle plus longtemps et voit son niveau de résistance à la fissuration plus longuement conservé en présence de chaux hydratée.

II.5.4. Diminution de la fragilité

Avec le vieillissement de l'enrobé, la fissuration intervient souvent, d'abord sous forme de micro-fissures qui coalescent ensuite pour former des macro-fissures. Comme décrit plus haut, ces phénomènes sont accentués par les charges répétées liées au trafic et la présence d'un enrobé vieilli, plus fragile. La fissuration peut également provenir des contraintes climatiques, par exemple en conséquence de fortes variations thermiques diurnes ou de températures très basses générant un fort retrait. Les particules de chaux hydratée interviennent alors comme un obstacle à la propagation des micro-fissures et gênent ainsi leur coalescence dès leur formation. Combiné à l'effet chimique sur le vieillissement du bitume, cette propriété contribue à améliorer la résistance à la fissuration des enrobés additives de chaux hydratée.

II.6. Utilisation actuelle de la chaux dans les mélanges bitumineux en Europe :

Le tableau suivant présente l'utilisation actuelle de la chaux hydratée dans les mélanges bitumineux en Europe

Tab (II.1) : Utilisation actuelle de la chaux dans les mélanges bitumineux en Europe

Pays	Niveau d'expérience	Début	[Enrobés à chaud traités à la chaux] / [total enrobés à chaud] (approx en %)	% de chaux hydratée dans les enrobés à chaud	Forme	Objectif	Applications
Allemagne	volontaire	2000	< 1	1 à 3	pure ou filler additivé	désenrobage, vieillissement	AC, SMA
Autriche	volontaire	2003	1	1.5 à 3.5	pure	désenrobage, orniérage	AC, SMA, PA
Belgique	de obligatoire à volontaire	années 80	< 1	1.5	filler additivé	désenrobage	SMA, PA (bitume-caoutchouc)
Danemark	volontaire	années 90	< 1	1 à 1.5	pure	désenrobage	AC
Espagne	volontaire	2004	< 1	1 à 2	pure	désenrobage	SMA
Finlande	volontaire	?	< 1	1 à 2	pure ou filler additivé	désenrobage, vieillissement, autre	AC, SMA, CMA
France	volontaire	? (> 1945)	1	1 à 1.5	pure ou filler additivé	désenrobage, vieillissement, autre	AC, CMA, PA, PA (bitume-caoutchouc), BBTM
Hongrie	tests	2009	< 1	2	a définir	désenrobage, orniérage	AC
Irlande	volontaire	2001	< 1	2	pure	désenrobage, orniérage	PA
Italie	volontaire	années 90	< 1	1 à 2	filler additivé	désenrobage	SMA, PA
Pays-Bas	obligatoire	années 90	7	2	filler additivé	désenrobage, vieillissement, durabilité	PA
Pologne	volontaire	1998	< 1	1 à 3	filler additivé	désenrobage	AC
Portugal	volontaire	début 2000	< 1	1 à 2	pure	désenrobage	PA (bitume-caoutchouc)
République Tchèque	tests	1996	< 1	1.5	pure	désenrobage, orniérage	AC, PA (bitume-caoutchouc)
Roumanie	tests	2007	< 1	2	filler additivé	désenrobage, orniérage	AC, SMA
Slovaquie	tests	2009	< 1	2	pure ou filler additivé	désenrobage	
Suède	volontaire / obligatoire	1998	< 1	1	pure	désenrobage, vieillissement	AC
Suisse	préféré	2006	1	1.5	pure	désenrobage, vieillissement, durabilité	PA, AC, SMA,
Royaume-Uni	volontaire	début 2000	1	1 à 2	pure	désenrobage	AC

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons essayé de cité la technique d'amélioration des enrobes bitumineux apporté par l'ajout d la chaux hydratée et les différentes méthodes d'ajout. Ensuite nous avons parlé sur l'utilisation actuel de la chaux hydratée.

Chapitre III

**Caractérisation Des Matériaux
Utilisée
Et Formulations**

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISEE ET FORMULATIONS

III.1 Introduction:

Ce chapitre a pour objectif de présenter les matériaux utilisés dans le cadre de cette étude.

Donc dans ce chapitre, d'abord, nous allons exposer les caractéristiques des différents matériaux utilisés dans la composition d'un béton bitumineux.

Puis, nous présentons les mélanges choisis dans cette étude par l'étude de formulation et la détermination des différents pourcentages de la chaux supposés. Finalement la conclusion qui récapitule tout les renseignements nécessaires exposé (Sachant que les essais réalisés dans cette étude sont faites au niveau de laboratoire CTTP D'ALGER).

Le schéma suivant présente la méthodologie de ce travail. fig(III.1).

III.2 Provenance des matériaux :

III.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 enrobes bitumineux destinées aux couches de roulement.

Les origines des fractions granulaires 0/3, 3/8, 8/15 le sont données dans le tableau (III.1)

Tab(III.1) : Provenance des granulats utilisés.

Matériau	Carrières
Sable 0/3	Ain-Touta (Batna).
Gravier 3/8	Ain-Touta (Batna).
Gravier 8/15	Ain-Touta (Batna).



Sable 0/3



gravier 3/8



gravier 8/15

Photo (III.1): fractions granulaires 0/3, 3/8 et 8/15 utilisées.

III.2 .2 Le bitume :

Le bitume utilisé dans cette étude est un bitume pur de classe 35/50 provenant des fondoirs de la centrale d'enrobage du groupe EVSM à ALGER.



photo (III.2) : Bitume 35/50

III.2 .3 la chaux :

La chaux utilisée dans cette étude c'est la chaux hydratée de « ben Rayien de Ghardaia »

III.3 Identification des constituants :**III.3.1 Caractéristiques intrinsèques des granulats :**

Afin de déterminer les caractéristiques intrinsèques des granulats, les essais suivants ont été réalisés :

III.3.1.1 Masses volumiques (NFP 18-301):**a. Masse volumique absolue :**

est la masse par unité du volume de la matière qui constitue le sable, sans tenir compte des vides qui peuvent prendre place entre les grains .La formule qui permet de calculer ce paramètre est :

$$\gamma_s = \frac{M}{V_s}$$

Tels que:

γ_s : La masse volumique absolue (t/m³, g/cm³,...)

M : La masse de l'échantillon (g)

V_s : Le volume absolu de l'échantillon (cm³)

b. Masse volumique apparente norme (NFP 94-064) :

par définition la masse volumique γ_a d'un échantillon est le quotient de sa masse M par son volume V_a qu'il occupe : $\gamma_a = \frac{M}{V_a}$

γ_a : La masse volumique apparente (t/m³, g/cm³,...)

M : La masse de l'échantillon (g)

V_a : Le volume apparent de l'échantillon (cm³)

Les résultats se résument dans le tableau suivant pour les différents granulats:

Tab (III.2): La masse volumique absolue et apparente des granulats et de chaux utilisée.

Type de granulat	γ_s (g/cm ³)	γ_a (g/cm ³)
Sable 0/3	2.67	1.49
Gravier 3/8	2.68	1.50
Gravier 8/15	2.68	1.47
Chaux hydratée	2.3	0.65
Chaux vive	3.3	0.83

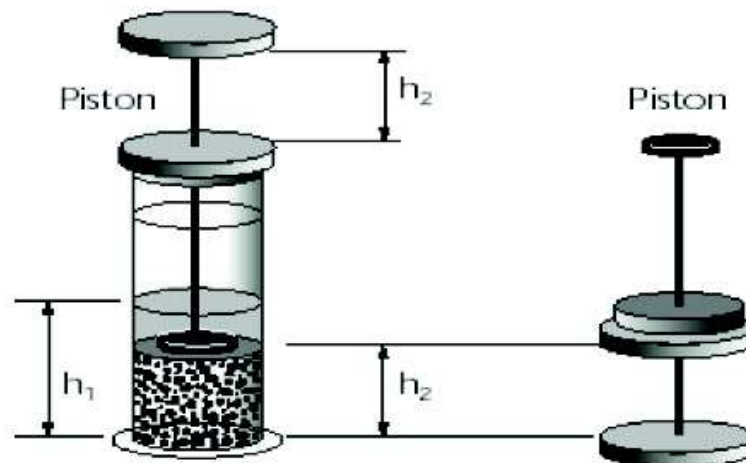
III.3.1.2 Equivalent de sable (norme NF P 18 598) :

Cet essai utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable effectué sur une fraction 0/5 mm du matériau à étudier. On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout au bout de 20 minutes on mesure les éléments suivants :

- hauteur h1 : sable propre +éléments fine (floculant).
- hauteur h2 : sable propre seulement.

On déduit l'équivalent de sable où on peut utiliser un piston comme la figure ci-dessous montre:

$$ESV = 100. h2 / h1$$



Fig(III.1): Principe d'essai d'équivalent de sable par piston

Les résultats trouvés sont mentionnés dans le tableau suivant:

Tab (III.3): ES de sable 0/3 utilisé

	Première éprouvette	Troisième éprouvette	Deuxième éprouvette
ES (%)	78	75	78
ES (%) moyenne	77		

III.3.1.3 Résistance à la fragmentation et à l'usure :

Elles sont mesurées par le coefficient de "Los Angeles" et le coefficient Micro Deval, Les résultats trouvés sont mentionnés dans le tableau suivant:

Tab (III. 4) : Résultats des essais LA et MDE

Essais	Référence	Gravier 3/8	Gravier 8/15
LA [%]	NA 5130	21.4	24.92
MDE [%]	NA 5129	8	6.74

III.3.2 Caractéristiques de fabrications des granulats :

III.3.2.1 Analyse granulométrique (NFP 18-560):

Cet essai a pour objectif de déterminer la répartition des grains suivant leurs dimensions ou grosseurs pour les granulats supérieurs au diamètre 0,08 mm. Les résultats de

l'analyse granulométrique sont donnés sous forme d'une courbe dite courbe granulométrique. Figure (III.2)

Le tableau (III.3) ci-dessous présente la distribution granulométrique pour les trois fractions granulaires.

Tab (III.5): Analyse granulométrique des granulats utilisés.

Tamis (mm)	Tamisât (%)		
	0/3	3/8	8/15
16	100	100	100
14	100	100	98
12.5	100	100	89
10	100	100	57
8	100	98	23
6.3	100	88	5
5	100	75	2.4
4	97	60	1.96
3.15	91.4	42	1.63
2	75.6	22	1.33
1	53.8	11	1.03
0.63	42.6	9	0.73
0.315	29.7	7	0.7
0.25	25.9	6	0.65
0.16	21	5	0.6
0.08	16.2	4	0.56

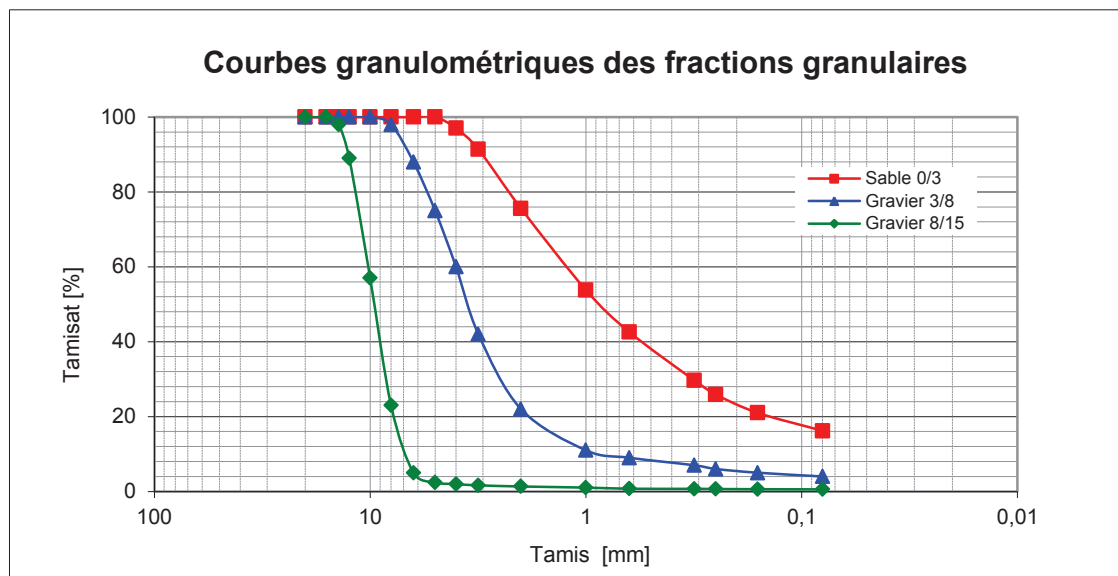


fig (III.2) : courbes granulométriques de différentes fractions granulaires utilisées

Commentaire :

Nous remarquerons que les trois classes granulaires présentent une granulométrie continue.

