

N° d'ordre : 08 /2012-M/GC

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE  
HOUARI BOUMEDIENE**

**FACULTÉ DE GÉNIE CIVIL**



## **MÉMOIRE**

Présenté pour l'obtention du diplôme de **MAGISTER**

En Génie Civil

Spécialité : GÉOTECHNIQUE

Par **CHINOUN MADANI**

Sujet

**INFLUENCE DE L'ASSOCIATION EVA-NBR SUR LE BITUME  
MODIFIE ET LES ENROBES BITUMINEUX MODIFIES**

Soutenu publiquement, le 21 / 04 / 2012, devant le jury composé de :

Mme. F. KHARCHI	Professeur à l'USTHB	Présidente
M. S. HADDADI	Maître de Conférences (A) à l'USTHB	Directeur de Mémoire
M. H. HOUARI	Professeur à l'Université de Constantine	Examineur
M. M. BELACHIA	Professeur à l'Université de Skikda	Examineur
M. M. OUDJIT	Maître de Conférences (A) à l'USTHB	Examineur

# *Dédicace*

*Je dédie ce travail*

*A la mémoire de mon père*

*A ma chère mère que dieu lui accorde longue vie*

*A mes frères*

*A mes sœurs*

*A toute ma famille*

*A tous mes amis*

*A tous mes enseignants*

## *Remerciements*

Tous d'abord, Nous tenons à remercier Dieu clément et miséricordieux de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur le Docteur **HADDADI SMAIL**, Maître de conférences à l'Université des Sciences et de Technologie Houari Boumediene, pour l'élaboration de ce mémoire, ses aides précieuses, conseils, son soutien permanent et pour tous ses efforts.

Je suis très honoré par la présence de Madame **F. KHARCHI**, Professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, qui a bien voulu présider le jury de ce mémoire.

Je voudrais exprimer mes remerciements à Monsieur **H. HOUARI**, Professeur à l'Université de Constantine, et à Monsieur **M. BELACHIA**, Professeur à l'Université de Skikda, et à Monsieur **M. OUDJIT**, Maître de Conférences à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, qui m'ont fait l'honneur d'accepter de participer au jury de ce mémoire.

En fin, je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin, à la concrétisation de ce travail.

## **Résumé**

Le but de ce travail est d'étudier l'influence de l'association de deux polymères sur les caractéristiques rhéologiques des bitumes modifiés et les propriétés mécaniques de mise à jour béton bitumineux. Les modifiants sont des polymères thermoplastiques, l'un est plastomère de type EVA (acétate de vinyle et d'éthylène) et l'autre est un déchet industriel élastomère NBR (acrylonitrile butadiène rubber) sous forme de poudrette de caoutchouc.

L'étude montre que:

- l'incorporation de l'association NBR-EVA dans le bitume améliore ses propriétés rhéologiques (pénétration, point de ramollissement, la ductilité).
- la modification par l'association EVA-NBR a une influence positive sur le béton de bitume modifié par l'amélioration de:
  - Compacité, stabilité Marshall, Marshall débit et le quotient Marshall,
  - La résistance à la traction indirecte.

Mots-clés: bitume, bitume modifié, Association EVA-NBR, enrobé bitumineux, Marshall, traction indirecte.

## **Abstract**

The aim of this work is to study the influence of the association of two polymers on the rheological characteristics of bitumens modified and the mechanical properties of modified bituminous concrete. The modifiers are thermoplastic polymers, a plastomer type is EVA (vinyl acetate and ethylene) and an industrial waste elastomer type NBR (acrylonitrile butadiene rubber) in the form of crumb rubber. The study shows that:

- the incorporation of the association NBR-EVA in the bitumen improves its rheological properties (penetration, softening point, ductility).
- modification by association NBR-EVA has a positive influence on the modified bituminous concrete by improving:
  - Compactness, Marshall stability, Marshall flow and Marshall quotient,
  - The indirect tensile strength.

Keywords: Bitumen, Modified Bitumen, EVA-NBR Association, Bituminous concrete, Marshall, Indirect traction.

## ملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير المعدلان EVA و NBR مجتمعان على الخصائص الريولوجية للزفت المعدل و الخصائص الميكانيكية للأقنعة الزفتية المعدلة. المعدلان هما عبارة عن مكثفان لدنان حراريا الأول من نوع إثيلين - فينيل أسيتات EVA و الثاني من نوع اكريلونتريل بوتديان ريبير NBR وهو عبارة عن فضلات صناعية على شكل مسحوق مطاطي. تثبت الدراسة أن :

✓ إدخال الثنائية NBR-EVA على الزفت تحسن خصائصه الريولوجية ( الاختراق، درجة حرارة التلين TBA ، قابلية التمدد)

✓ التعديل بواسطة الثنائية NBR-EVA له التأثير الإيجابي على الأقنعة الزفتية المعدلة بتحسين:

•الرص، الاستقرار، التميع و معامل مارشال

•زيادة في مقاومة الشد الغير مباشر

كلمات مفتاحية: الزفت، الزفت المعدل، الثنائية NBR-EVA ، الأقنعة الزفتية، مارشال، الشد الغير مباشر.

# Sommaire

---

**REMERCIEMENTS**

**RESUME**

**ABSTRACT**

**ملخص**

**SOMMAIRE**

**LISTE DES FIGURES**

**LISTE DES TABLEAUX**

**INTRODUCTION GÉNÉRALE** ..... 1

## Partie bibliographique

<b>I- ENROBE BITUMINEUX</b> .....	3
I-1 La place des matériaux bitumineux dans les structures routières.....	3
I-2 Différents types des chaussées .....	4
I-3 Composition de l'enrobé .....	4
I-3.1 Bitume .....	5
I-3-1.1 Classification des bitumes routiers.....	5
I-3-1.2 Composition de bitume .....	5
I-3-1.3 Stabilité colloïdale.....	6
I-3-1.4 Comportement rhéologique de bitume .....	6
I-3.2 Granulats.....	7
I-3-2.1 Le rôle du granulat dans l'enrobé.....	8
I-3-2.2 Caractéristiques et propriétés des granulats .....	8
I-4 Adhésivité.....	9
I-5 Détermination de la teneur en liant.....	9
I-6 Les sollicitations des chaussées .....	10
I-6.1 Sollicitations mécaniques .....	11
I-6.2 Sollicitations thermiques .....	12
I-7 Classement des types de comportement des matériaux bitumineux.....	13
<b>II- ENROBE BITUMINEUX MODIFIE</b> .....	14
II-1 Objectif de la modification.....	14
II-2 Les différents agents modifiants .....	14
II-3 Principaux polymères utilisés en génie civil .....	15
II-4 Procédés de modification .....	15
II-4.1 Le procédé humide .....	15
II-4-1.1 Bitume modifié .....	15
II-4-1-1.2 Le mécanisme de la modification.....	17
II-4-1.2 Influence de polymères .....	18
II-4.2 Le procédé sec .....	23

# Sommaire

---

## Partie expérimentale

<b>III. PRESENTATION DES MATERIAUX</b> .....	26
III-1 Le bitume .....	26
III-1.1 Caractéristiques du bitume.....	26
III-2 Les polymères .....	27
III-2.1 Le NBR .....	27
III-2.2 L'EVA .....	29
III-3 Les granulats .....	29
III-3.1 Origine des granulats .....	29
III-3.2 Analyse chimique.....	29
III-3.3 Analyse granulométriques .....	30
III-3.4 Les caractéristiques intrinsèques .....	31
III-3.5 Conclusion .....	31
<b>IV- BITUME MODIFIE</b> .....	32
IV-1 La modification.....	32
IV-1.1 Mode opératoire de la modification.....	32
IV-2 Essais sur le bitume modifié .....	33
IV-2.1 Essai de pénétrabilité .....	33
IV-2-1.1 Influence de l'association (EVA-NBR) sur la pénétrabilité .....	35
IV-2-1.2 Influence de temps de malaxage sur la pénétrabilité.....	36
IV-2.2 Essai de point de ramollissement (température bille anneau) .....	36
IV-2-2.1 Influence de l'association (EVA-NBR) sur la TBA .....	38
IV-2-2.2 Influence du temps de malaxage sur la TBA .....	39
IV-2-3 Essai de ductilité .....	39
IV-2-3.1 Influence de l'association (EVA-NBR) sur la ductilité .....	40
IV-2-3.2 Influence du temps de malaxage sur la ductilité .....	41
Conclusion.....	41
<b>V- ENROBÉS BITUMINEUX</b> .....	42
V-1 Etude de formulation de l'enrobé .....	42
V-1.1 Détermination de la courbe granulométrique du mélange .....	42
V-1.2 Détermination du teneur en liant .....	43
V-1.3 Choix de la formule optimale .....	44
V-2 Mode de fabrication des éprouvettes .....	45
V-3 Essais mécanique sur l'enrobé.....	46
V-3.1 Essai Marshall (à 30 minutes) .....	46
V-3.1.1 La compacité .....	47
V-3.1.2 Stabilité Marshall .....	48
a) Influence des différents mélanges sur la stabilité Marshall .....	48
b) Influence du temps de malaxage sur la stabilité Marshall .....	49
V-3.1.3 Fluage Marshall .....	50
a) Influence des différents mélanges sur le fluage Marshall .....	50
b) Influence du temps de malaxage sur le fluage Marshall.....	51
V-3.1.4 Quotient Marshall .....	52
a) Influence es différents mélanges sur le quotient Marshall .....	52
b) Influence du temps de malaxage sur le quotient Marshall.....	53

# Sommaire

---

V-3.2 Essai traction indirecte .....	54
V-3.2.1 La résistance à la traction indirecte .....	57
V-3.2.2 Type de rupture .....	59
V-3.3 Conclusion .....	60
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>	<b>61</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>63</b>

## LISTE DES FIGURES

Page

### Etude bibliographique

Fig 1.1 : Schéma d'une coupe de chaussée	03
Fig 1.2 : Schéma des différents types de structures de chaussée	04
Fig 1.3 : Comportement du bitume en fonction de $ \dot{\epsilon} $ et T	07
Fig 1.4 : Sollicitations induites par le trafic	12
Fig 1.5 : Types de comportement des matériaux bitumineux	13
Fig 2.1 : Mécanisme de la dispersion d'un copolymère dans le bitume.	18
Fig 2.2 : ITS et TSR pour chaque type de granulats en fonction de teneur en SBS	20
Fig 2.3 : ITS et TSR pour chaque type de granulats en fonction de teneur en EVA	21
Fig 2.4 : Propriétés Marshall en fonction de la teneur en HDPE	22
Fig 2.5 : Propriétés de traction indirecte en fonction de la teneur en HDPE	23
Fig 2.6 : Quotients Marshall en fonction de la teneur en EVA	25
Fig 2.7 : Quotients Marshall en fonction de la teneur en déchet	25

### Etude expérimentale

Fig 3.1 : Influence du temps de malaxage sur les caractéristiques de bitume pur.	27
Fig 3.2 : Le NBR sous forme de poudrette.	28
Fig 3.3 : Analyse granulométrique du NBR.	28
Fig 3.4 : Les granulats de l'EVA.	29
Fig 3.5 : Granulométrie des fractions granulaires.	30
Fig 4.1 : Appareillage de modification.	33
Fig 4.2 : Pénétrromètre.	34
Fig 4.3 : Principe d'essai pénétrabilité.	34
Fig 4.4 : La pénétrabilité pour les différents mélanges.	35
Fig 4.5 : Variation de la pénétrabilité pour les différents mélanges	35
Fig 4.6 : Influence du temps de malaxage sur la pénétrabilité	36
Fig 4.7 : Influence du temps de malaxage sur la variation de pénétrabilité	36
Fig 4.8 : matériel pour essai billes et anneaux.	37
Fig 4.9 : Principe d'essai billes et anneaux.	37
Fig 4.10 : TBA pour les différents mélanges.	38
Fig 4.11 : Variation de TBA pour les différents mélanges.	38
Fig 4.12 : Influence du temps de malaxage sur la température bille et anneau (TBA)	39
Fig 4.13 : Influence du temps de malaxage sur la variation de TBA	39

Fig 4.14 : Ductilimètre avec son moule.	39
Fig 4.15 : Principe d'essai ductilité.	39
Fig 4.16 : La Ductilité pour les différents mélanges.	40
Fig 4.17 : Variation de la ductilité pour les différents mélanges.	41
Fig 4.18 : Influence du temps de malaxage sur la ductilité.	41
Fig 4.19 : Influence du temps de malaxage sur la variation de ductilité	41
Fig 5.1 : Courbe granulométrique du mélange et fuseau de référence LCPC BB 0/14.	43
Fig 5.2 : Matériels utilisés pour fabrication les éprouvettes	45
Fig 5.3 : Pied à coulisse	46
Fig 5.4 : Presse d'écrasement avec un enregistreur.	46
Fig 5.5 : Compacités Marshall pour les différents mélanges	47
Fig 5.6 : Stabilité Marshall pour les différents mélanges.	48
Fig 5.7 : Variation de la stabilité Marshall pour les différents mélanges.	49
Fig 5.8 : Influence du temps de malaxage sur la stabilité Marshall.	49
Fig 5.9 : Influence du temps de malaxage sur la variation de stabilité Marshall	49
Fig 5.10 : Fluage Marshall pour les différents mélanges.	50
Fig 5.11 : Variation du fluage Marshall pour les différents mélanges.	51
Fig 5.12 : Influence du temps de malaxage sur le fluage Marshall.	51
Fig 5.13 : Influence du temps de malaxage sur la variation de fluage Marshall	51
Fig 5.14 : Quotient Marshall pour les différents mélanges	53
Fig 5.15 : Variation du quotient Marshall pour les différents mélanges.	53
Fig 5.16 : Influence du temps de malaxage sur le quotient Marshall	54
Fig 5.17 : Influence du temps de malaxage sur la variation de quotient Marshall	54
Fig 5.18 : Moule de la traction indirecte.	55
Fig 5.19 : Charge maximale à la traction indirecte pour les différents mélanges	55
Fig 5.20 : Variation de la charge maximale à la traction indirecte pour les différents mélanges.	56
Fig 5.21 : Déformation à la traction indirecte pour les différents mélanges.	56
Fig 5.22 : Variation de la déformation à la traction indirecte pour les différents mélanges.	57
Fig 5.23 : Résistance à la traction indirecte pour les différents mélanges.	58
Fig 5.24 : Variation de la résistance à la traction indirecte pour les différents mélanges.	58
Fig 5.25 : Types de rupture.	59
Fig 5.26 : Plan de rupture de quelques éprouvettes après la traction indirecte	60

## LISTE DES TABLEAUX

Page

### Etude bibliographique

Tableau 1.1- Classification des bitumes purs	05
Tableau 2.1- Principaux agents chimiques utilisés dans la modification des bitumes	15
Tableau 2.2- Formulation d'un bitume modifié pour enrobé drainant en regard de spécifications	17

### Etude expérimentale

Tableau 3.1 - Caractéristiques du bitume.	26
Tableau 3.2 - Résultats de l'analyse chimique des granulats.	30
Tableau 3.3 - Caractéristiques intrinsèques des fractions granulaires.	31
Tableau 4.1 - Représentations des mélanges.	32
Tableau 4.2 - Pénétrabilité à 25°C pour les différents mélanges.	34
Tableau 4.3 - Variation de la pénétrabilité pour les différents mélanges.	34
Tableau 4.4 - TBA pour les différents mélanges.	37
Tableau 4.5 - Variation de TBA pour les différents mélanges.	37
Tableau 4.6 - Ductilité à 25°C pour les différents mélanges.	40
Tableau 4.7 - Variation de ductilité à 25°C pour les différents mélanges	40
Tableau 5.1 - Teneur en liant pour les différentes formules.	44
Tableau 5.2 - Résultats de l'essai de Marshall du mélange étudié (formule A).	44
Tableau 5.3 - Pourcentages des Fractions choisies.	44
Tableau 5.4 - Compacité Marshall pour les différents mélanges.	47
Tableau 5.5 - Stabilité Marshall pour les différents mélanges.	48
Tableau 5.6 - Fluage Marshall pour les différents mélanges.	50
Tableau 5.7 - Quotient Marshall pour les différents mélanges.	52
Tableau 5.8 – Charges maximales et déformations à la rupture par la traction indirecte pour les différents mélanges.	55
Tableau 5.9 - Résistance à la traction indirecte (ITS) pour les différents mélanges.	57

## INTRODUCTION GENERALE

La route est une voie terrestre de communication qui permet de relier les lieux, de favoriser le développement économique d'une région et de faciliter les opportunités d'échanges et d'écoulement des produits. Elle permet en outre de réduire de façon substantielle, les coûts de transport et le temps de parcours. Les routes jouent donc un rôle important dans le développement socioéconomique.

