

N° d'ordre :FS/UMBB/2021

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université M'hamed Bougara de Boumerdès



Faculté des Sciences - Département de Chimie

Domaine : Sciences de la matière

Filière : Chimie

Spécialité : Chimie des Matériaux

Mémoire de projet de fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Présenté par :

M^{lle}. **BENREJDAL Sarah**

M. **FADOULI Abdellah**

Thème

Influence de l'ajout de polymères (PS, SBR, PEHD) sur les caractéristiques
du bitume routier et la stabilité des enrobés bitumineux

M. OUAAD Kamel	MCA, UMB Boumerdès	Président
M. OUALIT Mehena	MCA, UMB Boumerdès	Promoteur
M. IREKTI Amar	MCA, UMB Boumerdès	Examineur

Année universitaire : 2020/2021

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à rendre grâce à Dieu, de nous avoir donné la force et la santé afin que nous puissions accomplir ce travail.

Nous remercions vivement l'ensemble du personnel de la direction du groupe COSIDER.

- M. KABACHE .T, ingénieure de laboratoire du groupe COSIDAR El-Beida, Alger.
- M. BRIGHET .N, Ingénieure de laboratoire de groupe COSIDAR Dar El-Beida, Alger.

Nous remercions aussi notre Promoteur M^r OUALIT Mehena.

Nous adressons nos chaleureux remerciements aux membres du jury d'avoir bien voulu juger notre travail et pour leur disponibilité.

Merci à M. OUAAD Kamel de nous avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury de soutenance. Un grand merci aussi à M. IREKTI Amar d'avoir accepté de prendre part à ce jury.

Nous souhaitons également remercier tous les enseignants ayant assurés nos cours pendant les années d'études.

Nous tenons à remercier les personnels des entreprises qui nous ont aidé à acquérir les matières premières utilisées dans ce travail.

- ANNABIB REGHAIA industrielle.
- ENPC (polymère et caoutchouc) de ROUIBA industrielle.

Dédicaces

je dédie ce travail

A mes parents,

*Qui me sont très chers et qui ont su m'apporter toute leur présence,
leur soutien, leur temps et leurs prières durant toutes ces années*

*Pour tout l'amour dont vous m'avez entouré, pour tout ce que vous
avez fait pour moi*

*Que dieu, le tout puissant, vous préserve et vous procure santé et
longue vie afin que je puisse à mon tour vous combler*

A mes frères et sœurs

*Vous occupez une place particulière dans mon cœur. Je vous dédie ce
travail*

en vous souhaitant un avenir radieux, plein de bonheur et de succès

A toute ma famille

A mes très chers Amis

A tous ceux qui su croire en moi

A tous ceux me sont chers

FADOULI ABDELLAH

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes chers parents qui ont contribué à ma réussite le long de mon existence, notamment par leurs encouragements.

A mes sœurs et mes frères qui m'ont beaucoup aidé par leurs soutiens.

Je tiens à remercier vivement mon neveu « Amír » pour son aide précieuse.

Enfin, je remercie « Sídali » qui n'a pas cessé de m'encourager.

BENREJDAL SARAH

Résumé

Le présent travail consiste à étudier l'effet de l'incorporation des polymères sur les caractéristiques du bitume à usage routier ainsi que sur la stabilité du béton bitumineux, et ce, afin de comprendre le comportement du revêtement dans les conditions réelles d'exploitation des chaussées. A cet effet, des essais de caractérisation ont été effectués sur un bitume 35/50 modifié par trois types des polymères à différentes teneurs. Il s'agit de Polystyrène (PS), Polyéthylène Haute Densité (PEHD) et du copolymère Butadiène Styrène (SBR). Un solvant organique (chloroforme) a été utilisé pour la dissolution de ces polymères.

Les résultats des essais effectués au moyen d'une presse de cisaillement giratoire (PCG) et la traction indirecte ont montré que les performances des enrobés bitumeux varient considérablement avec la teneur et la nature des polymères utilisés. Les résultats expérimentaux également montrent que les bitumes modifiés, par leur susceptibilité thermique moindre, présentent de bien meilleures performances que les bitumes conventionnels.

L'exploitation des résultats de cette étude permet, d'abord, l'amélioration des performances des chaussées routières dans le climat chaud et froid, et d'autre part, elle aura un impact positif sur l'environnement par la réduction des polluants en plastiques dans la nature.

Abstract

The present work consists in studying the effect of the incorporation of polymers on the characteristics of bitumen for road use as well as on the stability of asphalt concrete, in order to understand the behavior of the coating under the real operating conditions of pavements. To this end, characterization tests were carried out on 35/50 bitumen modified with three types of polymers at different contents. These are Polystyrene (PS), High Density Polyethylene (HDPE) and Butadiene Styrene (SBR) copolymer. An organic solvent (chloroform) was used for the dissolution of these polymers.

The results of tests carried out using a gyratory shear press (PCG) and indirect traction have shown that the performance of asphalt mixes vary considerably with the content and nature of the polymers used. The experimental results also show that modified bitumens, by their lower thermal susceptibility, have much better performance than conventional bitumens.

The use of the results of this study allows, first, the improvement of the performance of road surfaces in hot and cold climates, and secondly, it will have a positive impact on the environment by reducing pollutants by plastics in nature.

Liste des Figures

Chapitre I

Figure I.1: Le bitume (liant hydrocarbonés)	02
Figure I.2. : Montage de fabrication de bitume.....	04
Figure I.3 : Schéma de séparation chimique des constituants du bitume.....	05
Figure .I.4 : La structure « sol » et « gel »	07
Figure I.5. : Classe de comportement du bitume en fonction de ϵ et T.....	07
Figure. I.6. : La température de bille –anneau (ramollissement)	09
Figure .I.7. : Principe de l’essai de retour élastique	09
Figure I.8. Les différentes fractions de granulats	11
Figure .I.9. : L’essai de bleu de méthylène	13
Figure I.10. L’essai de Micro Dévale	13
Figure I.11. : L’essai de résistance au choc (Los Angeles)	14
Figure I.12.: schéma de l’essai PCG	18
Figure I.13 : Essai de module de rigidité	19
Figure I.14 : Essai de l’orniérage	20

Chapitre II

Figure II.1. : Types des polymères	23
---	----

Chapitre III

Figure III.1. Courbe de pénétrabilité en fonction des différentes températures	32
Figure III.2. Influence de temps de malaxage sur les caractéristiques du bitume	34
Figure III.3. Le polymère PEHD	35

Figure III.4. Le polymère PS	36
Figure III.5. Aspect du copolymère SBR	36
Figure III.6. Le solvant chloroforme	37
Figure III.7. Appareillage de modification	38
Figure III.8. SBR dissout dans le chloroforme	39
Figure III.9. Mode opératoire de l'essai de pénétrabilité	41
Figure III.10. Résultats de pénétrabilité des mélanges en fonction du type et taux de polymère ajouté	42
Figure III.11. Pénétrabilité des différents mélanges en fonction du type et le taux de polymère ajouté	43
Figure III.12. Mode opératoire de l'essai de point de ramollissement	44
Figure III.13. Résultats de l'essai TBA des mélanges dont le polymère n'a pas été dissout dans le chloroforme	45
Figure III.14 : Résultats de l'essai TBA pour les mélanges contenant PS et SBR dissout dans le chloroforme (Solvant).....	46
Figure III.15. Schéma illustratif de l'essai du retour élastique.....	47
Figure.III.16. Retour élastique à 25°C pour les mélanges dont le polymère est dissout dans le solvant	48
Figure III.17. Courbe granulométrique pour les différentes fractions de granulats solvant	49
Figure III.18. Courbe granulométrique du mélange étudié 0/14	50
Figure III.19. Les proportions utilisées des agrégats dans le mélange	53

Figure III.20. Schéma illustratif du mode opératoire de l'essai PCG	55
Figure III.21. Pourcentage des vides en fonction du nombre de giration	56
Figure III.22. Pourcentage des vides des éprouvettes en fonction de nombre de girations.....	57
Figure III.23. Essai du module de rigidité sur une carotte de béton bitumineux.....	57
Figure III.24. : Résultats du module de rigidité du bitume pur pour les différents mélanges	58
Figure III.25. Résultats du module de rigidité des mélanges	59

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1.: Les teneurs de composition chimique du bitume	04
Tableau I.2.: Caractéristiques des bitumes selon les spécifications	08
Tableau I.3. : Classification des bitumes selon la pénétrabilité et le ramollissement	09
Tableau I.4. : Les caractéristiques des granulats	11
Tableau I.5. : fuseau granulométrique BB/14	15
Tableau I.6. : Les valeurs usuelles du module de richesse pour le béton bitumineux	16

Chapitre III

Tableau III.1 : Caractéristiques du bitume pur	31
Tableau III.2 : Susceptibilité thermique du bitume pur	32
Tableau III.3 : Evolution des caractéristiques du bitume sous l'effet de la durée de malaxage	33
Tableau III.4. Caractéristiques du mélange bitume-chloroforme	34
Tableau III.5. La susceptibilité thermique du mélange bitume / chloroforme	35
Tableau III.6. Représentation des mélanges (formulations)	40
Tableau III.7. Résultats de pénétrabilité à 25°C pour les mélanges en l'absence du chloroforme	41
Tableau III.8. Résultats de pénétrabilité à 25°C pour les mélanges en présence du chloroforme	42
Tableau III.9. : Résultats de l'essai TBA pour les mélanges ou le polymère (PS-SBR- PEHD) n'a pas été dissout dans le solvant	44
Tableau III.10. : Résultats de l'essai TBA pour les mélanges contenant PS et SBR se dissout dans le chloroforme (Solvant).....	45
Tableau III.11. Résultats de l'essai de retour élastique (%) à 25°C pour les mélanges en l'absence du chloroforme	47

Tableau III.12. : Retour élastique à 25°C pour les mélanges ou le polymère (PS-SBR) est dissout dans le solvant	48
Tableau III.13. Analyse granulométrique des granulats	49
Tableau III.14. Masse volumique des fractions 0/3 ; 3/8 et 8/15	50
Tableau III.15. Essai Los Angeles	50
Tableau III.16. Résultats d'essai de Micro Dévale	51
Tableau III.17. Les résultats d'essai de d'aplatissement des granulats	51
Tableau III.18. Résultats d'essai de propreté des granulats	51
Tableau III.19. Résultats de l'essai d'équivalent de sable	51
Tableau III.20. Le pourcentage pondéral des fractions (%)	52
Tableau III .21. Les proportions les trois fractions du mélange	53
Tableau III.22. La teneur en bitume et les différentes valeurs du module de richesse	53
Tableau III.23. : Résultats de l'essai PCG des mélanges à base de bitume modifié sans la présence du solvant	55
Tableau III.24. Résultats de l'essai PCG des mélanges à base de bitume modifié en présence	56
Tableau III.25. Résultats de l'essai de traction indirecte des mélanges dont le polymère introduit n'a pas été dissocié dans le chloroforme du solvant	58
Tableau III.26. Résultats de l'essai de traction indirecte des mélanges dont le polymère introduit a été préalablement dissocié dans le chloroforme	59

LISTE DES ABREVIATIONS

K : module de richesse

M1 : volume pycnomètre contenant l'eau distillé avec son bouchon.

M2 : volume pycnomètre contenant les granulats, l'eau distillé et le bouchon

M_G : masse granulats.

M_{VE} : masse volumique de l'eau distillée.

V_G : volume des granulats.

M_{VG} : masse volumique des granulats.

S' : Surface spécifique conventionnels

G : proportion pondérale des éléments supérieurs à 6.3 mm.

S : proportion pondérale des éléments compris entre 0.315mm et 6.3mm.

s : proportion pondérale des éléments compris entre 0.08 mm et 0.315 mm.

f : proportion pondérale des éléments inférieures 0.08mm.

PCG : presse de cisaillement giratoire

TBA : température de ramollissement Bille anneau

α : coefficient correcteur

PS : Polystyrène

SBR: Styrene butadiène a tactique (co-polymère)

PEHD Polyéthylène Haute Densité

TBA : Température bille et anneau

A : Susceptibilité thermique.

C : Une consente.

NR : caoutchouc naturel

IR : poly isoprène

CR : polychloroprène

NBR : copolymère acrylonitrile butadiène

TPE : Elastomères thermoplastiques

D : dimension supérieur du granulat.

d : dimension inférieur du granulat.

Table de matières

Remerciements

Dédicaces

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Table de matières

Introduction Générale01

Chapitre I : Généralités sur les enrobés bitumineux

I.1. Généralités sur le bitume02

I. 1.1. Introduction02

I.1.2. Définition de bitume02

I.1.3. Origine et fabrication de bitume02

I.1.1.3.1. La distillation atmosphérique03

I.1.1.3.2. La distillation sous vide03

I.1.1.3.3. Le soufflage03

I.4. Composition de bitume04

I.1.4.1. Séparation par précipitation05

I.4.2. Séparation par chromatographie d'adsorption05

I.1.1.5. Structure colloïdale de bitume06

I.1.6. Comportement rhéologiques des bitumes07

I.1.7. Principales caractéristiques des bitumes routiers08

I.1.7.1. Mesure de la pénétrabilité NF EN 142608

I.1.7.2. La température de ramollissement bille –anneau NF EN 142708

I.1.7.3. Retour élastique : NA 522309

I.1.8. Le bitume en Algérie.....10

I.2. Les granulats10

I.2.1. Introduction	10
I.2.2. Définitions	10
I.2.3. Principaux essais propre aux granulats	11
I.2.3.1. Analyse granulométrique NF EN 933-1	12
I.2.3.2. Coefficient d'aplatissement	12
I.2.3.3. Essai de bleu de méthylène NF EN 933-9	12
I.2.3.4. Essais de résistance à l'usure et au choc des granulats NF P18-572.....	13
I.2.3.5. Résistance au choc (essai los Angeles) NF P18-573	13
I.2.4. Conclusion	14
I.3.1. Généralités sur les enrobés	14
I.3.2. Méthodologie de conception des enrobés bitumineux algériens	15
I.3.2.1. Détermination de la teneur en bitume	15
I.3.3. Essais sur enrobés bitumineux	17
I.3.3.1. Essai Marshall	17
I.3.3.2. Essai Duriez (essai de compression simple)	17
I.3.3.3. Essai à la presse à cisaillement giratoire (PCG) NF EN 12697-31	17
I.3.3.4. Essai de module de rigidité	18
I.3.3.5. Essai d'orniérage	19
I.3.4. Phénomène d'orniérage	20
I.3.4.1. Définition	20
I.3.4.2. Types d'orniérage	20
I.3.4.3. Mécanisme d'orniérage	21

Chapitre II: Polymères et bitumes modifiés

II.1. Introduction	22
II.2. Définition de polymères	22
II.3. Type des polymères	22

II.3.1. Polymères naturels	22
II.3.2. Polymères artificiels régénérés	22
II.3.3. Polymères synthétiques	23
II.4. L'architecture	23
II .5. Propriétés	23
II.5.1. Thermoplastique	23
II.5.2. Thermodurcissables	23
II.5.3. Elastomères	23
II.6. Propriétés mécaniques et comportement des polymères.....	24
II.7. Effet de la température sur l'état structurel	24
II.8. Quelques repères historiques des modifications par polymères	25
II.9. Les objectifs de la modification	25
II.10. Différent types de polymères utilisées pour la modification des enrobés.....	26
II.11.1. Polymères thermoplastiques	27
II.11.2. Les caoutchoucs naturels et synthétiques	27
II.11.3. Caoutchoucs thermoplastiques	27
II.11.4. Les polymères thermodurcissables	27
II.12. Mécanisme de la modification	27
II.13. Compatibilité bitume-polymère	28
II.13.1. En terme thermodynamique	28
II.13.2. En terme pratique	28
II.14. Procédé de la modification	28
II.14.1. Procédé sec	28
II.14.2. Procédé humide	29

Chapitre III : Expérimentale

III. 1. Les matériaux utilisés	31
III.1.1. Le bitume pur	31
III.1.1.1. Caractérisation du bitume pur	31
III.1.1.2. Susceptibilité thermique	31
III.1.1.3. Influence du temps de malaxage sur les caractéristiques du bitume.....	33
III.1.2. Mélange bitume / solvant	34
III.1.2.1. Susceptibilité thermique	34
III.1.3. Les polymères	35
III.1.3.1. Polyéthylène haute densité (PEHD).....	35
III.1.3.2. Le polystyrène (PS)	35
III.1.3.3. Copolymère Styène Butadiène (SBR).....	36
III.1.3.4. Le chloroforme	36
III.2. La modification	37
III.3. Mode opératoire de la modification	38
III.4. Etude expérimentale sur les liants (bitumes) modifiés	40
III.4. Pénétrabilité	40
III.4.1. Influence de l'incorporation des polymères sur la pénétrabilité.....	40
III.4.2. Point de ramollissement	43
III.4.2.1. Influence de l'incorporation des polymères sur la température de ramollissement bille-anneau (TBA).....	44
III.4.3. Retour élastique.....	46
III.4.3.1. Influence de l'incorporation des polymères sur le retour élastique.....	47
III.5. Les agrégats	48
III.5.1. Analyse granulométrique.....	49

III.5.2. La masse volumique.....	50
III.5.3. Essai Los Angeles	50
III.5.4. Coefficient Micro Dévale humide	51
III.5.5. Essai d’aplatissement	51
III.5.6. Essai de propreté.....	51
III.5.7. Essai d’équivalent sable ES.....	51
III.6. Elaboration de l’enrobé par bitume modifié	52
III.6.1. Formulation	52
III.6.2. Calcul de la teneur en bitume	53
III.7. Essai de PCG (EN 12697).....	54
III.8. Module de rigidité	57
Conclusion Générale	60
Références Bibliographiques	61

Introduction Générale

Les routes contribuent à la croissance économique en facilitant les transports et les échanges, ce qui nécessite l'amélioration des chaussées et des revêtements, pour supporter la croissance de trafic et les poids lourds, ainsi que leur capacité d'adaptation aux changements climatiques.

Les structures de chaussées routières sont composées généralement par quatre couches, ces structures sont soumises à des sollicitations très complexes telles que le trafic et le climat qui ont une influence sur le comportement et la durabilité des matériaux bitumineux. Les chaussées subissent de grandes amplitudes thermiques et sont par conséquent soumises aux phénomènes de fissuration thermique et d'orniérage. Pour réduire ces phénomènes, plusieurs techniques ont été utilisées parmi les quelles : la modification des liants par des polymères qui est considérée comme la meilleure voie pour améliorer les caractéristique physiques et mécaniques des bitumes et des enrobés bitumineux.

L'essor économique de l'Algérie a provoqué un développement très important du réseau routier à travers tout le territoire national. Cependant, la formulation, la mise en œuvre et le choix des matériaux routiers en particulier le liant bitumineux, reste pratiquement non maîtrisé. Il suffit d'observer la surface de certaines chaussées pour constater l'ampleur des dégradations et ce, dès les premières années de leur mise en service. Ce phénomène s'est aggravé par l'intensification du trafic et des charges supportées par les structures de chaussée, étant due en particulier à l'accroissement du trafic poids lourds.

Plusieurs études ont montré que le comportement du béton bitumineux dépend essentiellement du comportement du bitume. En effet, la modification des enrobés bitumineux par des polymères représente une des solutions proposées les plus prometteuses, les résultats des différentes recherches ont démontré l'influence positive des matières plastiques sur les caractéristiques des enrobés bitumineux.

C'est dans ce contexte que s'inscrit la présente étude qui consiste à évaluer l'effet de l'incorporation de trois types de polymères sur les propriétés du bitume ainsi que la stabilité des enrobés bitumineux.

Ce mémoire se compose de 3 chapitres regroupés en deux parties essentielles :

- Etude bibliographique : Divisée en deux chapitres, le premier chapitre est consacré à des généralités sur les enrobés bitumineux alors que le second est dédié aux polymères et leurs influence sur les caractéristiques du bitume.
- Etude expérimentale : Présentée en un seul chapitre, qui détaille les matériaux utilisés, les méthodes expérimentales ainsi que l'analyse et l'interprétation des résultats.

La partie annexe à la fin de ce mémoire comporte les spécifications des différents essais ainsi que quelques détails des matériaux.

Partie I : Partie Bibliographique

Chapitre I :
Généralités sur les enrobés

I.1. Généralités sur le bitume

I. 1.1. Introduction

Le nom liant peut être défini comme une substance qui sert à ressembler de façon durable, des particules généralement solides. Le mot « hydrocarboné » indique que le produit referme principalement les atomes de carbone et d'hydrogènes; la substance, qui additionnée aux particules solides (granulats), développe au sein d'un mélange d'où les forces de cohésion assurant une rigidité, une résistance à la déformation en traction, une résistance à la compression et une résistance au cisaillement est appelé liant bitumineux (bitume) [1].

Il existe trois types de liant :

- Les bitumes qui sont des produits solides ou semi-solides extraits de pétrole.
- Les émulsions de bitume, qui résultent de la dispersion d'un bitume dans une phase réceptrice, en générale aqueuse.
- Les cut-back ou les bitume fluidifiés qui sont un mélange de bitume fluidifiant, généralement kérosène [1].