III.3.2.3 Coefficient d'aplatissement : (norme NF EN 933-3)

L'essai consiste à effectuer un double tamisage. Tout d'abord, au moyen de tamis d'essai, l'échantillon est fractionné en différents granulats élémentaires d_i/D_i , comme indiqué dans le tableau 1. Chacun des granulats élémentaires d_i /D_i est ensuite tamisé au moyen de grilles à fentes parallèles d'une largeur d'écartement $D_i/2$.

Le coefficient d'aplatissement global est calculé en tant que masse totale des particules passant au travers des grilles à fentes, exprimé en pourcentage du total de la masse sèche des particules faisant l'objet de l'essai.

Tab(III.6) : Grilles à fentes

Granulat élémentaire d_i/D_i	Largeur de fente de la grille
31.5/40	20 ± 0.2
25/31.5	16 ± 0.2
20/25	12.5 ± 0.2
16/20	10 ± 0.1
12.5/16	8 ± 0.1
10/12.5	6.3 ± 0.1
8/10	5 ± 0.1
6.3/8	4 ± 0.1
5/6.3	3.15 ± 0.1
4/5	2.5 ± 0.1

Les résultats trouvés sont mentionnés dans le tableau des caractéristiques de fabrication des agrégats suivant:

Tab(III.7) : Caractéristiques de fabrication des agrégats.

SABLE 0/3	Essais		Résultats	Spécifications
	Analyse Granulométrie	Tamis	Tamisât (%)	Limite (NFP 18-545)
		2D	100	100.00
		1,4 D	98	98 – 100
	D	91	85 – 99	
6Gravillon 3/8	Essais		Résultats	Spécifications
	Coefficient d'aplatissement (%)		17.92%	≤ 25
	Analyse Granulométrie	Tamis	Tamisât (%)	Limite (NF P 18-545)
		2D	100	100.00
		1,4 D	100	98 – 100
		D	98	85 – 99
		D/1,4	76	25 – 80
		D	42	0 – 20
d/2	14	≤ 5		
Gravillon 8/15	Essais		Résultats	Spécifications
	Coefficient d'aplatissement (%)		14.518%	≤ 25
	Analyse Granulométrie	Tamis	Tamisât (%)	Limite (NF P 18-545)
		2D	100	100
		1,4 D	100	98 – 100
		D	99	80 – 99
		D	23	0 – 20
d/2	1.96	≤ 5		

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 granulométrie et la teneur en fines.

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

III.3.3 Caractéristique du bitume :

Le bitume utilisé dans cette étude est un bitume pur de classe 35/50 provenant des fondoirs de la centrale d'enrobage du groupe EVSM à ALGER. Les essais d'identification sont les suivantes :

a. Essai de ductilité selon la norme NA 5223

a.1. Définition :

L'essai de ductilité, est un essai de laboratoire qui permet de déterminer l'aptitude d'un liant bitumineux à résister à la traction, à savoir à évaluer sa cohésivité.

a.2. Le principe :

Le principe consiste à mesurer l'allongement à la rupture d'une éprouvette de forme déterminée que l'on étire à une vitesse et à une température imposée.

a.3. Déroulement de l'essai :

- Chauffer l'échantillon jusqu'à ce qu'il devient fluide.
 - Enduire le moule d'un mélange de dextrine et de glycérine.
 - Verser l'échantillon dans le moule et le laisser refroidir pendant 30min à 40 min.
- photo (III.3)



Photo (III.3) : remplissage de moule

- Placer le moule dans un bain d'eau pendant 30min à 25°C.
- Eliminer l'excès avec un couteau.
- Placer le moule dans le ductilimetre et le laisser pendant 1h30 à 25°. photo (III.4)

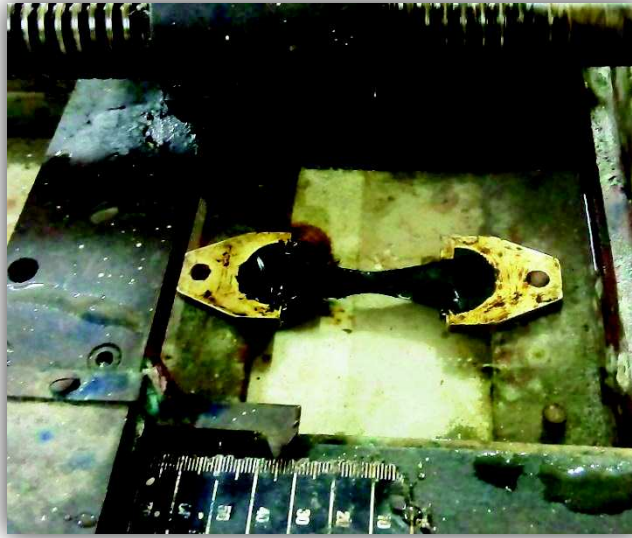


photo (III.4) : le moule dans le ductilimetre

- Effectuer l'étirage à une vitesse de 50mm/min jusqu'à la rupture. photo (III.5)



photo (III.5) : opération d'étirage

- Mesurer en cm la distance dont il a fallu écarter les pattes d'attache pour provoquer la rupture.

b. Essai de point de ramollissement selon la norme NA 2617**b.1. Définition :**

Le point de ramollissement est la température à laquelle un produit (par exemple le bitume) atteint un certain degré de ramollissement dans des conditions normalisées.

b.2. Le principe :

Deux disques horizontaux de bitume, moulés dans des anneaux de laiton à épaulement, doivent être chauffés dans un bain liquide avec un taux d'élévation de la température contrôlé, alors que chacun soutient une bille d'acier. Le point de ramollissement noté doit correspondre à la moyenne des températures auxquelles les deux disques se ramollissent suffisamment pour permettre à chaque bille, enveloppée de liant bitumineux, de descendre d'une hauteur de $(25,0 \pm 0,4)$ mm.

b.3. Déroulement de l'essai

- Chauffer l'échantillon jusqu'à ce qu'il soit fluide.
- Verser l'échantillon dans deux anneaux préchauffés. photo (III.6) et reposants sur une plaque enduite d'un mélange de glycérine et de dextrine pour éviter l'adhérence du produit.

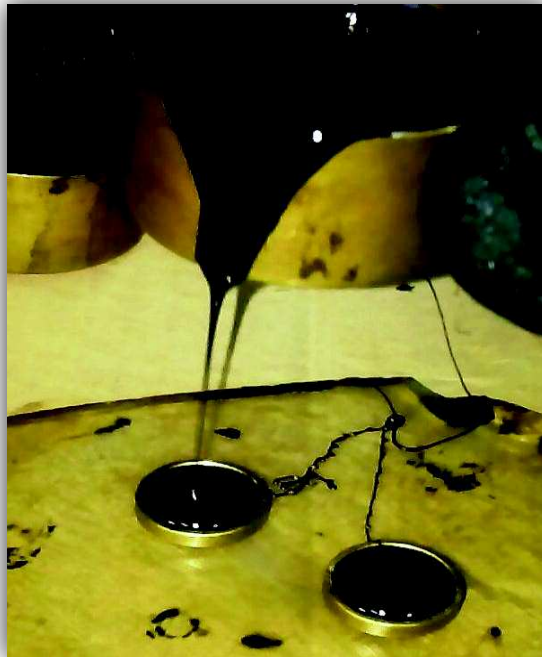


photo (III.6) : remplissage des moules

- Laisser refroidir 30min au moins.
- Enlever l'excès du produit par arasement avec une spatule chauffée.
- Assembler l'appareillage avec les anneaux, les guides et thermomètre spécifié en position correcte. Photo (III.7)



photo(III.7) : assemblage de l'appareil

- Remplir le vase avec de l'eau distillée.
- Placer les billes d'acier au centre de chaque anneau.
- Chauffer à vitesse de 5°C/min.
- Noter la température à laquelle l'échantillon enveloppant la bille touche la plaque du support. Photo (III.8)



photo (III.8) : la bille touche la plaque

c. Essai de pénétrabilité selon la norme NA 5192**c.1. Définition :**

consistance exprimée comme la profondeur, en dixièmes de millimètre, correspondant à la pénétration verticale d'une aiguille de référence dans un échantillon d'essai du matériau, dans des conditions prescrites de température, de charge et de durée d'application de la charge.

c.2. Le principe :

La pénétration d'une aiguille de référence dans l'échantillon d'essai conditionné doit être mesurée. Les conditions opératoires qui s'appliquent aux pénétrabilités jusqu'à environ $330 \times 0,1$ mm, doivent être : température de 25 °C, charge appliquée de 100 g, durée d'application de la charge de 5 s. Pour les pénétrabilités prévues supérieures à approximativement $330 \times 0,1$ mm, la température d'essai doit être abaissée à 15 °C, alors que la charge appliquée et sa durée d'application restent inchangées.

c.3. Déroulement de l'essai

- Chauffer l'échantillon jusqu'à ce qu'il soit fluide.
- Verser l'échantillon dans le gobelet préchauffé (la hauteur de l'échantillon doit être ≥ 10 mm à la profondeur à laquelle l'aiguille est susceptible de pénétrer photo (III.9)



photo (III.9) : remplissage des gobelets

- Protéger le gobelet et son contenu de la poussière par un couvercle et le laisser à la température (20°C - 30°C) pendant (1h30 – 2 h00).
- Placer ensuite le gobelet dans un bain d'eau à 25°C pendant (1h30 – 2 h00).
- Placer la prise d'essai dans le récipient de transfert et le mettre sur le plateau du

pénétromètre.

- Déplacer l'aiguille chargée (100grs \pm 0.1 grs) pour qu'elle affleure la surface de la prise d'essai.
- Ramener à 0 l'aiguille du cadran.
- Libérer l'aiguille pendant la durée spécifiée de (5s \pm 0.1s) la bloquer aussitôt et mesurer la profondeur d'enfoncement en (1/10mm). Photo (III.10)



photo (III.10) : mesurer la profondeur d'enfoncement

- Effectuer 03 mesures avec la même aiguille.
- A chaque mesure, replacer la prise d'essai et le récipient de transfert dans le bain d'eau.

Après les essais d'identification réalisés sur ce bitume dans le laboratoire CTTTP on a obtenu les résultats suivants :

Tab (III.8) : Caractéristiques du bitume 35/50

Essai	Valeur	Unité	Spécification norme NA 5265
Densité	1.02	g.cm ⁻³	1 – 1.100
Pénétrabilité à 25°C	39	1/10 mm	35 – 50
Point de ramollissement TBA	54.5	°C	52 – 60
Ductilité	>100	Cm	> 60

III.4. ETUDE DE LA FORMULATION

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 (déshébergement). Une étude de formulation consiste à :

- Choisir un mélange granulaire composé des trois fractions granulométriques (0/3, 3/8 et le 8/15) s'insérant parfaitement dans un fuseau de référence (fuseau SETRA / LCPC BBSG 0/14),
- Déterminer la teneur optimale en bitume à l'égard des spécifications de compacité et de résistance mécanique (Marshall et sensibilité à l'eau) en vigueur en Algérie,

III.4.1 Courbe granulométrique du mélange

L'objectif visé est de maîtriser la disposition granulaire du squelette granulométrique et de choisir une formule qui donne un mélange ayant la meilleure aptitude au compactage et qui pourrait conférer une meilleure stabilité au mélange hydrocarboné. La composition granulaire suivante a été retenue ;

Tab (III.9): Composition du mélange granulométrique.