Ces dernières années, la croissance économique des pays a engendrée un développement très important des moyens de transport, même dans les zones à climat spécifique, telles que les régions sahariennes chaudes ou à climat continental et les régions froides, la chose qui influe négativement sur la chaussée routière.

Parmi les matériaux utilisés pour la construction routière, ceux à base du liant bitumineux occupent une place importante. Les principaux modes de dégradation des chaussées bitumineuses sont l'orniérage, la fatigue et la fissuration. Ces dégradations résultent de sollicitations complexes telles que la répétition des contraintes liées à l'application de charges roulantes ou à des conditions climatiques variées. En Algérie le phénomène des déformations permanentes (essentiellement l'orniérage) est en plus aggravé par l'intensification du trafic de poids lourds couplé avec une température élevée. Ces phénomènes qui surgissent au fil des années, occasionnent des coûts très élevés en raison de la durée de vie limitée des routes. Il apparaît donc nécessaire d'approfondir les études menées sur les matériaux de chaussées, en particulier les bitumes et les enrobés bitumineux.

Pour remédier à ces problèmes de fissuration thermique et d'orniérage, diverses techniques ont été entreprise ; parmi lesquelles, la modification des liants avec des polymères qui s'avère une technique prometteuse. Cette opération permet d'améliorer les performances des liants bitumineux et de réduire la fréquence de réparation des chaussées.

L'objectif de cette recherche est de montrer la possibilité d'amélioration les caractéristiques physiques et mécaniques des bitumes modifiés et des enrobés bitumineux modifiés par l'association de deux polymères l'une est plastomère de type EVA (acétate de vinyle et d'éthylène) et l'autre est un élastomère (déchet industriel) acrylonitrile butadiène (NBR) sous forme de poudrette de caoutchouc.

Notre étude comporte deux parties qui comprennent chacune plusieurs chapitres

La première partie est consacrée à la recherche bibliographique où sont présentés des généralités sur les bitumes, les polymères, sont également introduits ainsi que les caractéristiques des bitumes modifiés, les propriétés des granulats et son rôle dans l'enrobé, en suite des généralités sur les enrobés bitumineux. Et enfin une synthèse de quelques travaux de recherche effectués sur la modification des bitumes et des enrobés bitumineux.

La deuxième partie concerne l'étude expérimentale :

- Le premier chapitre est consacré à la présentation de l'origine des matériaux utilisés dans ce travail (granulats, bitume, polymères), et les différentes caractéristiques physiques et mécaniques de ces matériaux.
- Deuxièmement, un chapitre est consacré à l'influence de la modification sur la consistance de bitume (pénétrabilité, température de ramollissement, ductilité).
- Troisièmement, un chapitre est consacré à la formulation de l'enrobé bitumineux et d'étudier l'influence des bitumes modifiés sur les caractéristiques de l'enrobés par l'application des essais mécaniques (Marshall, Traction indirecte).

Elle se termine par une conclusion générale.

## I- ENROBE BITUMINEUX

### I-1 La place des matériaux bitumineux dans les structures routières [Yan 2001]

Les chaussées se présentent comme des structures multicouches figure 1.1, qui sont mises en œuvre pour répartir les charges induites par le trafic que le sol support seul ne pourrait pas soutenir.

La structure complète comprend :

- le sol support ;
- la couche de forme qui protège le sol support pendant les travaux, permet d'améliorer les caractéristiques mécaniques des matériaux de remblais ou du terrain en place et de les protéger du gel ;
- les couches d'assise (couche de fondation + couche de base) qui sont constituées de matériaux élaborés (le plus souvent liés pour les chaussées à trafic élevé) qui doivent répartir les contraintes de pression dues au trafic dans les limites admissibles au niveau de la plate-forme support ;
- les couches de surfaces (couche de liaison + couche de roulement) qui subissent directement les actions du trafic.

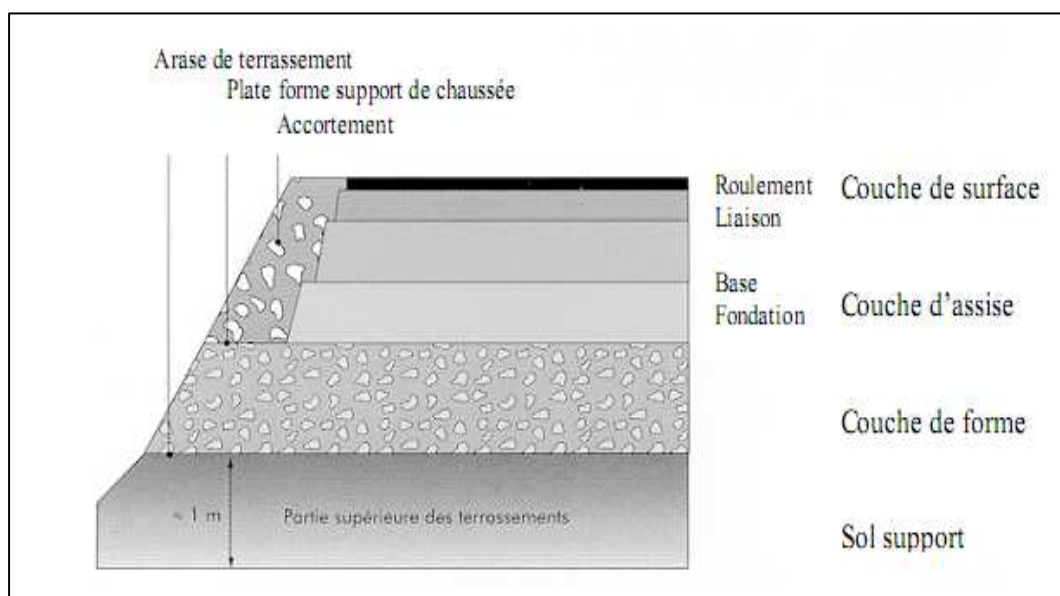


Fig 1.1 : Schéma d'une coupe de chaussée [Set 1994].

Les matériaux bitumineux peuvent être utilisés dans les couches de surface et dans les couches d'assise.

## I-2 Différents types de chaussées

Les structures de chaussées sont réparties en deux grandes classes (les chaussées bitumineuses et les chaussées en béton de ciment).

La figure 1.2 donne un aperçu des structures de chaussée les plus fréquemment rencontrées.

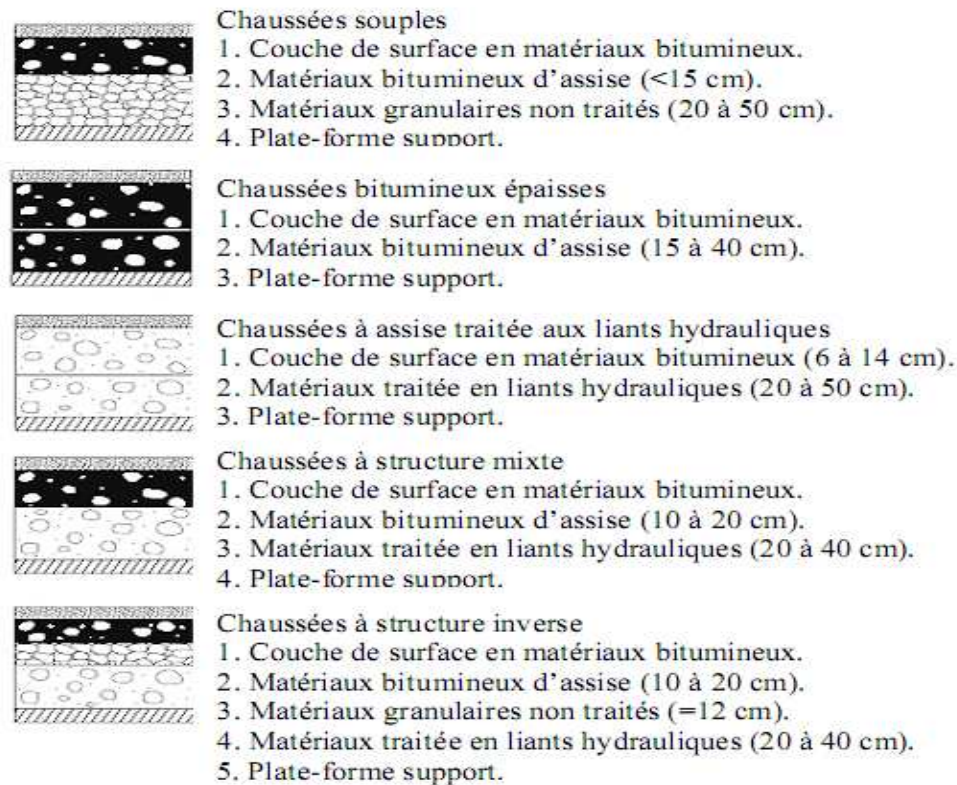


Fig 1.2 : Schéma des différents types de structures de chaussée [Set 1994].

Les chaussées souples et les chaussées bitumineuses épaisses sont employées pour le réseau départemental, les autres structures étant utilisées pour des niveaux de trafic plus élevés.

## I-3 Composition de l'enrobé

Les enrobés bitumineux sont fabriqués par mélange de gravillons, de sable avec ou sans fines, de filler, de liant bitumineux et d'éventuels dopes et/ou d'additifs, dans une proportion choisie. Dans ce mélange, le 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 [Lae 2008].

### I-3.1 Bitume

Les bitumes sont devenus des matériaux de haute technicité (étanchéité des structures, isolation phonique...), mais l'utilisation principale du bitume est la technique routière.

#### I-3-1.1 Classification des bitumes routiers

Le tableau 1.1 donne la classification définie par les normes en vigueur.

Tableau 1.1 – Classification des bitumes purs [Ber 1992].

Qualité	180-220	70-100	50-70	35-50	20-30
Pénétrabilité (25°C, 100 g, 5 s). (1/10 mm)	180 à 220	70 à 100	50 à 70	35 à 50	20 à 30
Point de ramollissement bille et anneau.(°C)	34 à 43	42 à 48	46 à 51	50 à 56	52 à 68
Densité relative à 25 °C (méthode au pycnomètre)	1,00 à 1,07		1,00 à 1,10		
Perte de masse au chauffage (163 °C, 5 h) (%)	< 2		< 1		
Pourcentage de pénétrabilité restant après perte de masse au chauffage par rapport à la pénétrabilité initiale	> 70	> 70	> 70	> 70	> 70
Point d'éclair (appareil Cleveland) (°C)	> 230	> 230	> 230	> 250	> 250
Ductilité à 25 °C (cm)	> 100	> 100	> 80	> 60	> 25
Solubilité dans le tétrachloroéthylène (C <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub> ) (%)	> 99,5				
Teneur en paraffine (%)	< 4,5				

- Les bitumes 180-220 sont essentiellement utilisés pour la fabrication des émulsions et la réalisation d'enrobés fins mis en œuvre en couches minces.
- Les bitumes 70-100, 50-70 et 35-50, s'ils sont également utilisés pour la fabrication des émulsions, sont surtout destinés à la confection des enrobés denses, des bétons bitumineux et des graves-bitumes.
- Les bitumes 20-30 sont principalement utilisés pour la confection des couches d'assise en sable-bitume. Dans le cas de sables de concassage, on peut également employer le bitume 35-50.

#### I-3-1.2 Composition du bitume

Plusieurs méthodes chimiques et physico-chimiques ont été utilisées pour déterminer les compositions des bitumes, les principales méthodes sont [Ram 1990] :

- Précipitation dans des solvants sélectifs;
- Fractionnement par chromatographie sur colonne ou sur baguette;
- Spectroscopie infrarouge;
- résonance paramagnétique électronique (RPE);
- chromatographie sur gel perméable (GPC) pour la distribution des masses;
- séparation par voie chimique de ROSTLER et STERNBERG.

L'analyse élémentaire d'un bitume met en évidence des atomes de carbone (typiquement 80 à 87 % massique) et d'hydrogène (8 - 12 %). En outre, des hétéroatomes tels que le soufre (1 - 9 %), l'azote (0 - 1,5 %) et l'oxygène (0,5 - 1,5 %) et des traces de métaux tels que le vanadium ou le nickel sont présentes [Les 2002]

Il est de pratique de regrouper les différents constituants au sein de grandes familles chimiques. Ce sont les Asphaltènes, et les Maltènes (Saturés, Aromatiques et Résines) [Les 2009].

### **I-3-1.3 Stabilité colloïdale**

L'état d'équilibre des bitumes, gouverné par la composition chimique de ses constituants, détermine non seulement son comportement rhéologique mais aussi ses variations de comportement avec la température. Il résulte donc d'un équilibre physico-chimique entre les divers constituants.

GASTEL [Gae 1971] a défini cet état par un indice d'instabilité colloïdal  $I_c$  à partir de trois constituants :

$$I_c = \frac{\text{Asphaltènes} + \text{Floculant}}{\text{Peptisant}}$$

Avec Floculant = huiles saturées

Peptisant = huiles aromatiques + résines

Gaestel constate que plus cet indice est élevé plus le bitume se rapproche de l'état gel et plus sa stabilité colloïdale est médiocre. Il note également que toutes les caractéristiques du liant (point de ramollissement, ductilité, température de fragilisation, etc.) varient de façon sensible avec l'indice d'instabilité colloïdale « $I_c$ », donc avec la composition. Cet indice prend les valeurs proches de 1 pour un bitume dans un état gel et près de 0.25 pour un état sol

### **I-3-1.4 Comportement rhéologique du bitume**

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

La caractéristique principale du bitume est la très large et progressive plage de variation de sa consistance avec la température, appelée susceptibilité thermique. Il peut se présenter alors sous les trois formes suivantes [Che 1996]:

- Un solide dur, fragile et cassant à basse température et à court temps de charge. On est alors dans la zone dite élastique, où le bitume est pour la plupart de ses applications, trop fragile pour résister aux sollicitations mécaniques sans 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 de charge étendu. C'est la zone fluide, et même quelquefois Newtonienne. Elle correspond à la température de mise en œuvre, c'est à dire à la fabrication, à la mise en place et au compactage des enrobés. Dans cette zone, il y a déphasage entre la contrainte et la déformation.
- Ni liquide ni solide à des températures et des temps de charge moyens. Cette zone est dite zone viscoélastique, qui correspond aux températures de service des enrobés sur la chaussée. Encore ici, il y a déphasage entre la contrainte et la déformation.

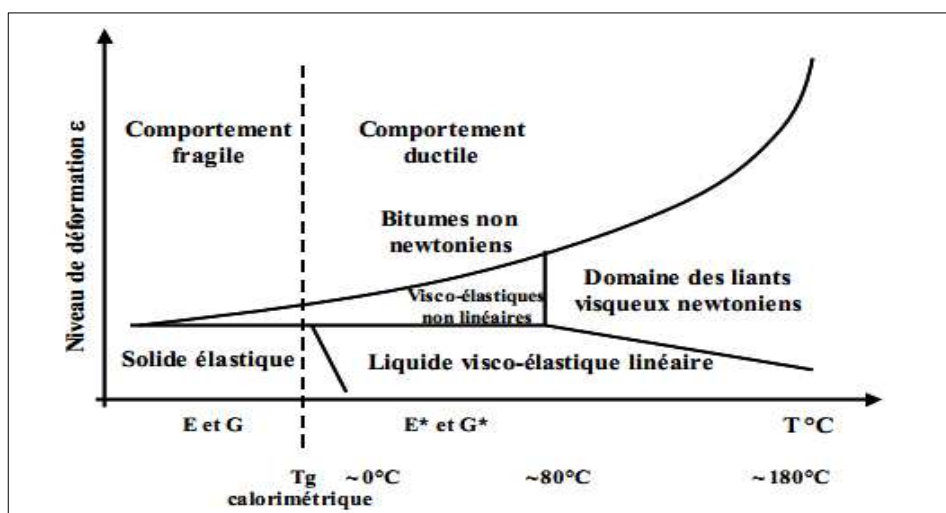


Fig 1.3 : Comportement du bitume en fonction de  $|\epsilon|$  et  $T$  [Cor 2005].

### I-3.2 Granulats

Les composants minéraux constituent environ 95% de la masse d'un enrobé bitumineux (80-85% du volume). Cette prépondérance des matériaux granulaires dans le mélange va fortement en influencer les propriétés mécaniques [Dan 2006].

Les granulats sont l'ensemble des sables, gravillons ou pierres concassées, qui proviennent du creusement d'un gisement ou d'une extraction à partir d'une roche mère compacte. Le granulats est utilisé soit comme matériau en vrac, soit après transformation (criblage, concassage, tamisage, dépoussiérage, lavage..).