I.1.2. Définition de bitume

Les bitumes sont des substances hydrocarbures, très visqueux à la température ambiante et de couleur noir ; connu depuis la plus haute antiquité sous forme naturelle, il provient, de nos jours, presque exclusivement de la distillation des pétroles bruts.

Les bitumes jouent un rôle important dans les techniques routières modernes, mais l'utilité de ce produit revient à 3800 avant J, C. dans la vallée de l'Euphrate en Mésopotamie (actuellement Iraq). En Amérique du Nord, le mot « asphalt » désigne le bitume, tandis que le mot « bitumen » désigne la fraction du bitume et en France le terme « bitume » désigner les produits du pétrole, comme en grande Bretagne ou en Allemagne [2].



Figure I.1: Le bitume (liant hydrocarbonés) [4].

I.1.3. Origine et fabrication de bitume

Les bitumes comme un liant hydrocarboné ayant plusieurs origines naturels ou industriel.

A l'état naturel, comme le Trinidad, certaines roches, telles que les calcaires asphaltites sont des roches poreuses imprégnées d'une certaines quantités de bitume naturel. La plupart de ce

calcaire asphaltite contient moins de 10% en poids de bitume. Donc la production mondiale est très faible puisqu'elle ne dépasse pas 200 mille tonnes.

D'autre part, l'origine de bitume industriel obtenu depuis la distillation des pétroles [6].

Il existe trois types de liants hydrocarbonés

- **Les liants naturels** : qui se trouvent dans la nature et qui sont utilisés depuis des temps très anciens. C'est une roche asphaltique telle qu'elle se présente dans le gisement et qui, après broyage est dénommée asphalte.
- **Les bitumes de pétrole** : qui sont obtenus par raffinage des pétroles bruts et des résidus pétroliers.
- **Les goudrons** : qui proviennent de la pyrogénéation à l'abri de l'air, du lignite et de la tourbe et du bois.

Ayant des origines et des constitutions chimiques différentes, les bitumes et les goudrons sont des liants de base utilisés séparément ou en mélange dans la technique routière. Les bitumes purs, tels que produits, sont trop visqueux pour être manipulés et mélangés avec des granulats [7].

Avec le développement des méthodes modernes de raffinage du pétrole brut domestique, on peut obtenir des matériaux bitumineux à coût moindre, c'est ainsi que les autres bitumes précités sont devenus non compétitifs, la plupart des pays produisent donc le bitume à partir du pétrole brut [3], ces étapes de raffinages de certains bruts pétroliers sont :

I.1.3.1. La distillation atmosphérique

Sans un premiers temps, après avoir effectué les opérations de décantation et de dessalage, le pétrole brut est porté à une température d'environ 300 °C, la phase vapeur est éliminée et condensée pour séparer les différents produits hydrocarbures (kérosène, gaz, essences, fuel....) en fonction de volatilité, la fraction lourde restant au fond de colonne constitue le résidu de la distillation directe et sert à élaboration du bitume [12].

I.1.3.2. La distillation sous vide

Ce résidu est ensuite injecté dans des tours de distillation sous vide où la séparation des différents constituants se poursuit en jouant sur les paramètres débit, pression et température. Le produit formé au fond de cuve est alors un résidu de la distillation sous vide [12].

I.1.3.3. Le soufflage

Une opération de soufflage peut être pratiquée sur le résidu de la distillation sous vide pour les colonnes peu performantes ou selon d'autres procédés de fabrication des essences et des huiles minérales sur les résidus pour les amener à la dureté souhaitée. Le soufflage des bitumes consiste à injecter de l'air au sien d'une base bitumineuse elle-même portée à une température comprise entre 250°C et 300°C. De très nombreuses réactions chimiques se déroulent provoquant une condensation des résines et des molécules d'asphalte. Le bitume obtenu est appelé bitume soufflé, il est peu employé en technique routière mais il est plus utilisé comme produit [12].

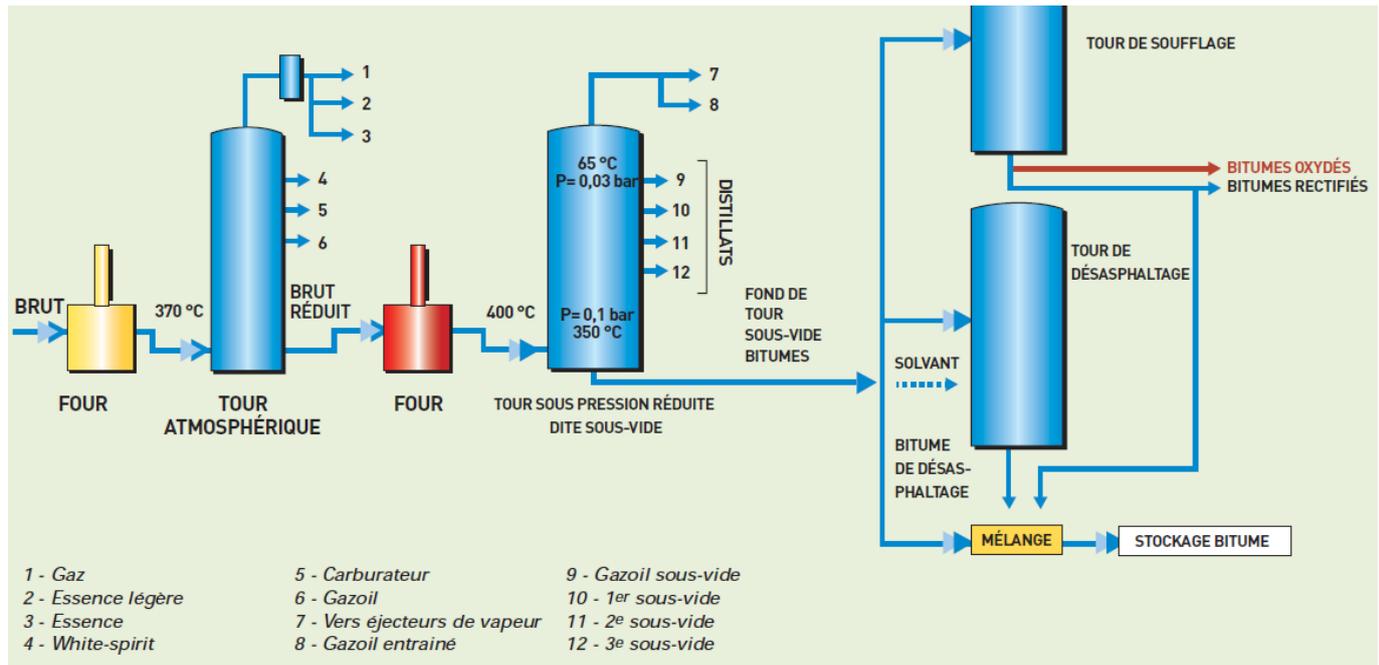


Figure I.2. : Montage de fabrication de bitume [45].

I.1.4. Composition de bitume

Le bitume est généralement constitué d'un mélange complexe d'hydrocarbures et la composition élémentaire est fortement dépendante de l'origine de son brut et technique de raffinage. L'analyse élémentaire met en évidence ses constituants que montre ce tableau I.1.

Tableau I.1. Les teneurs de composition chimique du bitume

Elément massique	Carbone	Hydrogène	Soufre	Azote	Oxygène	Vanadium	Nickel
	(%)					Ppm : par par million	
Teneur (%)	80 - 87	8-12	1- 9	0-1.5	0.5-1.5	10-200	20-200

D'autres traces de métaux (Fe, Ca, Ti, Na, Co, Cu, Sn et Zn) peuvent être détectées. Le mélange hydrocarbure de bitume est composé des masses molaires et des structures chimiques variées, la taille de ces molécules varie de quelques nanomètres à quelques dixièmes de micromètre pour les grandes tailles [1].

Les molécules de ces composés sont constituées de quatre principaux types d'hydrocarbures, paraffiniques, naphthéniques, aromatiques, et oléfiniques.

- Paraffiniques saturés linéaires ou ramifiés (chaines linéaires sans cycles).
- Naphthéniques saturées cycliques (cycle à chaîsons simple).
- Aromatiques : présence d'au moins un cycle avec double liaisons de type benzène.
- Oléfiniques : chaines contenant une ou plusieurs double liaisons.

Il faut également préciser que parmi les différentes molécules présentes dans les bitumes, rares sont celles constituées d'un seul des quatre types motifs cités, compte tenu de cette diversité, il n'est pas réaliste de vouloir déterminer la composition exacte des bitumes [1].

Les premiers travaux sur la chimie du bitume est à mettre à l'actif de Boussinglat, qui a séparé une fraction soluble qu'il a nommé « pétrolènes » maintenant appelée plutôt « maltènes » et fraction non-soluble qui s'appelle asphaltènes [1].

Plus récemment, le développement des techniques de chimie analytiques a permis de mieux définir et caractériser ses fractions, mais la séparation des bitumes en maltènes et asphaltènes et encore très largement acceptée, les différentes méthodes de séparation sont :

I.1.4.1. Séparation par précipitation

La séparation par solvant est la plus utilisée, c'est celle qui permet de séparer les bitumes en asphaltènes et en maltènes : les asphaltènes constituent la partie insoluble des bitumes dans les solvants de types n-alcanes, les maltènes la partie soluble. Ces derniers sont séparés en résines, hydrocarbures aromatiques et saturés (huiles) par chromatographie d'adsorption [14].

I.1.4.2. Séparation par chromatographie d'adsorption

Les techniques chromatographiques ont été les plus utilisées pour l'étude chimique des bitumes.

Dans la plupart des méthodes, les asphaltènes sont préalablement séparées des maltènes par précipitation. La chromatographie est alors faite sur la fraction maltenique en solution dans un solvant de types n-alcanes, et a servi de base à la séparation des bitumes en fonction de la polarité des composés. Cette technique chromatographique schématisée sur la figure I.3 sépare le bitume en quatre familles génériques [14].

- Saturés
- Aromatiques
- Résines
- asphaltène

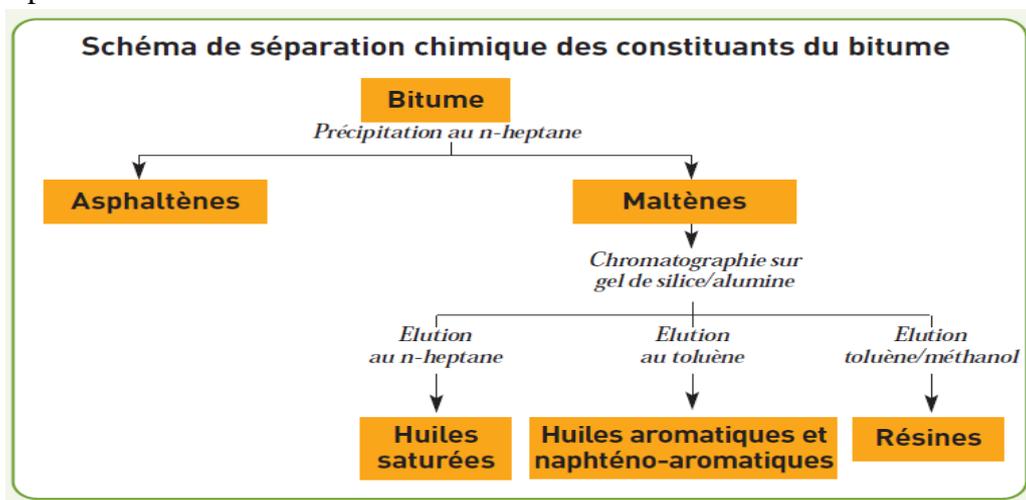


Figure I.3 : Schéma de séparation chimique des constituants du bitume[45].

I.1.5. Structure colloïdale de bitume

Selon la composition chimique et les concentrations respectives des constituants du bitume, l'équilibre colloïdale va être plus ou moins déplacé et donc va conférer au bitume des comportements rhéologique différents selon la température [5].

On peut dire que l'on distingue trois types de structure colloïdale fondamentale :

▪ Structure gel :

Caractérisée par l'agglomération de micelles d'asphaltènes formant ainsi un réseau continu dans le milieu dispersant faiblement structuré par les résines. Les bitumes à sature « gel » sont riches en asphaltènes et ont un comportement élastique.

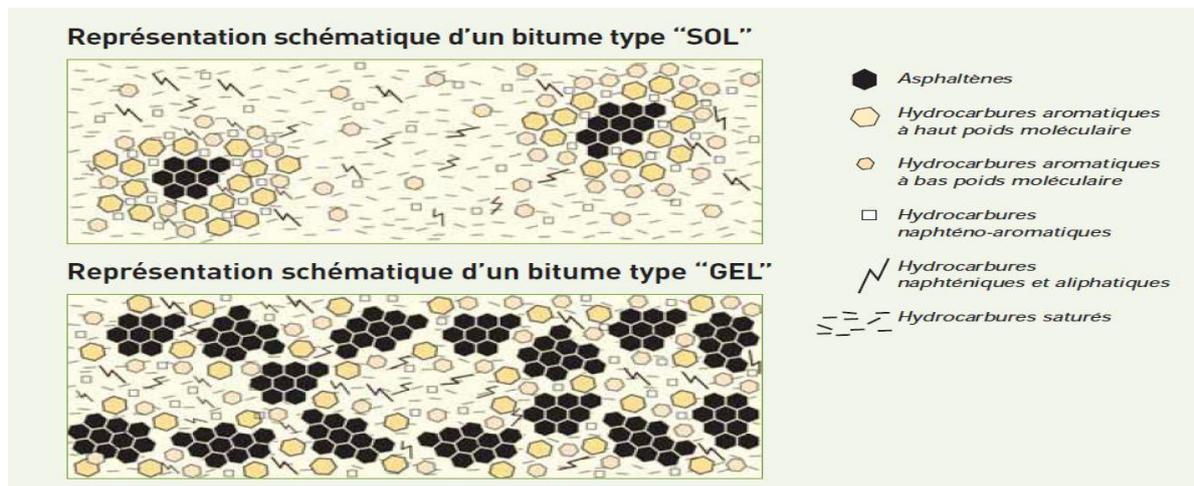
▪ Structure sol :

Caractérisé par la précipitation totale des micelles asphaltènes, par les résines ; on obtient ainsi une solution diluée et bien stabilisée d'asphaltènes dans milieu dispersant fortement structure par les résinés .ceci se rencontre dans le bitumes à phase maltène riche en aromatique. Ces bitumes ont un comportement VISQUEUX (newtonien) [5].

▪ Structure gel-sol :

Caractérisée par des agrégats de micelle d'asphaltènes baignant dans un milieu dispersant structure par les résines et intermédiaire entre sol et gel.

« La majorité des bitumes routiers ont cette structure, ils ont un comportement visqueux élastique »[45].



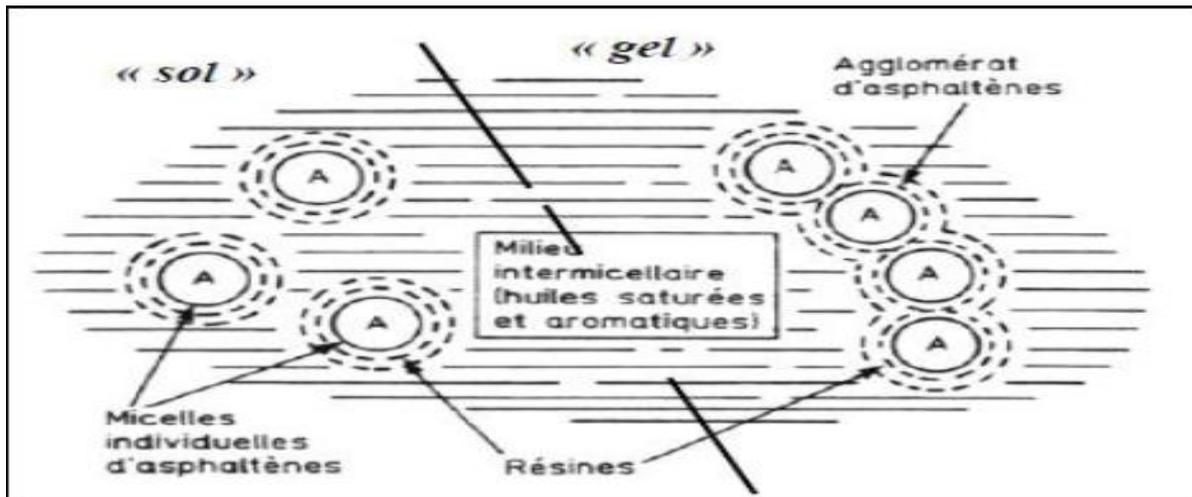


Figure I.4 : La structure « sol » et « gel » [45].

I.1.6. Comportement rhéologiques des bitumes

Les propriétés demandées aux bitumes pour garantir des chaussées durables sont essentiellement basées sur leurs propriétés rhéologiques.

La caractéristique principale du bitume est très large et progressive, selon la plage de variation de sa consistance en fonction de la température, appelée susceptibilité thermique. Il peut se présenter alors sous les trois formes suivantes :

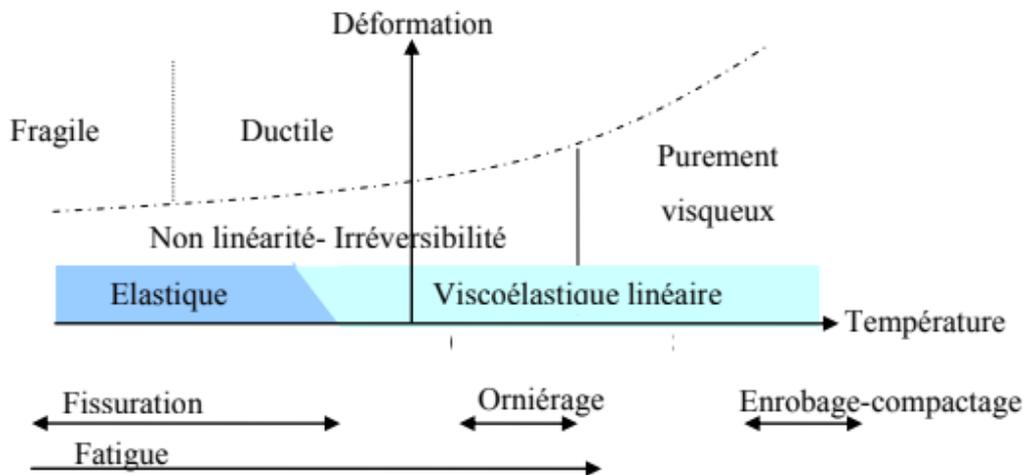


Figure I.5. : Classe de comportement du bitume en fonction de ϵ et T[45].

- ✓ Un solide dur, fragile et cassant à basse températures et à court temps de charge. on est alors dans la zone dite élastiques, où le bitume est la plupart de ses applications, trop fragile pour résister aux sollicitations mécaniques sans se casser.

« Dans cette zone, il n'y a pas de déphasage entre la contrainte appliquée et la déformation résultante. »

- ✓ Un liquide à haute température et à temps chargé étendu, c'est la zone fluide, et même quelque fois Newtonien, correspondant à la température de la mise œuvre c'est-à-dire la fabrication, de la mise en place et le compactage des enrobés,

« Dans cette zone, il y a déphasage entre la contrainte et la déformation ».

- ✓ Ni liquide et solide à des températures et des temps de charge moyens, cette zone est dite zone viscoélastiques, correspondant aux températures de services des enrobés sur la chaussée, encore ici, il ya un déphasage entre la contrainte et la déformation.

I.1.7. Principales caractéristiques des bitumes routiers

I.1.7.1. Mesure de la pénétrabilité NF EN 1426

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

Il existe en Algérie, trois classes de bitumes routiers qui sont dans le sens des duretés croissantes il s'agit 80/100 ,40/50 et 20/30.

Pour mieux définir les bitumes, on peut être amené à effectuer des essais à plusieurs températures qui permettent de tracer une courbe de pénétrabilité en fonction de la température, très utile pour apprécier la susceptibilité thermique du bitume.

Les bitumes routiers sont classifiés selon des spécifications qui assurent leurs qualité au moyens simple des essais, la caractérisation la plus complète a été mise au point par SHRP (programme de recherche stratégique des autoroutes). Les bitumes sont classés sur les performances dans les plages de températures optimales, ses spécifications visent à lutter contre l'orniérage, l'influence de trafic et l'influence de températures basses.[44].

En Algérie, le CCTP a recommandé de nouvelle limite de spécifications données selon le type de fabrication de bitume; ceci est clair dans la limite bille-anneau dans le tableau I.2. :

Tableau .I.2. Caractéristiques des bitumes selon les spécifications [44].

		Liant			
Caractéristiques	Normes	20/30	40/50	60 /70	80/100
Pénétrabilité à 25 °C	NF T 66-004	20 à 30	40 à 50	60 à 70	80 à100

I.1.7.2. La température de ramollissement bille –anneau NF EN 1427

C'est la température pour laquelle une bille d'acier s'enfonce à travers un disque de bitume contenu dans un anneau de métal dans les conditions définies de fabrication d'essais.