Fractions	Pourcentage (%)
Sable 0/3	39 %
Gravier 3/8	20 %
Gravier 8/15	41 %

La courbe granulométrique du mélange est donnée par la figure suivante.

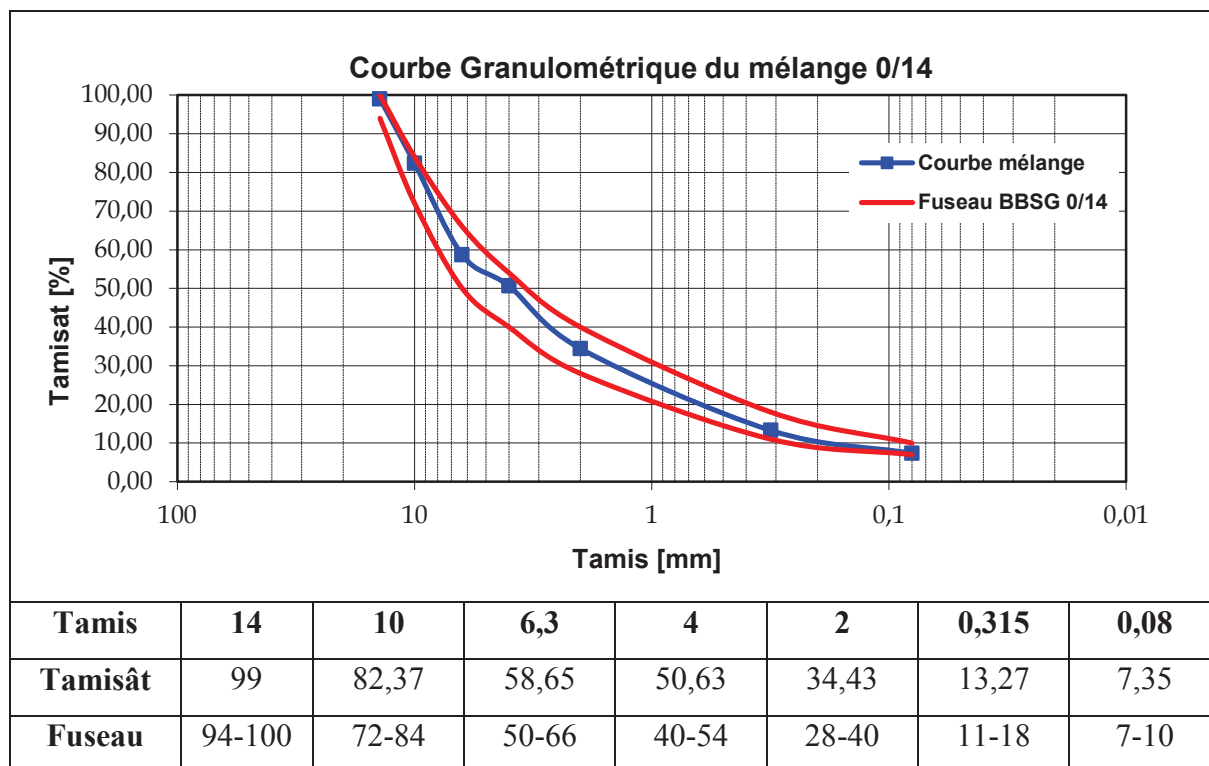


Fig (III.3): Courbe granulométrique du mélange granulaire.

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

III.4.2 Détermination des teneurs 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 granulaire donné, la formule suivante permet d'avoir une approximation de la surface spécifique Σ :

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

Avec :

G : des éléments supérieurs à 6.3 mm.

S : des éléments compris entre 6.3 et 0.315 mm.

s : des éléments compris entre 0.315 et 0.08 mm.

f : des éléments inférieurs à 0.08 mm.

G+S+s+f	Surface spécifique = $0,25G + 2,3S + 12s + 135f$	
100%	S (m ² /kg)	11,78

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

$$TL = \alpha \cdot K \cdot \sqrt[5]{\Sigma}$$

Avec :

TL : teneur en liant (%)

α : coefficient destiné à tenir compte de la masse volumique réel des granulats « MVRg ». Si celle-ci diffère de 2.65 t/m³, on utilise la formule suivante :

$$\alpha = \frac{2.65}{MVR_g}$$

Σ : surface spécifique des granulats (m²/kg).

K : le module de richesse qui caractérise l'épaisseur moyenne du film de bitume autour des granulats (la valeur minimale du module de richesse k pour un béton bitumineux 0/14 est 3.2).

Afin de trouver la teneur en liant optimale pour le mélange, on a préparé trois mélanges avec des modules de richesse différent. Les teneurs en bitume ainsi déterminées par la méthode citée précédemment en fonction des modules de richesse sont données dans le tableau suivant :

Tab(III.10): Teneurs en liant

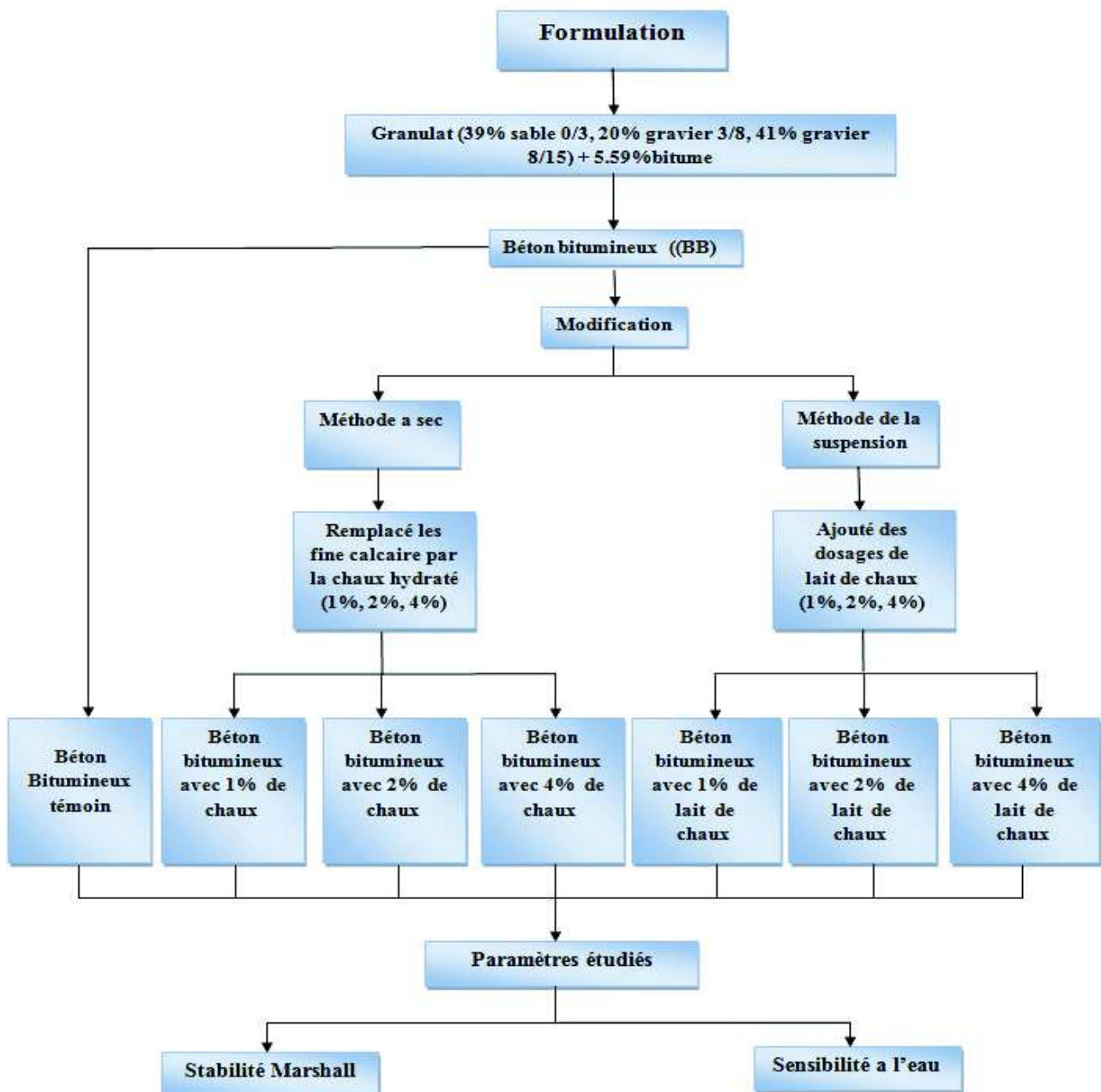
Formule	A	B	C
Module de richesse	3.45	3.6	3.75
Teneur en liant (%)	5.59	6.83	6.07

La teneur en liant optimale choisie pour ce mélange est **5.59%** (recommandation CTTP).

III.4.3 Détermination des mélanges des bétons bitumineux étudiés:

Dans notre étude nous avons utilisé deux méthodes d'incorporation de la chaux hydratée dans le béton bitumineux étudié la première consiste à remplacer des pourcentages des fines de sable par la chaux hydratée et la deuxième consiste à ajouter des dosages différentes en lait de chaux directement au mélange granulaire.

L'organigramme suivant présente la méthodologie de travail.



Fig(III.4) : schéma de travail

Dans cette étude sept mélanges ont été formulées à fin de faire les expérimentations nécessaires.

La fabrication d'un seul mélange consiste à déterminer le nombre d'éprouvette étudié pour déterminé le poids totale du mélange voir le tab(III.11)

Tab(III.11) : poids de mélange d'enrobé bitumineux choisie

Essais	Nombre d'éprouvette	Poids d'éprouvette	Poids totale
Stabilité Marshall	4	1200g	4800g
Sensibilité a l'eau	6	1200g	7200g
Module de rigidité	2	1200g	2400g
Nombre totale	12	1200g	15000 g

Le nombre total des éprouvette nécessaire pour les sept mélange étudié est 84 éprouvette

Le tableau suivant présent les mélanges étudiés :

Tab(III.12) : mélanges étudiés

N° de mélange	Teneur en bitume %	Pourcentage de la chaux	Mélange étudié en %	Mélange étudié en masse (g)
1er mélange (témoin)	Tl =5.59	0 %	39% sable 0/3 20% gravier 3/8 41% gravier 8/15	5850 g (0/3) 3000 g (3/8) 6150 g (8/15) 839 g (bitume)
Les mélanges préparés par la méthode à sec				
2ème mélange	Tl =5.59	1 %	38% sable 0/3 20% gravier 3/8 41% gravier 8/15	5700 g (0/3) 3000 g (3/8) 6150 g (8/15) 839 g (bitume) 150 g (chaux sèche)
3ème mélange	Tl =5.59	2 %	37% sable 0/3 20% gravier 3/8 41% gravier 8/15	5550 g (0/3) 3000 g (3/8) 6150 g (8/15) 839 g (bitume) 300 g (chaux sèche)

4ème mélange	Tl =5.59	4 %	35% sable 0/3 20% gravier 3/8 41% gravier 8/15	5250 g (0/3) 3000 g (3/8) 6150 g (8/15) 839 g (bitume) 600 g (chaux sèche)
Les mélanges préparés par la méthode de la suspension				
5ème mélange	Tl =5.59	1 %	39% sable 0/3 20% gravier 3/8 41% gravier 8/15	5850 g (0/3) 3000 g (3/8) 6150 g (8/15) 839 g (bitume) 450 ml (lait de chaux)
6ème mélange	Tl =5.59	2 %	39% sable 0/3 20% gravier 3/8 41% gravier 8/15	5850 g (0/3) 3000 g (3/8) 6150 g (8/15) 839 g (bitume) 900 ml (lait de chaux)
7ème mélange	Tl =5.59	4 %	39% sable 0/3 20% gravier 3/8 41% gravier 8/15	5850 g (0/3) 3000 g (3/8) 6150 g (8/15) 839 g (bitume) 1200 ml (lait de chaux)

Remarque :

La concentration du lait utilisé est de 0.33 kg par litre pour tous les mélanges

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons essayé d'identifier les différents types des matériaux utilisés dans cette étude : granulats, chaux, bitume

Dans cette étude sept mélanges ont été formulées à fin de faire les expérimentations nécessaires.