### **I-3-2.1 Le rôle du granulat dans l'enrobé**

Le squelette minéral, constitué par l'ensemble des grains en contact, doit assurer la distribution des contraintes dans le mélange et la transmission des charges aux couches inférieures de la chaussée. Par ailleurs, les grains minéraux doivent avoir une bonne résistance aux efforts statiques et dynamiques pour ne pas s'endommager sous les chargements.

Le filler absorbe une part importante du liant avec lequel il constitue le mastic. Le pouvoir rigidifiant du filler associé au liant apporte sa stabilité au mélange et participe à sa résistance.

### **I-3-2.2 Caractéristiques et propriétés des granulats**

Les caractéristiques des granulats, telles que la forme, l'angularité et l'état de surface, qui influencent directement la résistance des contacts aux déplacements et aux rotations relatifs des grains. Les principales Caractéristiques des granulats utilisés dans les assises de chaussée sont les suivants [Ber 1992] :

#### **a) Granularité**

Elle caractérise la répartition du granulat en tranches dimensionnelles. Les gravillons sont définies par leur plus petite et leur plus grande dimension. On parle d'un  $d/D$ , avec une tolérance sur  $d$  et  $D$  de 15 % si  $D > 1,58 d$ , et de 20 % si  $D \leq 1,58 d$ .

Les graves et les sables sont des matériaux à granularité continue  $0/D$ ,  $D$  étant supérieur à 6,3 mm pour les graves.

#### **b) Propreté**

L'absence d'éléments fins hydrophiles ou non (indésirables) issus du concassage de la roche ou des argiles rendent l'adhérence entre le liant et le granulat difficile.

#### **c) Angularité**

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

Pour un granulat de roche massive, elle est égale à 100 %.

Pour un granulat d'origine alluvionnaire, elle est définie par deux données :

- l'indice de concassage  $IC$ , proportion en poids d'éléments supérieurs à la dimension  $D$  du granulat élaboré ;

- le rapport de concassage  $RC$ , rapport entre  $d$  du matériau soumis au concassage et  $D$  du granulats obtenu.

#### **d) Forme**

Elle joue un rôle important à la fois pour les granulats de la couche de roulement, des gravillons plats ayant tendance à se coucher au moment du compactage, et pour les matériaux d'assise, des granulats plats ou allongés réduisant la compacité et la stabilité.

Elle est définie par le pourcentage d'éléments tels que  $G/E > 1,58$ .

Elle est mesurée par un double tamisage sur des tamis à mailles carrées qui trient suivant la grosseur ( $G$ ), et sur des cribles à barres parallèles qui trient suivant l'épaisseur ( $E$ ).

#### **I-4 Adhésivité**

Pour qu'il y ait adhésion du bitume au granulats, il doit y avoir contact entre le bitume et les granulats. L'enrobage s'effectue à haute température pour rendre le bitume fluide et lui permettre de recouvrir efficacement la surface irrégulière des granulats. Cependant, en présence d'obstacles physiques tels que de la poussière ou de l'argile à la surface des granulats, il peut y avoir recouvrement sans qu'il y ait adhésion [Eme 1997].

L'adhésion est assurée par les interactions intermoléculaires entre le liant bitumineux et la surface des granulats. Il peut s'agir de liens électrostatiques, en raison de la surface généralement électriquement chargée des granulats, de liaisons hydrogènes lorsque des groupements hydroxyles sont présents en surface, ou de liens dispersifs (type van der Waal), qui sont toujours présents [Cur 1992, Pet 1998]. La force totale du lien adhésif est alors fonction du nombre de liaisons intermoléculaires et de la force de chacune de ces liaisons [Dar 2003]. Ces interactions sont généralement suffisantes pour obtenir l'adhésivité souhaitée sur une surface propre et sèche. Un ancrage mécanique, résultant d'une pénétration de l'adhésif dans les aspérités du substrat, peut également contribuer à l'adhérence, surtout dans le cas d'une surface poreuse [Dar 2003, Ada 2005].

#### **I-5 Détermination de la teneur en liant**

Le liant bitumineux transmet naturellement son comportement viscoélastique à l'enrobé. Il faut donc définir une teneur en liant optimale afin d'assurer la cohésion du mélange et le bon enrobage de tous les grains du mélange par un film mince de bitume, et ce, tout en évitant des

problèmes de fluage et d'orniérage trop prononcés à haute température (dans le cas d'une trop forte teneur en bitume).

Pour déterminer cette teneur en liant optimale, on introduit la notion de surface spécifique des granulats [Dur 1962], notée  $\Sigma$  et exprimée en  $m^2/kg$ , c'est-à-dire la surface développée qu'auraient les granulats assimilés à des sphères.

Pour un mélange granulométrique donné, la formule suivante permet d'avoir une approximation de la surface spécifique  $\Sigma$  :

$$100\Sigma = 0,17G + 0,33g + 2,3S + 12s + 135f$$

Avec :

G : pourcentage de gros gravillons ( $\emptyset > 11$ ).

g : pourcentage de petits gravillons ( $\emptyset 6/11$ ).

S : pourcentage de gros sable ( $\emptyset 0,3/6$ ).

s : pourcentage de sable fin ( $\emptyset 0,08/0,3$ ).

f : pourcentage de filler ( $\emptyset < 0,08$ ).

On voit que le pourcentage de filler est prépondérant en ce qui concerne la surface spécifique et donc la teneur en liant. Dans certains cas, on utilise la formule simplifiée suivante :

$$\Sigma = 2,5 + 1,3f$$

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

$$P = \alpha k \sqrt[5]{\Sigma}$$

Avec :

p : teneur en liant (%).

$\alpha$  : facteur dépendant du type de granulats (2,65/masse volumique des granulats).

$\Sigma$  : surface spécifique des granulats ( $m^2/kg$ ).

k : module de richesse (k variant de 2,75 pour les enrobés donnant le maximum de résistance à la déformation, à 3,5 pour les enrobés les plus souples).

## I-6 Les sollicitations des chaussées

Les chaussées routières sont en permanence soumises à des sollicitations mécaniques et thermiques combinées avec des phénomènes chimiques qui vont participer, plus ou moins

rapidement selon leurs niveaux de sollicitation, à la dégradation du revêtement [Per 2001]. Ces éléments, responsables des dégradations, ont pour origine:

- les sollicitations du trafic : principalement les effets dynamiques dus aux passages répétés des poids lourds, les effets statiques lors du ralentissement du trafic et les frottements de surface pneu-chaussée,
- les sollicitations climatiques: entraînant des variations de température au sein des enrobés bitumineux. Ces variations sont soit de courte durée (journalières) ou soit de longue durée saisonnière),
- les phénomènes chimiques : dus à l'oxydation naturelle des liants hydrocarbonés, à l'action des sels de déverglaçage provenant des entretiens hivernaux, et aux dégradations de surface de la chaussée par le rayonnement solaire.

Ces actions diverses, agissant simultanément sur le revêtement bitumineux conduisent aux dégradations couramment observées [Dum 2004], notamment:

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

### **I-6.1 Sollicitations mécaniques**

En première approximation, chaque couche de chaussée est assimilée à une poutre qui subit des flexions sous l'effet du trafic. Le calcul des efforts et déformations qui apparaissent nécessite, en premier lieu, la connaissance du module complexe et éventuellement du coefficient de Poisson. Soulignons qu'en raison des propriétés particulières apportées par le bitume (viscoélastique), les enrobés bitumineux ont un comportement (donc un module) fortement dépendant de la température et de la vitesse de chargement.

Les tractions répétées à la base des couches sous l'effet du passage des véhicules créent des « micros » dégradations qui s'accumulent et peuvent entraîner la ruine du matériau. Ce phénomène est la fatigue qui s'observe pour de nombreux matériaux.

Les chaussées sont, en général, dimensionnées pour que la ruine ne se produise pas avant  $10^6$  cycles ou pour le nombre de cycles de chargement équivalents créés par le trafic sur une période comprise entre 15 et 20 ans. Les effets du trafic ont été abondamment étudiés de par le monde et les publications y relatives sont abondantes.

Les compressions répétées sous le passage des véhicules peuvent induire des déformations permanentes qui, si elles sont trop importantes, se traduisent par un orniérage à la surface de la chaussée.

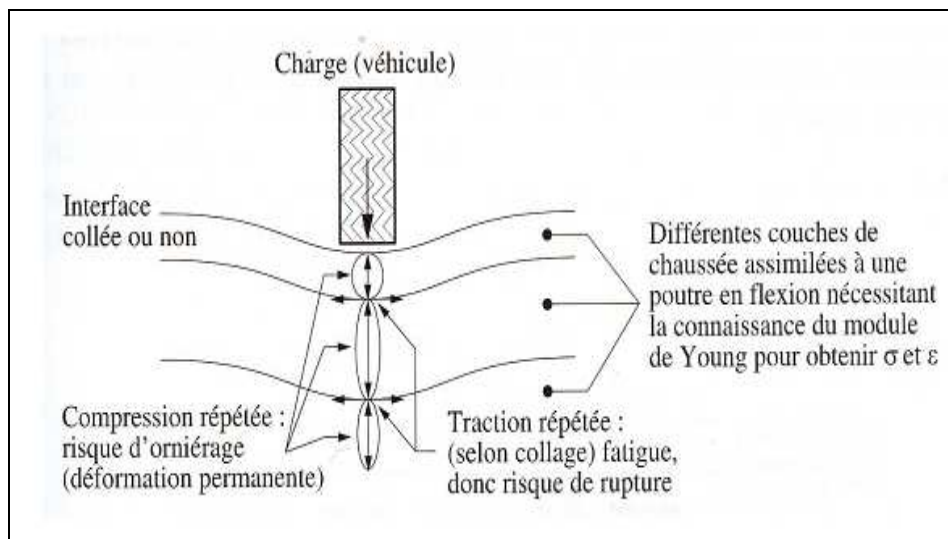


Fig 1.4 : Sollicitations induites par le trafic [Cor 2005].

### I-6.2 Sollicitations thermiques

Mis à part l'accélération du vieillissement du matériau et les pertes de portance des chaussées en période de dégel dues à la présence de sols gélifs dans les couches d'infrastructure, les variations de la température ont deux effets mécaniques principaux :

- variation du module de l'enrobé bitumineux (facteur jusqu'à 100x),
- création de contraintes et déformations au sein du matériau en raison des dilatations-contractions thermiques lors des changements de température (couplage thermomécanique).

### I-7 Classement des types de comportement des matériaux bitumineux

Le comportement des matériaux bitumineux dans les structures routières varie largement suivant les conditions de chargements et le climat. Corté et Di Benedetto [Cor 2005] classifient les types de comportement des enrobes bitumineux suivant l'amplitude de déformation et le nombre de cycles de chargement, comme suit (Fig. 1.5).

- Pour un faible nombre de cycles de chargement et des déformations élevées (quelques pourcents), le comportement est fortement non linéaire.
- Pour des chargements comprenant quelques centaines de cycles et des déformations faibles ( $< 10^{-4}$ ), le comportement est considéré, en première approximation, viscoélastique linéaire.

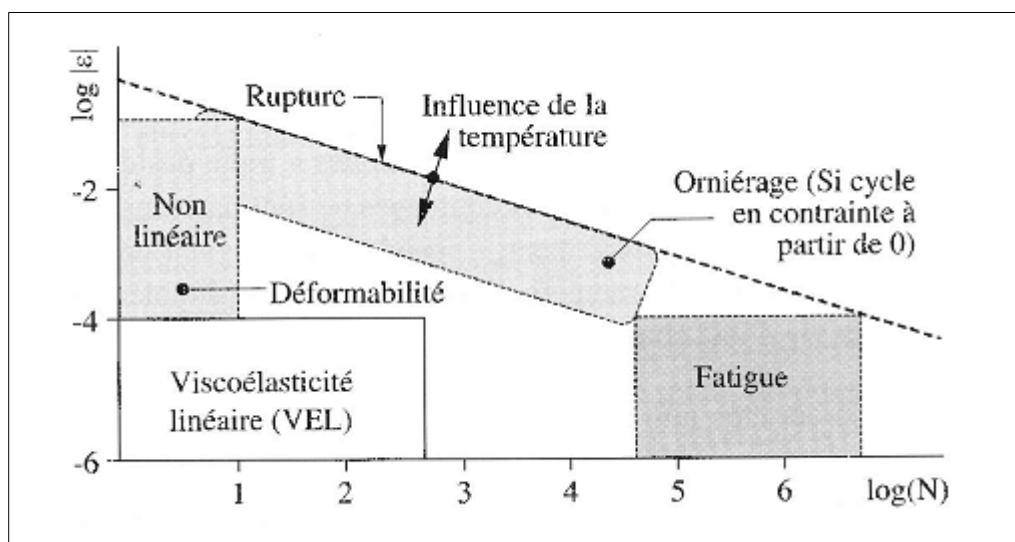


Fig 1.5 : Types de comportement des matériaux bitumineux [Cor 2005].

- Le phénomène de fatigue se produit lors de chargements de plusieurs dizaines de milliers de cycles et des déformations "faibles" qui favorisent le développement de l'endommagement.
- La production et l'accumulation des déformations irréversibles sous un grand nombre de cycles de chargements favorisé par une température élevée est le quatrième type de comportement.

## II- ENROBE BITUMINEUX MODIFIE

L'enrobé bitumineux dans sa configuration traditionnelle n'assure plus un bon fonctionnement des chaussées, des études ont montré qu'en incorporant des polymères comme modifiant est amélioré les caractéristiques de l'enrobé bitumineux.

### II-1 Objectif de la modification

L'amélioration des qualités intrinsèques du liant se traduit par les effets suivants :

- Augmentation de l'intervalle de plasticité défini par les températures de Fraass et de Bille et Anneau.
- Augmentation de la cohésion du liant aux températures de service élevées.
- Amélioration des propriétés élastique donnant un meilleur comportement en fatigue et une diminution du risque d'orniérage des enrobés.
- Possibilité d'employer un dosage en liant plus élevé, propriété intéressante dans certains cas, tel celui des enrobés drainants.

Cependant, toutes ces qualités ne peuvent pas être trouvées avec un bitume pur et c'est pourquoi on utilise et met au point des enrobés modifiés [Bru 1986].

### II-2 Les différents agents modifiants [Aip 1999]

- a) **Les polymères thermodurcissables** qui durcissent de façon irréversible à une température qui dépend de leur nature chimique (structure réticulées).
- b) **Les polymères thermoplastiques** qui se fluidifient et deviennent malléables sous l'effet de la chaleur, de façon réversible.

Les polymères thermoplastiques sont subdivisés en deux familles : les élastomères et les plastomères qui se distinguent, aux températures d'usage, par des comportements différents du point de vue, (rigidité, déformabilité résilience).

- **Les plastomères**, la déformation élastique s'accompagne d'une déformation permanente qui peut être relativement importante.
- **Les élastomères** présentant l'élasticité du caoutchouc à la température ambiante.

- c) **Les polymères de synthèse** il s'agit notamment de la poudrette de caoutchouc et des latex.

### II-3 Principaux polymères utilisés en génie civil

Le tableau ci-après dresse une liste des principaux agents modifiants du bitume employés en technique routière classés par catégorie.

Tableau 2.1 : Principaux agents chimiques utilisés dans la modification des bitumes

Polymères thermoplastiques élastomères	Copolymère styrène-butadiène-styrène SBS
	Copolymère styrène-isoprène-styrène SIS
	Styrène-butadiène SB
	Copolymère statistique styrène-butadiène SBR
Polymères thermoplastiques plastomères	Copolymère éthylène-acétate de vinyle EVA
	Copolymère éthylène-acrylate de méthyle EMA
	Copolymère éthylène-acrylate de butyle EBA
	Polyisobutylène PIB
Latex	Polychloroprène
	Caoutchouc SBR
	Caoutchouc naturel
Poudrette de caoutchouc	

### II-4 Procédés de modification

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

#### II-4.1 Le procédé humide

Ce procédé était basé sur l'utilisation du « bitume modifié » pour la fabrication de l'enrobé bitumineux modifié.

##### II-4-1.1 Bitume modifié

Un bitume modifié est un mélange de bitume et d'additifs, ces additifs sont limités à des substances macromoléculaires destinées à modifier certaines propriétés intrinsèques du liant de base. Celles-ci sont en général des élastomères naturels ou de synthèse ou des plastomères.