Chapitre I : Généralités sur les enrobés bitumineux

A cette température, le bitume présente une structure interne telle que les contraintes auxquelles il est soumis, par les conditions même de l'essai, sont suffisante pour permettre une déformation irréversible, elle-même définie.

Pour cela, une bille d'acier est placée sur anneau de cuivre rempli préalablement de bitume, l'ensemble est plongé dans un bain dont de température est élevé de 5°C par minute / la température de ramollissement est celle à laquelle la Bille, entraînant la membrane de bitume, atteint un repère fixé, de bonne corrélations existent entre la température de ramollissement Bille anneau (TBA) et la résistance à l'orniérage pour les bitumes purs. [44].

Tableau I.3. : Classification des bitumes selon la pénétrabilité et le ramollissement

	Unité	Classe								
		20/30	30/35	35/50	40/60	50/70	70/100	100/150	160/220	250/330
Pénétrabilité	0.1mm	20/30	30/35	35/50	40/60	50/70	70/100	100/150	160/220	250/330
TBA	°C	55/63	52/60	50/58	46/54	46/54	43/51	39/47	35/43	30/38

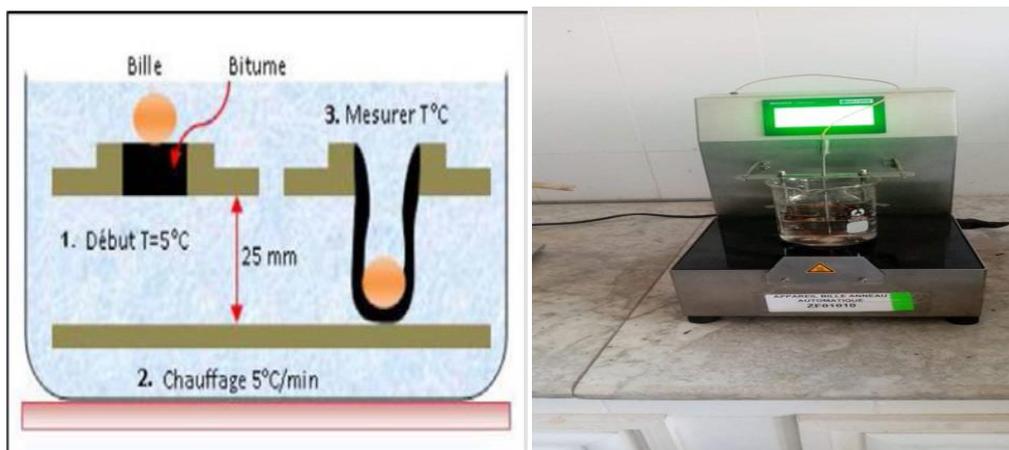


Figure. I.6. : La température de bille –anneau (ramollissement)

I.1.7.3. Retour élastique : NA 5223

Cette technique consiste à mesurer l'allongement, à l'instant précis de sa rupture d'une éprouvette de forme déterminée, étirée à une vitesse de 50mm/min, et à une température de 25 °C (Voir figure I.7).

La mesurer de la ductilité du liant permet de s'assurer de la non fragilité de ce dernier.

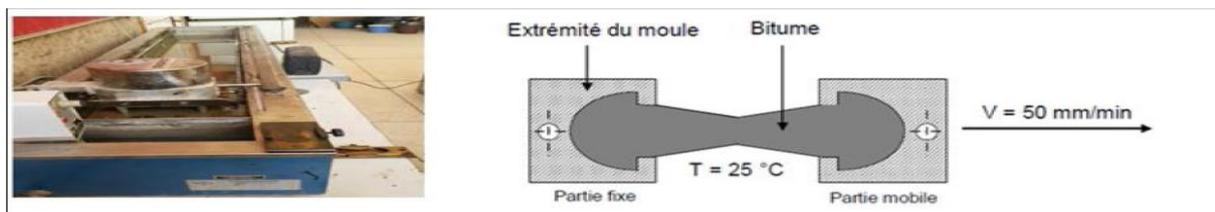


Figure .I.7. : Principe de l'essai de retour élastique

I.1.8. Le bitume en Algérie

Les classes de bitumes purs employées en technique routière sont 35/50 et 70/100.

Le pétrole algérien n'est pas assez dense pour en extraire du bitume, celui-ci est alors importé soit sous forme :

- de matière première : brut réduit, raffiné Arzew et Skikda
- D'un produit fini : bitume pur

Le bitume 35/50 est fabriqué à la raffinerie d'arzew par soufflage, il est destiné aux enrobés à chaud.

Le 70 /100 est fabriqué à Skikda par la distillation sous vide.

I.2. Les granulats

I.2.1. Introduction

Les granulats sont présents partout dans notre cadre de vie et nous avons besoin chaque année de plusieurs millions de tonnes de ce matériau pour satisfaire les besoins de la construction.

Les sables et graviers sont utilisés de deux manières :

- Soit ils sont employés tels quels pour construire des routes, des voies ferrées, des terrains d'atterrissage, etc.,
- Soit ils sont associés à d'autres matériaux afin de fabriquer d'autres produits de construction, tels que le béton, les enrobés routiers ou les mortiers [8].

Les granulats utilisés dans les enrobés en couche de roulement jouent un rôle de première importance dans le phénomène d'adhérence pneus-chaussée. Sous l'effet de la circulation, les granulats en surface tendent à se polir plus ou moins rapidement selon leur nature et leur composition minéralogique et aussi selon la densité du trafic [8].

Certains phénomènes d'orniérage ou désenrobage peuvent s'expliquer par l'interaction entre le bitume et les granulats ou d'après la forme des granulats, donc ils doivent répondre à des critères de qualité et à des caractéristiques propres à chaque usage [7].

I.2.2. Définitions

Le granulat est constitué d'un ensemble de grains minéraux qui, selon sa dimension (comprise entre 0 et 125 mm) se situe dans l'une des 7 familles suivantes: (fillers; sablons, sables; graves; gravillons; ballast; enrochements) [18].

Les granulats sont obtenus en exploitant des gisements de sables et de graviers d'origine alluvionnaire terrestre ou marine, en concassant des roches massives (calcaires ou éruptives) ou encore par le recyclage de produits tels que les matériaux de démolition. Leur nature, leur forme et leurs caractéristiques varient en fonction des gisements et des techniques de production [18].

Les granulats les plus usuels pour la fabrication des mortiers et des bétons sont élaborés à partir de roches d'origine alluvionnaire (granulats roulés ou semi-concassés) ou à partir de roches massives (granulats concassés).

La taille des granulats répond du critère granulométrique précis, les granulats sont classés en fonctions de leur granularité (distributions dimensionnelle des grains) déterminée par analyse granulométrique à l'aide des tamis [18].

Le granulat est désigné par le couple d/D avec :

D : dimension supérieur du granulat.

d : dimension inférieur du granulat.

Tableau I.4. : Les caractéristiques des granulats [44].

Les granulats les plus utilisés		
Familles	Dimension	Caractéristiques
Fillers	0/D	D < 2 mm avec au moins 85% de passant 1.25mm Et 70% de passant à 0.063mm
Sables	0/D	d = 0 et D ≤ 4mm
Graviers	0/D	D ≥ 6.3 mm
Gravillons	d/D	d ≥ 2 mm et D ≤ 63 mm
Ballasts	d/D	d = 31.5 mm et D = 50 ou 63 mm



Figure I.8. Les différentes fractions de granulats

I.2.3. Principaux essais propre aux granulats

L'aptitude des granulats à être utilisés dans les assises de chaussées est régie par un certain nombre d'essais :

- ❖ celle qui tient à la nature de la roche d'origine (dureté, résistance au polissage, résistance au choc).
- ❖ celle qui résultent de la fabrication des granulats (propreté, forme, granularité, angularité, homogénéité) [44].

En outre, les essais mécaniques permettent d'établir un classement selon :

- La résistance à la fragmentation par les essais Los Angeles (norme p18-573).
- La résistance à l'usure et à l'attrition par l'essai Micro Deval humide.
- La résistance au polissage. [44].

I.2.3.1. Analyse granulométrique NF EN 933-1

La courbe granulométrique des différents granulats peuvent être déterminée par l'essai d'analyse granulométrique.

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont des dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de colonne de tamis. Pourcentage des tamisats sous les tamis dont les mailles D sont indiquées en abscisse selon une graduation logarithmique.

I.2.3.2. Coefficient d'aplatissement

La forme des graillons est déterminée par l'essai d'aplatissement (A), le coefficient d'aplatissement caractérise la forme du granulat à partir de sa plus grande dimension et de son épaisseur.

Plus A est élevée, plus de gravillons contient des éléments plats, une mauvaise forme à une incidence sur la maniabilité et ça favorise la ségrégation [21].

I.2.3.3. Essai de bleu de méthylène NF EN 933-9

Cet essai, utilise des manières courantes pour caractériser l'activité de l'argile contenue dans le sol, il est également utilisé pour évaluer l'influence des fines d'origines argileuse contenues dans les sables et graves d'origines naturelles ou artificiels.

L'essai est conduit sur un échantillon contenant au moins 200g de fraction granulométrique 0/2mm.



Figure I.9 : L'essai de bleu de méthylène

I.2.3.4. Essais de résistance à l'usure et au choc des granulats NF P18-572

Déterminé par l'essai de micro deval (MDE) en présence d'eau, on utilise un broyeur à bille d'acier, contenant de l'eau, cela provoque une usure de gravillons par frottement réciproques avec production d'éléments fins (passant au tamis 1.6mm), MDE représente la proportion d'élément fins produits pendant l'essai, plus MDE est faible, meilleurs sera la résistance à l'usure. [44].



Figure I.10. L'essai de Micro Deval

I.2.3.5. Résistance au choc (essai los Angeles) NF P18-573

Il consiste à placer dans un cylindre à axe horizontale de 70 cm de diamètre et 50 cm de longueur les granulats à essayer et des boules d'acier, on effectue 500 révolutions à 30 tr /min, le poids et la granularité de la prise d'essai sont déterminés en fonction du diamètre maximal du granulat.[44].

Après essai, les matériaux sont criblés au tamis de mille 1.6mm et le poids de la fraction passante est rapporté au poids de la prise d'essai, le rapport, multiplié par 100, est appelé coefficient los Angeles.

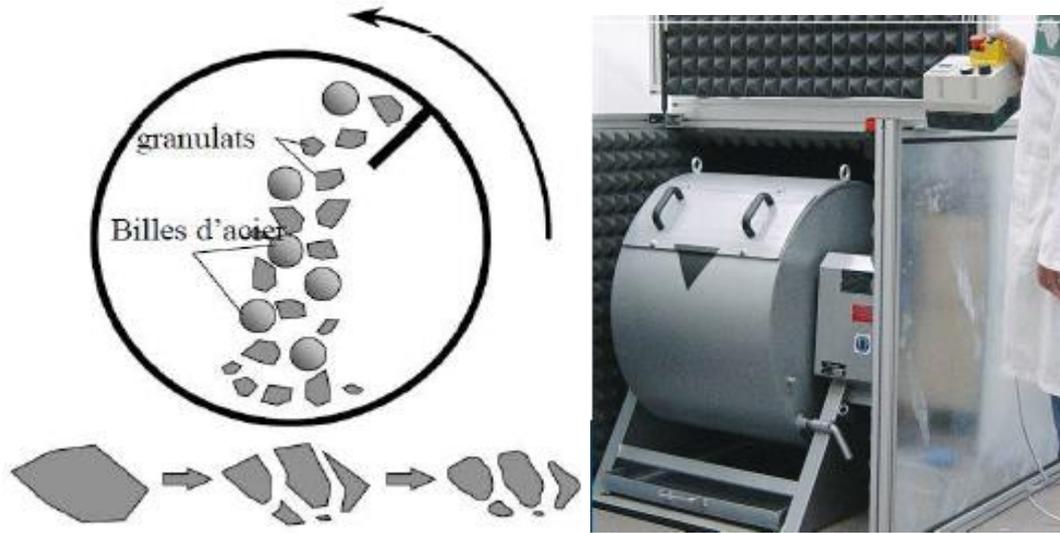


Figure I.11. : L'essai de résistance au choc (Los Angeles)

I.2.4. Conclusion

Le choix d'un squelette granulaire adéquat est une opération importante dans l'étude de la formulation des enrobés bitumineux, les agrégats ne sont pas les mêmes, chaque granulat d'une provenance donnée a ses propriétés physiques et chimiques.

I.3.1. Généralités sur les enrobés

Dans les deux grands titres précédents, nous avons vu le bitume et le granulat.

Les deux ensemble forment l'enrobé, lequel doit aussi répondre à certaines exigences.

On appelle enrobé tout mélange constitué de granulats agglomérés entre eux par liant hydrocarboné, ce mélange peut être enrichi par des fines et éventuellement contenir des additifs en vue d'améliorer certaines propriétés, généralement la composition d'un enrobé bitumineux est comme suit :

- ❖ **Granulats** : (environ 90% en poids) composé de plusieurs fractions en pourcentages variables :
 - Les fines < 80µm.
 - Les sables (0/3).
 - Les graves (3 /8), (8 /15).
- ❖ **Bitume** : (5 à 7% en poids).
- ❖ **Vide** : (de 2 à 20 % selon les matériaux).

Les enrobés sont classés en catégorie, selon leur usage, on parle, soit du béton bitumineux (BB) pour les couche de surface, soit de grave bitume (GB) pour les couches d'assise, leur formulation et dimensionnement sont réalisées par couche, entre autre, sélectionnés selon le trafic prévu, nombre de cycles de sollicitation [31].

Nous intéressons ici aux enrobés bitumineux à chaud qui résultent d'un mélange à chaud de gravillon, de sable, de fillers et des liant bitumineux et d'éventuels dopes et /ou d'additifs, dans une proportion choisie, dans ce mélange liant hydrocarboné (le bitume) est principalement responsable de la cohésion tandis que le squelette minéral constitué par les granulats assure la rigidité de l'ensemble [31].

Les enrobés à chaud fabriqués aux alentours de 180°C, dans une centrale d'enrobage.

L'objectif est de produire un enrobé durable qui sera transporté à chaud vers le chantier d'épandage, pour former la couche supérieur du revêtement des infrastructures routières, il est mise en œuvre à une température d'environ 150°C au moyen d'un finisseur, en dessous de 130°C, un enrobé à chaud devient difficile à travailler, et la qualité de l'application peut partir [13].

I.3.2. Méthodologie de conception des enrobés bitumineux algériens

La formulation en Algérie est basé sur la vérification des caractéristique des composants ainsi que sur l'essai Duriez et Marshall en fonction des matériaux granulaires, on choisi une formule qui donne un mélange ayant la meilleurs aptitude au compactage et qui pourrait donner une meilleure stabilité au mélange hydrocarboné [28].

On doit vérifier premièrement que la courbe granulométrique du mélange s'inscrit parfaitement dans le fuseau spécifique de référence du béton bitumineux 0/14 de STERA – LCPC destiné pour une couche de roulement.

Les fractions granulaires du béton bitumineux 0/14 sont choisies parmi les granulats suivants : 0/3, 3/8 et 8/15, le fuseau granulaire est présenté comme suit :

Tableau I.5.: fuseau granulométrique BB/14 [44].

Tamis	Passant BB 0/14
20	/
14	94-100
10	72-84
6.3	50-66
2	28-40
0.08	7-10

I.3.2.1. Détermination de la teneur en bitume

On appelle teneur en bitume (TL), la masse des granulats secs exprimée en pourcentage, Duriez a établi une formule pour déterminer la teneur en bitume des enrobés en bitume en fonction de la surface spécifique du mélange :

$$TL = K \cdot \alpha \cdot \sqrt{\sum S'} \quad \text{Eq I.1. [17].}$$

K : Module de richesse

Chapitre I : Généralités sur les enrobés bitumineux

Il présente une quantité de liant en fonction de la surface spécifique du mélange sec, il caractérise donc l'épaisseur du film de liant autour des granulats, le module de richesse permet de classer les mélanges bitumineux.

- ❖ Les graves bitume ($2 < K \text{ grave bitume} < 3.2$)
- ❖ Les bétons bitumineux ($3 < K \text{ béton bitumineux} < 3.9$)

Voir le tableau suivant :

Tableau I.6. : Les valeurs usuelles du module de richesse pour le béton bitumineux

Enrobé	Module de richesse			
0/14	3.45	3.6	3.75	3.90

α : Coefficient correcteur

Ce coefficient permet de tenir compte de la masse volumique réelle des granulats, si celle-ci diffère de 2.65 t/m^3 , on utilise la formule suivante :

$$\alpha = 2.65 / MVg \dots \dots \dots \text{Equ. I.2. [17].}$$

MVg : Masse volumique des granulats utilisés

La méthode utilisée est la méthode classique au pycnomètre. On mesure un poids des granulats séché à 105°C , puis déterminer son volume par déplacement de liquide dans pycnomètre comme suit :

Une masse connue M_G de granulats séché (par passage de l'étuve à 105°C jusqu'à une masse constante). Les bulles d'air libérées sont aspirées par vide d'air (trompe d'air), après s'être assuré qu'aucune bulle d'air n'est piégée entre les granulats ; on détermine avec un très grand soin le volume d'eau déplacé par particules.

- ❖ Le volume des granulats V_G égale au volume d'eau déplacé.

M_1 : Volume pycnomètre contenant l'eau distillé avec son bouchon.

M_2 : Volume pycnomètre contenant les granulats, l'eau distillé et le bouchon.

$$M_2 = M_1 + M_G - M_{VE} \cdot V_G \dots \dots \dots \text{Eq. I.3 [17].}$$

- ❖ Le volume des granulats s'exprime par :

$$V_G = \frac{M_1 + M_G - M_2}{M_{VE}} \dots \dots \dots \text{Eq I.4.}$$

- ❖ L'expression de la densité du solide est donc donné par :

$$MVG = \frac{M_G}{V_G} \dots = \frac{M_G}{M_1 + M_G - M_2} \quad \text{Eq I.4 [17].}$$

Avec :

M_G : Masse des granulats.

M_{VE} : Masse volumique de l'eau distillée.

V_G : Volume des granulats.

M_{VG} : Masse volumique des granulats.

S' : Surface spécifique conventionnelle

La surface spécifique d'un granulat représente la surface totale des particules par rapport à son volume, elle est exprimée en m^2/m^3 de granulats, cette façon d'exprimer la surface spécifique permet de faire la comparaison entre des différents granulats. Elle est exprimée ensuite en m^2/Kg , laquelle est essentiellement comparable entre les matériaux possédant une même densité.

$$S' = 0.25G + 2.3S + 12s + 135f \quad \text{en } Kg/m^2 \dots\dots\dots Eq .I.5 [17].$$

G : Proportion pondérale des éléments supérieurs à 6.3 mm.

S : Proportion pondérale des éléments compris entre 0.315mm et 6.3mm.

s : Proportion pondérale des éléments compris entre 0.08 mm et 0.315 mm.

f : Proportion pondérale des éléments inférieures à 0.08mm.

I.3.3. Essais sur enrobés bitumineux

Les formulations des bétons bitumineux sont déterminées au moyen d'essais dans le laboratoire permettant d'évaluer le comportement des matériaux au compactage (presse de cisaillement giratoire PCG), et ce, afin d'apprécier leurs caractéristiques mécaniques (essais de fatigue, essais MARSHALL, essai LCPC-DURIEZ) et d'estimer leurs risques de déformations permanentes (essais l'orniérage).

I.3.3.1. Essai Marshall

L'essai Marshall est très utilisé au niveau international, pour la détermination direct de la stabilité (force maximal appliquée), et du fluage Marshall (valeur de déformation en « mm » correspondant à la stabilité), deux grandeurs liées à la caractérisation empirique de l'orniérage [18].

I.3.3.2. Essai Duriez (essai de compression simple)

La méthode d'essai Duriez a pour but de déterminer, à 18 °C pour un compactage donné, la tenue à l'eau d'un mélange hydrocarboné à chaud à partir de la résistance à la compression avec ou sans immersion des éprouvettes [40].

I.3.3.3. Essai à la presse à cisaillement giratoire (PCG) NF EN 12697-31

Essai à la presse à cisaillement giratoire (PCG) est un essai de formulation.

La particularité de l'appareil réside dans le fait que l'échantillon n'est pas densifié par impact comme le cas de la méthode Marshall, mais plutôt sous l'action combiné d'un piston exerçant

une pression fixée à 600 KPa et d'un moule cylindrique de 150 mm de diamètre incliné de 0.8 degré et décrivant un mouvement giratoire de 30 tr /min.

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

Ce mode de compactage traduit la relation linéaire qui existe entre le nombre de passes d'un rouleau compacteur de chantier et le nombre de giration ; (ce n'était pas le cas avec le nombre d'impact de méthode de Marshall), alors la méthode de Marshall ne permet la mesure d'un pourcentage de vides que pour un effort de compactage unique, l'essai à la PCG permet de mesurer l'évolution de pourcentage de vides dans le mélange en fonction du nombre de girations, cette courbe de pourcentage de vide en fonction du nombre de giration décrit la maniabilité du mélange, qui utilisé comme critère de formulation des enrobés.