Chapitre IV

resultats d'essais et interpretations

CHAPITRE IV : RESULTAT D'ESSAIS ET INTERPRETATIONS**IV.1. ESSAIS REALISES ET DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX****IV.1.1 Introduction:**

Dans ce chapitre, nous allons exposer l'étape expérimentale par la réalisation des deux essais mécaniques l'essai Marshall et la sensibilité à l'eau. Ainsi que les résultats relatifs aux ces essais

Ces essais ont pour but de juger la validité de notre choix des mélanges sélectionnés précédemment et ceci par la détermination des performances mécaniques de chaque mélange.

Sachant que nous avons adopté deux méthodes d'incorporation dans ce travail :

1- Méthode à sec.

2-Méthode de la suspension (l'ajout de lait de chaux)

Les deux méthodes mentionnées précédemment (chapitre II).

IV.1.2 Confection des éprouvettes:

Les éprouvettes sont confectionnées suivant le type d'essai Marshall pour les essais mécaniques étudié dans ce travail (même type d'éprouvettes).

IV.1.2.1 Préparation des mélanges :**IV.1.2.1.1 Préparation des mélanges granulaires****a. la méthode à sec (granulats sèche +la chaux hydrate poudre):**

- Euvé les granulats (105°C - 24h) ;
- Peser les granulats et la chaux qu'il faut ;
- Supprimer une partie des fines du sable pour le remplace par la chaux (cette étape pour objet de garder la même granulométrie du mélange) ;
- Ajouter la chaux au mélange granulaire. photo (IV.1) ;



photo (IV.1) : granulats traitées par la chaux hydratée

- mélanger les constituants. photo (IV.2).



photo (IV.2) : malaxage des constituants (chaux+granulats)

b. la méthode de la suspension (granulats sèche + lait de chaux):

b. 1. Préparation de lait de chaux :

- Peser la chaux vive qu'il faut, trios différente quantité (1% 2% 4% par rapport la masse du mélange granulaire)
- Gâcher la chaux vive pesé avec une quantité d'eau définit (Dosage approximatif : 3 litres d'eau pour 1 kg de chaux vive)
- Après le gâchage laisser le lait se repose pendant 20 minute (cette étape pour but d'assurer l'extinction totale de la chaux vive)



photo (IV.3) : préparation de lait de chaux

b.2. malaxage :

- Après la préparation du lait, verser chaque dosage à son mélange granulaire et continuer le malaxage jusqu'à l'obtention d'un recouvrement efficace des granulats.



photo (IV.4) : opération de malaxage

IV.1.2.1.2 : conservation :

Protéger les mélanges granulaires, garde les dans un espace sain, pendant la durée de stockage considéré (7jours).



photo (IV.5) : stockage et conservation des mélanges granulaires.

IV.1.2.2. Préparation du liant :

- Une quantité de liant correspondant aux besoins de l'essai est prélevé ;
- Le liant prélevé est placé dans un récipient remplis et fermé ;



photo (IV.6) : bitume 35/50

- La température de référence de préparation des mélanges est définie suivant la catégorie de liant hydrocarboné utilisée comme suit (NFP 98-250-1):
 - Bitume 80/100 : $140^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$
 - Bitume 60/70 : $150^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$
 - **Bitume 40/50 : $160^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$**
 - Bitume 20/30 : $180^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$

IV.1.2.3. Malaxage :

Après la durée de stockage considérer (7jours) ;

- Placer le mélange granulaire et le bitume dans l'étuve à la température 165°C pendant 2heur ;
- Verser dans la cuve de malaxage les échantillons de granulats pesés, avec la chaux et le bitume ;
- Malaxer les constituants dans la cuve ;
- Continuer le malaxage jusqu'à l'obtention d'un mélange intime, les granulats étant complètement enrobés de liant. S'assurer que le mélange est visuellement homogène. Terminer le malaxage en restant dans la durée maximale de 3min.



photo (IV.7) : L'opération de malaxage .



Photo (IV.8) : béton bitumineux obtenu après malaxage.

IV.1.3. Confection des éprouvettes pour les essais réalisés :

Les éprouvettes pour les essais réalisés sont déterminées par confection d'une éprouvette cylindrique (photo (IV.9), d'une masse indicative de 1200 g, de 105 mm de diamètre et de 63,5 mm de hauteur théorique.



Photo (IV.9) : Exemple d'éprouvette confectionnée pour les essais étudié

IV.1.3.1 : Remplissage des moules et compactage :

On pèse une quantité m égale 1200 g de mélange à 0,1% près en valeur relative.

(Photo IV.10)



photo (IV.10) : pesage et remplissage

Après avoir placé un disque de papier en fond de moule, les moules sont portés à la température de référence de préparation des éprouvettes 2 h au minimum, et on met en place la hausse puis on introduit le mélange en une seule fois dans le moule légèrement enduit d'oléate de soude glycéro. Ensuite, on place le deuxième disque de papier sur le mélange, on maintient fermement à la verticale la tige de la dame et on compacte le mélange 50 coups de la dame (voir la photo (IV.11)). On démonte et remonte le moule en intervertissant la base et la hausse et on répète à nouveau le damage. Le nombre total des coups est 100 coups.



photo (IV.11) : L'opération de compactage

Le moule est conservé 5 h au moins à température ambiante (15 à 25° C) après leur compactage.

IV.1.3.3 : Démoulage

Après refroidissement des moules, pour les démouler on fait passer l'éprouvette dans la hausse en s'aidant du piston extracteur et de la presse comme la photo (IV.12)

ci-dessous explique cette démarche :



Photo (IV.12) : L'opération de démoulage

La confection des autres éprouvettes se fait avec les mêmes étapes précédentes pour les autres mélanges.

Quand les éprouvettes sont prêtes, on commence le déroulement des différents essais.

On détermine les paramètres suivants :

- La densité apparente de l'éprouvette ;
- Compacité de l'éprouvette ;
- % des vides résiduels ou vides de l'éprouvette ;
- Stabilité Marshall en KN ;
- Résistance à la traction indirecte à 40°C ;
- Détermination de la sensibilité à l'eau.

IV.1.4 : Équipements et procédures d'essais :

IV.1.4.1 Essai Marshall :

Le concept de l'essai Marshall était développé par Bruce Marshall en 1948 au Mississippi State Highway Department, USA. [2] Cet essai permet de mesurer en laboratoire, avec une température et une énergie de compactage données, la résistance d'une éprouvette à la déformation sous l'application graduelle d'une charge et la déformation subie par cette éprouvette au moment de sa rupture sous l'application de la charge maximale dite stabilité et fluage Marshall.

Ces derniers facteurs permettent de donner des indications sur la qualité globale de l'enrobé dont le choix et le dosage des constituants pour obtenir une meilleure composition ou une formulation à adopter pour un enrobé. (La stabilité présente un maximum pour une certaine teneur en bitume, puis elle décroît).

IV.1.4.1.1 Principe de l'essai :

L'essai de stabilité Marshall est un essai de compression exercée suivant la génératrice d'une éprouvette cylindrique semi-frettée (photo(IV.10)). Cette compression est appliquée sur l'éprouvette après ½ heure d'immersion dans un bain d'eau à 60°C, et à la vitesse de 50 mm/mn \pm 0,1 mm/mn.

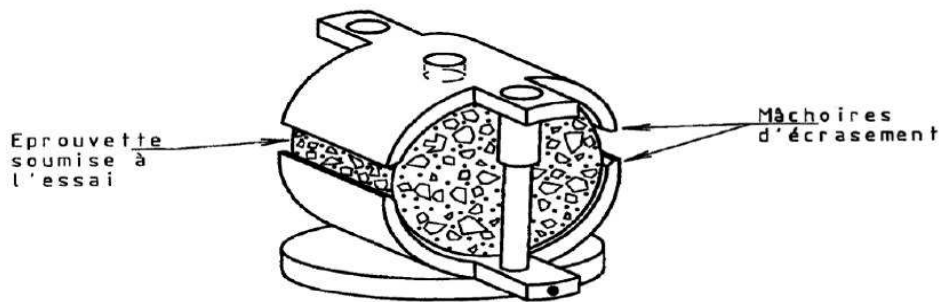


Photo (IV.12) : Principe de l'essai Marshall

IV.1.4.1.2 Déroulement de l'essai :

Après confection des éprouvettes, une partie sera réservée pour déterminer la densité apparente et l'autre sera réservée pour déterminer la stabilité et le fluage.

On immerge les éprouvettes dans le bain thermostatique réglé à $60^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ avec les mâchoires d'écrasement pour une durée de 30 mn (± 1 mn). Photo (IV.13)

Pendant ce temps, on installe également le dispositif contrôleur de cadence réglé pour une vitesse $50\text{mm/mn} \pm 0,1\text{mm/mn}$.

L'éprouvette est placée dans les mâchoires d'écrasement (photo (IV.14)), l'ensemble est porté entre les plateaux de la presse pour être soumis à l'essai de compression. Ces opérations doivent être réalisées en moins d'une minute.

La rupture se produit au moment de l'arrêt de l'appareil puis on note les chiffres qu'indiquent l'écran de l'appareil (stabilité et fluage). Les mêmes étapes sont faites pour toutes les éprouvettes réalisées dans cette étude.



Photo (IV.13) : éprouvettes dans le bain thermostatique réglé à $60^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$



Photo (IV.14) : L'éprouvette dans les mâchoires

IV.1.4.1.3 Formule de calcul :

$$S = L \times 0.232 \times K$$

S : Stabilité Marshall en KN

L : La lecture de l'anneau en mm

0.232 : constant d l'appareille

K : coefficient de correction.

IV.1.4.2. Sensibilité à l'eau :

La sensibilité à l'eau définie par le rapport de résistance en traction indirecte, calculé comme étant le quotient de la résistance d'éprouvettes humides (après immersion) sur celle d'éprouvettes sèches, exprimé en pourcent.

IV.1.4.2.1.Principe de l'essai:

Les éprouvettes nécessaires à la réalisation de l'essai sont fabriquées par compactage statique à double effet.

Les éprouvettes sont soumises à l'essai de traction indirecte après conservation à une température ambiante (20 ± 5) °C dans des conditions définies : à l'air pour certaines éprouvettes photo (IV.15), en immersion pour d'autres photo(IV.16), une période comprise entre 68 h et 72 h dans un bain d'eau à (40 ± 1) °C. La tenue à l'eau est caractérisée par le rapport des résistances avant ou après immersion. (Le mode opératoire mentionné dans l'annexe)



Photo (IV.15) : éprouvettes conservé à l'air.



Photo (IV.16) : éprouvettes immergé dans l'eau.

IV.1.4.2.2. Déroulement de l'essai:

Les éprouvettes sont soumises à l'essai de traction indirecte, qu'elles aient été conservées avec ou sans immersion.

- Porter le lot des corps d'épreuve secs à la température d'essai en le plaçant dans un bain d'eau, protéger de l'eau le corps d'épreuve au moyen d'un sac en plastique souple photo(IV.17), ou d'une autre protection étanche appropriée et s'assurer que la protection étanche est bien appliquée sur la surface de l'éprouvette pour permettre une transmission correcte de la chaleur ;



Photo (IV.17) : éprouvettes protégés avec un sac de plastique



Photo (IV.18) : éprouvettes immergés dans l'eau

- Sécher la surface des corps d'épreuve humides avec un chiffon pour effectuer l'essai ;
- Exercer une compression sur l'éprouvette photo(IV.19). Appliquer la charge diamétrale de manière continue, sans à coups, à une vitesse de déformation constante

de (50 ± 2) mm/min après une période transitoire représentant moins de 20 % du temps de chargement, jusqu'à atteindre la charge maximale ; enregistrer la charge maximale P appliquée ;



Photo (IV.19) : opération d'essai de traction indirecte



Photo(IV.20) : Type d'éprouvette écrasé par traction indirecte (fendage).

- Déterminer la résistance à la traction indirecte sur les éprouvettes conformément au mode opératoire de l'EN 12697-23. L'essai de traction indirecte doit être réalisé moins de 1 min après que le corps d'épreuve ait été sorti du bain.