##### ➤ Les liants modifiés élastomères (SBS)

Les bitumes modifiés par addition de SBS ont les propriétés suivantes:

- Susceptibilité thermique très faible dans le domaine des températures de service;

- Consistance a chaud permettant une utilisation dans les conditions d'emploi;
- Cohésion plus élevée dans une gamme de température plus grande;
- Forte capacité d'allongement avant rupture, même à basse température; meilleur comportement a la fatigue.

➤ **Les liants modifiés plastomères (EVA)**

Est utilisé depuis longtemps dans les modifications de bitume. Il est généralement ajouté à une teneur de 5% en poids de bitume [Mur 2000, Sao 2009, Had 2008], la modification du bitume avec l'EVA est caractérisée par une diminution de la pénétrabilité et une augmentation de la température bille et anneau, diminuant ainsi la susceptibilité thermique [Sao 2009].

➤ **Mélanges d'élastomères et de plastomères**

Le bitume peut aussi être modifié par adjonction d'un élastomère et d'un plastomère.

Ainsi certains industriels ont cherché à tirer bénéfice des avantages spécifiques de chaque grande famille de modifiant en ajoutant au bitume simultanément des EVA et des SBS.

Ces liants fortement modifiés, de coût élevé, sont utilisés dans divers types d'enrobés de couche de roulement sur des sites fortement sollicités pour lesquels on attend une amélioration importante des résistances à la fissuration et à l'orniérage [Spi 1989].

Certains pays européens ont mis en place des spécifications pour les liants modifiés dans lesquelles on exige des valeurs minimales de température de ramollissement bille et anneau et de recouvrance élastique. A partir du moment où de telles spécifications existent, et indépendamment de leur pertinence, l'industriel producteur de liants modifiés se trouve dans l'obligation d'y satisfaire ce qui peut l'amener, dans sa démarche d'optimisation économique de la formulation, à "doper" un bitume copolymère d'éthylène avec la quantité de SBS juste nécessaire à la satisfaction des spécifications. Par exemple, en Espagne, pour les enrobés drainants, il est spécifié un liant bitume polymère normalisé appelé BM-3a dont l'ensemble des exigences peut être aisément satisfait avec un bitume - SBS à teneur suffisante en polymère. D'un autre côté, un bitume EVA, même dosé à 5 % de polymère, ne permet pas d'atteindre la recouvrance élastique requise. Les EVA étant globalement moins onéreux que les SBS, l'optimisation économique pour le fournisseur conduit à ajouter au bitume EVA la quantité juste suffisante de SBS permettant de satisfaire le critère de recouvrance élastique. Le tableau 2.2 rassemble les valeurs significatives.

Tableau 2.2- Formulation d'un bitume modifié pour enrobé drainant en regard de spécifications

Propriétés	Spécifications du BM - 3a	Liant EVA	Liant EVA + SBS
Pénétration (1/10 mm 25 °C)	55 - 70	65	60
Température Bille et Anneau (°C)	> 58	54	58,5
Ductilité à 5 °C (cm)	> 4	10	26
Recouvrance élastique à 25 °C (% en torsion)	> 15	12	28

#### II-4-1-1.1 Le mécanisme de la modification

La modification des propriétés des bitumes par l'addition de polymère est souvent expliquée par le gonflement du polymère par les huiles du bitume.

En effet, si le polymère n'est pas soluble au sens moléculaire du terme (ce qui n'est pas nécessairement souhaitable), il est au moins gonflable par la fraction huileuse légère du bitume.

Il se constitue alors deux phases [Don 1991] :

- Une phase polymère gonflé par les huiles
- une phase bitume plus riche en résines et en asphaltènes ( ceux-ci n'intervenant pas dans la solvation ) que le bitume de base.

Ceci permet une augmentation de la viscosité et le développement du caractère « GEL » du liant. Le polymère gonflé rend donc, même à faible teneur, le bitume plus élastique et plus résistant à l'écoulement.

La dispersion du polymère dans le bitume est également expliquée en tenant compte de trois paramètres influant (figure 2.1) [Kra 1980]:

- **La taille des particules** : plus elles sont petites, plus la surface d'échange est importante et plus grande est la vitesse de diffusion du bitume dans les particules (étapes 1 et 2) ;
- **Le cisaillement** : malgré le gonflement, les molécules deviennent d'autant plus mobiles (étapes 3 et 4) qu'elles ont été rompues ;
- **La température** : la vitesse de diffusion du bitume dans les particules de polymère augmente avec la température et modifie le moment où le cisaillement devient efficace.

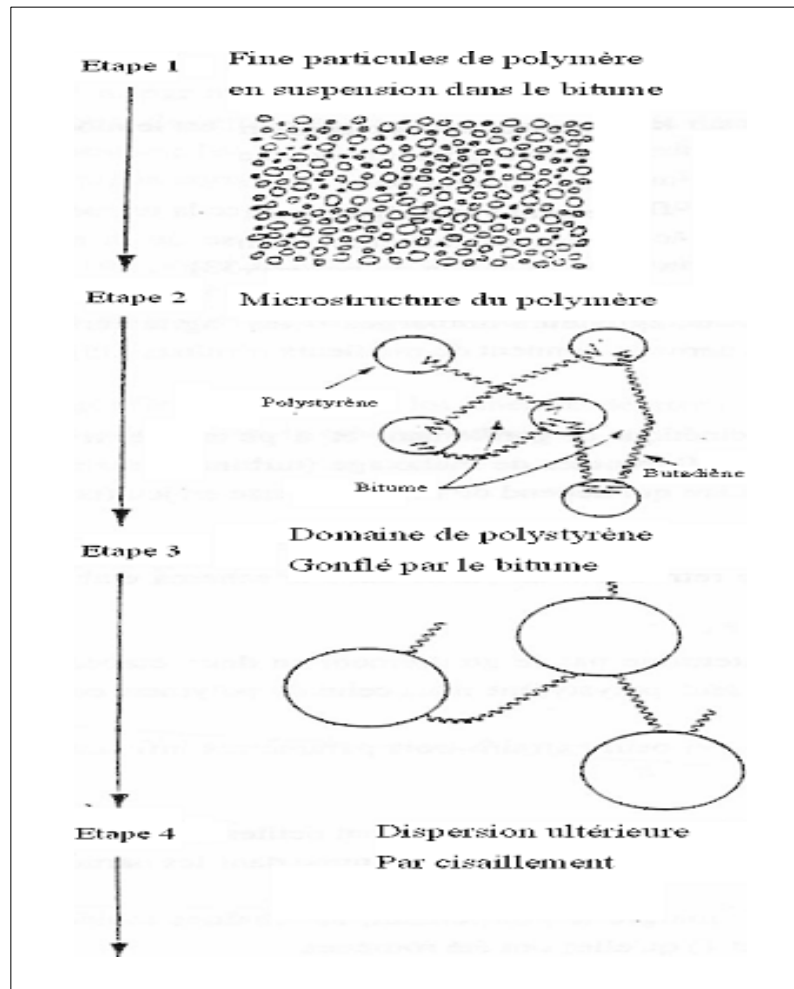


Fig 2.1 : Mécanisme de la dispersion d'un copolymère dans le bitume.

#### II-4-1.2 Influence des polymères

Comme mentionné précédemment, le but de la modification des enrobés par des polymères est l'amélioration de leurs caractéristiques. Dans ce qui suit, certains travaux montrent l'influence des polymères sur le bitume et l'enrobé bitumineux modifié par voie humide.

Haddadi [Had 2007] a étudié l'influence d'un polymère (déchet industriel de type NBR sous forme de poudrette) sur les caractéristiques de bitume et l'enrobé bitumineux modifié.

Il a utilisé :

- Des granulats
  - Un sable 0/3 présente une forte teneur en carbonates ( $\text{CaCO}_3$ ), il s'agit d'un sable calcaire.
  - Des gravillons 3/8 et 8/15 sont de nature Siliceuse.

- Un déchet industriel de type NBR sous forme de poudrette provenant de la société d'application d'élastomère (SAEL). Sa densité est de 1,22 mesurée par rapport à l'éthanol dont la densité est de 0,79.
- Un bitume de grade 35/50 provient des raffineries de Naftal.

La modification a été effectuée selon les conditions suivantes :

- une vitesse de rotation de 600 tr/mn,
- une température comprise entre 190 et 200 °C,
- un temps de malaxage de 1 heure.

Le bitume a été modifié aux teneurs suivantes : 2, 3 et 4%.

Les résultats montrent que :

- La pénétrabilité diminue avec la teneur en polymère.
- La température de ramollissement augmente avec la teneur en polymère. La tendance est linéaire.
- La ductilité augmente d'une manière linéaire à 25°C avec la teneur en NBR
- Le quotient Marshall est maximal pour 2 % de NBR, donc c'est la teneur optimale.

Gorkem et Sengoz [Gor 2009] ont étudiés l'influence des polymères SBS et EVA sur les caractéristiques du bitume et l'enrobé bitumineux modifiés, ainsi que l'effet de la nature des granulats sur les enrobés bitumineux, et l'influence de l'humidité sur les enrobés à été également étudiée (en réalisant des essais de traction indirecte sur des éprouvettes sèches et humides).

Ils ont utilisés :

- Un bitume de classe 50/70 provenant de la Société des raffineries de pétrole Turque (Aliaga/Izmir).
- Deux types d'agrégats calcaire et basalte.
- Deux types de modifiant sont utilisés :
  - Polymère élastomère SBS a été fourni par (Shell Chemicals Company)
  - Polymère plastomère EVA a été fourni par (Société d'Arkema)

Ils ont adoptés les conditions de modification suivantes :

- Température de malaxage : 180-185°C,
- Vitesse de malaxage : 125-1100rpm,

- Temps de malaxage : 2 heures,
- Teneur en SBS : 2, 3, 4, 5 et 6%.
- Teneur en EVA : 3, 4, 5, 6 et 7%.

Les résultats des essais sur le bitume modifié montre que les polymères SBS et EVA améliorent les différent caractéristique de bitume.

Les résultats des essais de traction indirecte ont montré que :

La résistance à la traction indirecte (ITS) de différents mélanges modifiés augmente avec l'augmentation de la teneur en modifiants (Fig 2.2 et 2.3).

Les mélanges préparés avec le bitume modifié par SBS et EVA sont moins sensibles à l'humidité que les mélanges préparés avec le bitume pur pour tous les types de granulats (basalte-calcaire et calcaire). En conséquence, il peut être conclu que, le bitume modifié par ces polymères offre une meilleure adhérence.

Le SBS a conduit à une plus grande amélioration de la résistance du mélange humide comparé à l'EVA dans le mélange bitumineux.

Les mélanges préparés avec l'association basaltes-calcaires sont plus sensibles à l'humidité que les mélanges calcaires. Cette différence peut être attribuée à la formation d'une liaison faible entre l'agrégat de basalte et le bitume.

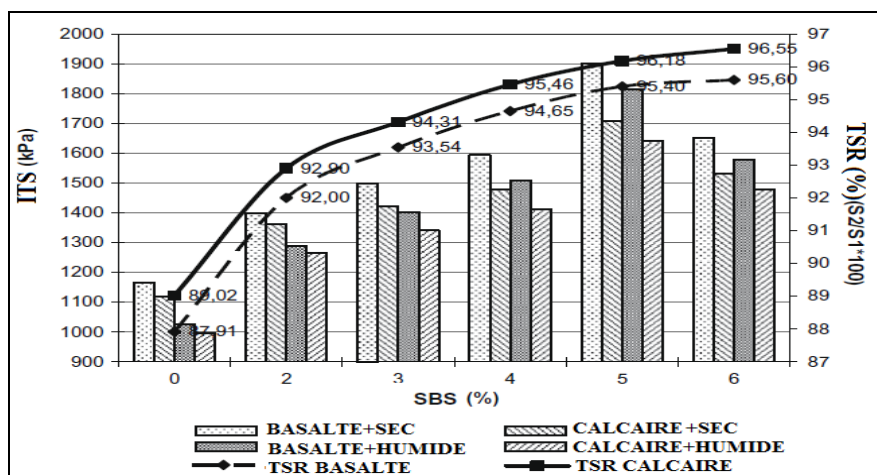


Fig 2.2 : ITS et TSR pour chaque type de granulats en fonction de teneur en SBS.

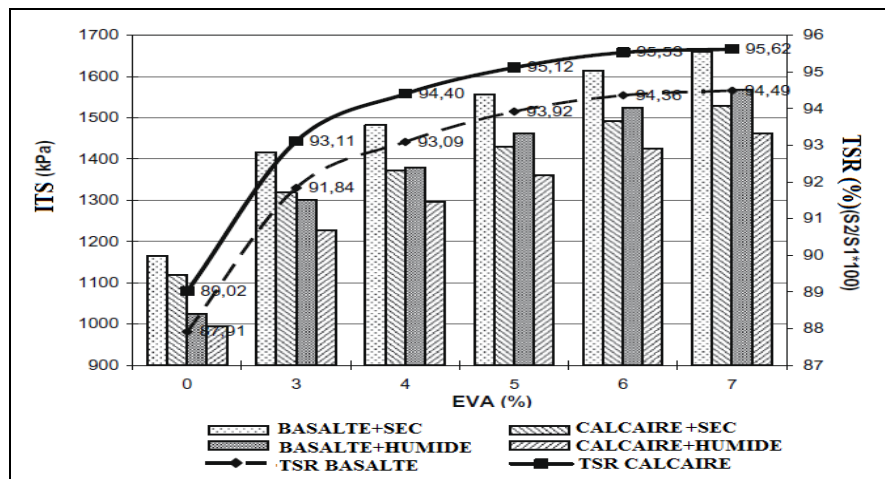


Fig 2.3 : ITS et TSR pour chaque type de granulats en fonction de teneur en EVA.

Attaelmanan et al [Att 2011] ont étudiés l'influence de polymères de type polyéthylène haut densité (HDPE) sur les caractéristiques des bitumes et les enrobés bitumineux modifiés.

Ils ont utilisé :

- Un bitume de grade 80/100 provenant d'une usine d'asphalte dans la région du Heilongjiang,
- Un polymère de type polyéthylène haut densité (HDPE) sous forme de lentilles.
- Des agrégats ont été obtenus d'une usine d'asphalte dans la province du Heilongjiang située dans la partie nord de la Chine.

Ils ont adopté les conditions de modification suivantes :

- Température de malaxage : 170°C,
- Vitesse de malaxage : 3000 rpm,
- Temps de malaxage : 2 heures,
- Teneur de HDPE : 1, 3, 5 et 7%.

Les résultats de cette étude ont montré que :

- Le HDPE permet d'avoir des valeurs de la ductilité  $\geq 100$  cm jusqu'à 5%, qui indique que le HDPE est complètement dissout dans le bitume.
- Le point de ramollissement de bitume pur a augmenté de 69% à la teneur de 5% de HDPE,
- La pénétrabilité a diminué de 35% pour 5% en HDPE, ce qui indique des améliorations dans la résistance à la déformation.

Les résultats de l'essai Marshall montrent que :

- L'ajout de 5% en HDPE a augmenté la stabilité Marshall de 13%,
- Tous les teneurs de HDPE satisfont les limites spécifiées par les vides d'air,
- La valeur de quotient Marshall a augmenté de 55 % à 5% de HDPE.

On peut dire que les enrobés bitumineux modifiés par HDPE offrent une meilleure résistance contre les déformations permanentes en raison de leur haute stabilité et grande valeur du QM, par conséquent les enrobés bitumineux modifiés par HDPE pourraient être utilisés dans les chaussées aéroports militaires.