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

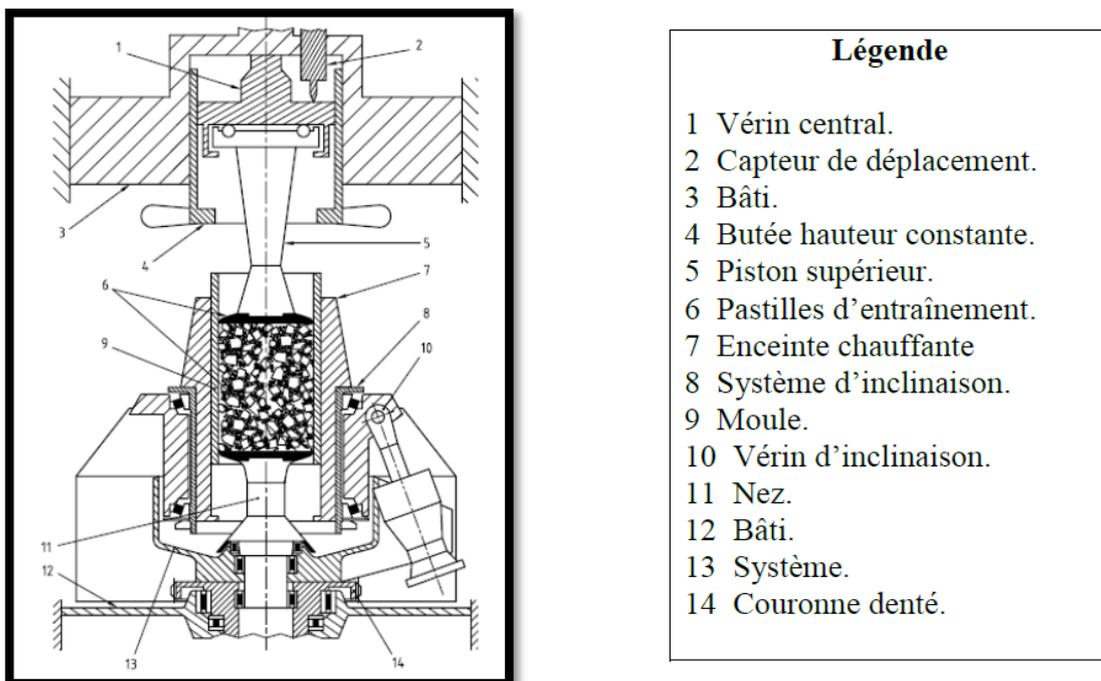


Figure I.12.: schéma de l'essai PCG

I.3.3.4. Essai de module de rigidité

La rigidité du mélange est déterminée soit par un essai se module complexe (solicitation sinusoïdale sur éprouvette trapézoïdale) soit par l'essai de traction uni-axial (sur éprouvette cylindrique ou parallélépipédique), la charge est appliquée dans un domaine de petites déformation, en contrôlant le temps ou la fréquence, la température et la loi de chargement.

Le module (rapport de la contrainte de déformation) est calculé pour chaque essai élémentaire, grâce à l'équivalence temps-température, on trace la courbe maitresse du module

à une température donnée, cette représentation permet de connaître le comportement du mélange sur un large spectre de temps de charge ou de fréquence.

La spécification porte sur le module à 15°C et une fréquence de 10 Hz ou un temps de charge de 0.02 s [43].

Le montage d'appareil de l'essai de module de rigidité est présenté par la figure I.12.

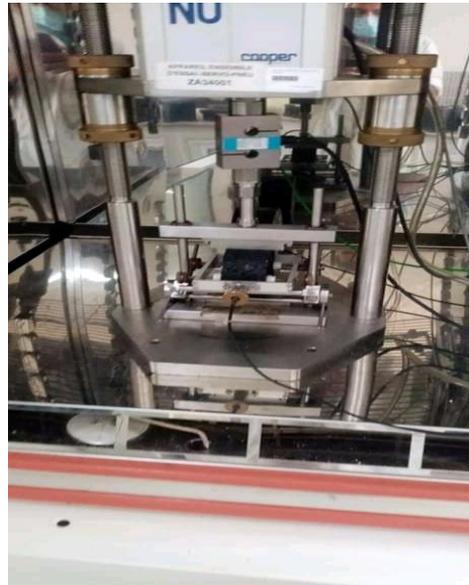
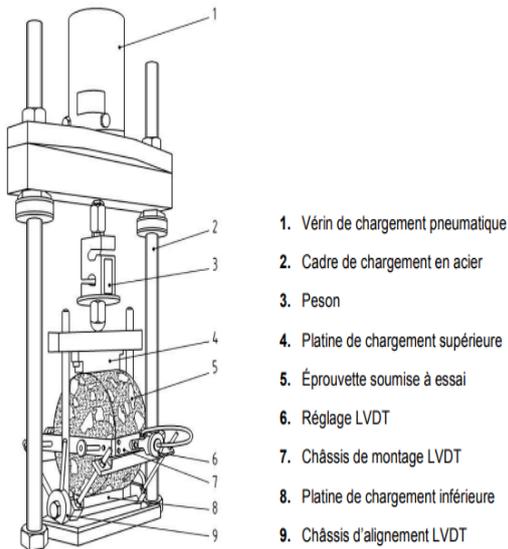


Figure I.13 : Essai de module de rigidité

I.3.3.5. Essai d'orniérage

Cet essai très important pour les routes fréquentées et avec des pourcentages de poids lourds assez élevé, il permettra de simuler au laboratoire la résistance de l'enrobé à l'orniérage. C'est une méthode qui est plus représentatives que les autres méthodes de laboratoires lors de l'évolution de la résistance à la déformation permanente et les résultats ont montré une excellente corrélation avec la déformation de chaussée en service.

On détermine la profondeur de l'ornière au passage répété d'un pneumatique, selon l'épaisseur de l'enrobé, on confectionne une plaque de 5 ou 10 cm qu'on lui fait subir une énergie de compactage normalisé à 60°C, plusieurs cycles sont appliqués 1000, 3000, 10000, 30000 Le résultat est comparé à la norme.[44].



Figure I.14 : Essai de l'orniérage

I.3.4. Phénomène d'orniérage

I.3.4.1. Définition

L'orniérage par définition est une trace parement creusée dans la chaussée par les roues des véhicules.

I.3.4.2. Types d'orniérage

Les ornières sont généralement classées en trois catégories

❖ Les ornières d'usure

Elles sont dues à la perte progressive des particules des granulats de la couche de la surface, ce type d'orniérage est causé par la combinaison de l'environnement et le trafic routier [24].

❖ Les ornières structurelles

L'orniérage des structures résulte généralement d'un sous dimensionnement de la chaussée pour les conditions de trafic dont elle est soumise, plusieurs facteurs peuvent influencer ce mécanisme comme la construction de la chaussée, les facteurs liés au trafic (types pneus, charge par essieu, vitesse de déplacement, pression de gonflage) et les facteurs environnements [24].

❖ Les ornières d'instabilité

Il ne s'agit plus d'un problème de dimensionnement des structures mais d'un problème de formulation mettant en jeu les caractéristiques de divers constituants, tel leur dosage et la mise en œuvre des mélanges [24].

I.3.4.3. Mécanisme d'orniérage

Plusieurs mécanismes peuvent être à la base du phénomène d'orniérage, les ornières dans l'enrobé bitumineux sont dues à la densification et l'augmentation du cisaillement.

L'orniérage initial est causé par la densification de la chaussée sous le passage de pneus, l'évolution de l'orniérage est liée au cisaillement qui conduit à la formation de bourrelet aux bords du passage des roues. Toutefois, pour les chaussées bien compactées, la contrainte de cisaillement dans la couche de béton bitumineux est le mécanisme principal d'orniérage de la chaussée selon le mécanisme suivant :

- ❖ La déformation plastique verticale dans la couche de l'enrobé bitumineux.
- ❖ Le fluage latéral dans la couche de l'enrobé bitumineux (on peut définir la résistance au mécanisme par la capacité d'un enrobé bitumineux à maintenir intact son squelette minéral).
- ❖ La déformation des couches inférieures.

Plusieurs facteurs peuvent influencer ce mécanisme comme la construction de la chaussée, les facteurs liés au trafic [27].

Chapitre II :
Polymères & bitumes modifiés

II.1. Introduction

L'utilisation de la matière plastique remonte à l'antiquité, les hommes utilisaient les propriétés des plastiques de la corne, des écailles, de l'ambre, du caoutchouc.....etc, chauffés et moulés pour fabriquer de nombreux objets. À partir de la fin de XIXe siècle débute la mise au point de nouvelles matières, les plastiques semi-synthétiques faites de polymères naturels modifiés chimiquement par des produits chimiques.

Les matières plastiques sont essentiellement fabriquées par des pétrochimistes, à partir du pétrole ou de gaz naturel, les usages sont très variés et entrent « de la petite objets de la vie de tous les jours ».

Les liants bitumineux tels que produits dans la raffinerie ne possèdent pas des performances requise pour être utilisé dans la construction des routes, elles de plus, soumise à la forte charge des camions, à un trafic intense et à des conditions climatiques très rigoureuses.

Pour augmenter les performances de ce liant, on fait donc appel à des techniques des modifications, l'objectif de la modification est de produire un liant « idéal » [33].

II.2. Définition de polymères

Le mot polymère vient de grec « polus » plusieurs et « meros » parties, soit « plusieurs parties » ou « plusieurs unités ».

C'est une substance généralement organique composée essentiellement d'atome de carbone et d'hydrogène, liquide ou solide à température ambiante, de masses moléculaires élevées.

Elle est caractérisée par la répétition d'un ou plusieurs types de motif monomères liés les uns aux autres par des liaisons covalentes.

Le nombre moyen de monomères dans un polymère est le degré de polymérisation.

Le haut polymère est celui dont le degré de polymérisation est élevé, celui –ci est faible, le composé est un oligomère.

Les polymères industriels peuvent être fabriqués à partir d'un seul type de monomères, ils sont alors dits homopolymères, ou bien à partir du plusieurs types de monomères et dits copolymères [36].

II.3. Type des polymères

On peut classer les polymères selon différentes catégories :

II.3.1. Polymères naturels

Ils sont en l'état dans la nature, ils sont couramment subdivisés selon leur provenance végétale, animale ou minérale, tels que caoutchouc, la cellulose, le collagène et l'amylose.

II.3.2. Polymères artificiels régénérés

Ils résultent d'une transformation chimique de constituants de base naturelle, tels que les dérivés cellulosiques dont la molécule de la base est la cellulose.

II.3.3. Polymères synthétiques

Ils sont souvent proches des polymères naturels bien que leurs constituants de base n'existent pas dans la nature, tels que les caoutchoucs synthétiques polypropylène [34].

II.4. L'architecture

➤ Linéaires ou monodimensionnels

L'enchaînement est dans une seule direction de l'espace.

➤ Bidimensionnels

L'enchaînement s'étend dans deux directions de l'espace, tels que le graphite.

➤ Tridimensionnels : par pontage des molécules linéaires peuvent être transformé en 3D.

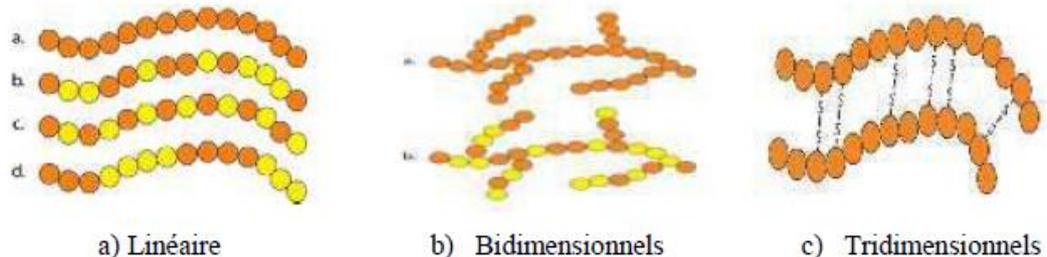


Figure II.1. : Types des polymères

II .5. Propriétés

II.5.1. Thermoplastique

Ils sont constitués de macromoléculaires de structures linéaires ou ramifiées qui sont liées entre elles par des liaisons faibles qui peuvent être rompues, soit par élévation de la température, qui entraîne un ramollissement progressif réversible, soit par dissolution dans un solvant adéquat, après refroidissement ou vaporisation du solvant, les liaisons se rétablissent et les polymères retrouvent leur état solide initial, les thermoplastiques sont donc faciles à mettre en œuvre et recyclables et peuvent être combinés au bitume à température élevée [31].

II.5.2. Thermodurcissables

Ils sont constitués de macromoléculaires formant un réseau tridimensionnel, l'élévation de la température ou l'addition d'un solvant ne permet pas de rompre les liaisons covalentes.

Les thermodurcissables sont alors infusibles et insolubles après la réticulation d'où ils sont non recyclables [31].

II.5.3. Elastomères

Ils sont obtenus à partir de polymères linéaires par une réticulation, dont la densité est beaucoup plus faible que dans les cas des polymères thermodurcissables, ce qui conduit à la formation d'une structure partiellement tridimensionnelle.

La vulcanisation ou pontage permet de transformer un polymère à comportement plastiques en un matériau à comportement élastiques, du fait de la légère vulcanisation, ce matériau à des grandes déformations élastiques réversibles qui peuvent atteindre 100%.

Les élastomères sont difficilement recyclable, ils résistent bien à l'influence des produits tels que les huiles, les essences et sont insensibles à l'eau et ils résistent également bien à l'oxygène et au rayonnement solaire et donc au vieillissement naturel.

Les élastomères contiennent de 50 à 60 % de polymères, le reste est composé de charges, agent de vulcanisation, accélérateurs, produits retardant le vieillissement et d'autres additifs, les élastomères sont classés en trois familles principales :

➤ **Elastomères à usages généraux tels que :**

Le caoutchouc naturel (NR), le poly isoprène (IR), le copolymère butadiène styrène (SBR).

➤ **Elastomères à usages spécifiques tels que :**

Le polychloroprène (CR), le copolymère acrylonitrile butadiène (NBR).

➤ **Elastomères thermoplastiques (TPE) :**

Ils ne sont pas vulcanisés ou réticulés lors de la fabrication, mais possèdent, à la température de service, des propriétés similaires à celle du caoutchouc vulcanisé, ces dernières disparaissent lors de chauffage pour les mettre en œuvre et réapparaissent, lorsque le matériau revient à la température de service [31].

II.6. Propriétés mécaniques et comportement des polymères

L'ingénieur doit, pour gérer les polymères et leurs comportement, prendre l'altitude de s'informer au mieux sur les matériaux qu'il emploie, à savoir sur :

- L'architecture du polymère ;
- La formulation du polymère ;
- La mise en œuvre du matériau ;
- Les conditions d'utilisation

Toute évidence, tous ces paramètres ne sont pas indépendants puisque, dans certaine mesure, la nature des chaînes conditionne leur organisation et leur comportement [32].

II.7. Effet de la température sur l'état structurel

A basse température, la plupart des polymères présentant un état vitreux, ils sont rigides, lorsque la température augmente, ils passent par un état de transition, pour une plage de températures spécifique du polymère, les chaînes macromoléculaires glissent les unes par rapport aux autres et les polymères se ramollissent, cette plage de température est dite température de transition vitreuse T_g .

Lorsque la température augmente, l'énergie thermique fournie aux molécules augmente leur mobilité : les rotations autour des liaisons C-C du squelette des chaînes sont plus aisées (changements de conformation), le nombre de liaisons de faible intensité (Van der Waals), diminue quand la température augmente ce qui libère les mouvements moléculaires [30].

II.8. Quelques repères historiques des modifications par polymères

Les recherches d'amélioration des propriétés des bitumes par modification de sa structure ou par ajout d'additifs sont anciennes.

Mais c'est aux trentaines dernières années que l'on peut faire remonter l'essor véritable de chercher, selon diverses directions, de produits et procédé permettant la modification des caractéristiques et propriétés des bitumes à usages routier. Antérieurement à 1970, on relève ainsi à partir de la fin des années 50, aux Etats-Unis, la réalisation d'enrobés avec bitume modifié par des caoutchoucs incorporés sous forme de latex.

Des opérations du même genre furent effectuées en Europe, des expérimentations eurent ainsi lieu en France en 1996, mais ces applications, souvent réalisées à titres d'essai, furent généralement considérées comme insuffisamment au point, onéreuse et non indispensable malgré l'essor important des travaux public durant les années 60, les travaux de construction routière furent réalisés à cette époque avec des bitume purs.

Le développement de bitume modifié par des polymères et d'emploi d'additifs est intimement lié à la mise au point de nouvelle formule d'enrobés bitumineux de couche de surface en faible épaisseur, offrent de meilleures performances en termes de qualité d'usage et de durabilité, c'est tout un ensemble de techniques de chaussées qui s'industrialisera dans les années 80 [33].

II.9. Les objectifs de la modification

Les objectifs recherchés par la modification des bitumes par des polymères sont multiples, il s'agit avant tout de modifier le comportement aux températures extrêmes atteintes par la chaussés, conserver une consistance suffisamment élevée aux hautes températures pour éviter ressues et déformations permanente, diminuer la fragilité à basse température pour éviter fissurations et arrachements de gravillons.

Ces objectifs dépendent aussi des domaines d'applications et des techniques projetées, enduits superficiels, tapis minces, enrobés drainants, couches de roulement pour routes à trafic.

La modification des bitumes consiste ou permettent à modifier une ou plusieurs des caractéristiques suivantes :

- **La susceptibilité thermique** : caractérisée par la variation de la consistance en fonction de la température, la modification a pour but de réduire cette susceptibilité en élargissant l'intervalle séparant le point de fragilité à basse température et le point de ramollissement à haute température.
- **la cohésion** : définie comme l'énergie nécessaire pour rompre un film de liant, elle varie en fonction de la température en passant par un maximum, le but de la modification est d'augmenter la cohésion maximale et /ou la « plage de cohésion » et d'obtenir ainsi une consistance satisfaisante dans toute la gamme des températures de service.
- **l'élasticité** : définie comme l'aptitude des liants à supporter, de façon réversible sans rompre, la déformation induite par l'effet du trafic et des variations de température, la

modification vise à maintenir cette élasticité dans une large gamme des températures d'utilisation.

- **La résistance à la fatigue** : la modification a pour but d'augmenter la capacité de la résistance des matériaux à basse température, ce capital est consommé progressivement sous les sollicitations répétées sous l'effet de trafic.
- **l'adhésivité passive** : améliorer la résistance au désherbage sur la chaussée.
- **La résistance au vieillissement** : la modification doit améliorer la résistance au vieillissement aussi bien à la mise en œuvre que sous les conditions d'utilisation [33].

II.10. Différent types de polymères utilisés pour la modification des enrobés

Pour que le polymère soit efficace, il faut qu'il soit compatible avec la matrice bitumineuse, le polymère doit améliorer la résistance du bitume à des températures élevées sans pour autant le rendre trop visqueux à la température du malaxage ou bien trop rigide à des températures basses.

Si ce bitume est appelé à être utilisé dans le mélange bitumineux, il doit être capable de malaxer dans un équipement conventionnels, dans tous les cas, le bitume doit être disponible, moins coûteux et stable pendant le stockage et l'application, les polymères majeurs que posent les enrobés modifiés avec des polymères résident dans la mauvaise solubilité de certains polymères dans la matrice bitumineuse qui peut conduire à la séparation des phases.

Les principaux groupes de polymères utilisés pour la modification des enrobés sont les suivants :

- Polymères thermoplastiques.
- Caoutchouc naturel et synthétiques.
- Caoutchouc thermoplastiques.
- Polymères thermodurcissables.

Actuellement, les enrobés sont modifiés surtout avec les caoutchoucs thermoplastiques, aussi bien avec les polymères thermoplastiques, les caoutchoucs naturels ou synthétiques sont difficilement appliqués comme additifs, tandis que les résines thermodurcissables sont utilisées dans des applications particulièrement spécial.

Quelques fois, deux différents polymères sont ajoutés simultanément, dans le but de conférer au enrobés modifiés les performances requises, il est important de rappeler que chaque classe de polymères et caractérisé par son poids moléculaire, sa structures, sa viscosité, etc.....et dans chaque cas, les caractéristiques propre du polymère devraient être étudiées avant que ce dernier soit incorporé dans la matrice bitumineuse [31].

II.11.1. Polymères thermoplastiques

Sont caractérisés par ramollissement durant le chauffage et par le durcissement durant le refroidissement, le polyéthylène (PE), le polystyrène (PS), l'éthylène acétate de vinyle (EVA), sont les principaux polymères de ce groupe comme modifiants [31].

II.11.2. Les caoutchoucs naturels et synthétiques

Les caoutchoucs naturels et synthétiques tels que le polybutadiène (PB), le polyisoprène (IR), le butyle caoutchouc, le caoutchouc styrène butadiène (SBC) tous sont testés avec les bitumes, le caoutchouc naturel est susceptible à la décomposition et à l'oxydation, il possède un poids molaire trop élevé, il est directement dissous dans le bitume [31].