IV.1.4.2.3. Formule de calcul :

$$\text{ITS} = \frac{2P}{\pi DH}$$

ITS : Résistance à la traction indirecte, exprimée en GPa;

P: Charge maximale, exprimée en kN;

D : Diamètre de l'éprouvette, exprimé en mm;

H : Hauteur de l'éprouvette, exprimée en mm.

$$\text{ITSR} = 100 \times \frac{\text{ITS}_w}{\text{ITS}_d}$$

ITSR : Rapport en pourcentage (%) des résistances à la traction indirecte ;

ITS_w: Résistance à la traction indirecte du lot «humide» en kPa ;

ITS_d : Résistance à la traction indirecte moyenne du lot «sec» en kPa.

IV.1.4.3 Détermination de la densité apparente (méthode géométrique) :

Masse volumique apparente :

Masse par unité de volume, incluant les vides d'air, d'un corps d'épreuve à une température d'essai connue (norme p98-818-6)

Le volume du corps d'épreuve s'obtient par mesurage des dimensions

IV.1.4.3.1 Appareillage supplémentaire pour la méthode géométrique

Pied à coulisse (photo. IV.21) pour le mesurage des dimensions de l'éprouvette avec une exactitude d'au moins 0,1 mm (EN 12697-29).

IV.1.4.3.2 Formule de calcul :

Calculer la masse volumique apparente géométrique d'une éprouvette cylindrique (ρ) au 1 kg/m³ le plus proche comme suit :

$$\rho = \frac{m}{\frac{\pi}{4} \times h \times d^2} \times 10^6$$

où :

ρ est la masse volumique apparente de l'éprouvette – mode opératoire «géométrique», en kilogrammes par mètre cube (kg/m³) ;

m est la masse de l'éprouvette sèche, en grammes (g) ;

h est la hauteur de l'éprouvette, en millimètres (mm) ;

d est le diamètre de l'éprouvette, en millimètres (mm).



Photo (IV.21) : pied à coulisse

IV.1.4.4 Détermination de l'affinité granulats-bitume (méthode de la bouteille tournante) EN 12697-11:

IV.1.4.4.1 définition de l'affinité granulats-bitume :

Degré d'enrobage de bitume déterminé visuellement sur des granulats minéraux enrobés de bitume.

IV.1.4.4.2 Principe de l'essai:

Dans la méthode «de la bouteille tournante», l'affinité est exprimée par le degré d'enrobage de bitume, déterminé visuellement, de granulats minéraux enrobés de bitume, non compactés, après une agitation mécanique en présence d'eau.

IV.1.4.4.3 Déroulement de l'essai:

- La fraction de 8 mm à 11,2 mm (ou de 5,6 mm à 8 mm ou de 6,3 mm à 10 mm) est lavée, séchée et mélangée à du bitume pour obtenir un enrobage complet et uniforme photo (IV.22)



Photo (IV.22) : granulats enrobés

- les granulats enrobés de bitume sont conservés à température ambiante ;
- étalés sur une plaque métallique ou un papier siliconé jusqu'au lendemain puis divisés en trois parts-échantillons pour analyse.
- Chaque part-échantillon est placée dans une bouteille remplie d'eau photo(IV.23)



Photo (IV.23) : Bouteille

- La bouteille est hermétiquement fermée et placée sur un dispositif permettant de la faire rouler photo(IV.24) ;



Photo (IV.24) : les bouteilles dans la jarrette de MDE

- Pour l'essai, régler la machine à rouler et les bouteilles à une vitesse de rotation définie (dans cette étude nous avons utilisé la machine de micro Deval)
- Placer les bouteilles sur la machine à rouler les bouteilles et commencer le roulage
- Estimer le degré d'enrobage de bitume sur les grains à 5 % près par une observation visuelle et le noter photo(IV.25)



Photo (IV.25) : Estimation de degré d'enrobage.

- Utiliser une lampe pour faciliter l'observation et l'estimation. Les zones éventuellement minces, brunâtres et translucides doivent être considérées comme étant complètement enrobées. Noter si des agglomérations de grains sont observées.

IV.2. RESULTATS ET DISCUSSION

IV.2.1 Essai de Marshall:

IV.2.1.1 La densité apparente et la densité absolue:

Le tableau ci-dessous présente la variation de la densité apparente et absolue en fonction du différent pourcentage de la chaux selon chaque mélange (le détail des calculs est mentionné dans l'annexe).

Tab (IV.1) : Variation de la densité apparente et absolue

Béton bitumineux Témoin			
Pourcentage de la chaux	0%		
La densité apparente(g/cm³)	2.34		
La densité absolue (g/cm³)	2.46		
A-Béton bitumineux modifié (avec la méthode à sec)			
Pourcentage de la chaux	1%	2%	4%
La densité apparente(g/cm³)	2.27	2.31	2.27
La densité absolue(g/cm³)	2.46	2.46	2.46
A-Béton bitumineux modifié (avec la méthode de lait)			
Pourcentage de la chaux	1%	2%	4%
La densité apparente(g/cm³)	2.31	2.34	2.35
La densité absolue(g/cm³)	2.46	2.46	2.46

Remarque :

Nous remarquons dans ce tableau que la densité apparente dans les sept mélanges, approximativement est constante en fonction de la variation des pourcentages de la chaux.

IV.2.1.2 Pourcentage des vides :

La détermination des différents types de pourcentages des vides en fonction des pourcentages de la chaux se fait par les formules citées dans le chapitre précédent.

- Pourcentage volumétrique des vides de l'éprouvette, soit V_v %

Le tableau suivant présente les différents pourcentages des vides :

Tab (IV.2) : Valeurs de V_v

Mélange Témoin			
Pourcentage de la chaux	0%		
V_v (%)	4.71%		
Les Mélanges avec la chaux Sec			
Pourcentage de la chaux	1%	2%	4%
V_v (%)	7,67%	6.06%	7.73%
Les Mélange avec lait de chaux			
Pourcentage de la chaux	1%	2%	4%
V_v (%)	6.00%	4.73%	4.39%

On présente la variation des différents pourcentages des vides V_v pour les différents mélanges par les figures suivantes :

❖ Méthode à sec :

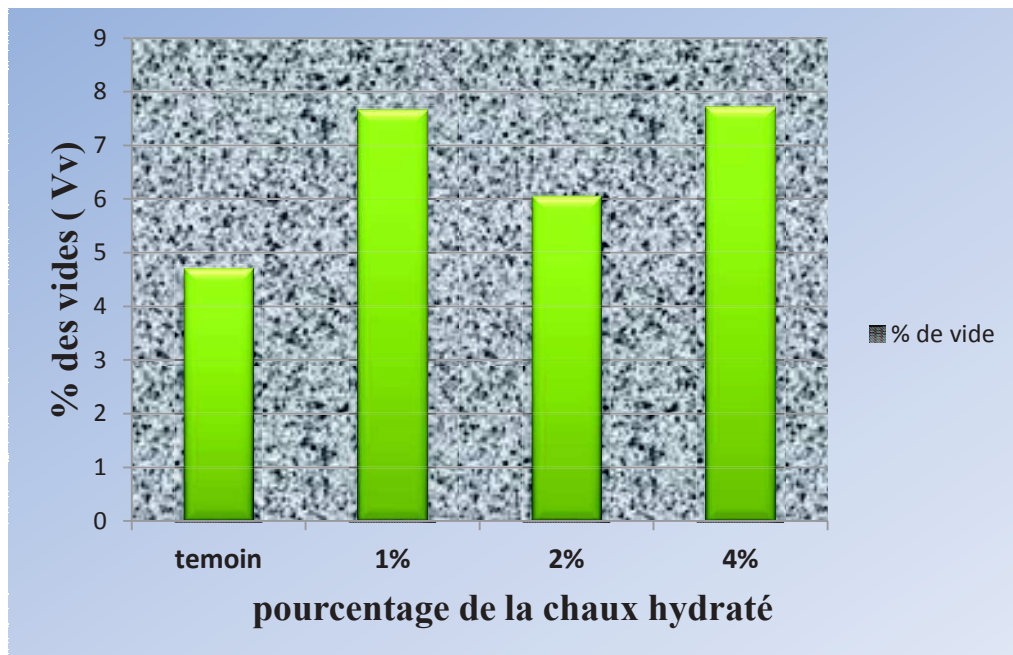


Fig (IV.1): Variation des vides en fonction des pourcentages de la chaux

❖ Méthode de la suspension (Lait de chaux) :

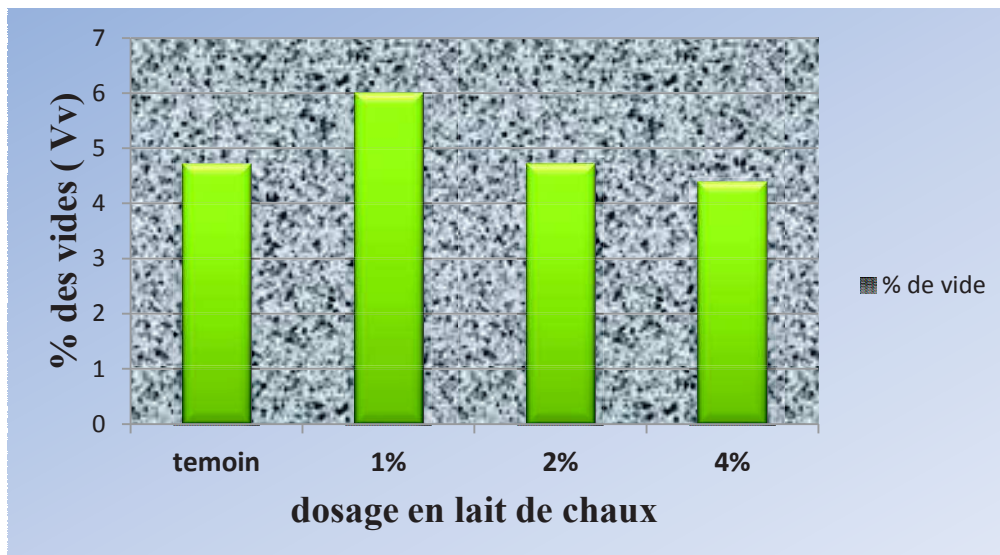


Fig (IV.2): Variation des vides en fonction des dosages en lait

La figure (IV.1) ci-dessus montre des valeurs élevées de pourcentage des vides par rapport le mélange témoin, Ces valeurs des vides éminentes sont dues au remplacement des fines du sable par la chaux hydratée, cette dernière ne présente pas le même rôle physique dans les trois mélanges. On voit aussi que le pourcentage des vides a peu près, constant pour les dosages (1% et 4%) de la chaux et qui est inférieure pour un dosage de 2% tout en restant supérieur à celle de l'enrobé de référence.

On voit sur la figure (IV.2) l'augmentation de pourcentage des vides clairement observé dans la première valeur (1% de lait de chaux) car la présence d'un liant minérale dans le mélange granulaire change la distribution des grains (le rôle d'un liant c'est l'assemblage des grains). Ce rôle permet de coller les grains entre eux et créé un nouvel espace (un vide).

D'autre part la diminution est remarquable pour les deux dernières valeurs, le pourcentage des vides diminue avec l'augmentation des dosages de lait de la chaux, car la quantité de la chaux présentée dans les laits 2 et 4% est supérieur a celle du premier mélange.