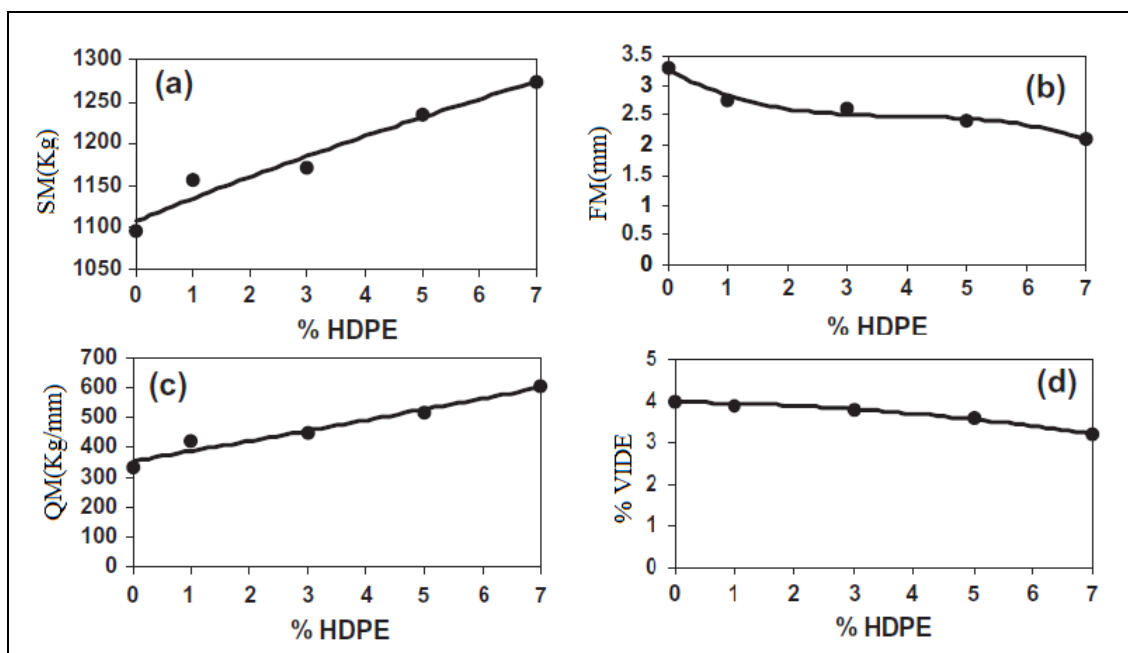


Fig 2.4 : Propriétés Marshall en fonction de la teneur en HDPE  
(a-Stabilité, b-Fluage, c-QM, d- % Vides)

Les résultats des essais de traction indirecte ont montré que :

- La résistance à la traction indirecte ITS augmente pour les deux températures d'essai (c'est à dire augmenter l'adhérence entre les granulats et du bitume, ce qui conduit à une diminution du polissage de la route).
- La résistance à la traction indirecte ITS pour les mélanges modifiés par HDPE est légèrement plus élevée que pour les mélanges conventionnels.
- Les valeurs de TSR ont été de 79,82% et 94,81%, respectivement, pour le bitume pur et le bitume modifié à 5% de HDPE. On peut voir que le mélange modifié par PEHD améliore la résistance à l'humidité que le mélange conventionnel.

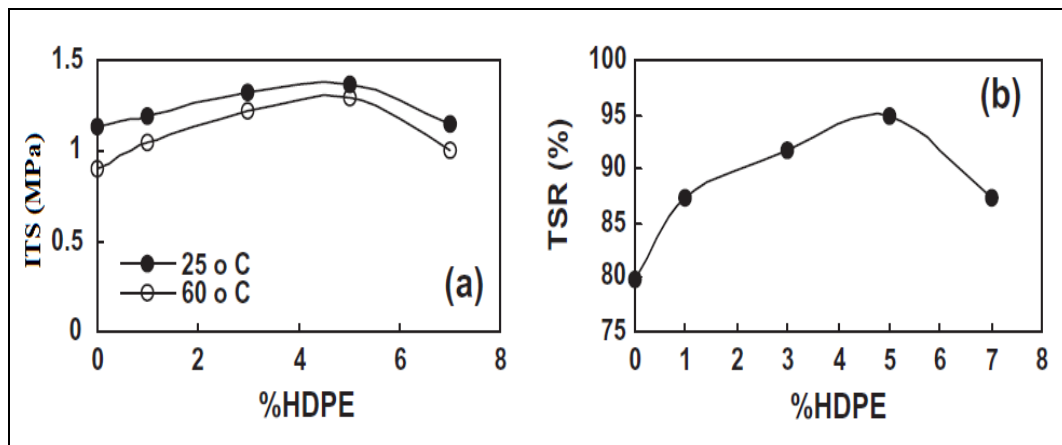


Fig 2.5 : Propriétés de traction indirecte en fonction de la teneur en HDPE (a-ITS, b-% TSR).

#### II-4.2 Le procédé sec

Ce procédé consiste en l'ajout direct du modifiant lors de l'opération de malaxage de l'enrobé

Sangita et al [San 2011] ont étudié l'influence de polymères WPM (un mélange de caoutchouc nitrile broyé et les déchets de polyéthylène) sur les caractéristiques Marshall et traction indirecte de béton bitumineux modifié par voie sèche.

Ils ont utilisé :

- Un mélange (WPM) de caoutchouc nitrile broyé et les déchets de polyéthylène (taille des particules <2mm).
- Un bitume de classe 60/70.
- Des agrégats quartzes disponibles localement (New Delhi, Inde).
- La chaux hydratée a été utilisé comme matériau de remplissage (Filler).

Les résultats des essais mécaniques ont montré :

Le quotient Marshall à 30 minutes est le plus élevé pour le mélange modifié ayant 8% de WPM qui est 1,41 fois plus élevé que celui du mélange conventionnel.

La résistance à la traction indirecte (ITS) du mélange contenant 8% de WPM est la plus élevée que le mélange conventionnel. Les valeurs d'ITS à sec obtenues à 25°C sont 6,5 kg/cm<sup>2</sup> pour le mélange conventionnel et 11,92 kg/cm<sup>2</sup> pour le mélange modifié contenant à 8% de WPM. Cela implique que le mélange 8% WPMB est capable de

résister plus à la traction. Le taux de résistance à la traction du mélange 8% WPMB est de 93,5% comparativement à 89% pour le mélange conventionnel, ce qui confirme que le mélange 8% WPMB est moins sensible à l'humidité par rapport au mélange conventionnel.

Saoula et al [Sao 2009] ont étudié l'influence de deux polymères (EVA et un déchet de semelles de chaussures, il contient entre 50 et 60% d'EVA) sur les caractéristiques de bitume et l'enrobé bitumineux modifié, et ils ont utilisé pour la fabrication d'enrobé modifié les deux procédés de modification sec et humide.

Ils ont utilisé :

- Un bitume de classe 80/100
- Les modifiants utilisés sont l'EVA et un déchet de semelles de chaussures, il contient entre 50 et 60% d'EVA. Les deux modifiants proviennent de la S.A.E.L. (Société Algérienne d'élastomère)
- Trois fractions granulaires (0/3, 3/8, 8/15) sont utilisés. Ils sont obtenus à partir des carrières du nord de l'Algérie. Le sable (calcaire) provient de Keddara situé à Bouira et les graviers (basalte) proviennent de Cap-Djinet à Boumerdes

Les paramètres de modification sont :

- Une température du mélange de 175°C.
- Une vitesse de malaxage : 300 tr/min.
- Une durée de malaxage de 4heures.
- Les teneurs en EVA : 3, 5 et 7%.
- Les teneurs en déchet : 1, 2, 3 et 4%.

L'évolution des propriétés physiques des deux bitumes modifiés est caractérisée par une diminution de la pénétrabilité et une augmentation de la température bille et anneau, diminuant ainsi la susceptibilité thermique.

Trois types d'enrobés sont pris en considération dans ce travail. Ils se distinguent essentiellement par leur processus de fabrication :

- Le premier noté M0 est obtenu en mélangeant le bitume pur et les agrégats. C'est le mélange témoin ;

- Le deuxième noté M1 pour les EVA et D1 pour les déchets est obtenu en mélangeant le bitume modifié aux agrégats (procédé humide -A-);
- Le troisième noté M2 pour les EVA et D2 pour les déchets est obtenu en malaxant les agrégats, le bitume pur et le modifiant en même temps. L'incorporation des modifiants a été faite progressivement afin d'assurer l'homogénéité des mélanges (procédé sec -B-).

Après l'essai Marshall les valeurs du QM ont été calculées afin d'évaluer la résistance des éprouvettes d'enrobés modifiés. Une valeur plus grande du quotient indique que les mélanges sont plus résistants aux déformations permanentes.

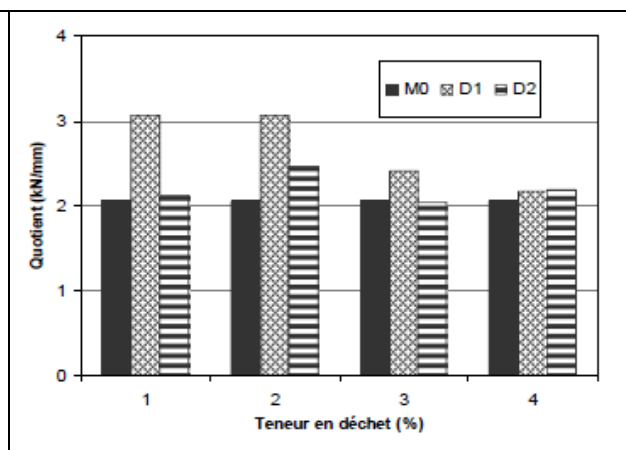
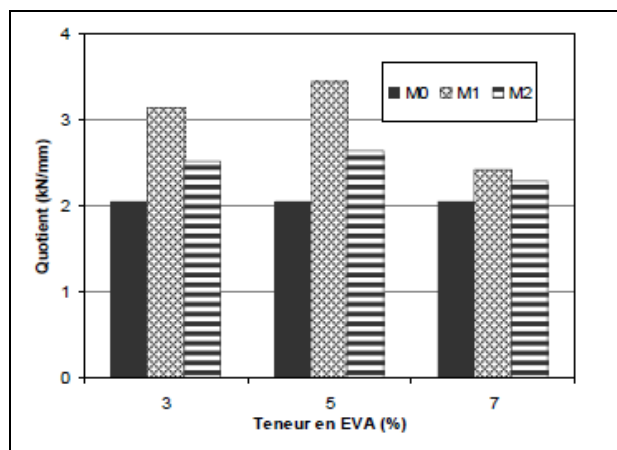


Fig 2.6 : Quotients Marshall en fonction de la teneur en EVA.

Fig 2.7 : Quotients Marshall en fonction de la teneur en déchet

Le mélange M1 à 5% d'EVA atteint la valeur maximale du QM par rapport à l'enrobé témoin. Par ailleurs, les mélanges M1 (3%) et D1 (1 et 2%) présentent pratiquement les mêmes résistances ceci montre tout l'intérêt d'utiliser ce type de déchet. L'application du procédé B donne des résistances très satisfaisantes particulièrement avec les mélanges M2 (3 et 5%) et D2 (2%). Cependant, le mélange D2 (3%) n'améliore pas le QM comparé à celui de l'enrobé témoin. Le mélange D2 (2%) présente une meilleure résistance que celle du mélange D1 (3%), ceci se traduit par un gain en énergie (pas de modification du liant) aussi par une réduction de la quantité du déchet à utiliser.

L'étude du comportement mécanique des enrobés a montré que les meilleures résistances aux déformations permanentes sont obtenus avec 5% d'EVA et 2% de déchet, et cela quelque soit le procédé de fabrication. Ceci révèle tout l'intérêt d'appliquer des enrobés modifiés directement au malaxage (procédé B) sachant que leur utilisation ne nécessite aucun changement à la centrale de fabrication des enrobés bitumineux.

Cette partie présente l'étude expérimentale consacrée aux essais a caractérisation effectuée sur le bitume, polymère, granulats et le bitume modifié ainsi que des essais mécaniques (Marshall, Traction indirecte) effectués sur les bétons bitumineux modifiés. L'influence de l'association de deux polymères (EVA et NBR) sur les caractéristiques de bitume modifié et des enrobés bitumineux modifiés est étudiée. Cette partie fait suite aux travaux réalisés par Saibou Dodo et Tamzait [Sai 2010] sur étude de l'influence de l'association NBR et EVA sur le bitume. A l'issue de étude, les optimums sont obtenus pour les teneurs de 2% pour le NBR et 5% pour l'EVA. L'association EVA-NBR concernera donc les teneurs totales de 2% et 5%. Les pourcentages seront de 50% EVA-50% NBR et 25% EVA-75% NBR. Ces pourcentages ont été choisis pour valoriser le déchet industriel NBR. L'EVA étant une matière première.

### **III- PRESENTATION DES MATERIAUX**

Dans ce chapitre sont exposés l'origine des matériaux de base utilisés dans ce travail (granulats, bitume, polymères), et les différentes caractéristiques physiques et mécaniques de ces matériaux.

#### **IV- III-1 LE BITUME**

L'étude expérimentale a été effectuée avec un bitume de classe 35/50. Il provient de l'entreprise des travaux publics EGCR de Boumerdes.

##### **III-1.1 Caractéristiques du bitume**

Le bitume pur soumis au malaxage avec un agitateur électrique à hélice avant faire les essais de caractérisation (Pénétrabilité, TBA, Ductilité).

Nous avons adopté les paramètres de malaxage suivants :

- Un volume de bitume d'environ 500g.
- Une température de malaxage de  $180\pm 5^{\circ}\text{C}$ .
- Une vitesse de malaxage : 600 tr/min.
- Une durée de malaxage de 1, 2, 3 et 4heures.

Le tableau 3.1 donne les caractéristiques classiques du bitume pour les différentes durées de malaxage :

Tableau 3.1- Caractéristiques du bitume.

Essais	Temps de malaxage				Spécifications
	1h	2h	3h	4h	
Pénétrabilité à 25°C (1/10 mm)	37	38	36,5	35	35 à 50
Température bille et anneau «TBA» (°C)	51	51,25	51,6	52	50 à 58
Ductilité à 25°C (cm)	107,3	111,6	114,3	120,3	> 100
Densité	1.04				-

La figure 3.1 représenté l'influence du temps de malaxage sur les caractéristiques classiques de bitume pur (Pénétrabilité à 25°C, TBA, Ductilité à 25°C).

On remarque que les caractéristiques de bitume pur sont légèrement améliorées avec l'augmentation de la durée de malaxage.

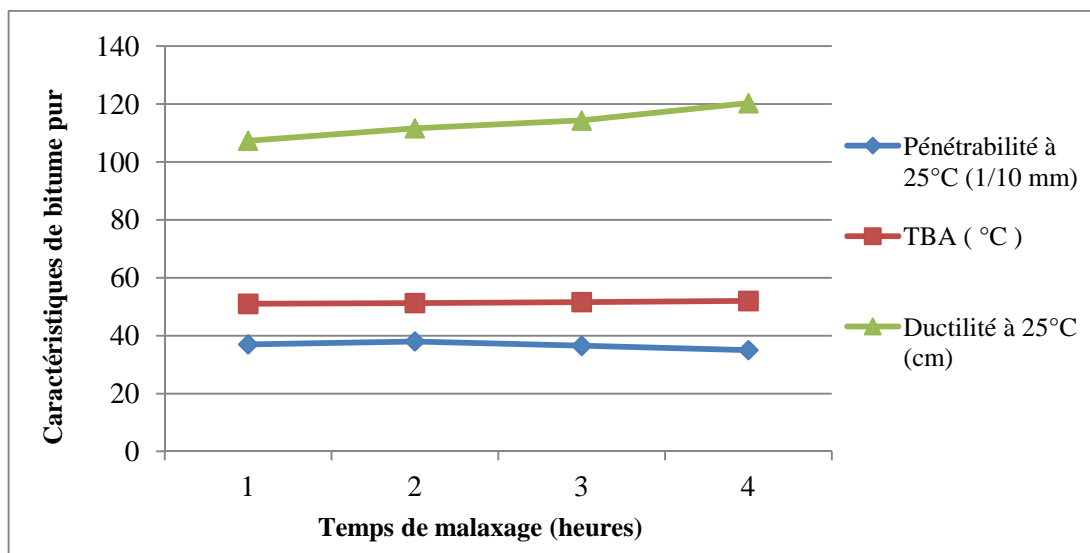


Fig 3.1: Influence du temps de malaxage sur les caractéristiques de bitume pur.

## III-2 LES POLYMÈRES

Dans nos travaux nous avons utilisé un polymère de synthèse (EVA) ainsi qu'un déchet industriel en forme de poudrette de caoutchouc (NBR), les deux polymères ont fournis par la S.A.E.L. (Société Algérienne d'élastomère)

### III-2.1 Le NBR

C'est un déchet industriel issu du broyage des semelles de chaussure. Le polymère NBR qui est un couleur noirâtre, est utilisé sous forme de poudrette. La figure 3.2 montre son aspect.

Nous avons réalisé les essais suivants sur le NBR :

- La densité
- La granulométrie



Fig 3.2 : Le NBR sous forme de poudrette.

### III-2.1.1 Densité du NBR

La densité de la poudrette est de 1.22 mesurée par rapport à l'éthanol dont la densité est de 0,79.