II.11.3. Caoutchoucs thermoplastiques

Les élastomères thermoplastiques utilisés comme adjuvants pour les enrobés sont des blocs de copolymères de mono-et dioléfinés. Comme monoléfiné est le plus utilisé, tandis que comme dioléfinés, ce sont le butadiène et l'isoprène [31].

II.11.4. Les polymères thermodurcissables

Les thermodurcissables ne ramollissent pas durant le chauffage, ils ne sont pas très utilisés dans le pavage des routes, raison de leur coût élevé et de la méthode de leur mise en œuvre, toutefois les propriétés qu'ils confèrent sont remarquable, les produits les plus connus sont basées sur des résines époxy [31].

II.12. Mécanisme de la modification

Sur le plan thermodynamique, la compatibilité correspond à la situation où le bitume et le polymère forment une seule phase, dans ce cas, on peut parler de la solubilité de polymères dans le bitume.

Un tel système, s'il se présente idéalement de point de vue stockage, car il n'y a pas de séparations de phase, n'a pas en générale de performance supérieure à celles du bitume d'origine.

En pratique, on considère que la compatibilité est bonne quand le mélange voit sa propriété améliorée et quand la manipulation du mélange s'effectue sans précautions excessives : la compatibilité a alors le sens de convenance. Il en résulte cependant une préoccupation pratique : la séparation de phase possible et l'agitation du mélange au stockage est souvent nécessaire.

La solubilité de polymères dans les bitumes dépend de plusieurs facteurs, dont en particulier la différence de paramètre de solubilité entre le polymère et les facteurs métallène du bitume, ainsi que la quantité de asphaltène, il est nécessaire que la différence des paramètres de solubilités soit faible pour assurer une bonne compatibilité. « La quantité de asphaltènes ne doit pas être généralement élevée » [36].

Par ailleurs, ces systèmes bitume-polymère, suivant leur température critique supérieure de solution, peuvent se présenter soit en une seule phase (au dessus de cette température), soit en deux phases (en dessous de cette température) [36].

Les paramètres qui interviennent sur le niveau de cette température soit principalement les asphaltènes et le pouvoir de solvation des maltènes [36].

Un dernier facteur important est la masse moléculaire des constituants, l'addition au bitume de polymère à faible masse moléculaire est plus facile que celle des polymères à forte masse moléculaire, l'éventail de la masse moléculaire des polymères utilisées dans la modification des bitumes est 50000 à 300000 g/mol [36].

La mise au point d'un bitume-polymère de qualité nécessite donc généralement des recherches assez poussées, et l'on doit viser une association bitume – polymère qui présente à celle du bitume classique mais aussi les qualités pratiques d'utilisation convenable [36].

II.13. Compatibilité bitume-polymère

La compatibilité peut être définie de deux façons :

- ✓ En terme thermodynamique.
- ✓ En terme pratique

II.13.1. En terme thermodynamique

La compatibilité se définit comme une situation où le bitume et le polymère forment une seule phase, nous nous référons à cette définition de la compatibilité en parlant de « solubilité » d'un polymère dans le bitume est qu'il n'y aura pas de séparation de phase et qu'un tel mélange peut être stocké sans agitation [32].

II.13.2. En terme pratique

La compatibilité se définit comme une situation où le bitume et le polymère peuvent se combiner pour former un produit dont les propriétés se trouvent améliorées et où ce mélange peut être manipulé sans excessives.

L'implication pratique pour bitume / polymère et qu'il peut y avoir séparation de phase si le mélange est stocké sans agitation [32].

II.14. Procédé de la modification

Il existe deux procédés de fabrication d'enrobés modifiés : à sec et par voie humide.

II.14.1. Procédé sec

L'enrobé est fabriqué selon les proportions de l'étude de formulation des différentes fractions des granulats et des bitumes, la quantité de l'additif est choisie comme un pourcentage en poids du squelette granulaire, l'additif est incorporé avec le squelette granulaire lors du malaxage, le bitume est introduit par la suite.

Une fois les granulats enrobés, des éprouvettes de types Marshall sont confectionnées.

Pour évaluer l'effet des polymères sur les performances mécaniques de l'enrobé, il est nécessaire de faire l'essai de Marshall [38].

II.14.2. Procédé humide

Ce procédé consiste à modifier le liant de base par l'emploi d'un polymère afin de modifier la structure chimique et les propriétés physiques et mécaniques.

Différents procédés sont développés pour produire les bitumes-polymères, la méthode la plus adoptée au laboratoire ou en usine est basée sur les principes suivants :

- La température de mélange est généralement comprise entre 150°C et 200°C.
- La durée de malaxage (agitation mécanique, vitesse de malaxage est 300-400 tr /min) varie de 1 et 12 h selon le types de polymère [38].

II.15. Conclusion

Ce chapitre à été dédié à l'identification des polymères et leurs types, en particulier ceux que utilisés comme additifs dans le bitume.

Les principaux types sont les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères, les plus utilisés dans le bitume modifié sont des élastomères.

Chapitre III : Partie Expérimentale

Ce chapitre englobe à la fois les matériaux et méthodes expérimentales utilisées pour la réalisation de ce travail ainsi que la présentation des résultats et leurs interprétations.

La présente étude a été réalisée moyennant les matériaux suivants :

- ❖ Bitume de grade 35/50 ;
- ❖ Agrégats de fractions 0/3, 3/8 et 8/15 ;
- ❖ Polystyrène (PS), Copolymère Styrene Butadiène (SBR) et Polyéthylène Haute Densité (PEHD) ;
- ❖ Solvant organique (chloroforme).

III.1. Les matériaux utilisés

III.1.1. Le bitume pur

Notre étude expérimentale a été réalisée sur un bitume de classe 35/50, il provient de l'entreprise NAFTAL.

III.1.1.1. Caractérisation du bitume pur

La caractérisation du bitume a été effectuée au "Département des produits hydrocarbonés" de Cosider ENGINEERING, sis à Dar El Beida par les techniques suivantes :

- Essai de pénétrabilité ;
- Essai de ramollissement bille et anneau TBA ;
- Essai de ductilité.

Le tableau III.1 montre les caractéristiques du bitume pur et les spécifications en vigueur.

Tableau III.1 : Caractéristiques du bitume pur

Type d'essai	Résultat	Spécifications
Température bille et anneau « TBA » (°C)	53.5°	50 – 58
Pénétrabilité à 25°C (1/10mm)	35	35- 50

Les résultats montrent que les caractéristiques de ce bitume coïncident avec les spécifications préconisées dans la norme EN 12951 « Spécification des bitumes routiers » pour la classe 35/50.

III.1.1.2. Susceptibilité thermique

La susceptibilité thermique du bitume pur est estimée à partir de la variation de la pénétrabilité en fonction de la température selon la méthode LCPC, pour cela, on a effectué des essais de pénétrabilité à différentes températures afin d'évaluer son évolution, pour le bitume de grade 35 /50, les températures utilisées sont 20, 25, 30, 35 et 40 °C.

Les résultats des essais de pénétrabilité en fonction de la température sont représentés respectivement dans le tableau III.2 et la figure III.1

Tableau III.2 : Susceptibilité thermique du bitume pur

T° (°C)	20	25	30	35	40
Pénétrabilité 1/10 mm	28	40	71	107	157
Log pén	1.45	1.65	1.85	2.03	2.19

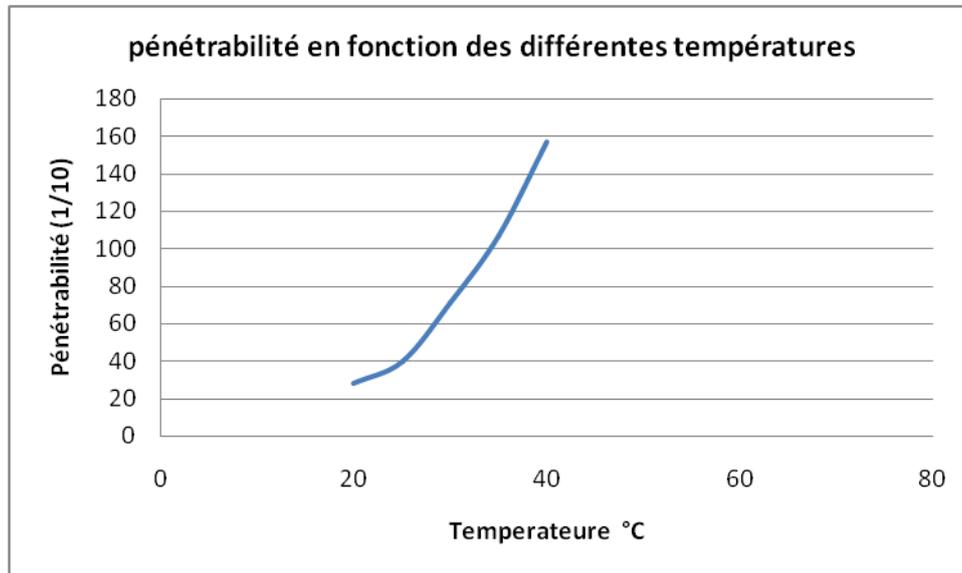


Figure III.1. Courbe de pénétrabilité en fonction des différentes températures

Nous observons que la température change l'état physique du bitume, c'est-à-dire, lorsque la température augmente le bitume devient mou, par conséquent, la pénétrabilité augmente.

Cette courbe montre qu'il existe une variation linéaire en coordonné semi-logarithmique entre la pénétrabilité et la température, la susceptibilité thermique du bitume est estimée par le coefficient A qui représente la pente de la droite (Voir équation III.1).

$$\text{Log (pen)} = AT + C \dots\dots\dots\text{Eq. III.1}$$

Où :

A : Susceptibilité thermique.

C : Constante.

La susceptibilité thermique des bitumes routiers est représentée par un indice appelé indice de pénétrabilité (IP).

Selon la susceptibilité à la température, l'indice de pénétrabilité IP va de -0.3 (bitume très susceptible) jusqu'à environ +0.7 (bitume moins susceptible).

Pour le bitume de type « gel », les indices de pénétrabilité IP sont positifs par contre, pour les bitumes de type « sol », ils sont négatifs.

Après les calculs à l'aide de L'équation III .2.

$$A = \frac{\log(\text{pen } T_1) - \log(\text{pen } T_2)}{T_1 - T_2} \dots\dots\dots \text{Eq. III.2}$$

$$A = 0.037 \quad \text{et} \quad IP = 0.53 \quad -0,3 < IP < +0,7 \quad 0.015 < A < 0.06$$

Le bitume utilisé dans notre étude est un bitume routier car la valeur A est égale à 0.037, elle est comprise entre 0.015 et 0.06 (intervalle de bitume routier), et que le bitume est moins susceptible car la valeur de IP est égale 0.53 entre -0,3 et +0,7.

III.1.1.3. Influence du temps de malaxage sur les caractéristiques du bitume pur

L'influence du temps de malaxage sur les caractéristiques classiques du bitume pur a été évaluée.

Le bitume pur (35/50) est soumis au malaxage avec un agitateur électrique à hélice avant de faire les essais de caractérisation (pénétrabilité, TBA, ductilité).

Nous avons adopté les paramètres de malaxage suivants :

- Une température de malaxage de $180 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Une vitesse de malaxage : 600 tr /min.
- Une durée de malaxage de 0 ; 1 ; 2 et 3 heures.

Les caractéristiques classiques du bitume sous l'effet de la durée de malaxage sont résumées dans le tableau III.3 :

Tableau III.3 : Evolution des caractéristiques du bitume sous l'effet de la durée de malaxage

Essai	Durée de malaxage			
	0h	1h	2h	3h
Pénétrabilité à 25°C (1/10 mm)	42	40.6	35	30
Température de bille et anneau « TBA » à 25°C	53.5	54	57	61
Roture élastique en (cm)	130	123	113	78

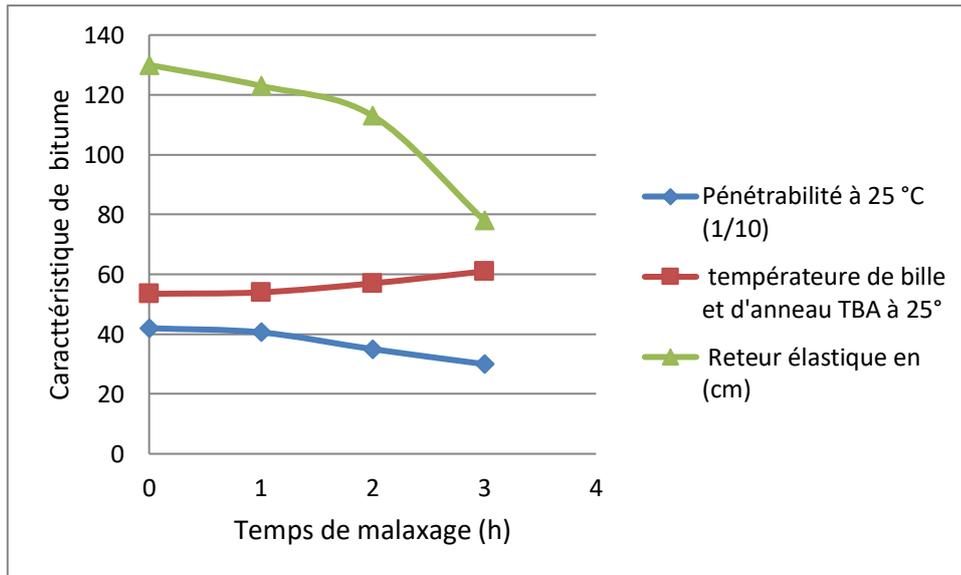


Figure III.2. Influence de temps de malaxage sur les caractéristiques du bitume

On remarque que la consistance du bitume augmente avec l'augmentation de la durée de malaxage. En revanche, le bitume devient dur et perd sa ductilité.

III.1.2. Mélange bitume / solvant

Afin de faciliter la dissolution (dissociation) des polymères dans le bitume, une quantité (100 ml) d'un solvant organique (chloroforme) a été introduite.

Les caractéristiques classiques du mélange bitume –chloroforme sont résumées dans le tableau III.4.

Tableau III.4. Caractéristiques du mélange bitume-chloroforme

Type d'essai	Résultats	Spécifications Classe 70/100	Spécifications Classe 35/50
Pénétrabilité à 25°C (1/10mm)	85	70-100	35-50
Température de bille et anneau « TBA » à 25°C	46	43-51	50-58
Retour élastique à 25°C	5	13	42

III.1.2.1. Susceptibilité thermique

La susceptibilité thermique du mélange bitume + chloroforme est estimée à partir de la variation de la pénétrabilité à différentes températures selon la méthode LCPC. Pour le grade de bitume 70/100 puisqu'on a remarqué que la classe de bitume change quand on ajoute le solvant, les températures sont 20 ; 25 ; 30 ; 35 et 40 °C.

Les résultats des essais de pénétrabilité en fonction de la température sont représentés dans le tableau III.5.

Tableau III.5. La susceptibilité thermique du mélange bitume / chloroforme

T (°C)	20	25	30	35	40
Pénétrabilité 1/10mm	68	84	114	134	175
Log pénétrabilité	1.83	1.92	2.05	2.12	2.25

III.1.3. Les polymères

Dans nos travaux, nous avons utilisé les polymères de synthèse suivants :

- ❖ Polyéthylène haute densité (PEHD) ;
- ❖ Polystyrène (PS) ;
- ❖ Co- polymère styrène butadiène (SBR).

III.1.3.1. Polyéthylène haute densité (PEHD)

Le polyéthylène PE est l'un des polymères les plus simples et les moins coûteux, il appartient à la famille des polyoléfines, ces importants polymères de synthèse très employés avec PP, le PVC et le PS. Sa production mondiale était estimée 80 millions de tonnes en 2008 il compose notamment la moitié des emballages plastiques.

Les trois principales familles de PE sont le PEHD (PE haute densité), le PELD (PE basse densité), et le PELLD (PE à basse densité linéaire).

Dans notre campagne expérimentale, nous avons utilisé le PEHD que nous avons récupéré de l'entreprise ANABIB sise à Reghaia industrielle.



Figure III.3. Le polymère PEHD

III.1.3.2. Le polystyrène (PS)

Le polystyrène PS est l'un des polymères les plus simples et les moins chers, désigne un polymère dont le monomère – comprenez l'élément moléculaire répété est le styrène, ce dernier est formé d'un benzène accroché au composé CH-CH₂.

Le PS utilisé dans notre étude expérimentale provient de l'entreprise LES FRERE
GUEZZOUL à sise Sétif.



Figure III.4. Le polymère PS

III.1.3.3. Copolymère Styrène Butadiène (SBR)

Est un copolymère du styrène et du 1,2-butadiène, le SBR est obtenu à froid, à chaud (50 °C) ou en solution avec un catalyseur, il a des propriétés d'élastomères proches du caoutchouc, résistant au gel, à l'abrasion et à la déchirure entre autre.

Nous avons récupéré le copolymère SBR au niveau de l'entreprise nationale (polymère-caoutchouc) sise Rouiba industrielle.



Figure III.5. Aspect du copolymère SBR

III.1.3.4. Le chloroforme

Le chloroforme, ou tri chloroforme est un composé organique de formule CHCl_3 . il s'agit d'un liquide dense, incolore, à forte odeur, produit à grande échelle comme précurseur du PTFE, c'est aussi un précurseur de divers réfrigérants, c'est l'un des quatre chlorométhanés et

un trialométhane, c'est un puissant anesthésique, euphorisant, anxiolytique et sédatif lorsqu'il est inhalé ou ingéré.



Figure III.6. Le solvant chloroforme

III.2. La modification

Les bitumes polymères sont fabriqués en générale par dispersion du polymère dans le bitume sous agitation à chaud.

Dans notre étude, la modification a été réalisée au laboratoire de l'entreprise du groupe Cosider à Dar el Beida, nous avons pour cela utilisé un appareillage constitué de : (Voir figure III.7).

- ❖ d'un agitateur électrique à hélice muni d'un variateur de vitesse de rotation allant de 50 à 2500 tr /min.
- ❖ d'un thermomètre allant de -50 à 250 °C.
- ❖ d'un récipient dans lequel on effectue la modification, ce dernier est équipé d'un couvercle hermétique pour empêcher la vaporisation des huiles du bitume lors du chauffage.

Nous avons adopté les paramètres de la modification suivants :

- Un volume de bitume d'environ 600 g.
- Une température de mélange de 180 ± 10 .
- Une vitesse de malaxage ; 600 tr/min.
- Une durée de malaxage de 1, 2 et 3 heures.

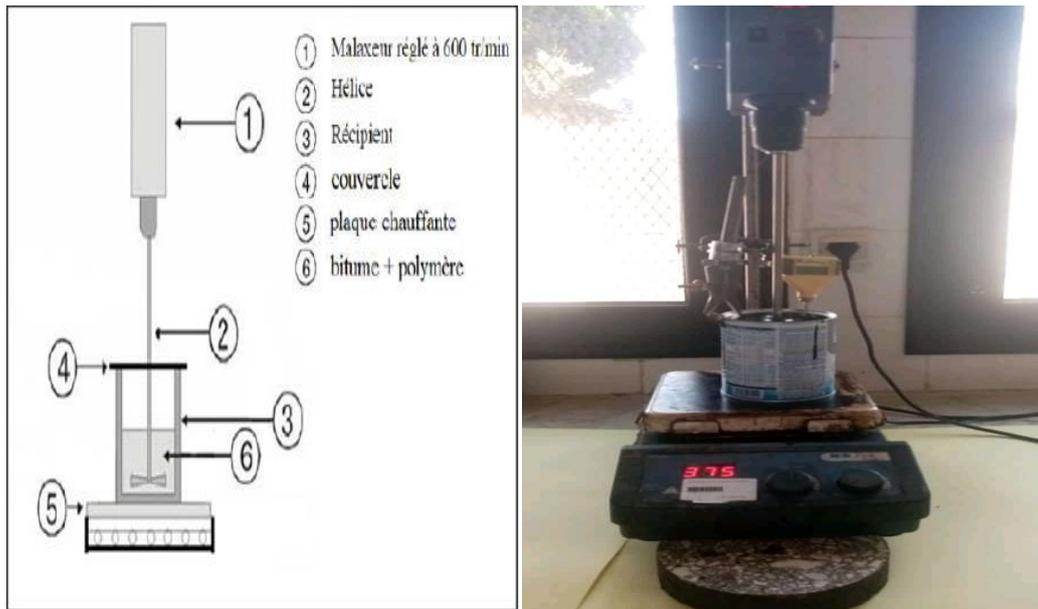


Figure III.7. Appareillage de modification

III.3. Mode opératoire de la modification

- ❖ Le bitume est chauffé dans une étuve jusqu'à atteindre une température comprise entre 175 et 185°C pendant 2 heures.
- ❖ Remplir les boîtes (84g /boîte) avec du bitume et mettre sur la plaque chauffante, le récipient qui est équipé dans couvercle hermétique pour empêcher la vaporisation d'huile de bitume.
- ❖ A une température de 175°C, le polymère avec la dose choisie est introduit et l'agitateur à hélice est mis en marche à la vitesse de 600 tr /min.
- ❖ Durant toute la manipulation, la température doit être maintenue dans l'intervalle 175 à 185°C en réglant la plaque chauffante, la vérification de la température s'effectue régulièrement à l'aide du thermomètre digitale.
- ❖ Arrêter le malaxeur après le temps de malaxage 2h.
- ❖ Le déversement est alors effectué rapidement dans les coupelles en laiton pour l'essai de pénétrabilité, les anneaux pour la TBA et dans le moule du ductilimètre.