IV.2.1.3 La compacité :

Le tableau suivant présente la variation de la compacité des éprouvettes en fonction de la variation des dosages en chaux selon chaque mélange :

Tab (IV.3) : Variation de la compacité

Mélange Témoin			
Pourcentage de la chaux	0%		
La compacité (%)	95.29%		
Les Mélanges avec la chaux Sec			
Pourcentage de la chaux	1%	2%	4%
La compacité (%)	92.33%	93.94%	92.27%
Les Mélange avec lait de chaux			
Pourcentage de la chaux	1%	2%	4%
La compacité (%)	94.00%	95.27%	95.61%

Les figures ci-dessous présentent la variation de la compacité en fonction des dosages de la chaux hydratée selon chaque mélange :

❖ Méthode à sec :

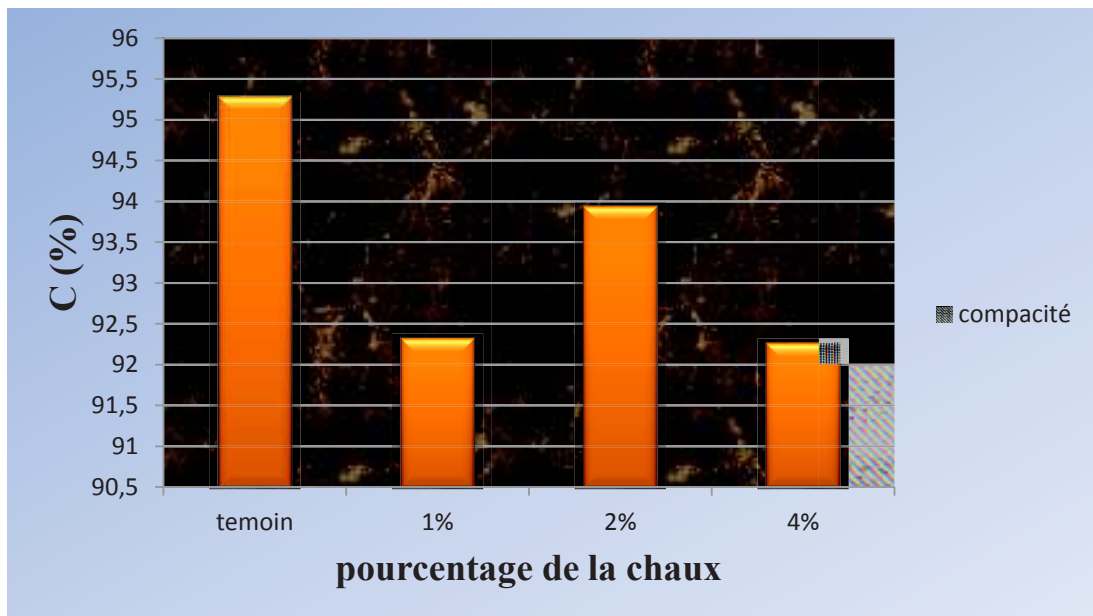


Fig (IV.3): Variation de la compacité en fonction des pourcentages de la chaux hydratée

❖ Méthode de la suspension (lait de chaux) :

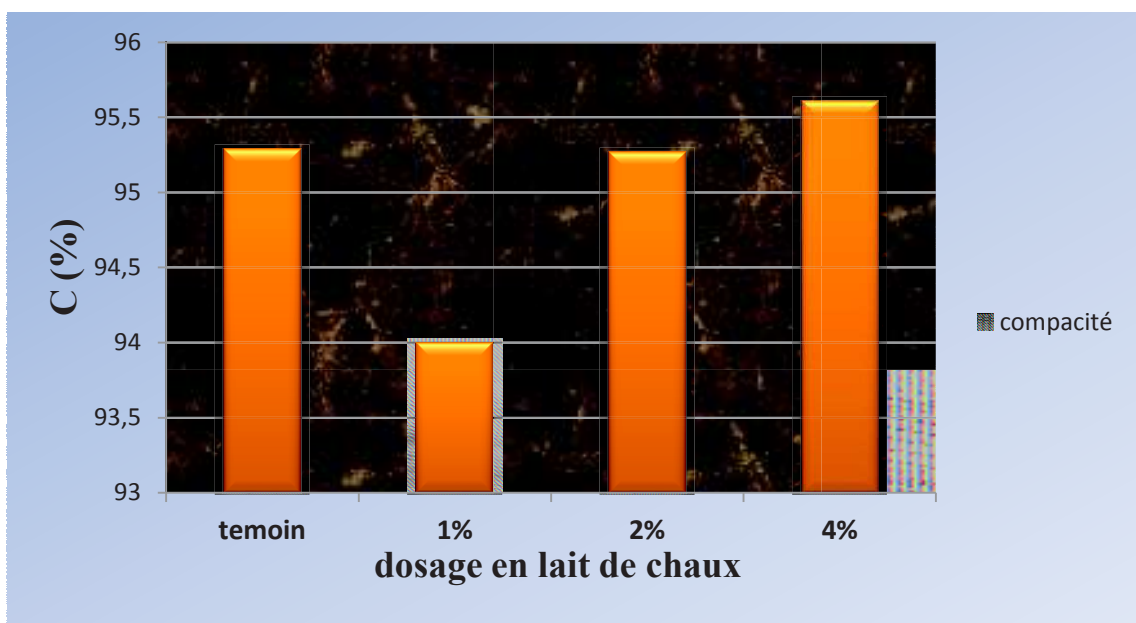


Fig (IV.4): Variation de la compacité en fonction des pourcentages de la chaux hydratée

La figure (IV.3) ci-dessus montre que la compacité diminue avec l'augmentation des dosages de la chaux, Les valeurs trouvées sont faible en comparaison avec les spécifications ($\geq 95\%$) et cela elle est remarquée par les valeurs élevées trouvées de pourcentages des vides V_v dans la figure (IV.1). On peut expliquer cette insuffisance que la chaux hydratée possède une porosité plus importante que les fillers minéraux (la chaux absorbe le bitume).

D'après le graphe ci-dessus on constate que la compacité diminue légèrement pour un dosage de 1% de lait de chaux puis elle augmente. Cette diminution due à la modification de la distribution granulaire du mélange car la présence de la chaux sous forme d'un lait change cette distribution par l'assemblage des grains (le rôle d'un liant) qui va créer un nouvel espace granulaire dans le mélange.

D'autre part la compacité est presque constante pour les deux dernières valeurs (2 et 4% de lait) et qu'elle égale à la valeur de référence. Tout en restant acceptable en comparaison avec les spécifications ($\geq 95\%$)

IV.2.1.4 Stabilité Marshall:

Le tableau suivant présente la variation de la stabilité Marshall des éprouvettes en fonction de la variation des dosages de la chaux selon chaque mélange.

Tab(IV.4) : Variation de la stabilité Marshall

Mélange Témoin			
Pourcentage de la chaux	0%		
Stabilité Marshall (KN)	10.55		
Les Mélanges avec la chaux Sec			
Pourcentage de la chaux	1%	2%	4%
Stabilité Marshall (KN)	10.28	10.81	12.59
Le gain de stabilité %	3.05	13.90	19.33
Les Mélanges avec lait de chaux			
Pourcentage de la chaux	1%	2%	4%
Stabilité Marshall(KN)	10.85	11.13	12.81
Le gain de stabilité %	14.33	17.28	21.42

Les figures ci-dessous présentent la variation de la stabilité de Marshall en fonction de pourcentage de la chaux hydratée

❖ La méthode à sec :

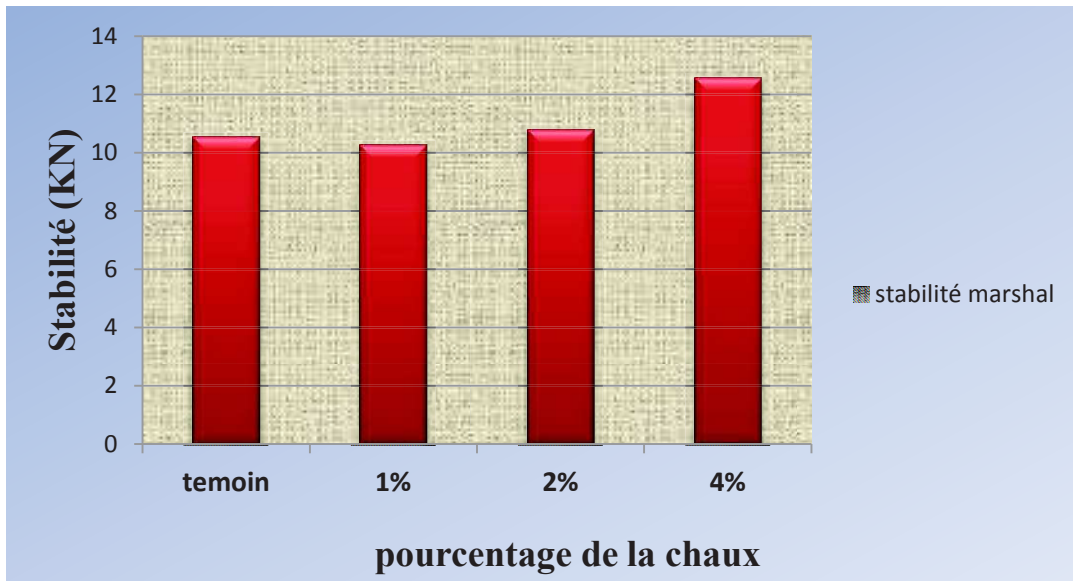


Fig (IV.5): Variation de stabilité Marshall en fonction des pourcentages de la chaux hydratée

❖ Méthode de la suspension (Lait de chaux) :

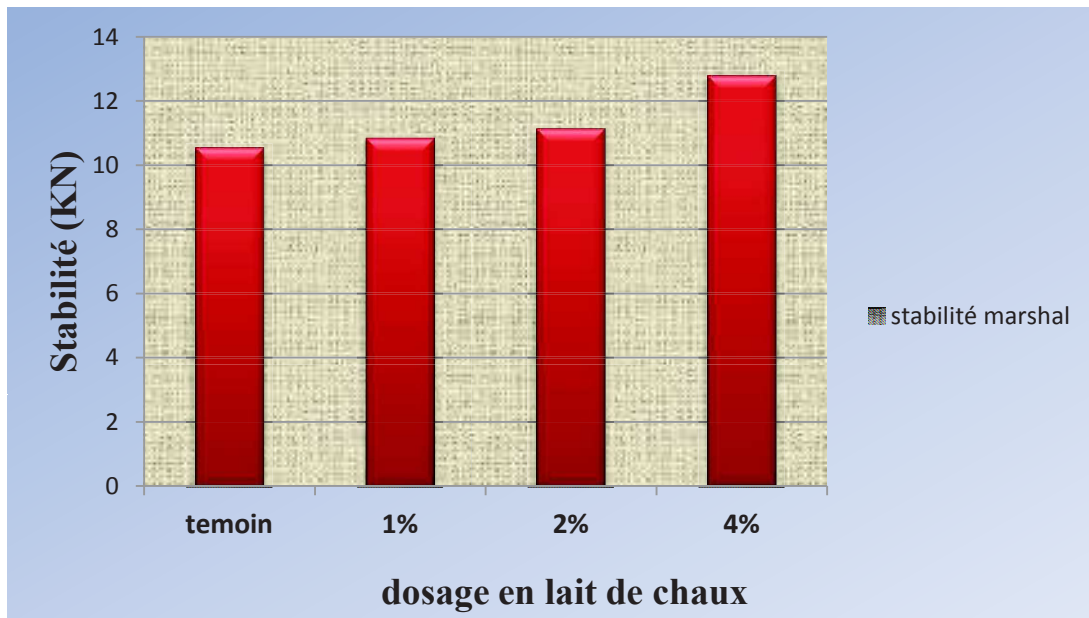


Fig (IV.6): Variation de stabilité Marshall en fonction des dosages de lait de chaux

❖ Le gain et la réduction de la stabilité Marshall :

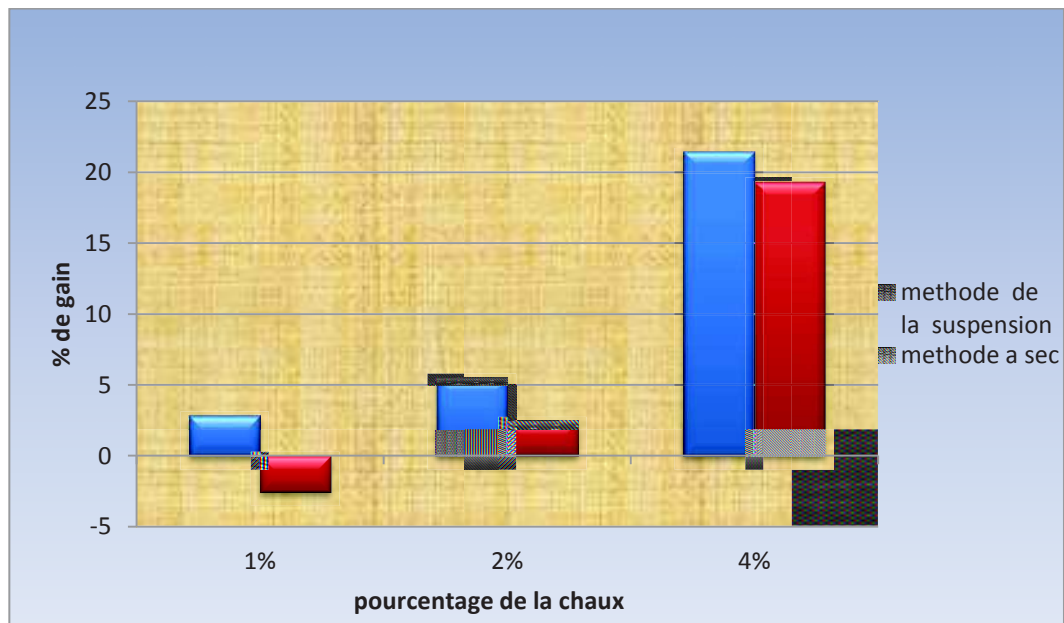


Fig (IV.7): pourcentage de gain de la stabilité Marshall

La figure (IV.5) suivante présente une amélioration de la stabilité, cette amélioration remarquée après la comparaison par le mélange témoin et ceci grâce à l'ajout de la chaux hydratée.