### III-2.1.2 Analyse granulométrique du NBR

L'analyse granulométrique (la figure 3.3) montre que la poudrette du NBR est constituée de particules inférieures à 0,8 mm

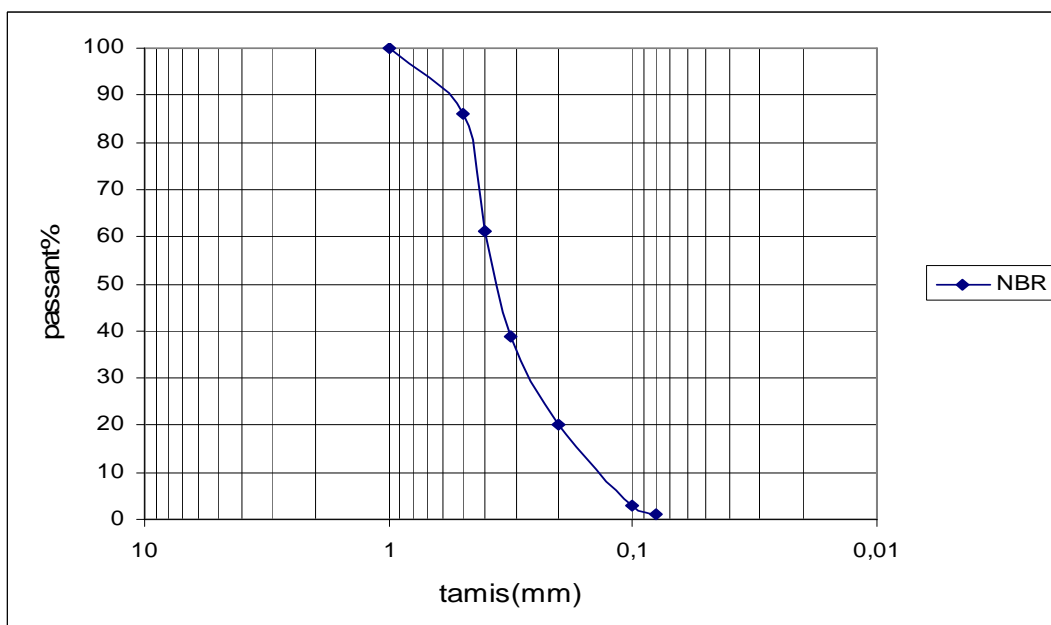


Fig 3.3 : Analyse granulométrique du NBR.

### III-2.2 L'EVA

L'acétate de vinyle et d'éthylène (EVA) est l'un des plastomères les plus utilisés en technique routière. Il est composé du copolymère d'éthylène et du comonomère acétate de vinyle.

En technique routière, il est conseillé d'utiliser des copolymères dont la teneur en acétate de vinyle varie entre 18 et 33 %. La température maximale de mise en œuvre de ces polymères est estimée à 200°C.

Il se présente sous forme de lentilles blanchâtres (2 à 5 mm de diamètre), la figure 3.4 montre son aspect.



Fig 3.4 : Les granulats de l'EVA.

La densité de l'acétate de vinyle et d'éthylène (EVA) est de 0.93.

### III-3 LES GRANULATS

Les granulats de cette étude sont les plus couramment utilisés par les entreprises pour la réalisation des chaussées.

#### III-3.1 Origine des granulats

Les granulats de classe 0/3, 3/8 et 8/15 utilisés dans notre recherche proviennent de la carrière d'El Hachimia de la wilaya de Boumerdes.

#### III-3.2 Analyse chimique

Les analyses ont été effectuées au LCTP (Hussein Dey), les résultats sont présentés dans le tableau 3.2 :

Tableau 3.2 - Résultats de l'analyse chimique des granulats.

Échantillon	Sable	Gravier	Gravier
	0/3	3/8	8/15
Insolubles ( $\text{SiO}_2$ +Silicates)	4,8	6,3	5,2
Oxyde de fer et d'Al ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ + $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	1,83	1,75	2,6
Gypse ( $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ )	Traces	Traces	Traces
Chlorures (NaCl)	0,29	0,47	0,41
Carbonates ( $\text{CaCO}_3$ )	94,78	92,04	91,65
Anhydride Carbonique $\text{CO}_2$	41,70	40,50	40,32
Perte au feu	42,66	41,68	41,98
Eau de constitution	0,96	1,18	1,66
Bilan chimique pondéral	102,66	101,74	101,52

L'analyse chimique montre que :

- Les graviers 3/8 et 8/15 proviennent de la même roche de mère.
- Le sable et les graviers une forte teneur en carbonates ( $\text{CaCO}_3 > 91\%$ ), il s'agit des calcaires.

Nos granulats sont de nature calcaire donc ils présentent une excellente adhésivité et une bonne tenue à l'eau avec les liants hydrocarbonés.

### III-3.3 Analyse granulométriques

La figure 3.5 présente les courbes granulométriques des différentes classes 0/3, 3/8 et 8/15.

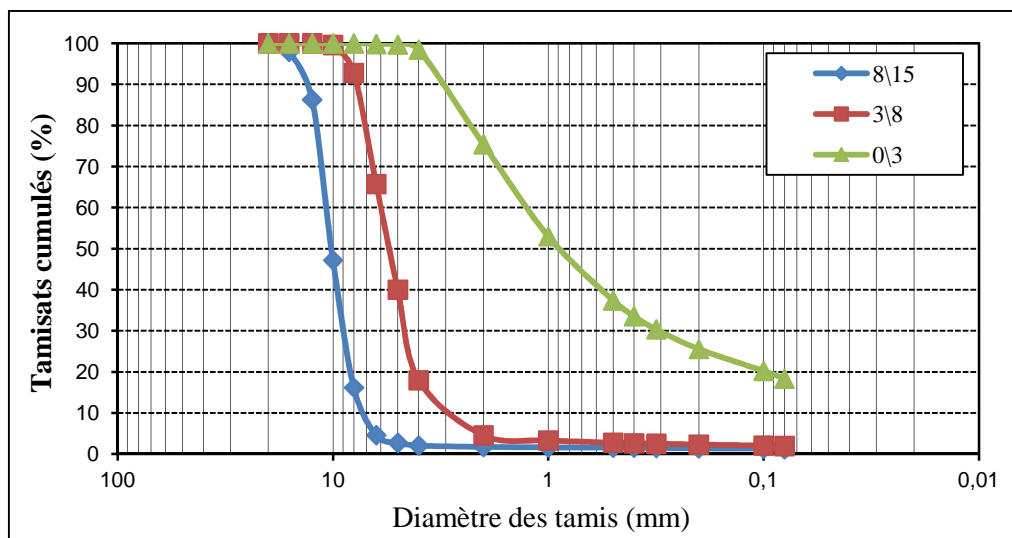


Fig 3.5 : Granulométrie des fractions granulaires.

Nous remarquons que les trois fractions présentent des granularités continues.

### III-3.4 Les caractéristiques intrinsèques

Le tableau suivant présente les caractéristiques intrinsèques des notre granulats.

Tableau 3.3 - Caractéristiques intrinsèques des fractions granulaires.

Essais \ classe	0/3	3/8	8/15	Observation
Propreté (%)	/	4,97	0,91	< 2 Bon à moyen
Los Angeles (%)	/	22,18	21,61	20<LA<30 Moyen
Micro-Deval (%)				
• Humide	/	18,9	18,7	13<MDE<20 Bon à Moyen
• Sec		5,2	5,1	MDS<13 Très bon
Aplatissement	/	14,18	9,23	≤ 20%
Équivalent de sable(%)	72	Sable propre		
Densité spécifique	2,55	2,65	2,60	/

- Les résultats du tableau indiquent que les deux fractions 3/8 et 8/15 ont des caractéristiques intrinsèques mécaniques moyennes à bonne. La propreté de la fraction 3/8 est >2, mais cette impureté est de nature calcaire. Le sable 0/3 est propre. La forme des gravillons est en générale cubique et le coefficient d'aplatissement conforme aux exigences des normes,

### III-3.5 Conclusion

Les granulats ont donc de bonnes caractéristiques pour être utilisés dans la fabrication des enrobés bitumineux.

## IV- BITUME MODIFIE

Notre travail dans ce chapitre consiste à étudier :

- L'influence de la modification sur la consistance de bitume
- L'influence de la durée de malaxage sur le bitume modifié.

### IV-1 La modification

Dans notre cas la modification a été réalisée au laboratoire de routes de la faculté de génie civil de l'USTHB. Nous avons adopté les paramètres de modification suivants :

- Un volume de bitume d'environ 500g.
- Une température du mélange de  $180 \pm 5^\circ\text{C}$ .
- Une vitesse de malaxage : 600 tr/min.
- Une durée de malaxage de 1, 2, 3 et 4heures.

Cette modification a été effectuée par des différents pourcentages de l'association (EVA-NBR), le tableau ci-dessous représenté les différentes mélanges de cette association :

Tableau 4.1- représentations des mélanges.

	Teneurs totales des modifiants (EVA+NBR)	% EVA	% NBR
Mélange 1 (M1)	2%	50%	50%
Mélange 2 (M2)	2%	25%	75%
Mélange 3 (M3)	5%	50%	50%
Mélange 4 (M4)	5%	25%	75%

#### IV-1.1 Mode opératoire de la modification

- Le bitume est chauffé dans le récipient sur la plaque chauffante jusqu'à atteindre une température comprise entre 175 et 185 °C, le récipient est équipé d'un couvercle hermétique pour empêcher l'évaporation des huiles lors du chauffage.

- A cette température, le polymère à la dose choisie est introduit et l'agitateur à hélice mis en marche à la vitesse de 600 tr/min.

- Durant toute la manipulation, la température doit être maintenue dans l'intervalle 175 et 185 °C en réglant la plaque chauffante, la vérification de la température s'effectue régulièrement à l'aide du thermomètre digital.

- A la fin de malaxage, l'agitateur est mis à l'arrêt puis soulevé avec le couvercle.

- 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.

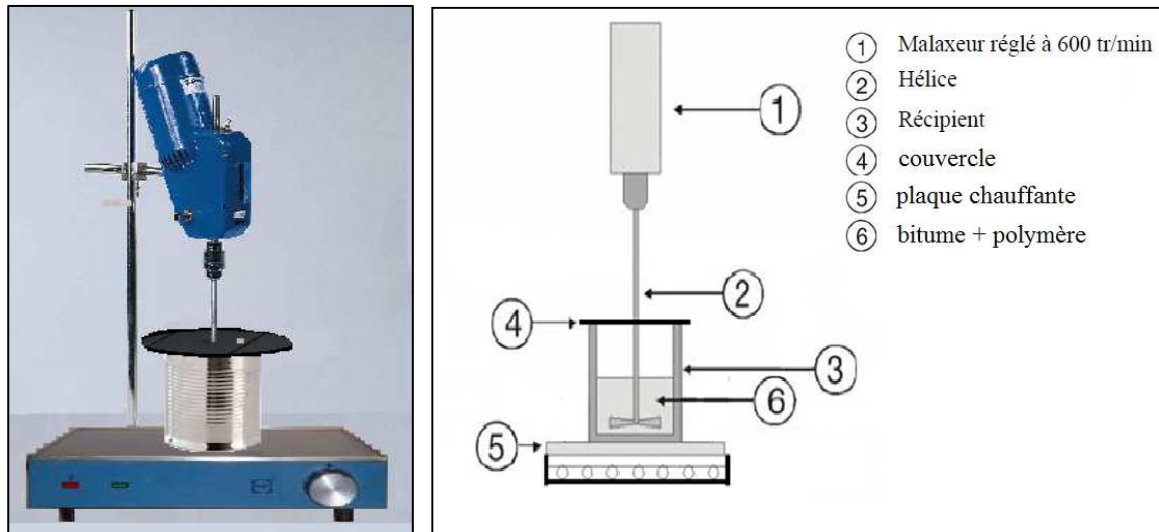


Fig 4.1 : Appareillage de modification.

## IV-2 Essais sur le bitume modifié

### IV-2.1 Essai de pénétrabilité

La pénétrabilité d'un liant bitumineux est la consistance (la propriété de ses diverses particules d'adhérer entre elles) exprimée comme la profondeur, en dixièmes de millimètres, correspondant à la pénétration d'une aiguille de référence dans un échantillon d'essai du matériau, dans des conditions prescrites de température, de charge et de durée d'application de la charge.

L'essai consiste à mesurer l'enfoncement d'une aiguille standard dans l'échantillon d'essai conditionné.

Les conditions opératoires s'appliquant aux pénétrations :

- Température fixée à 25 °C.
- Charge appliquée 100 g.
- Durée d'application de la charge fixée à 5 s.

Les figures 4.2 et 4.3 représentent respectivement le pénétromètre et le principe d'essai pénétrabilité.



Fig 4.2 : Pénétromètre.

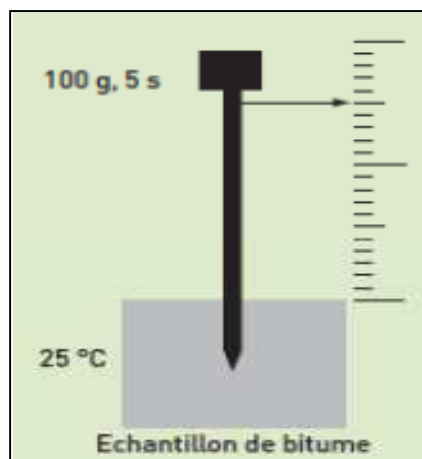


Fig 4.3 : Principe d'essai pénétrabilité.

Les résultats de la pénétrabilité pour les différents mélanges et pour chaque heure de malaxage sont présentés dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2 - Pénétrabilité à 25°C pour les différents mélanges.

Mélanges	Temps de malaxage			
	1h	2h	3h	4h
M0 (Bitume pur)	37	38	36,5	35
M1 (2% [50%EVA+50%NBR])	30,8	31,8	28	29
M2 (2% [25%EVA+75%NBR])	35,2	34,5	24,5	24
M3 (5% [50%EVA+50%NBR])	31,8	30,5	25	26
M4 (5% [25%EVA+75%NBR])	31,5	34,5	27	31,5

Les résultats de la variation de pénétrabilité des bitumes modifiés par rapport au bitume pur pour les différents mélanges et pour chaque heure de malaxage sont présentés dans le tableau 4.3.

La variation est calculée par la formule suivante :

$$\text{La variation de péné (\%)} = \frac{\text{péné (bitume pur)} - \text{péné (bitume modifié)}}{\text{péné (bitume pur)}} * 100$$

Tableau 4.3 - Variation de la pénétrabilité pour les différents mélanges.

Mélanges	Temps de malaxage			
	1h	2h	3h	4h
M1 (2% [50%EVA+50%NBR])	-16,76	-16,32	-23,29	-17,14
M2 (2% [25%EVA+75%NBR])	-4,86	-9,21	-32,88	-31,43
M3 (5% [50%EVA+50%NBR])	-14,05	-19,74	-31,51	-25,71
M4 (5% [25%EVA+75%NBR])	-14,86	-9,21	-26,03	-10,00

### IV-2-1.1 Influence de l'association (EVA-NBR) sur la pénétrabilité

Les figures 4.4 et 4.5 représentent la pénétrabilité à 25°C et sa variation pour les différents mélanges et pour chaque heure de malaxage.

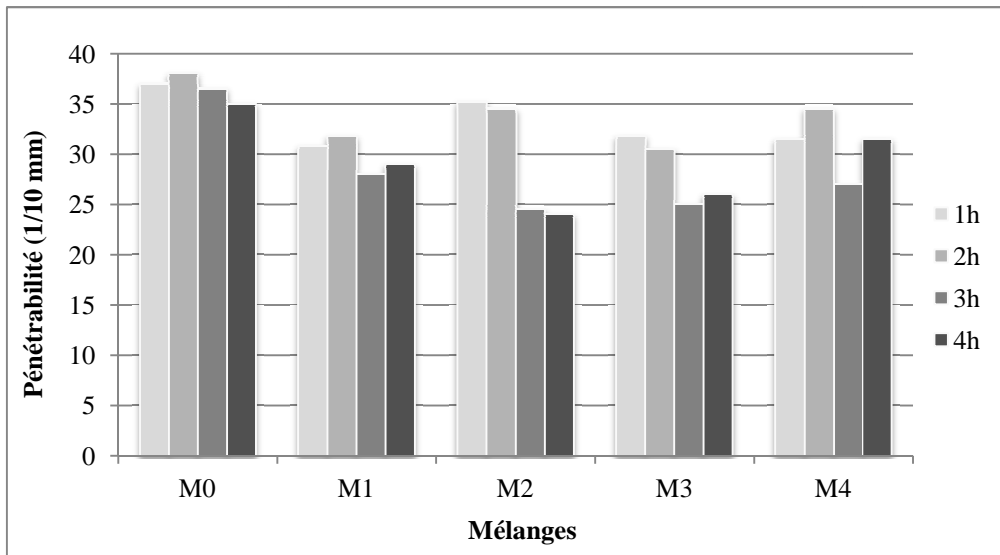


Fig 4.4 : La pénétrabilité pour les différents mélanges.