Dans notre cas pratique, deux modes opératoires ont été utilisés :

Mode opératoire 1 :

On a mis le polymère sans dissolution (dissociation) préalable dans le solvant (chloroforme) avec différents pourcentages. On a remarqué que certains polymères ne dissolvent pas dans le bitume, c'est-à-dire que le mélange n'est pas homogène.

Mode opératoire 2 :

- Avant que l'on mélange le polymère (PS et /ou SBR) on les a dissout (dissocie) dans un solvant chloroforme avec la méthode suivante :

Mélanger 100 ml de ce solvant avec la quantité désirée du polymère (pourcentage de polymère 2% ou 4%) jusqu'à dissolution complète.

- A la fin, on ajoute le mélange obtenu (solvant + PS et/ou SBR) dans le bitume selon le mode opératoire de modification.



Figure III.8. SBR dissout dans le chloroforme

Dans notre étude, on a modifié le bitume en l'associant respectivement à trois types de polymères (SBR-PS-PEHD) avec des teneurs bien précises avant de réaliser les essais de caractérisation suivants :

- ❖ Essai de pénétrabilité à 25°C.
- ❖ Essai de température de ramollissement bille-anneau à 25°C.
- ❖ Essai de la ductilité à 25°C.

Le tableau III.6 regroupe les différentes formulations (mélanges) réalisées en précisant les taux de polymères introduit au bitume :

Tableau III.6. Représentation des mélanges (formulations)

Mélange	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
Bitume pur	0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PS		4%	--	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SBR			4%							-	-	-
PS dissous dans le chloroforme		-	-	2%	4%	-	-	-	-	-	-	-
SBR dissous dans le chloroforme		-	-	-	-	2%	4%	-	-	-	-	-
SBR+PS dissous dans chloroforme		-	-	-	-	-	-	2%	4%	-	-	-
Solvant+bitume		-	-	-	-	-	-	-	-	100ml de solvant	-	-
PEHD+bitume		-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.5%	-
SBR granulés		-	-	-	-	-	-	-	-	-		4%

- M : Mélange.

- Solvant+bitume : Modification réalisée en ajoutant 100 ml de chloroforme dans le bitume.

- SBR sous forme de granules : Le SBR a été découpé en petits morceaux et ajouté dans le mélange d'enrobé bitumineux.

III.4. Etude expérimentale sur les liants (bitumes) modifiés

III.4. Pénétrabilité

III.4.1. Influence de l'incorporation des polymères sur la pénétrabilité

On a réalisé l'essai de pénétrabilité sur les bitumes modifiés par différents polymères (PS-SBR-PEHD) avec différents pourcentages.

Mode opératoire

- Préparer et chauffer les échantillons et les gobelets à une température de 180 °C.
- Remplir les gobelets avec du bitume après avoir bien agiter pour éviter les bulles d'air puis laisser refroidir à une température ambiante pendant 90 min .
- Mettre les gobelets remplis dans un bain marie à la température 25°C pendant 120 min.
- Retirer les gobelets au terme de la durée de conservation dans l'eau, placer les échantillons sous l'appareil de pénétrabilité.
- Effectuer les mesures.



Figure III.9. Mode opératoire de l'essai de pénétrabilité

Les résultats obtenus sur les mélanges dont les polymères introduits ont été préalablement non dissout dans un solvant organique (chloroforme) sont donnés dans le tableau III.7 et la figure III.10.

Tableau III.7. Résultats de pénétrabilité à 25°C pour les mélanges en l'absence du chloroforme

mélanges	Temps de malaxage	2h
	M0 (bitume pur)	34
	M1 (PS 4%)	33
	M2 (SBR 4%)	35
	M10 (PEHD)	29

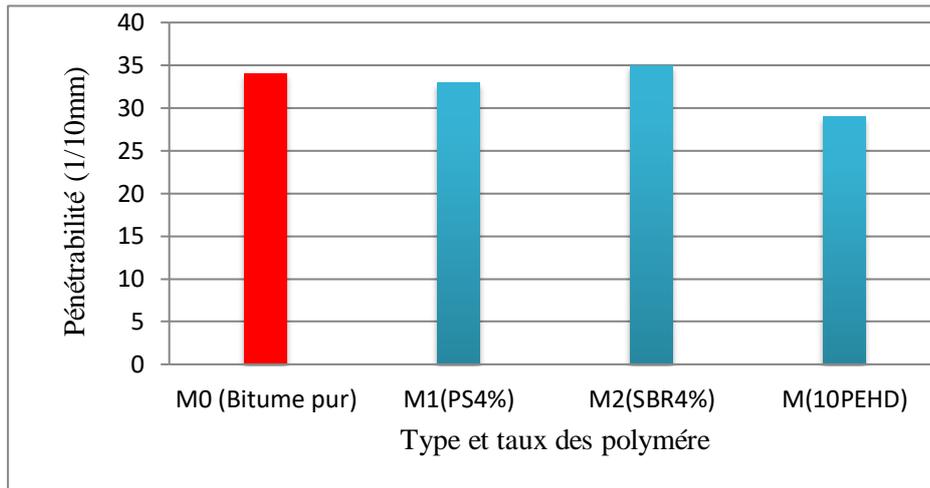


Figure III.10. Résultats de pénétrabilité des mélanges en fonction du type et taux de polymère ajouté

- On observe que la pénétrabilité du bitume contenant les polymères PS et SBR à 4% est quasiment similaire à celle du bitume pur. A noter que les deux polymères ne sont pas dissous dans le bitume (mélange non homogène) ce qui explique la non influence de ces deux polymères sur cette caractéristique.
- Dans le cas de PEHD, malgré le taux faible introduit 0,5%, la pénétrabilité a diminué par rapport au bitume pur, le mélange est homogène.

Les résultats obtenus sur les mélanges dont les polymères introduits ont été préalablement dissout dans un solvant organique (chloroforme) sont donnés dans le tableau III.8 et la figure III.11.

Tableau III.8. Résultats de pénétrabilité à 25°C pour les mélanges en présence du chloroforme

Le temps de malaxage	2h
Mélange	
M9 (Solvant 100 ml + bitume)	85
M3 (PS 2% se dissout dans solvant)	42.5
M4 (PS 4% se dissout dans solvant)	41
M5 (2% SBR se dissout dans solvant)	41
M6 (SBR 4% se dissout dans solvant)	44
M7 ((PS+SBR) 2% se dissout dans solvant)	42
M8 ((PS+SBR) 4% se dissout dans solvant)	40

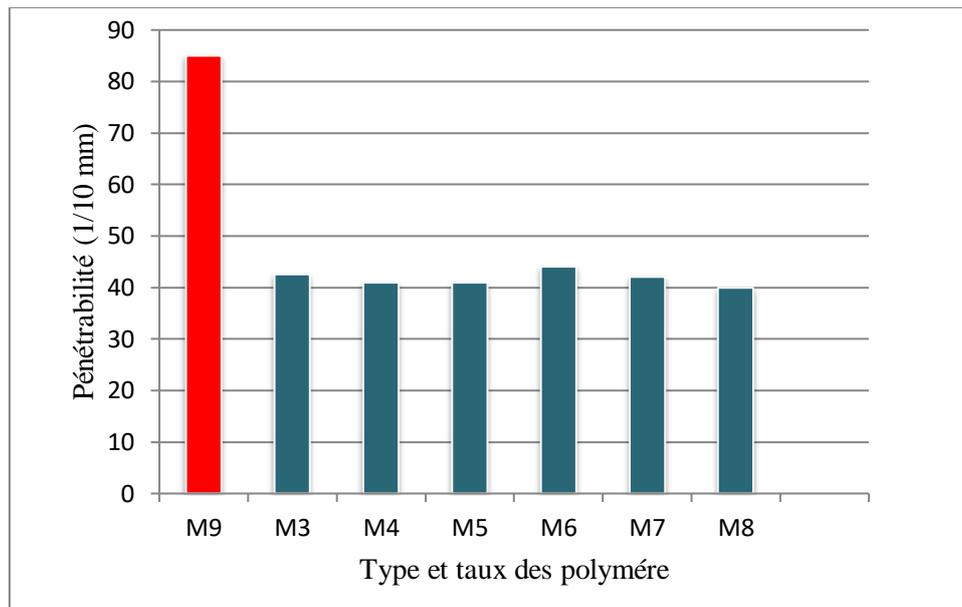


Figure III.11. Pénétrabilité des différents mélanges en fonction du type et le taux de polymère ajouté.

- La pénétrabilité des bitumes modifiés à différents mélanges a augmenté par rapport au bitume de base.
- La pénétrabilité obtenue avec le mélange ((PS+SBR) 4%) est la plus importante avec une valeur de 40 mm.

III.4.2. Point de ramollissement

Le but de cet essai est de mesurer le point de ramollissement pour avoir une idée sur la consistance du bitume.

Mode opératoire

- le bitume doit être suffisamment fluide, pour être verser dans les anneaux.
- mettre les deux anneaux sur une plaque enduite d'un agent démoulant de glycérine, remplir les anneaux avec le bitume et laisse de refroidir à une température ambiante pendant 1h.
- enlever l'excédent de bitume et araser la surface des anneaux par une spatule chaude pour que l'échantillon soit au niveau des anneaux.
- Mettre chaque anneau sur le cercle extérieur puis dans le support et placer le bille d'acier au centre d'anneau.
- Mettre le support dans le béccher pendant 15 min, que l'on déjà préparé le béccher avec l'eau à une température de 5°C.
- Après le 15min, placer le béccher sur la plaque chauffante pour lancer l'essai et à l'aide d'un thermomètre on détermine sur à quelle température s'enfonse les deux bille d'acier bitume et touche la plaque de support, la vitesse d'échauffement c'est 5°C/min.

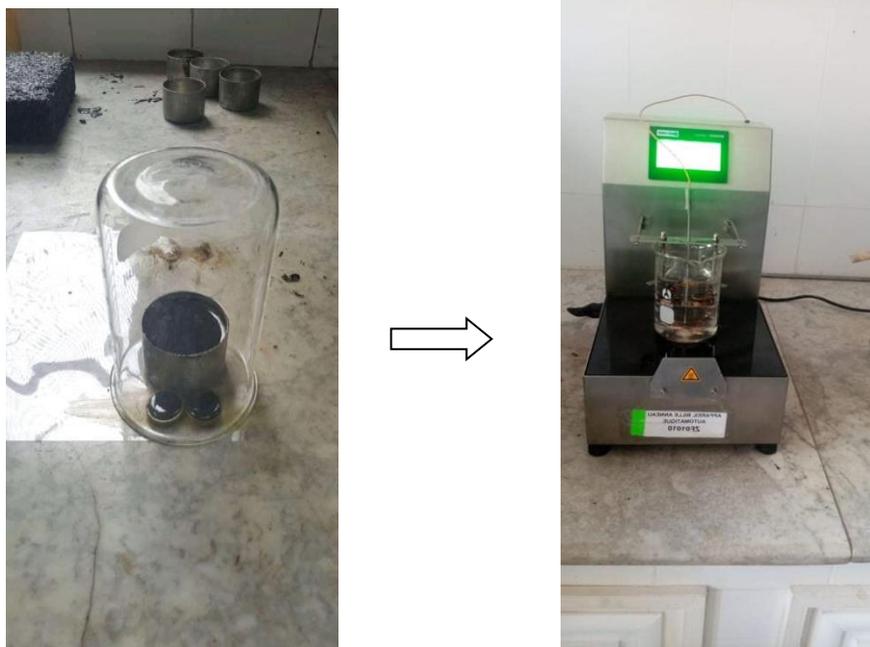


Figure III.12. Mode opératoire de l'essai de point de ramollissement

III.4.2.1. Influence de l'incorporation des polymères sur la température de ramollissement bille-anneau (TBA)

Les résultats obtenus sur les mélanges dont les polymères introduits ont été préalablement non dissout dans un solvant organique (chloroforme) sont donnés dans le tableau III.9 et la figure III.13.

Tableau III.9. : Résultats de l'essai TBA pour les mélanges ou le polymère (PS-SBR-PEHD) n'a pas été dissout dans le solvant

La formulation	Résultats TBA	
	Anneau gauche	Anneau droit
M0 (bitume pur)	53.3	54
M1 (4% de PS)	53	52.1
M2 (4% de SBR)	54	53.7
M10 (PEHD)	50.4	51

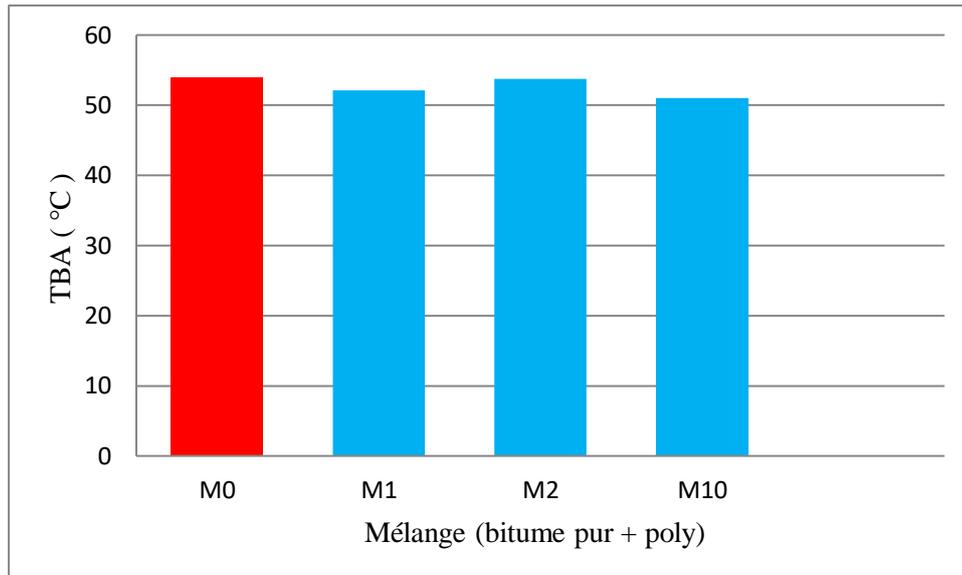


Figure III.13. Résultats de l'essai TBA des mélanges dont le polymère n'a pas été dissout dans le chloroforme

- L'incorporation de PS et SBR (non dissous dans le solvant) dans le bitume, n'influe pas sur la température de ramollissement par rapport au bitume pur.
- Mais dans le cas du polymère PEHD, on remarque une diminution de TBA par rapport au bitume pur.

Les résultats obtenus sur les mélanges dont les polymères introduits ont été préalablement dissout dans un solvant organique (chloroforme) sont donnés dans le tableau III.10 et la figure III.14.

Tableau III.10. : Résultats de l'essai TBA pour les mélanges contenant PS et SBR se dissout dans le chloroforme (Solvant).

La formulation	Résultats TBA	
	Anneau gauche	Anneau droit
M9 (100 ml de solvant + bitume)	46.2	47
M3 (2% de PS se dissout dans le solvant)	54	54.3
M4 (4% de PS se dissout dans le solvant)	54.2	54.7
M5 (2% de SBR se dissout dans le solvant)	42.1	42
M6 (4% de SBR se dissout dans le solvant)	56	55
M7 (2% de (PS+SBR) se dissout dans le solvant)	53	53.1
M8 (4% de (PS+SBR) se dissout dans le solvant)	55	55.7

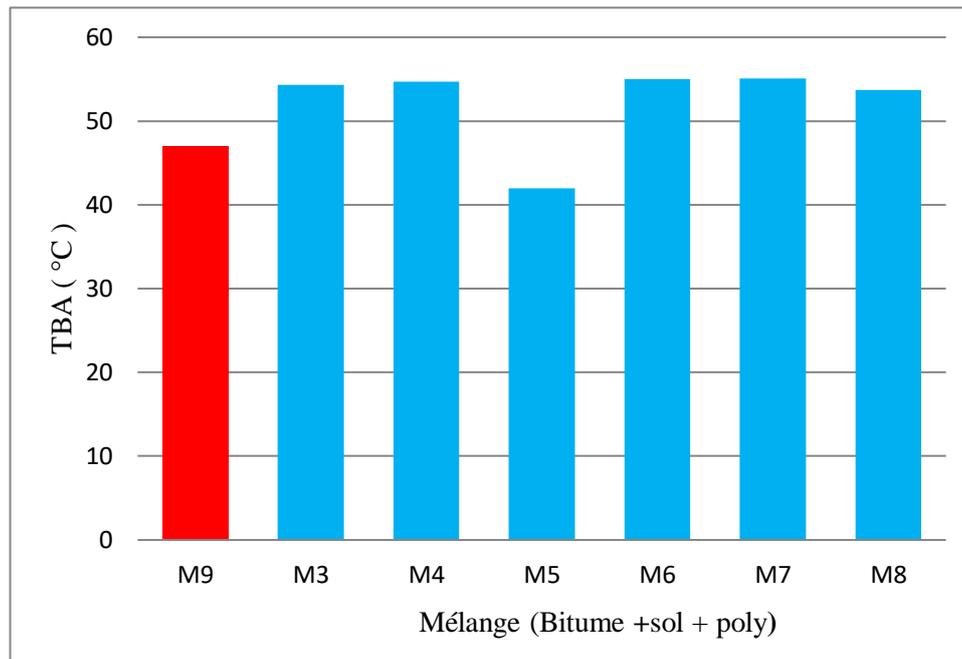


Figure III.14 : Résultats de l'essai TBA pour les mélanges contenant PS et SBR dissout dans le chloroforme (Solvant).

- L'incorporation des différents polymères dans le bitume, influe sur la température de ramollissement qui augmente avec le temps de malaxage.
- Les TBA obtenues avec le mélange M8 est le plus importante.

III.4.3. Retour élastique

L'essai de retour élastique se fait seulement sur les bitumes modifiés par les élastomères et ce, pour déterminer la capacité de bitume modifié à retrouver ses caractéristiques géométriques d'origine à la suite de la déformation.

Mode opératoire

- Le bitume doit être suffisamment fluide (généralement à une température de 180°C) pour verser le bitume dans des moules d'éprouvette qu'ont déjà enduite avec un agent démoulant huile).
- Après un refroidissement pendant 90min, mettre l'éprouvette dans un bain marie à une température ambiante à 25°C pendant 90 min .
- placer les éprouvettes sur le ductilimètre (dispositif de traction), puis étirer l'éprouvette à une vitesse de 50mm /min jusqu'à une élongation de 200mm noté (L_0).
- Couper le fil de bitume formé après l'opération de traction au milieu 10mm pour obtenir deux moitiés fils, et laisser reposer pendant 30min afin de déterminer le retour élastique.

- Après 30min, et l'aide d'une règle, mesurer la distance entre deux extrémités des deux moitiés fils (L_1) et calculer le retour élastique par l'application de l'équation III.3. :

$$RE(\%) = (L_1/L_0) \cdot 100 \dots\dots\dots Eq. III.3.$$



Figure III.15. Schéma illustratif de l'essai du retour élastique

III.4.3.1. Influence de l'incorporation des polymères sur le retour élastique

Les résultats obtenus sur les mélanges dont les polymères introduits ont été préalablement non dissout dans un solvant organique (chloroforme) sont donnés dans le tableau III.11 et la figure III 16.

Tableau III.11. Résultats de l'essai de retour élastique (%) à 25°C pour les mélanges en l'absence du chloroforme.

Mélange	Résultats (%)
M0 (bitume pur)	5
M1 (PS 4%)	5.3
M2 (SBR 4%)	5
M10 (PEHD)	2.5

- Le retour élastique ne décroît pas pour les différents mélanges par rapport au bitume pur.
- Le retour élastique du mélange contenant le PEHD dosé à 0.5% décroît par rapport au bitume.
- Le PEHD n'influence pas sur la plasticité du bitume.

Les résultats obtenus sur les mélanges dont les polymères introduits ont été préalablement dissout dans un solvant organique (chloroforme) sont donnés dans le tableau III.12 et la figure III.16.