La stabilité Marshall maximale trouvée dans cette méthode correspond à un pourcentage de la chaux optimale 4% égale 12.59 KN, le même pourcentage correspond à une mauvaise compacité enregistrée sur la fig. (V.3) cette contradiction explique que Lorsqu'on ajoute de la chaux hydratée à l'asphalte(le bitume), elle réagit avec les granulats et renforce le lien entre le bitume et la pierre et rendre le mélange plus dur et résistant.

Les résultats dans la figure (IV.6) ci-dessus montrent aussi une amélioration de stabilité par rapport au mélange témoin pour les mêmes raisons citées dans le paragraphe précédent. Néanmoins dans cette méthode la teneur en fine est élevée par rapport à la méthode à sec car nous avons ajouté le lait directement au mélange granulaire sans supprimer une quantité des fines correspond à celle de lait ajouté. Mais malgré cette teneur en fines, la valeur maximale de stabilité trouvée dans cette méthode (12.81 KN) est à peu près égale à la stabilité maximale trouvée dans la méthode à sec (12.59 KN).Ce qui montre que cette amélioration de la stabilité est due par l'ajout de la chaux hydratée n'ont pas par le surdosage des fines.

On constate d'après la figure(IV.7) une réduction du gain enregistrée sur la courbe de la méthode à sec(- 2.5%) pour un mélange qui contient 1% de la chaux hydratée cette réduction due au diminution de la compacité qu'on a déjà vue sur la fig.(IV.3)

Sinon, le gain de la stabilité Marshall par la méthode à sec est sensiblement le même que celle de la méthode de la suspension et l'augmentation de la stabilité Marshall est dépend du pourcentage de la chaux ajoutée.

IV.2.2 Sensibilité a l'eau :

IV.2.2.1 La densité apparente et la densité absolue:

Le tableau ci-dessous présente la variation de la densité apparente et absolue en fonction du différent pourcentage de la chaux selon chaque mélange

Tab (IV.5) : Variation de la densité apparente et absolue

Béton bitumineux Témoin						
Pourcentage de la chaux	0%					
Type d'écrasement	Avant immersion			Après immersion		
La densité apparente (g/cm³)	2.36			2.36		
La densité absolue (g/cm³)	2.46			2.46		
A-Béton bitumineux modifié par la méthode à sec						
Pourcentage de la chaux	1%		2%		4%	
Type d'écrasement	Avant immersion	Après immersion	Avant immersion	Après immersion	Avant immersion	Après immersion
La densité apparente (g/cm³)	2.29	2.29	2.33	2.33	2.28	2.28
La densité absolue (g/cm³)	2.46	2.46	2.46	2.46	2.46	2.46
B-Béton bitumineux modifié avec la méthode de lait de chaux						
Pourcentage de la chaux	1%		2%		4%	
Type d'écrasement	Avant immersion	Après immersion	Avant immersion	Après immersion	Avant immersion	Après immersion
La densité apparente (g/cm³)	2.31	2.31	2.34	2.34	2.36	2.36
La densité absolue (g/cm³)	2.46	2.46	2.46	2.46	2.46	2.46

IV.2.2.2 Pourcentage des vides :

Le tableau suivant présente les différents pourcentages des vides pour l'essai de sensibilité à l'eau :

Tab (IV.6) : Valeurs de V_v

Mélange Témoin			
Pourcentage de la chaux	0%		
V_v (%)	4.06		
Les Mélanges avec la chaux Sec			
Pourcentage de la chaux	1%	2%	4%
V_v (%)	6.91	5.28	7.3
Les Mélange avec lait de chaux			
Pourcentage de la chaux	1%	2%	4%
V_v (%)	6.09	4.87	4.06

Le résultat de % en vide d'après l'essai de la sensibilité a l'eau est, à peu près, similaire à celle obtenu d'après l'essai Marshall.

IV.2.2.3 La compacité :

Le tableau suivant présente la variation de la compacité des éprouvettes de la sensibilité à l'eau en fonction de la variation des dosages en chaux selon chaque mélange :

Tab (IV.7) : Variation de la compacité

Mélange Témoin			
Pourcentage de la chaux	0%		
La compacité (%)	95.94		
Les Mélanges avec la chaux Sec			
Pourcentage de la chaux	1%	2%	4%
La compacité (%)	93.09	94.72	92.69
Les Mélange avec lait de chaux			
Pourcentage de la chaux	1%	2%	4%
La compacité (%)	93.91	95.13	95.94

Remarque :

Le résultat de compacité trouvé d'après l'essai de la sensibilité a l'eau est, à peu près, similaire à celle obtenu d'après l'essai Marshall

IV.2.2.4 Détermination de la résistance à la traction indirecte et le rapport (r/R) :

IV.2.2.4.1 la résistance à la traction indirecte :

Le tableau (IV.8) présente les résultats obtenus de la résistance à la traction indirecte avant et après immersion et le rapport entre eux :

Tab (IV.8) : sensibilité à l'eau

Béton bitumineux Témoin						
Pourcentage de la chaux	0%					
Type d'écrasement	Avant immersion (R)			Après immersion (r)		
Resistance a la traction indirecte (Mpa)	1.56			1.40		
Le rapport (r/R)	0.897					
Béton bitumineux modifier A (avec la chaux sèche)						
Pourcentage de la chaux	1%		2%		4%	
Type d'écrasement	Avant immersion	Après immersion	Avant immersion	Après immersion	Avant immersion	Après immersion
Resistance a la traction indirecte (Mpa)	1.38	1.31	1.67	1.65	1.611	1.610
Le rapport (r/R)	0.949		0.988		0.999	
Béton bitumineux modifier B (avec lait de chaux)						
Pourcentage de la chaux	1%		2%		4%	
Type d'écrasement	Avant immersion	Après immersion	Avant immersion	Après immersion	Avant immersion	Après immersion
Resistance a la traction indirecte (Mpa)	1.74	1.57	1.56	1.54	1.734	1.733
Le rapport (r/R)	0.902		0.987		0.999	

Les figures ci-dessous présentent la variation de la traction indirecte avant et après immersion en fonction de :

1- pourcentage de la chaux hydratée poudre (méthode à sec) fig. (IV.8)

2- dosage de lait de chaux (méthode de la suspension) fig. (IV.9)

❖ **Méthode à sec :**

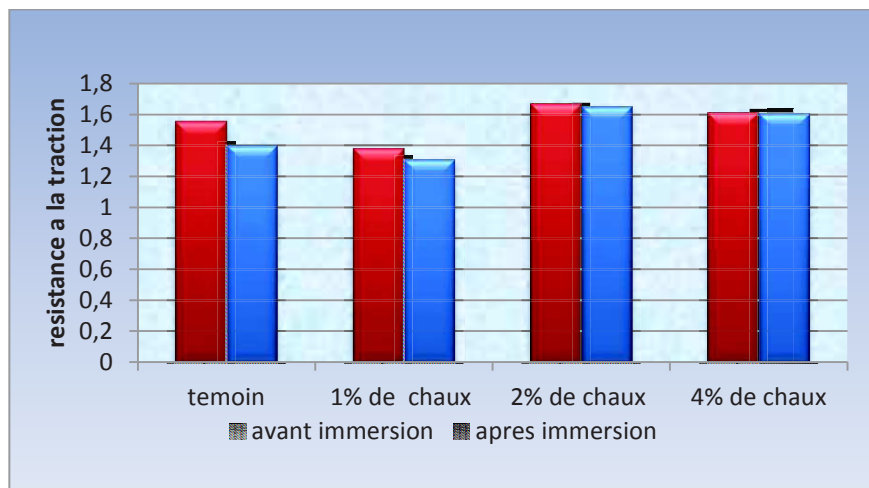


Fig (IV.8): Influence du pourcentage de la chaux sur la résistance à traction indirecte des enrobés sec et humide.

❖ **Méthode de la suspension (Lait de chaux) :**

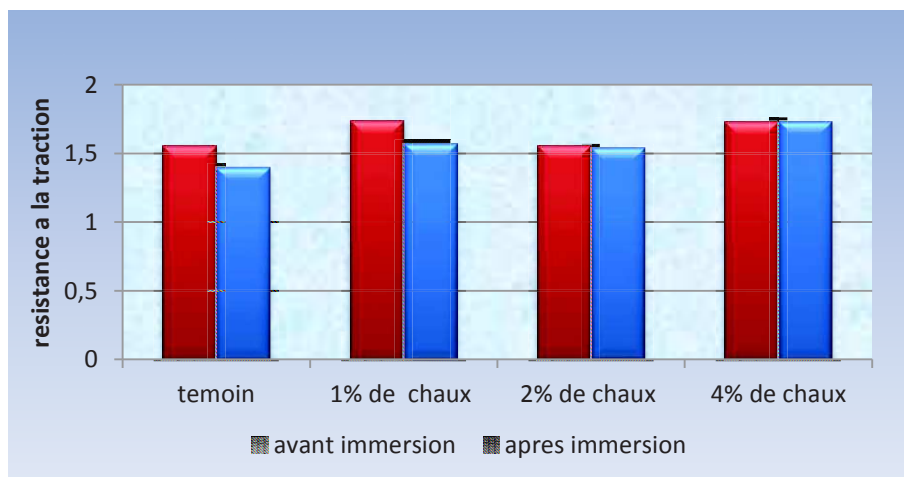


Fig (IV.9): Influence du dosage de lait de chaux sur la résistance à traction indirecte des enrobés sec et humide

La figure(IV.8) ci-dessus montre l'influence du pourcentage de la chaux sur la résistance à traction indirecte des enrobés sec (avant immersion) et humide (après immersion).

Nous constatons à partir de cette figure que pour un pourcentage de la chaux croissant, la résistance à la traction indirecte des enrobés bitumineux testés augmente, sec et humide.

D'après la figure (IV.9) ci-dessus, on remarque que la meilleure résistance à la traction indirecte avant et après immersion enregistrée dans le mélange le plus dosé en chaux c'est-à-dire plus le dosage en lait de chaux augmente, plus la résistance à la traction indirecte avant et après immersion augmente et atteinte une valeur maximale égale à 1.73 Mpa.