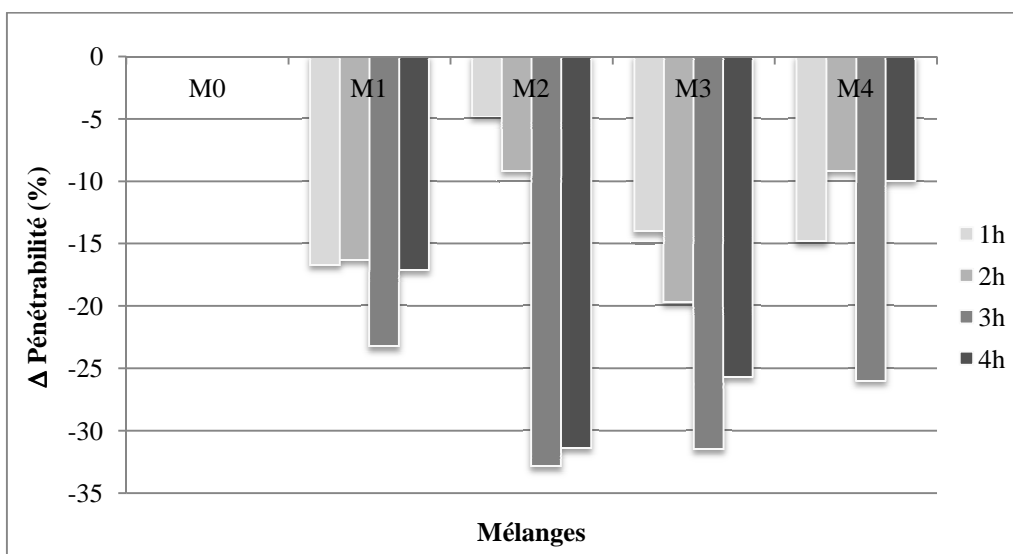


Fig 4.5 : Variation de la pénétrabilité pour les différents mélanges

On remarque que :

- la pénétrabilité de bitumes modifiés à différents mélanges est diminuée par rapport au bitume de référence pour toutes les durées de malaxage.
- la pénétrabilité est diminuée considérablement pour les mélanges M1 et M3 respectivement à 1h et 2h de malaxage.
- Le mélange M2 diminue la pénétrabilité à 3h et 4h de malaxage, (respectivement de 33 et 31% par rapport au bitume de référence)

### IV-2-1.2 Influence de temps de malaxage sur la pénétrabilité

Les figures 4.6 et 4.7 représentent la pénétrabilité à 25°C et sa variation en fonction de la durée de malaxage pour chaque mélange.

La pénétrabilité augmente entre 1 et 2 heures de malaxage pour certains mélanges et diminuée pour les autres, et elle est diminuée pour tous les mélanges entre 2h et 3h de malaxage, puis elle va se stabiliser entre 3h et 4h de malaxage et ceci presque pour tous les mélanges.

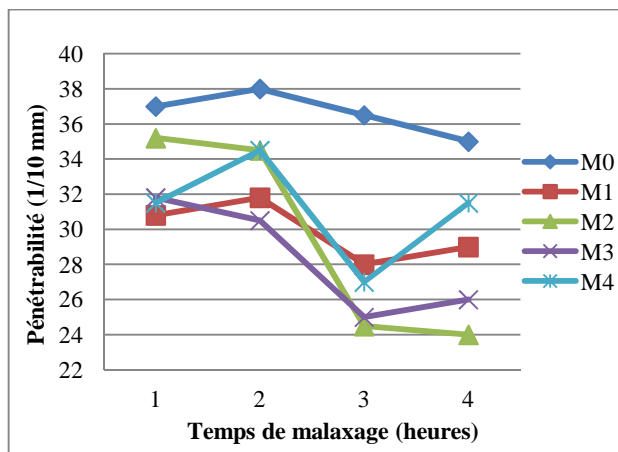


Fig 4.6 : Influence du temps de malaxage sur la pénétrabilité

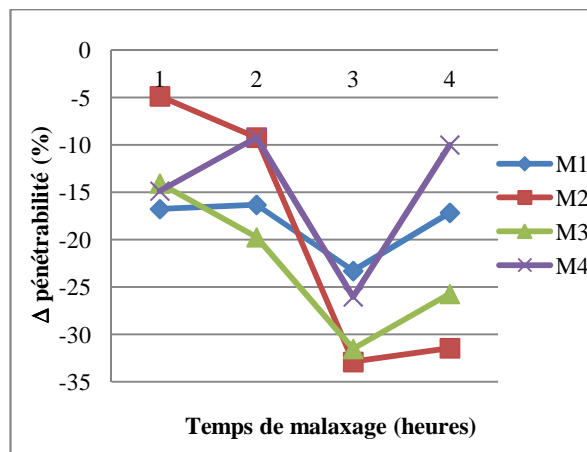


Fig 4.7 : Influence du temps de malaxage sur la variation de pénétrabilité

### IV-2.2 Essai de point de ramollissement (température bille anneau)

La température de ramollissement est celle à laquelle le matériau dans les conditions de référence de l'essai atteint une certaine consistance, c'est la température maximale à laquelle disparaît la cohésion du bitume.

Deux disques horizontaux de bitumes, moulés dans des anneaux de laiton à épaulement, sont chauffés dans un bain liquide avec un taux d'élévation de la température contrôlé (5 °C par minute), alors que chacun soutient une bille d'acier. La température de ramollissement notée doit correspondre à la moyenne des températures auxquelles les deux disques se ramollissent suffisamment pour permettre à chaque bille, enveloppée de bitume, de descendre d'une hauteur de 25 mm ± 0,4 mm.

Plus la température de ramollissement est élevée, plus le bitume est dur.

Les figures 4.8 et 4.9 représentent respectivement le matériel et le principe d'essai billes et anneaux.



Fig 4.8 : matériel pour essai billes et anneaux.

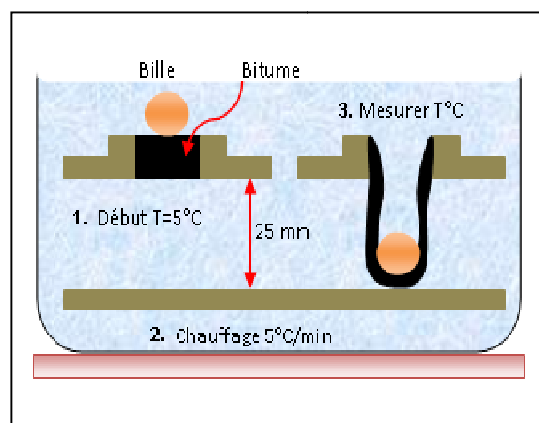


Fig 4.9 : Principe d'essai billes et anneaux.

Les résultats de la température bille et anneau pour les différents mélanges et pour chaque heure de malaxage sont présentés dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4 - TBA pour les différents mélanges.

Mélanges	Temps de malaxage			
	1h	2h	3h	4h
M0 (Bitume pur)	51	51,25	51,6	52
M1 (2% [50%EVA+50%NBR])	51,5	53,5	53,1	52
M2 (2% [25%EVA+75%NBR])	52	53	51	52,25
M3 (5% [50%EVA+50%NBR])	57,5	57	55,75	55,1
M4 (5% [25%EVA+75%NBR])	53,5	54	52,5	53,25

Les résultats de variation de la température bille et anneau des bitumes modifiés par rapport au bitume pur pour les différents mélanges et pour chaque heure de malaxage sont présentés dans le tableau 4.5.

Tableau 4.5 – Variation de TBA pour les différents mélanges.

Mélanges	Temps de malaxage			
	1h	2h	3h	4h
M1 (2% [50%EVA+50%NBR])	0,98	4,39	2,91	0,00
M2 (2% [25%EVA+75%NBR])	1,96	3,41	-1,16	0,48
M3 (5% [50%EVA+50%NBR])	12,75	11,22	8,04	5,96
M4 (5% [25%EVA+75%NBR])	4,90	5,37	1,74	2,40

### IV-2-2.1 Influence de l'association (EVA-NBR) sur la température bille anneau (TBA)

Les figures 4.10 et 4.11 représentent la température bille anneau (TBA) et sa variation pour les différents mélanges et pour chaque heure de malaxage.

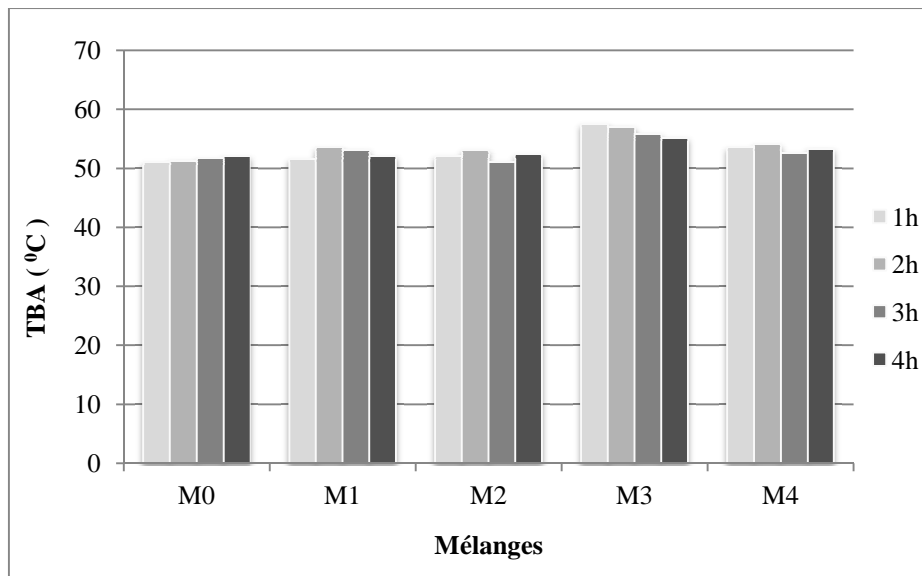


Fig 4.10 : TBA pour les différents mélanges.

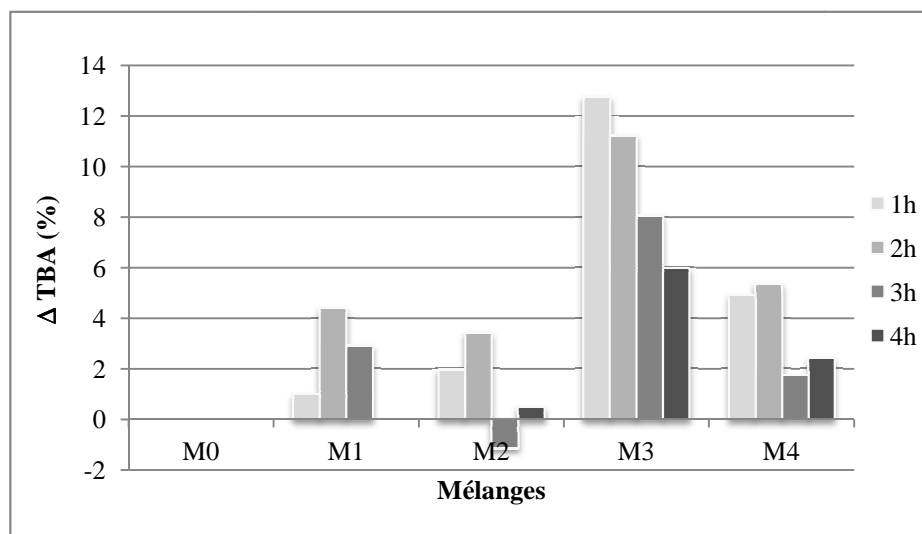


Fig 4.11 : Variation de TBA pour les différents mélanges.

On remarque que :

- Les différents mélanges augmentent la température bille anneau (TBA).
- Les TBA obtenues avec le mélange M3 sont les plus importantes.
- la teneur 5% (M3, M4) augmente la TBA mieux que celle de 2% (M1, M2).

**IV-2-2.2 Influence du temps de malaxage sur la température bille et anneau (TBA)**

Les figures 4.12 et 4.13 représentent la TBA et sa variation en fonction de la durée de malaxage pour chaque mélange.

La TBA augmente entre 1 et 2 heures de malaxage, et elle est diminuée entre 2h et 3h de malaxage pour tous les mélanges, et puis augmenter encore entre 3h et 4h de malaxage et ceci pour tous les mélanges sauf M1 et M3.

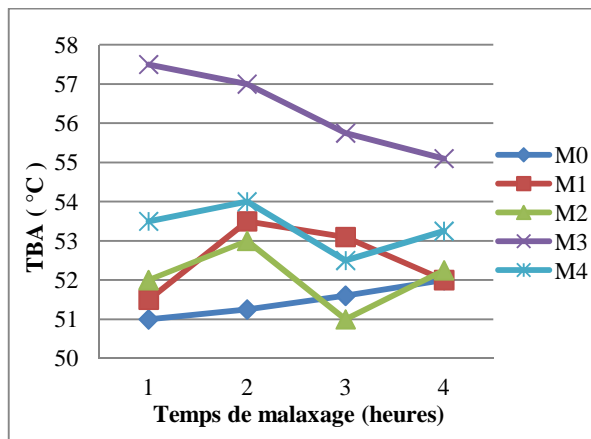


Fig 4.12 : Influence du temps de malaxage sur la TBA.

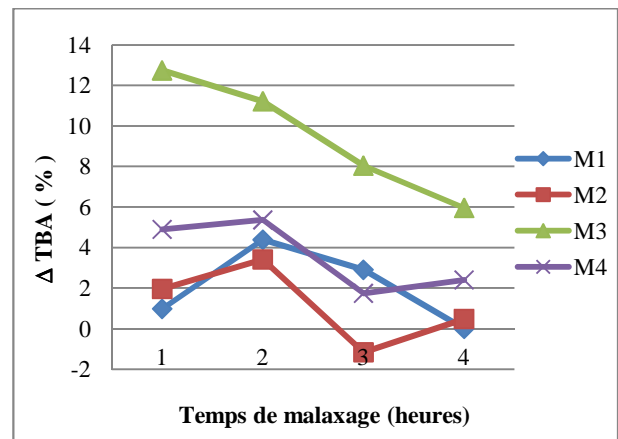


Fig 4.13 : Influence du temps de malaxage sur la variation de TBA.

**IV-2.3 Essai de ductilité**

Cet essai associé à celui de pénétrabilité donne une indication sur la nature du bitume. Il consiste à déterminer la distance à laquelle peut être étirée une briquette de bitume immergée dans un bain de 25 °C de température à une vitesse spécifiée de 50 mm/min et ceci au moment de la rupture du filament ainsi formé.

Les figures 4.14 et 4.15 représentent respectivement le ductilimètre et le principe d'essai ductilité.

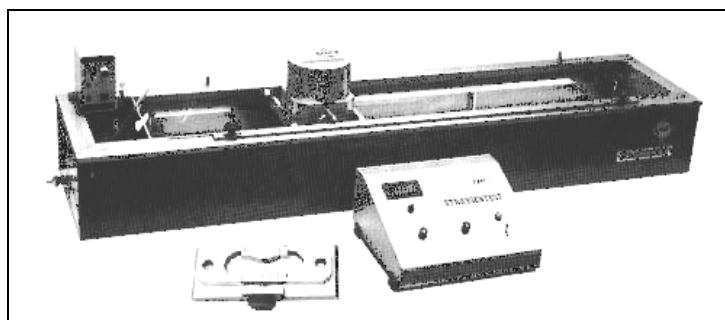


Fig 4.14 : Ductilimètre avec son moule.

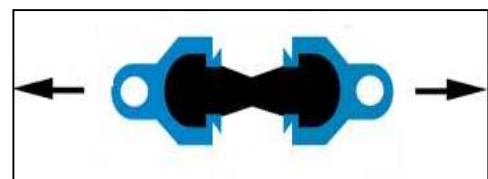


Fig 4.15 : Principe d'essai ductilité.

Les résultats de la ductilité pour les différents mélanges et pour chaque heure de malaxage sont présentés dans le tableau 4.6.

Tableau 4.6- Ductilité à 25°C pour les différents mélanges.

Mélanges	Temps de malaxage			
	1h	2h	3h	4h
M0 (Bitume pur)	107,3	111,6	114,3	120,3
M1 (2% [50%EVA+50%NBR])	45	36	38,25	41
M2 (2% [25%EVA+75%NBR])	36,5	36,5	39,75	32,5
M3 (5% [50%EVA+50%NBR])	19	18	23	24,3
M4 (5% [25%EVA+75%NBR])	18,5	20	21	23,25

Les résultats de variation de la ductilité des bitumes modifiés par rapport au bitume pur pour les différents mélanges et pour chaque heure de malaxage sont présentés dans le tableau 4.7.