Tableau III.12. : Retour élastique à 25°C pour les mélanges ou le polymère (PS-SBR) est dissout dans le solvant

Mélange	Résultats(%)
M9 (Solvant 100ml +bitume)	8
M3 (PS 2% se dissout dans solvant)	10
M4 (PS 4% se dissout dans solvant)	12
M5 (SBR 2% se dissout dans solvant)	10
M6 (SBR 4% se dissout dans solvant)	14
M7 ((PS+SBR) 2% se dissout dans solvant)	15
M8 ((PS+SBR) 4% se dissout dans solvant)	13.5

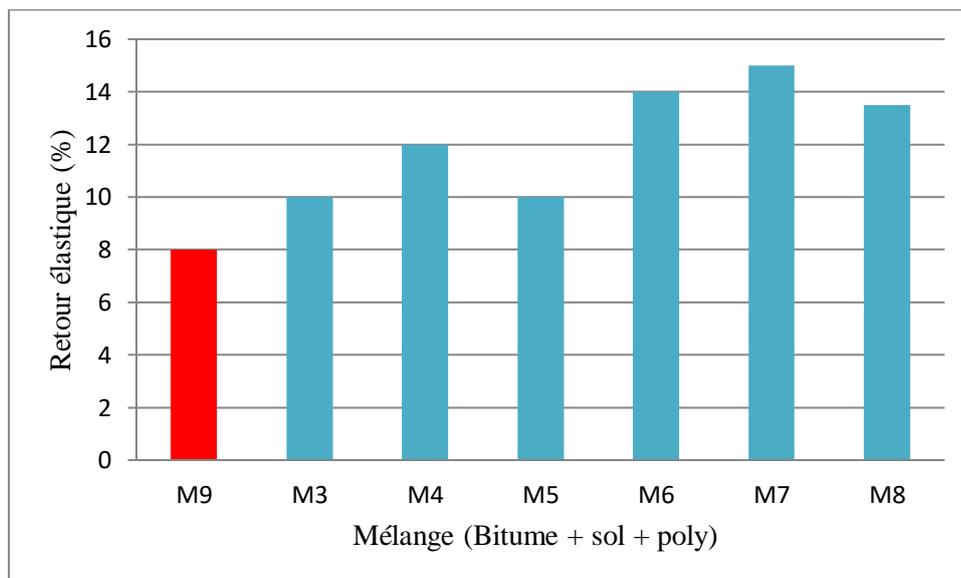


Figure.III.16. Retour élastique à 25°C pour les mélanges dont le polymère est dissout dans le solvant

- Le retour élastique augmente pour les différents mélanges par rapport au bitume de référence (M9).
- Le mélange M7 a enregistré le meilleur retour élastique.
- Le retour élastique du bitume modifié est en relation directe avec les teneurs des modifiants.
- On peut conclure que l'augmentation de la valeur du retour élastique fait améliorer les propriétés du bitume.

III.5. Les agrégats

Les résultats sont prélevés et soumis aux essais normatifs usuels en vue d'apprécier leurs caractéristiques comparatives aux exigences techniques prescrites.

III.5.1. Analyse granulométrique

Les analyses granulométriques sont menées suivant les recommandations de la norme NA 2607-1 : 2014.

Les masses des différents refus ou celles des différents tamisats sont rapportées à la masse initiale de matériau, le pourcentage ainsi obtenu sont exploités sous une forme graphique (courbe granulométrique).

Le tableau III.13 présente la composition granulométrique des trois fractions granulaires

Tableau III.13. Analyse granulométrique des granulats

Tamis en (mm)	8/15	3/8	0/3
31,5	100	100	100,0
25	100	100	100,0
20	100	100	100,0
16	100	100	100,0
14	85	100	100,0
12,5	66	100	100,0
10	35	100	100,0
8	11	100	100,0
6,3	2	82	100,0
5	1	37	100,0
4	0,8	14	100,0
2	0,8	2	77,0
1	0,8	1,3	45,0
0,5	0,8	1,3	24,0
0,25	0,8	1,3	14,0
0,125	0,8	1,3	12,5
0,080	0,8	1,3	11,0
0,063	0,8	1,3	10,0

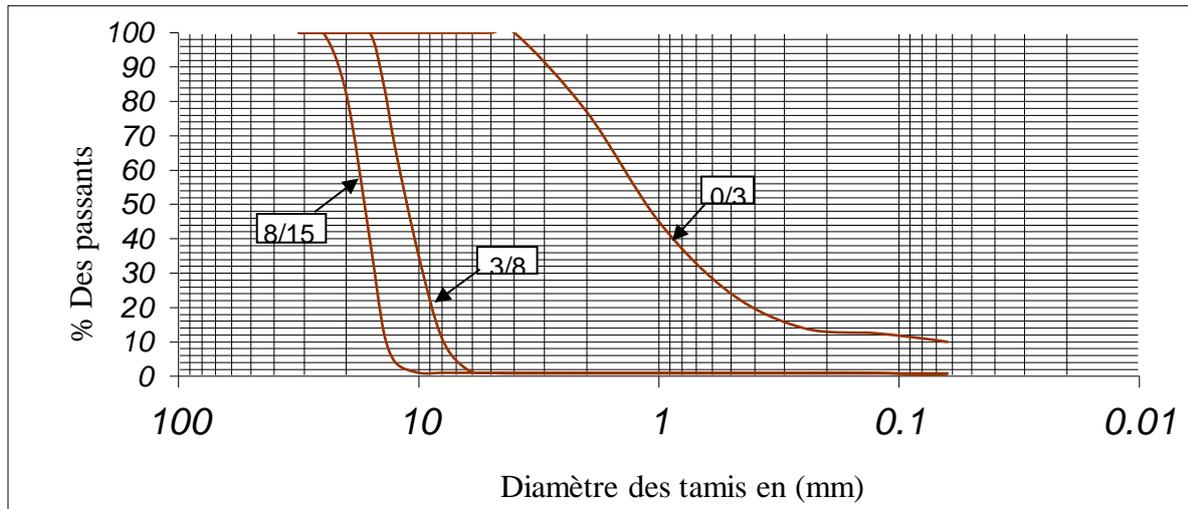


Figure III.17. Courbe granulométrique pour les différentes fractions de granulats

La figure III.18. Représente la courbe granulométrique du mélange qui s'inscrit parfaitement dans le fuseau de référence au béton bitumineux 0/14 destiné pour la couche de roulement.

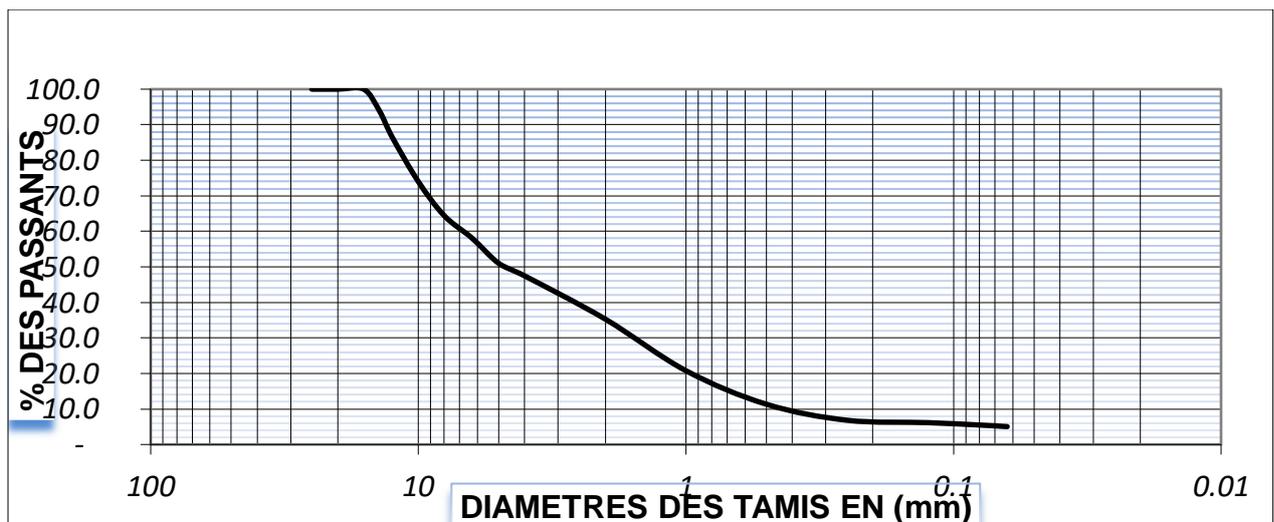


Figure III.18. Courbe granulométrique du mélange étudié 0/14

Nous remarquons que l'allure de la courbe du mélange est classée conformément à la spécification requise tout respectant la marge de tolérance, on peut considérer que les pourcentages des granulats sont appropriés.

III.5.2. La masse volumique

Les résultats de la masse volumique des granulats sont mentionnés dans le tableau III.14

Tableau III.14. Masse volumique des fractions 0/3 ; 3/8 et 8/15

Fractions		0/3	3/8	8/15
La masse volumique (g/cm ²)	Apparente	1.43	1.45	1.47
	Absolute	2.57	2.7	2.7

III.5.3. Essai Los Angeles

Pour les granulats de classe 8/15, on effectue l'essai de Los Angeles et les résultats obtenus sont représentés dans le tableau III.15.

Tableau III.15. Essai Los Angeles

Essai	Fractions	Norme	Résultats	Recommandations
LA (10/14)	8/15	NA 5130	21.46	≤ 25

III.5.4. Coefficient Micro Deval humide

Les résultats obtenus montrent que le gravier testé de classe 8/15 présente un bon comportement à l'usure Tableau III.16.

Tableau III.16. Résultats d'essai de Micro Deval

Essai	Fraction	Norme	Résultats	Recommandations
M _{DE} (%)	8/15	NA 5129	17.13	≤ 20

III.5.5. Essai d'aplatissement

Le pourcentage d'éléments plats contenu dans l'ensemble des échantillons sont modérés et reste inférieur au seuil fixé par la norme recommandée comme indiquons dans le tableau III.17.

Tableau III.17. Les résultats d'essai de d'aplatissement des granulats

Essai	Norme	Fractions			Recommandations
		0/3	3/8	8/15	
D'aplatissement	NA 255	-	19	17	< 20

III.5.6. Essai de propreté

Résultats d'essai de propreté des granulats dans le tableau III.18.

Un bon granulat ne doit pas contenir plus de 2% d'impuretés, pour les fractions 3/8 .8/15 :

Tableau III.18. Résultats d'essai de propreté des granulats

Essai	Norme	Fractions			Recommandations
		0/3	3/8	8/15	
Propreté de granulats	EN 933-9	-	1.6	0.85	< 2

Un bon granulat ne doit pas contenir plus de 2% d'impuretés, dans notre cas, on observe que pour les fractions 3/8 et 8/15, ils possèdent successivement 1.6% et 0.85%. C'est-à-dire la propreté des gravillons est conforme à la norme en vigueur.

III.5.7. Essai d'équivalent sable ES

Résultats de l'essai d'équivalent de sable sont donnés dans le tableau III.19.

Tableau III.19. Résultats de l'essai d'équivalent de sable

Essai	Fractions	Norme	Résultats	Recommandations
ES à 10%	0/3	NA 455	62	≥ 50

Le pourcentage d'éléments fins subsistant après lavage est supérieur à la valeur exigée par la norme.

III.6. Elaboration de l'enrobé par bitume modifié

III.6.1. Formulation

Les formules d'enrobés utilisées sont celles obtenues suite à une étude de formulations d'usage actuellement dans les laboratoires, et qui consiste à choisir la formule qui donne un mélange ayant la meilleure aptitude au compactage et qui pourrait donner une meilleure stabilité au mélange hydrocarboné.

L'analyse granulométrique des trois fractions granulaires utilisées a conduit à une formulation optimisée des compositions dans le Tableau III.20.

Tableau III.20. Le pourcentage pondéral des fractions (%)

POURCENTAGE PONDERALE DES FRACTIONS %					MELANGE
15/25	8/15	3/8	0/3	Filler	
0,0	40,0	15,0	45,00	0	100,0
-	40,0	15,0	45,0	-	100,0
-	40,0	15,0	45,0	-	100,0
-	40,0	15,0	45,0	-	100,0
-	40,0	15,0	45,0	-	100,0
-	34,0	15,0	45,0	-	94,0
-	26,4	15,0	45,0	-	86,4
-	14,0	15,0	45,0	-	74,0
-	4,4	15,0	45,0	-	64,4
-	0,8	12,3	45,0	-	58,1
-	0,4	5,6	45,0	-	51,0
-	0,3	2,1	45,0	-	47,4
-	0,3	0,3	34,7	-	35,3
-	0,3	0,2	20,3	-	20,8
-	0,3	0,2	10,8	-	11,3
-	0,3	0,2	6,3	-	6,8
-	0,3	0,2	5,6	-	6,2
-	0,3	0,2	5,0	-	5,5
-	0,3	0,2	4,5	-	5,0

L'analyse granulométrique des trois fractions granulaires utilisées a conduit à une formulation optimisée des compositions dans Tableau III .21

Tableau III .21. Les proportions les trois fractions du mélange

Fraction	0/3	3/8	8/15
Proportion(%)	45	15	40

Le mélange granulaire arrête du béton bitumineux semi granulat BB 0/14 est constitué de trois fractions d'agrégats dont les proportions sont données dans la figure III .19.

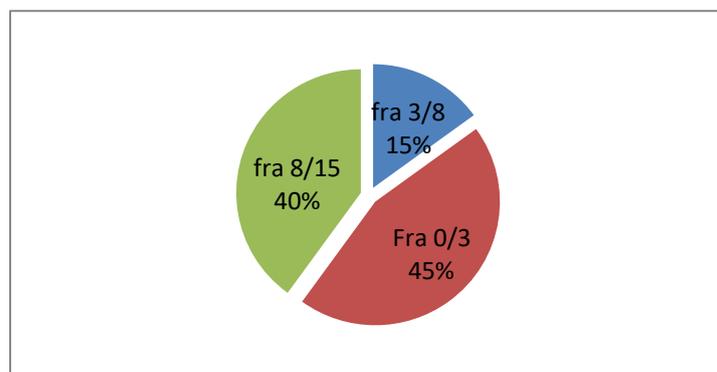


Figure III.19. Les proportions utilisées des agrégats dans le mélange

III.6.2. Calcul de la teneur en bitume

La teneur en liant est déterminée en pourcentage en poids des agrégats selon la méthode de calcul suivante Eq III.4.

$$TL = K \cdot \alpha \cdot \sqrt[5]{\sum S'} \dots\dots \text{Eq. III.4.}$$

Tableau III.22. La teneur en bitume et les différentes valeurs du module de richesse

CALCUL LES TENEURS EN LIANTS EN FONCTION DES MODULES DE RICHESSES (K)									
MODULE DE RICHESSE		Dosage en bitume %	Dosage en additif %	MVRg (g/cm ³)	Coeff correcteur α	Surface spécifique Σ (m ² /kg)	Racine cinq de Σ	MVRc (g/cm ³)	bitume + add %
K1=	3,00	4,53	0	2,7130	0,977	8,838	1,546	2,534	4,53
K2 =	3,60	5,44	0					2,502	5,44
K3 =	3,75	5,66	0	2,495	5,66				
K4 =	3,90	5,89	0	2,487	5,89				

On remarque que chaque bitume a son module de richesse et sa MVR_c, C'est-à-dire que la MVR dépend le module de richesse.

Mode opératoire de la préparation des enrobés bitumineux

- La modification est effectuée sur le bitume à différents pourcentages,
- Les granulats sont séchés dans une étuve ventilée à une température comprise entre 150 et 175 °C jusqu'à l'obtention d'une masse constante.
- Mesurer et calculer les pourcentages en poids de bitume, et même pour les granulats calculer pour différents pourcentages 15 .45. 40 %.
- Chauffer le bitume dans une étuve à une température de 175 °C.
- mélanger le bitume avec les granulats et mettre dans le moule de l'essai de PCG qui a lui-même doit être chauffé pendant 3h à une température 180°C.

III.7. Essai de PCG (EN 12697)

Le but de cet essai est la détermination de l'aptitude au compactage des enrobés et d'optimiser la formulation de ces derniers.

L'essai sur les bitumes purs et modifiés à différents pourcentage de polymères (SBR-PS-PEHD), a pour but de déterminer le module de rigidité.

Mode opératoire

- On effectue l'opération suivante :
- Mettre en température les moules et pastilles pendant 2h au moins dans une enceinte portée à la température d'essai.
- Peser dans un récipient intermédiaire la masse « M » du mélange hydrocarbonés à $\pm 0,1\%$ Prés.
- Introduire en seule fois le mélange hydrocarbonés dans le moule et maintenir le moule, l'éprouvette, les pastilles dans une enceinte à la température prescrite de l'essai $\pm 10^{\circ}\text{C}$ entre 30min et 2heure.
- Préparation de PCG (fixer le nombre de giration à 80, la masse de mélange hydrocarboné introduire dans le moule et le diamètre intérieur de moule (100 mm).
- Introduire le moule dans le PCG et lancer l'essai.
- Répéter l'essai trois fois au moins.
- Exprimer les résultats et porter les valeurs moyennes de pourcentage des vides de trois essais.



Figure III.20. Schéma illustratif du mode opératoire de l'essai PCG

Les résultats obtenus sur les mélanges dont les polymères introduits ont été préalablement non dissout dans un solvant organique (chloroforme) sont donnés dans le tableau III.23 et la figure III 21.

Tableau III.23. : Résultats de l'essai PCG des mélanges à base de bitume modifié sans la présence du solvant

Nombre de girations	Mélange		
	Bitume pur	PEHD 0.5%	SBR granules 4%
	% des vides		
5	19.659	22.041	21.222
10	17.838	19.673	18.572
15	16.375	18.085	16.940
20	14.638	16.120	15.715
30	12.837	15.354	14.036
40	11.738	13.531	12.821
60	10.58	12.531	11.097
80	8.23	9.693	10.002
Spécifications à 80 girations	Min 4, Max 9		

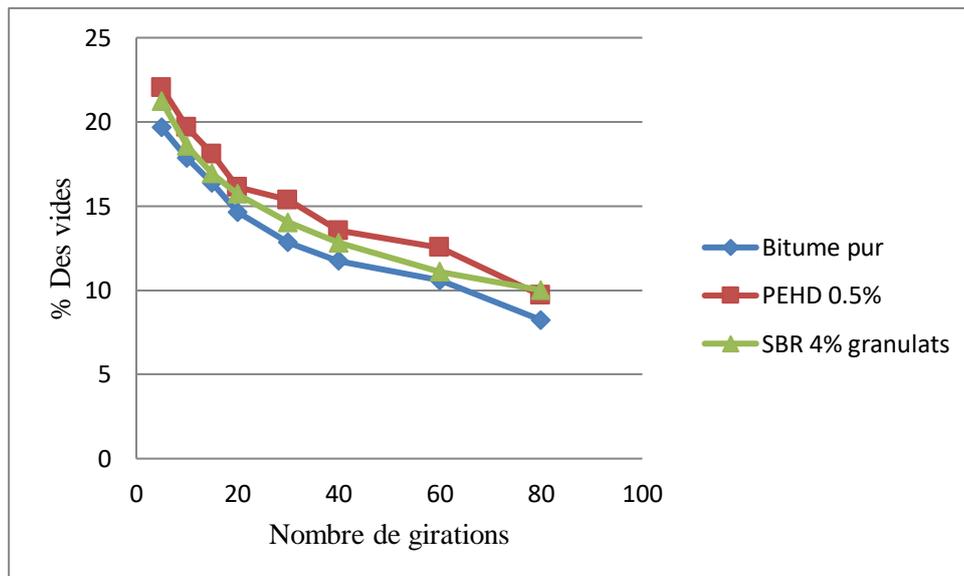


Figure III.21. Pourcentage des vides en fonction du nombre de giration

- Le pourcentage des vides des mélanges (PEHD 0.5%) et (SBR granulés) augmente par rapport au bitume de référence c'est-à-dire l'ajout de deux polymères améliore les caractéristiques de l'enrobé bitumineux.
- Généralement, les résultats obtenus sont tous acceptable pour l'ensemble des formulations et répondent aux spécifications en vigueur.

Les résultats obtenus sur les mélanges dont les polymères introduits ont été préalablement dissout dans un solvant organique (chloroforme) sont donnés dans le tableau III.24 et la figure III 22.