IV.2.2.4.2 Le rapport (r/R) :

Les figures ci-dessous présentent la variation du rapport (r/R) en fonction de :

- 1- pourcentage de la chaux hydratée poudre (méthode à sec) fig. (IV.10)
- 2-dosage d lait de chaux (méthode de la suspension) fig. (IV.11)

❖ Méthode à sec :

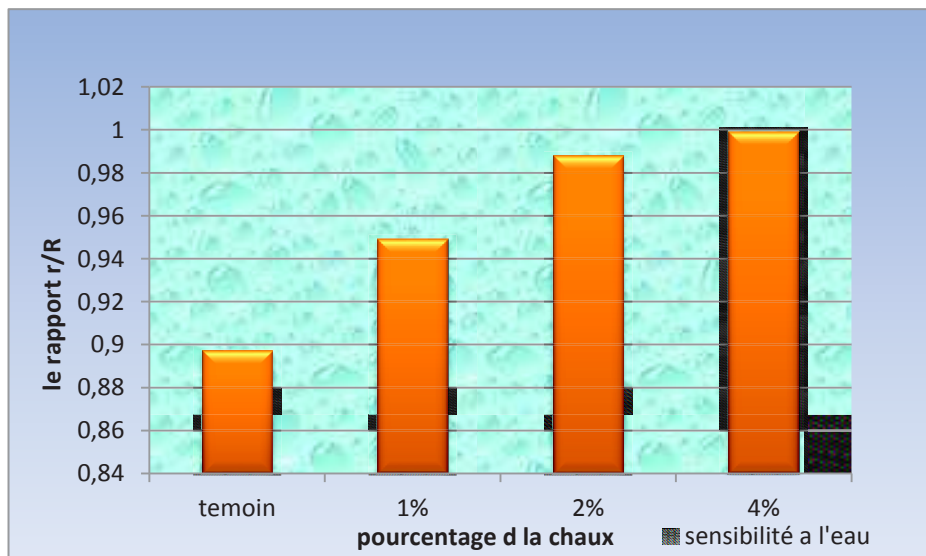


Fig (IV.10): Influence du pourcentage de la chaux sur la sensibilité à l'eau des enrobés.

❖ Méthode de la suspension (Lait de chaux) :

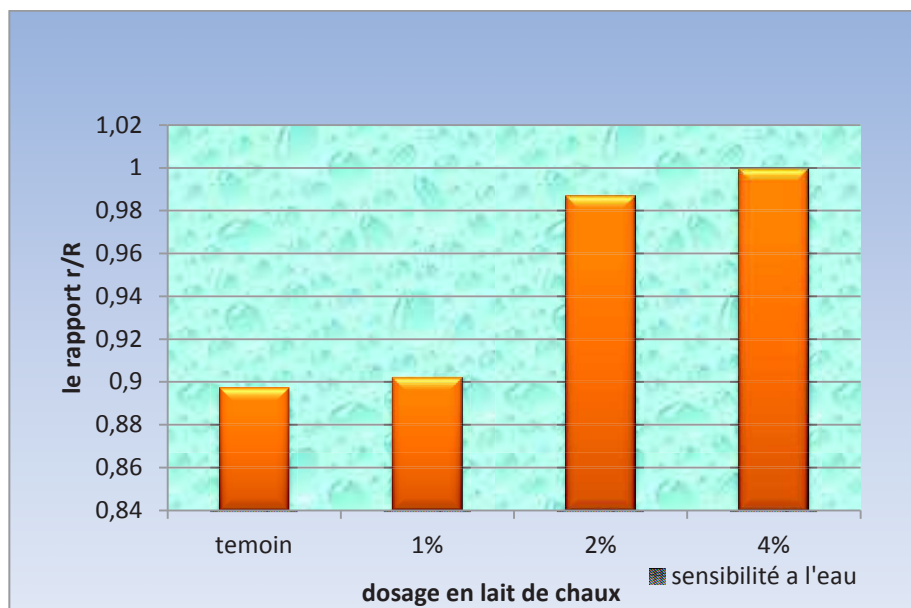


Fig (IV.11): Influence du dosage de lait de chaux sur la sensibilité à l'eau des enrobés.

Les figures (IV.10- IV.11) montrent l'influence du pourcentage de la chaux sur la sensibilité à l'eau des enrobés.

Nous constatons à partir de ces figures que :

Pour un pourcentage de la chaux croissant, le rapport (r/R) augmente c'est à dire la sensibilité à l'eau des enrobés bitumineux testés diminue

Le mélange à 4% de chaux présente la plus faible sensibilité à l'eau.



Pour les trois mélanges étudiés de chaque méthode la résistance au désenrobage (r/R) dépasse toujours la valeur 0.9.

L'augmentation de la résistance au désenrobage est proportionnelle avec l'ajout de la chaux hydratée.

IV.2.3. l'affinité granulat-bitume (l'adhésivité)

Le tableau suivant présente les résultats d'adhésivité des matériaux en présence ou non de chaux hydratée.

Tab (IV.9) : Résultats d'adhésivité des matériaux

	Granulat non traité (témoin)		Granulat traité par la chaux	
Résultats d'adhésivité				
Nombre d'essais	1	2	1	2
Adhésivité en %	81.17	76.56	98.36	99.57
Moyenne %	78,86		99,06	

Les résultats obtenus après l'essai d'affinité sont présentés en termes de pourcentage avec ou sans chaux hydratée pour les granules sur le tableau (IV.9).

D'après le tableau (IV.9) on remarque que les granules traité par la chaux hydratée présentent une meilleure résistance au désenrobage

La chaux diminue la capacité de l'eau à entrer dans le système liant granulat et provoque le désenrobage.

La chaux hydratée modifie les propriétés de surface des granules, permettant le développement d'une chimie de surface (ions calcium) et une rugosité (précipités) plus favorables à l'adhésion du bitume.

conclusion

generale

Conclusion generale :

Cette étude nous a permis de mettre en valeur la technique d'utilisation de la chaux hydratée en tant qu'additif dans les mélanges bitumineux et de préciser un certain nombre de point :

Les pourcentages des vides pour les trois mélanges préparés selon la méthode à sec sont élevés à cause des propriétés physiques de la chaux hydratée.

La chaux hydratée possède une porosité plus importante que les fines calcaire donc la chaux absorbe beaucoup de bitume.

Les pourcentages des vides pour les trois mélanges préparés selon la méthode de la suspension comportent comme suit :

- Augmentation de pourcentage des vides clairement observé dans le premier mélange (1% de lait de chaux) due au changement de distribution granulaire.
- Le pourcentage des vides diminue avec l'augmentation des dosages en lait, car la quantité de la chaux présentée dans les dosages 2 et 4% est supérieur a celle du premier mélange.

Les résultats obtenus sur la compacité sont :

D'après la méthode à sec la compacité diminue avec l'augmentation des pourcentages de chaux .On peut expliquer cette insuffisance que la chaux hydratée possède une porosité plus importante que les fillers minéraux. Cette diminution n'influe pas sur la stabilité

D'après la méthode de la suspension la compacité diminue légèrement pour un dosage de 1% de lait de chaux puis elle augmente pour atteindre une valeur égale à la valeur de mélange témoin.

Nous constatons d'après les résultats obtenus sur la stabilité Marshall, que la stabilité augmente avec l'augmentation des pourcentages de chaux quel que soit la méthode de modification.

La valeur maximale de stabilité trouvée dans la méthode de suspension est à peu près égale à la stabilité maximale trouvée dans la méthode à sec.

Pour un pourcentage de la chaux croissant, la résistance à la traction indirecte des enrobés bitumineux testés (sec et humide) augmente.

Pour un pourcentage de la chaux croissant, le rapport (r/R) augmente c'est à dire la sensibilité à l'eau des enrobés bitumineux testés diminue

Le mélange à 4% de chaux présente la plus faible sensibilité à l'eau

Pour les trois mélanges étudiés de chaque méthode la résistance au désenrobage (r/R) dépasse toujours la valeur 0.9

La chaux hydratée est très efficace pour lutter contre le désenrobage et améliorer la tenue à l'eau des enrobés bitumineux

Les réactions acido-basiques entre la chaux hydratée et les acides naturellement présents dans le bitume forment des sels insolubles qui n'attirent plus l'eau

La chaux hydratée modifie les propriétés de surface des granulats, permettant le développement d'une chimie de surface (ions calcium) et une rugosité (précipités) plus favorables à l'adhésion du bitume.

La chaux hydratée permet de traiter les particules argileuses qui adhèrent à la surface des granulats, limitant leur impact négatif sur le mélange.

La chaux floccule les particules d'argile, ce qui les empêche de former une barrière facilement déplaçable par l'eau, entre le bitume et le granulat.

Les enrobés bitumineux modifiés par adjonction de la chaux présentent des performances mécaniques supérieures à celles des bétons ordinaires quel que soit le mode de modification adopté.

Référence bibliographiques

Référence bibliographiques

Référence bibliographiques :

[1] - **GERARD KARSENKY** : «GUIDE PRATIQUE DES VRD et aménagements extérieurs », 2^{ème} édition ; éditions Eyrolles 61 Bd Saint Germain 75240 Paris Cedex 05, www.edition-eyrolles.com

[2] –**KHENGUAOUI SAFIA** : « VALORISATION DU SABLE DE DUNES EN COUCHE DE ROULEMENT SABLE – BITUME », Mémoire pour l'obtention du diplôme de Magister en Génie Civil, Faculté des sciences de la technologie et science de la matière, université KASDI MERBAH DE OURGLA, soutenue le 18/12/2013.

[3] -**Magazine: bitume.info**

Bitume.info • Revue périodique éditée par le Groupement Professionnel des Bitumes et destinée à faire connaître les réalisations routières, industrielles, hydrauliques ou autres dans lesquelles le bitume joue un rôle important.
www.bitume.info / Mél : contact@bitume.info.

[4] –**Hassan BAAJ** : « COMPORTEMENT A LA FATIGUE DES MATERIAUX GRANULAIRES TRAITES AUX LIANTS HYDROCARBONES», Thèse Doct. L'institut national des sciences appliquées de Lyon, soutenue le 1er juillet 2002.

[5] - **Sâannibè Ciryle SOMÉ** : «Comportement thermomécanique des enrobés tièdes et de l'interface bitume-granulat», Thèse Doct. ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR GÉOSCIENCES ET ARCHITECTURE, UNIVERSITÉ DE NANTES, soutenue le 15 Octobre 2012.

[6] – **C.JOLICOEUR, N.OTIS**: « Etude de mécanisme d'adhésion entre un liant bitumineux et un granulat », ministère des transports du Québec, Octobre 2006.

[7] –**JEAN-LUC DELOORME, CHANTAL DE LA ROCHE, LOUISETTE WENDLING** : «Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobes», septembre2007.

[8]–**NORMALISATION FRANCAISE** : «granulats», Définitions, conformité, spécifications, P18-540.

[9] - **André-Gilles Dumont, Patrick Rychen, Michel Pittet** : «Détermination de la présence et de l'efficacité de dope dans les bétons bitumineux», École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Laboratoire des voies de circulation (LAVOC), février2010, <http://partnershop.vss.ch>.

Référence bibliographiques

[10] – **Anne Dony, Johan Colin, Charley Tougard, Didier Lesueur** : « Résistance aux dégâts hivernaux des enrobés bitumineux contenant de la chaux hydratée », article presse RGRA /N°899 JANVIER -FEVRIER 2012.

[11] –**IDRRIM**, institut des routes, des rues et des infrastructures pour la mobilité norme, note d'information «Norme NF EN 459 : Chaux de construction», E-mail : idrrim@idrrim.com / www.idrrim.com

[12] -**LA CHAUX HYDRATEE**, un additif reconnu pour des enrobés bitumineux plus durables, (« Rapport pour l'Association Européenne de la Chaux / Groupe de travail sur les enrobés bitumineux Mai 2012»), info@eula.eu, www.eula.eu.

[13] –**Graymont ENTREPRISE DES PRODUITS DE CHAUX ET DE PIERRE DE QUALITE**, « Chaux éteinte Une solution pour un rendement supérieur des enrobés à chaud», www.graymont.com

[14] - **Norme algérienne**, «Bitume et liants bitumineux spécification des bitume routiers», NA 5265. N°édition 3 Date 2006.

[15] – **l'Organisme de Contrôle Technique des Travaux Publics (C.T.T.P)**, «Recommandations sur l'utilisation des bitumes et des enrobés bitumineux à chaud », CTTTP

[16] –**Université Paul Sabatier Toulouse**, COURS MASTER2 « ROUTES Matériaux, Durabilité des chaussées MASTER 2 GENIE-CIVIL Tome II », UE1 2011/2012.