Tableau III.24. Résultats de l'essai PCG des mélanges à base de bitume modifié en présence du solvant

Nombre de girations	Mélange			
	Bitu+ Solv	4% PS	4% SBR	4% PS+SBR
	% des vides			
5	20.685	21.672	21.867	22.666
10	17.956	19.033	19.012	20.224
15	16.365	17.462	17.245	18.604
20	15.216	16.299	15.987	17.408
30	13.540	14.640	14.175	17.493
40	12.311	13.493	12.821	14.657
60	10.642	11.844	10.970	12.471
80	8.513	9.772	9.718	9.777
Spécifications à 80 girations	Min 4, Max 9			

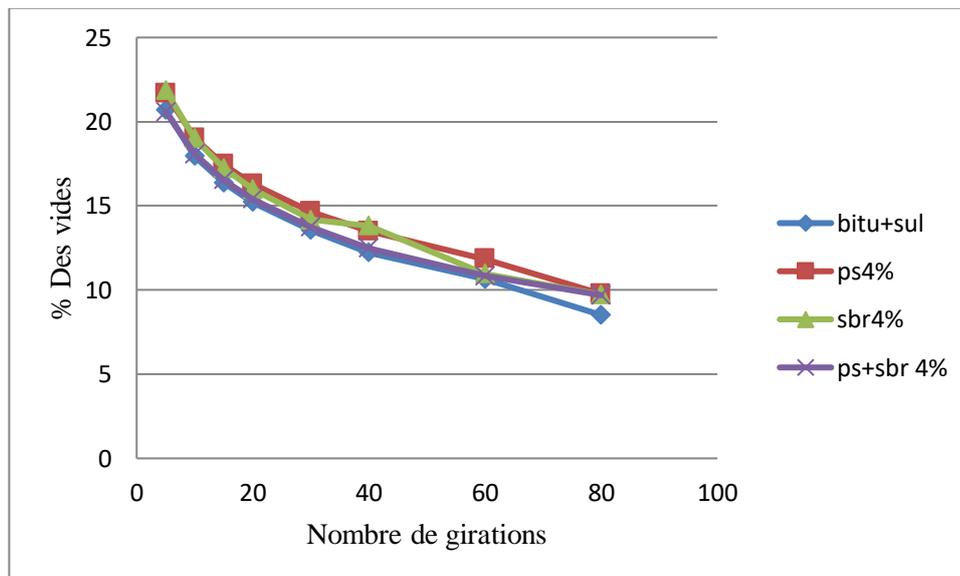


Figure III.22. Pourcentage des vides des éprouvettes en fonction de nombre de girations

- A quatre vingt (80) girations, l'augmentation des vides qui enregistré après avoir ajouté les polymères par rapport aux bitume de référence (bitume + solvant), les résultats sont très satisfaisants, une légère amélioration.

III.8. Module de rigidité

Le module de rigidité est déterminé par l'essai de traction indirecte à 15°C, il représente le rapport de contrainte à la déformation, il est calculé pour chaque essai élémentaire de traction uni-axial sur éprouvette cylindrique, la charge est appliquée dans un domaine de petites déformations, en contrôlant le temps ou la fréquence, la température et la loi de chargement.

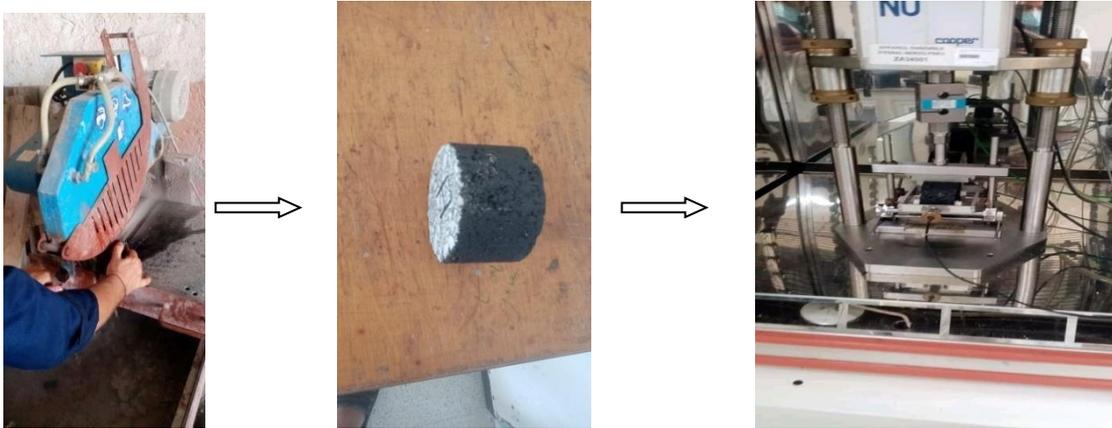


Figure III.23. Essai du module de rigidité sur une carotte de béton bitumineux

Les résultats obtenus sur les mélanges dont les polymères introduits ont été préalablement non dissout dans un solvant organique (chloroforme) sont donnés dans le tableau III.25 et la figure III 24.

Tableau III.25. Résultats de l'essai de traction indirecte des mélanges dont le polymère introduit n'a pas été dissocié dans le chloroforme

Caractéristique	Mélange		
	Bitume pur	PEHD 0.5%	SBR 4% granulés
MVR (g/m ³)	2.534		
% des vides	8.23	9.693	10.002
Température d'essai (°C)	15		
Temps de charge (ms)	124		
Déformation (µm)	5		
Module de rigidité (MPa)	10000	11028	5948
Spécification (MPa)	≥ 7000		

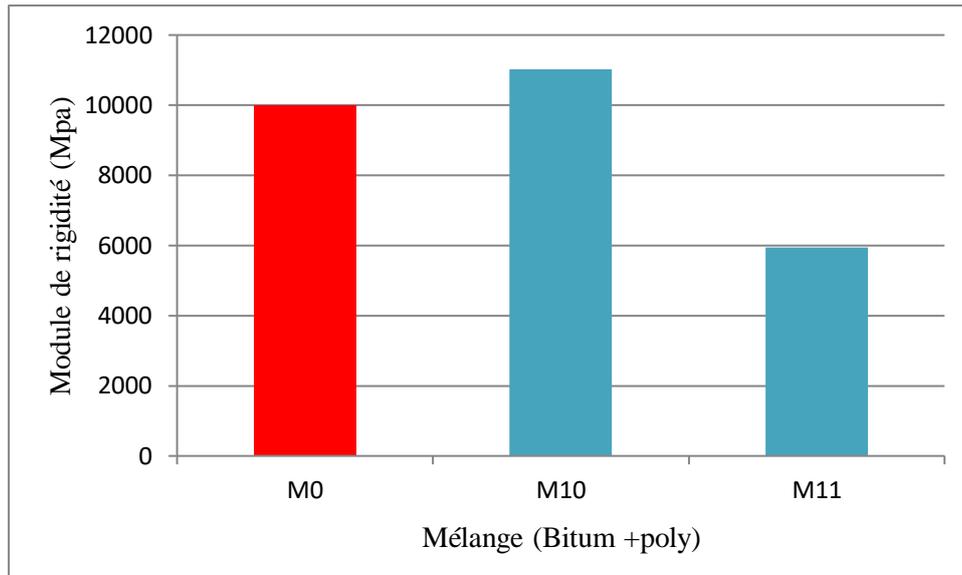


Figure III.24. : Résultats du module de rigidité du bitume pur pour les différents mélanges

- On peut remarquer que le module de rigidité de l'éprouvette de mélange (M10) contenant 0.5% de PEHD est plus élevé par rapport à celui de l'éprouvette de référence confectionnée à base de bitume pur.
- Le PEHD améliore sensiblement le module de rigidité.
- En revanche, dans le cas du mélange contenant 4% de SBR sous forme de granules, le module de rigidité est nettement moins élevé par rapport à celui de l'éprouvette de référence (bitume pur), il est même nettement inférieur à la valeur limite exigée pour les bétons bitumineux.

Les résultats obtenus sur les mélanges dont les polymères introduits ont été préalablement dissout dans un solvant organique (chloroforme) sont donnés dans le tableau III.26 et la figure III 25.

Tableau III.26. Résultats de l'essai de traction indirecte des mélanges dont le polymère introduit a été préalablement dissocié dans le chloroforme

Caractéristique	Bit+ solv	4% PS	4% SBR	4% PS+SBR
MVR (g/m^3)	2.534			
% des vides	8.511	9.772	9.718	9.777
Température d'essai ($^{\circ}C$)	15			
Temps de charge (ms)	124			
Déformation (μm)	5			
Module de rigidité (MPa)	11187	11299	10208	12950
Spécification (MPa)	≥ 7000			

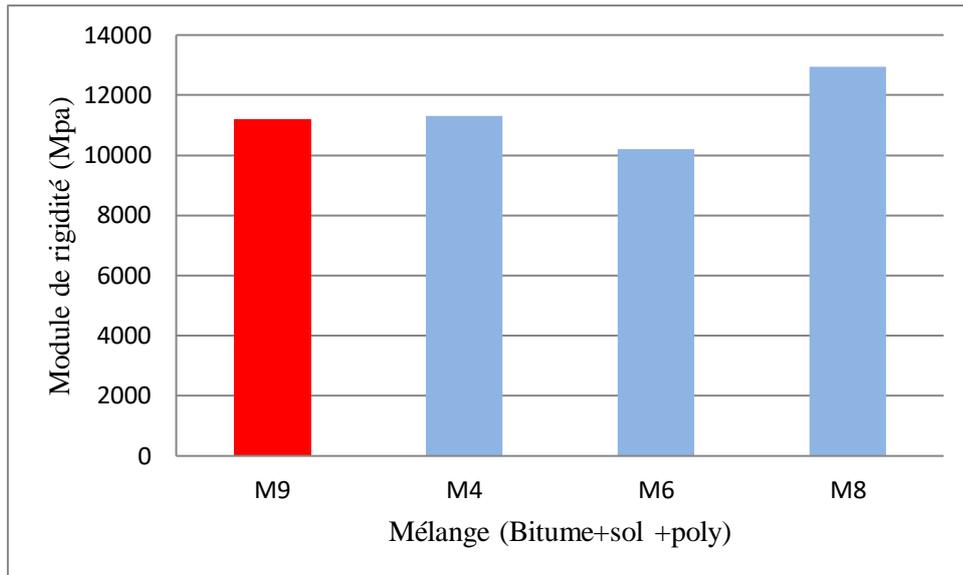


Figure III.25. Résultats du module de rigidité des mélanges

- On peut distinguer que la valeur du module de rigidité du mélange contenant 4% de SBR(M6) a diminué par rapport au bitume de référence (bitume+solvant). Alors que celle du mélange contenant à la fois les deux polymères PS et SBR avec un taux de 4% (M8) a enregistré une valeur nettement meilleure que celle du béton de référence dosé uniquement à base de (bitume pur + solvant).

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU LABORATOIRE

Opérationnel depuis septembre 2014, le Laboratoire Central des Matériaux représente un centre de contrôle et d'essai des matériaux, il est organisé en 4 départements : béton et constituants, sol et géotechnique, produits hydrocarbonés et un département de soutien. L'objectif assigné à ce projet est :

- De prendre en charge les préoccupations du groupe COSIDER, en matière d'essais et de contrôles;
- De devenir une référence dans le domaine des techniques de productivité pour le secteur du BTPH algérien.

OBJECTIFS ET MISSIONS

- Améliorer la qualité des travaux, par la mobilisation de moyens humains et techniques avec pour ambition de proposer, des solutions nouvelles et respectueuses répondant aux enjeux de développement durable en matière de matériaux, procédés, systèmes constructifs et services proposés.
- Intervenir dans les domaines d'assistance technique, du conseil, de la formation, des essais et d'analyses.

Le Laboratoire du Groupe COSIDER



Le LCM est divisé en 3 départements techniques : Béton et constituants, sol et géotechnique et Produits hydrocarbonés

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'utilisation des enrobés bitumineux avec ajout de polymères ou le bitume modifié est devenu une nécessité pour notre pays, et qui n'exploite pas ses déchets en plastiques. Plusieurs études ont montré le bon effet, notamment de la poudrette de caoutchouc sur le comportement à long terme d'un mélange bitumineux, elle augmente la compacité et donne une bonne rigidité à l'enrobé.

Le présent travail s'est intéressé à l'étude de l'influence de la modification des bitumes par l'incorporation de polymères (PS-SBR-PEHD) sur les caractéristiques du bitume pur et modifié ainsi que sur la stabilité des enrobés bitumineux.

Le mécanisme de la modification du bitume a été étudié et mené au laboratoire de groupe Cosider Dar el Beida, département hydrocarbonés.

A la lumière des résultats obtenus, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- ✚ L'augmentation de la durée de malaxage, a amélioré les caractéristiques (pénétrabilité, point de ramollissement et le retour élastique) du bitume pur.
- ✚ La modification du bitume par l'introduction de polymères (PS-SBR-PEHD) améliore les propriétés du bitume tel que la pénétrabilité, le point de ramollissement et la ductilité.
- ✚ L'association des deux polymères (PS+SBR) avec une teneur de 4% a donné les meilleures performances.
- ✚ Les deux polymères (PS-SBR) ne dissolvent pas dans le bitume.
- ✚ Les élastomères et plastomères sont les polymères les plus utilisés dans la modification du bitume.
- ✚ Le PEHD à 0,5% améliore sensiblement le module de rigidité mais n'influence pas sur le retour élastique.
- ✚ Le copolymère SBR sous forme de granules n'a pas donné des résultats satisfaisants par rapport aux propriétés des enrobés bitumineux.
- ✚ Le mélange contenant les deux polymères (SBR/PS) avec un taux de 4% améliore le module de rigidité, la pénétrabilité, le TBA et le retour élastique.
- ✚ l'introduction des polymères utilisés avec une teneur de 2% a donné des résultats pratiquement similaires à ceux du bitume sans modifiants.
- ✚ L'utilisation du chloroforme a contribué sensiblement à la dissolution des polymères utilisés.

Références Bibliographiques

- [1] : J. BERTHIER. Le recyclage en centrale des enrobés bitumineux. le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées LCPC. décembre 1982
- [2] : Groupe National Enrobés Tièdes. Abaissement de température des mélanges bitumineux : Etat de l'art et recommandation. IDRRIM. 2015
- [3] : M. L. NGUYEN. Etude de la fissuration et de la fatigue des enrobés bitumineux. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. juin 2009.
- [3] : J. BERTHIER. Le recyclage en centrale des enrobés bitumineux. le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées LCPC. décembre 1982
- [4] : B. MELBOUCI. S. SADOON. Valorisation des bétons bitumineux recyclés et étude de leur renforcement. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [5] : B. POUTEAU, Durabilité mécanique du collage blanc sur noir dans les chaussées. Ecole Centrale de Nantes. 2004.
- [6] : J .CORTE. Conception et dimensionnement des structures de chaussées – Guide technique. L.C.P.C, S.E.T.R.A. Paris .1994.
- [7] : A.F. Des ESSARTS. Etude du comportement des enrobes bitumineux aux températures de mise en œuvre. Matériaux. Université Paris-Est, 2016.
- [8] : Guide de bonnes pratiques, la mise en œuvre des enrobés, Bitume Québec, Novembre 2008.
- [9] : B. IRASTORZE. Les Enrobés bitumineux. Revue Générale des routes et de l'Aménagement. 2003.
- [10] : S. BITUMES. Techniques et utilisations. Ouvrage de la Société des Pétroles Shell.1991.
- [11] : H. Di BENEDETTO et J. CORTE. Matériaux routiers bitumineux 1 : constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges bitumineux. Hermès Lavoisier. 2005.
- [12]: D. LESUEUR. The colloidal structure of bitumen : Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. Advances in Colloid and Interface Science. 2009.
- [13] : Manuel laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Formulation des enrobés à chaud .Paris Cedex 15. Septembre 2005.
- [14] : Bulletin technique. Membranes de bitume modifié au SBS. Octobre 1999.
- [15] : F. OLARD, C. Le NOAN et A. ROMIER, Les enrobés basse énergie EBE. Et basse température EBT. Revue Générale des Routes et des Aéroports (RGRA), 2007.
- [16] : DURIEZ, Traité de matériaux de construction. Editions Dunod ,1950.
- [17] : J.H.TAPSOBA .Etude de formulation et de mise en oeuvre des enrobés. Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement.2012.
- [18] : F. MOUTIER, Utilisation de la Presse à Cisaillement Giratoire et de l'onéroux dans la méthode française de formulation des enrobés bitumineux, Euro bitume, 1992.
- [19] : F. MOUTIER, Modélisation des résultats de la PCG. Réflexions à propos du seuil ultime de compactage. Euro bitume, 1996.
- [20] : Instruments de contrôle pour génie civil. Bera Test catalogue. Edition 2011

- [21] : J.J. CHAUVIN, L'essai de module complexe utilisé pour la formulation des enrobés, Budapest, 1990.
- [22] : De LA ROCHE. Module de rigidité et comportement en fatigue des enrobés bitumineux. Expérimentations et nouvelles perspectives d'analyse, Novembre 1996.
- [23] M. HACHANI, D. DAAS, Etude expérimental d'un béton bitumineux modifié à la poudre de caoutchouc -Influence du mode de modification-, mémoire de magister, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2013.
- [24] : P. LEPERT, M SIFFERT, Catalogue des dégradations de surface des chaussées, Méthode de Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), 1998.
- [25] : J. NAVARO. Cinétique de mélange des enrobés recyclés et influence sur les performances mécaniques. Génie des procédés. Arts et Métiers Paris Tech, 2011.
- [26] : M. ARZAN, Fayat recycling book, 2007.
- [27] : M. MALOT, Y. JOLIVET, Enrobé bitumineux à base de fraisât de recyclage de matériaux de chaussées, son utilisation dans l'industrie routière, 2007.
- [28] : A. CARTER, Le recyclage des enrobés: à chaud, tiède ou à froid, Congrès AQTR, 2011.
- [29] : J.-P. SERFASS, Recyclage en centrale des matériaux de chaussée, 2008.
- [30] : J.-P. SERFASS, Recyclage et retraitement en place des matériaux de chaussée, 2009.
- [31] : Bitume info. Groupement Professionnel des Bitumes. Bitume et développement durable. France, Octobre 2009.
- [32] La rhéologie des bitumes: Principes et Modification, Didier Lesueur, Rhéologie, Vol.2, 1-30 (2002)
- [33] ABABSA Moussira : « valorisation des mélanges bitume-polymère par le procédé de lapyrolyse », Memoire de magister, soutenu le 29/01/2006, chimie des matériaux p 3-11(CU Larbi Ben M'hidi Oum El baouaghi)
- [34] : BELABED Saida et Zerouel Nacira « fluage des enrobés bitumineux avec ajout d'un polymère » projet de fin d'étude USTHB FGC 2006
- [35] Reiki Zahia, Rabah Amel ; optimisation de la qualité de bitume oxyde sur les matières d'étanchéité
- [36] Becker, Y, Mendez, M. P., & Rodriguez, Y. Polymer modified asphalt. In Vision Tecnologica. 2001
- [37] Olga Solomatnikova, Comportement rhéologique et propriétés cohésives et Adhésives desliants bitumineux, thèse (189p), Université Laval Avril 1998
- [38] : HADJIRA Haidar et AKLI Younsi « influence de la granularité du polymère dans la modification des bitumes » projet de fin d'études USTHB FGC 2007
- [39] YVES Mouton ; « matériaux organiques pour le génie civil : approche physicochimique » Hermès science publications ; Octobre 2003 »
- [40] Zhu, J., Birgisson, B., & Kringos, N. Polymer modification of bitumen: Advances and challenges. European Polymer Journal, 54, 18-38, 2014.

[41] Bitume info.com.

[42] BOUGHAMSA, W. (2008). Les bitumes modifiés par des polymères. Mémoire de magister : Géo-matériaux. Skikda : Université de Skikda. 77 p.

[43] Askri,N.(1998).Étude technico-économique des projets d'implantation de forages d'exploitation. Mémoire fin de cycle DEUA : Gestion industrielle. Boumerdes: Ex INH.53 p.

[44] BAZZINE Rabia Epouse BARKAT Ingénieur d'état en génie civil (2013) . Mémoire de Magister :Génie Civil (Géo-Matériaux) OUARGLA : Université de OUARGLA

[45] Lombardi,Bemard. bitum.info.paris: Groupement professionnels des bitumes ,juin 2005.75008

Normalisation

NF EN 933-1 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats, Partie 1 : Détermination de la granularité, Analyse granulométrique par tamisage. 1997.

NF EN 933-3 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats, Partie 3 : Détermination de la forme des granulats, Coefficient d'aplatissement. 1997.

NF EN 933-9 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats, Partie 9 : Qualification des fines, Essai au bleu de méthylène.

NF P18-560 : Analyse granulométrique par tamisage Septembre, 1990.

NF P18-572 : Essai d'usure micro-Doval, 1990.

NF P18-573 : Essai Los Angeles décembre, 1990.

NF P18 -591 : Détermination de la propreté superficielle Septembre, 1990.

NF P 18-598 : Équivalent de sable octobre, 1991.

NF EN 1097-6 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats, Partie 6 : Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau.2000.

NF EN 12697-12 : Mélanges bitumineux, Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud, Partie 12 : Détermination de la sensibilité à l'eau des éprouvettes bitumineuses.2004.

NF EN 12697-26 : Mélanges bitumineux, Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud, Partie 26 : Rigidité.2004.

NF EN 12697-31 : Mélanges bitumineux, Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud, Partie 31 : Confection d'éprouvettes à la presse à compactage giratoire.2004.

NF EN 12697-34 : Mélanges bitumineux, Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud, Partie 34 : Essai Marshall.2004.

NF EN 1426 : Bitumes et liants bitumineux, Détermination de la pénétrabilité à l'aiguille.1999.

NF EN 1427 : Bitumes et liants bitumineux, Détermination de la température de ramollissement, Méthode Bille et Anneau.1999.

NF EN 1426 : Pénétrabilité a l'aiguille d'un produit bitumineux

NF EN 14 27 point de ramollissement (Méthode de bille et anneaux), JUIN 2007

Norme NA 5223 : ductilité

EN 13398) : Retour élastique

EN 13399 Stabilité au stockage, Mai 2010

EN 12593 :

Web graphie :

1. <http://www.memoireonline.com/>
2. <http://www.naftal.dz/fr/>
3. <http://www.wikipedia.org/>