Tableau 4.7- Variation de ductilité à 25°C pour les différents mélanges

Mélanges	Temps de malaxage			
	1h	2h	3h	4h
M1 (2% [50%EVA+50%NBR])	-58,06	-67,74	-66,54	-65,92
M2 (2% [25%EVA+75%NBR])	-65,98	-67,29	-65,22	-72,98
M3 (5% [50%EVA+50%NBR])	-82,29	-83,87	-79,88	-79,80
M4 (5% [25%EVA+75%NBR])	-82,76	-82,08	-81,63	-80,67

#### IV-2-3.1 Influence de l'association (EVA-NBR) sur la ductilité

Les figures 4.16 et 4.17 représentent la ductilité à 25°C et sa variation pour les différents mélanges et pour chaque heure de malaxage.

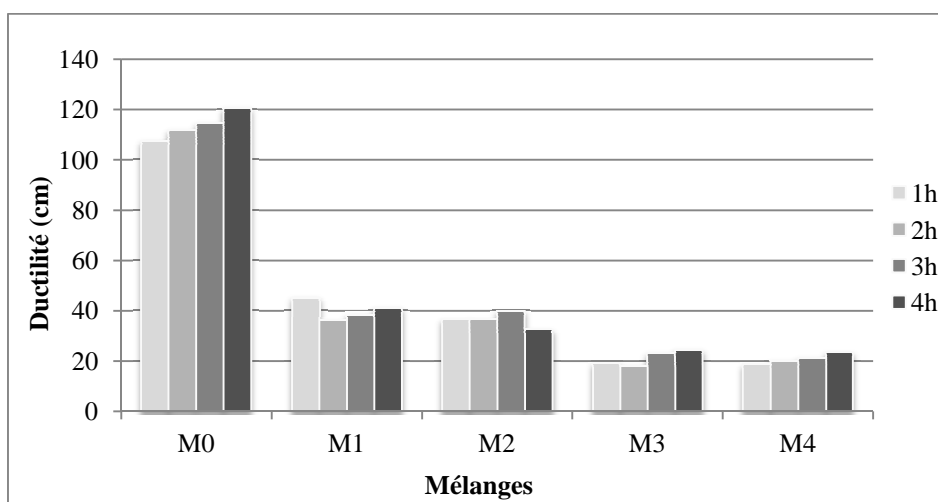


Fig 4.16 : La Ductilité pour les différents mélanges.

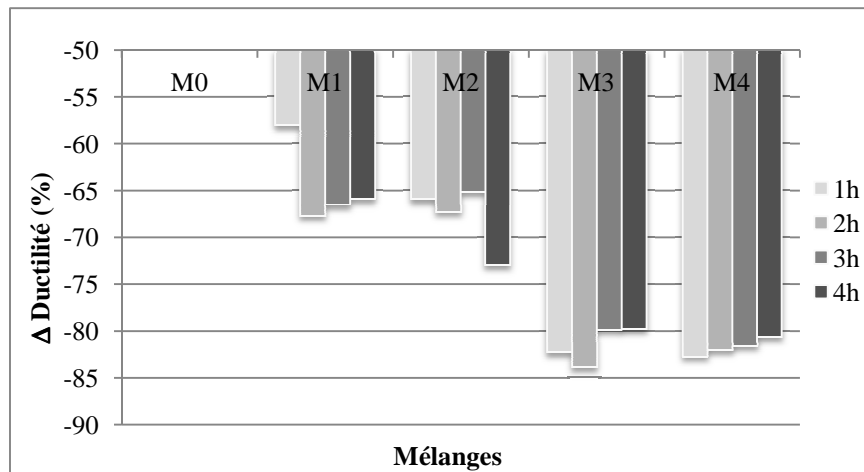


Fig 4.17 : Variation de la ductilité pour les différents mélanges.

On remarque que :

- La ductilité décroît pour les différents mélanges.
- la teneur 5% (M3, M4) diminue la ductilité mieux que celle de 2% (M1, M2)

#### IV-2-3.2 Influence du temps de malaxage sur la ductilité

Les figures 4.18 et 4.19 représentent la ductilité à 25°C et sa variation en fonction de la durée de malaxage pour chaque mélange. On remarque que la ductilité est quasi stable pour toutes les durées de malaxage.

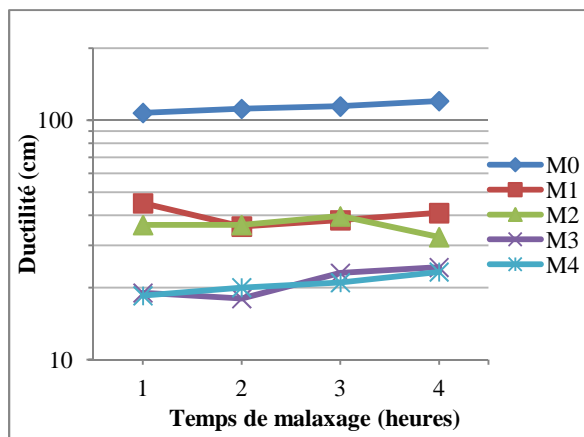


Fig 4.18 : Influence du temps de malaxage sur la ductilité.

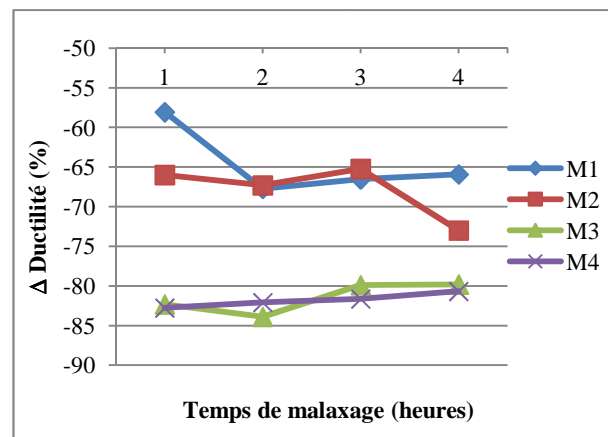


Fig 4.19 : Influence du temps de malaxage sur la variation de ductilité.

#### Conclusion :

- La modification du bitume par l'association EVA-NBR a amélioré les propriétés du bitume tel que la pénétrabilité, le point de ramollissement et la ductilité.
- Le mélange M3 augmente la consistance du bitume mieux que les autres associations.
- La consistance de bitume augmente avec l'augmentation de la durée de malaxage jusqu'à 3h de malaxage.

## V- ENROBÉS BITUMINEUX

Dans ce chapitre, nous exposant les essais mécaniques (Marshall, Traction indirecte) que nous avons effectué sur des éprouvettes en béton bitumineux préparées à base d'un bitume modifié par ajout de deux polymères associés (EVA et NBR). Et nous considérons l'impact de ce dernier sur les différentes caractéristiques mécaniques (résistance, fluage...) de l'enrobé bitumineux modifié.

### V-1 Etude de formulation de l'enrobé

Les mélanges hydrocarbonés sont constitués de deux matériaux :

- Les granulats qui constituent le squelette minéral ;
- Le bitume qui a pour but d'assurer la liaison entre ces derniers, confère aussi au mélange ses propriétés viscoélastiques.

Le travail consiste à établir :

- un mélange optimal des différents granulats qui s'insère dans un fuseau de référence appelé "fuseau de spécification"
- un dosage en liant qui peut envelopper toute la surface de mélange granulaire et qui résiste au phénomène de ressuage ou glaçage

#### V-1.1 Détermination de la courbe granulométrique du mélange

Pour déterminer la courbe optimal, plusieurs mélanges à différentes proportions ont été effectués pour la composition granulaires du BB0/14 et ce conformément aux fuseaux spécifiés.

La composition granulaire ainsi retenue est la suivante :

Fraction	Provenance	Pourcentages pondéraux
0/3	Hachimia	35 %
3/8		30 %
8/15		35 %

La figure 5.1 montre l'analyse granulométrique du mélange BB 0/14



Les résultats obtenus sont :

$MVR_g$	$\Sigma$	$\sqrt[5]{\Sigma}$	$\alpha$
2,598	11,743	1,637	1,020

Pour chaque module de richesse (k) on a trouvé un teneur en liant, le tableau 5.1 ci-après donne les valeurs obtenues.

Tableau 5.1 - Teneur en liant pour les différentes formules.

Formule	A	B	C	D
Module de richesse K	3.45	3.60	3.75	3.9
Teneur en Liant (%)	5,80	6,01	6.26	6.51

### V-1.3 Choix de la formule optimale

Les mélanges proposés notés A, B, C et D qui sont des variantes à différents dosages en liant ont été soumises à l'essai Marshall. La formule A (5,80%) donne les meilleurs résultats à la stabilité, fluage et quotient Marshall (Tableau 5.2).

Tableau 5.2 - Résultats de l'essai de Marshall du mélange étudié (formule A).

Caractéristiques Marshall	Temps de malaxage de bitume				Spécification
	1h	2h	3h	4h	
Stabilité (KN)	8,884	8,967	9,384	9,354	>8
Fluage (mm)	3,605	3,333	3,425	3,552	2-4
Densité apparente (kg/m <sup>3</sup> )	2329,7	2281,4	2295,4	2308,0	/
Compacité (%)	95,5	94,8	95,4	95,9	92-97
Vides résiduels (%)	4,5	5,2	4,6	4,1	/
Quotient Marshall (KN/mm)	2,494	2,696	2,744	2,650	/

La formulation finale est la suivante :

Tableau 5.3 - Pourcentages des Fractions choisies.

Fraction	Provenance	Pourcentages pondéraux
0/3	Hachimia	35 %
3/8		30 %
8/15		35 %
Liant 35/50	EGCR	5.80%

## V-2 Mode de fabrication des éprouvettes

La figure de 5.2 représente les étapes de fabrication des éprouvettes d'enrobés, chauffage, malaxage, moulage, compactage et démoulage.

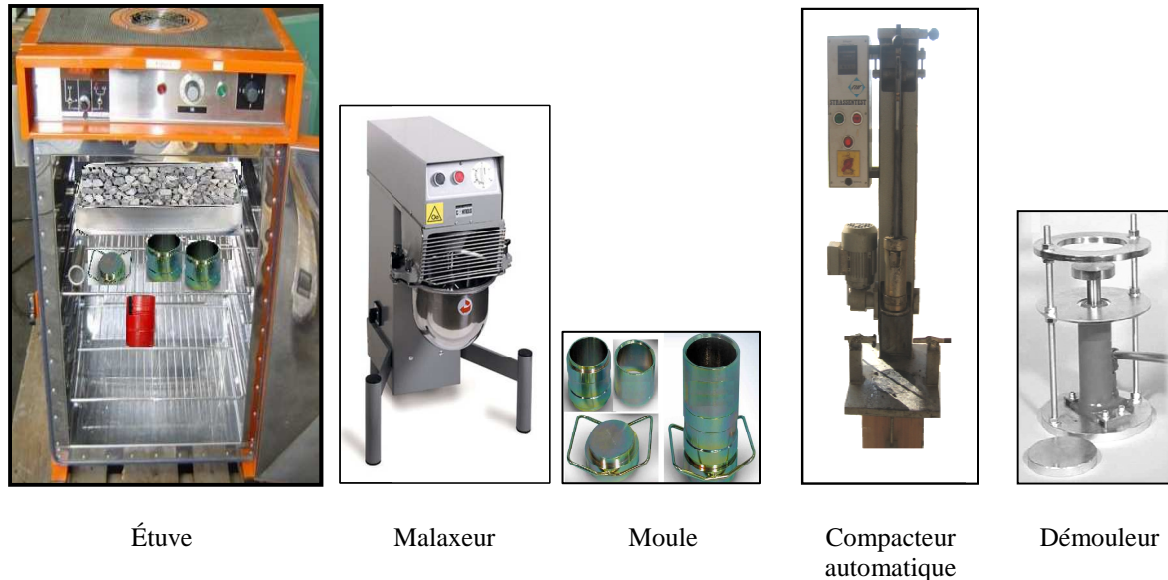


Fig 5.2 : Matériels utilisés pour fabrication des éprouvettes

Tous les matériels utilisés pour l'enrobage (moules, hausse, etc....) et les matériaux (granulats et bitume) sont chauffés à la température d'enrobage désirée (environ 160°C). Ensuite, les granulats sont pesés et homogénéisés (mélangés dans le malaxeur de quelques secondes), enfin on ajoute la quantité de bitume nécessaire et on malaxe l'ensemble jusqu'à obtenir une homogénéisation correcte, les différents poids sont déterminés à partir de la formulation visée.

On pèse des quantités de mélange, chaque quantité correspondant à une éprouvette, ces quantités sont placées dans l'étuve pendant quelques minutes avant le moulage, les éprouvette doivent être compactées (50 coups sur chaque face) dans une plage acceptable de température donnée.

Après le compactage les éprouvettes sont refroidies pendant 15 minutes sous un jet circulaire d'eau froide, maintenu de telle façon qu'il ne mouille pas l'enrobé, on le laisse ensuite une heure à température ambiante avant démoulage.

Après démoulage, les éprouvettes sont conservées vingt quatre heures à la température ambiante sans risque de déformation, puis sont soumises aux différents essais.

Avant de commencer à réaliser les essais, on pèse les éprouvettes, puis on les mesure au moyen d'un pied à coulisse (figure 5.3) à raison de 6 mesures pour la hauteur et 3 mesures pour le diamètre.

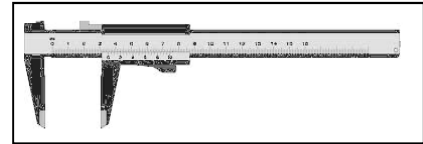


Fig 5.3 : Pied à coulisse

### V-3 Essais mécaniques sur l'enrobé

Les essais mécaniques (Marshall, Traction indirecte) sont appliqués sur des enrobés modifiés à base du bitume modifié par :

- L'association EVA-NBR avec des différents mélanges (M1, M2, M3 et M4) sont représentés dans le tableau 4.1.
- D'autres mélanges M5 [2% NBR] et M6 [5%EVA] sont représentés les optimums teneurs de l'EVA et le NBR (Haddadi et Saoudi [Had 2007, Sao 2008], Saoula et al [Sao 2009] ont trouvés que respectivement 2% NBR, 5% EVA sont les teneurs optimales).

#### V-3.1 Essai Marshall (à 30 minutes)

La figure 5.4 représente la presse d'écrasement avec un enregistreur effort-déformation. L'écrasement s'est effectué à la vitesse de 0,850 mm/s après avoir conservé séjourné les éprouvettes dans un bain marie porté à la température de 60°C pendant 30 minutes. Quatre (04) éprouvettes ont été testées dans chaque cas.

A l'issu de l'essai, nous avons mesuré la force maximale ainsi que le fluage correspondant. Avant l'essai nous avons déterminés les compacités et le volume des vides d'air des différentes éprouvettes.



Fig 5.4 : Presse d'écrasement avec un enregistreur.

### V-3.1.1 La compacité

L'obtention de bonnes performances mécaniques passe par l'optimisation de la compacité des enrobés bitumineux. Elle représente un paramètre de résistance à l'orniérage.

La compacité d'une éprouvette est donnée par la formule suivante :

$$C (\%) = \frac{MVA}{MVR} * 100$$

Avec :

MVA : masse volumique apparente de l'éprouvette.

MVR : masse volumique réelle (est égale 2,41 t/m<sup>3</sup> pour notre mélange)

Les résultats de compacité pour différents mélanges sont représentés dans le tableau suivant.

Tableau 5.4 - Compacité Marshall pour les différents mélanges.

Mélanges	Compacité (%)			
	1h	2h	3h	4h
M0 (bitume pur)	95,536	94,782	95,364	95,889
M1 (2% [50%EVA+50%NBR])	96,414	96,995	96,829	96,473
M2 (2% [25%EVA+75%NBR])	96,567	96,694	96,489	96,810
M3 (5% [50%EVA+50%NBR])	96,758	96,825	96,507	96,654
M4 (5% [25%EVA+75%NBR])	96,804	95,938	96,762	96,712
M5 (2% NBR)	96,773	95,937	96,867	96,756
M6 (5% EVA)	96,678	95,873	96,702	96,690

Les résultats du tableau 5.4 sont illustrés dans la figure 5.5.

On remarque que la compacité Marshall augmente pour les différents mélanges.

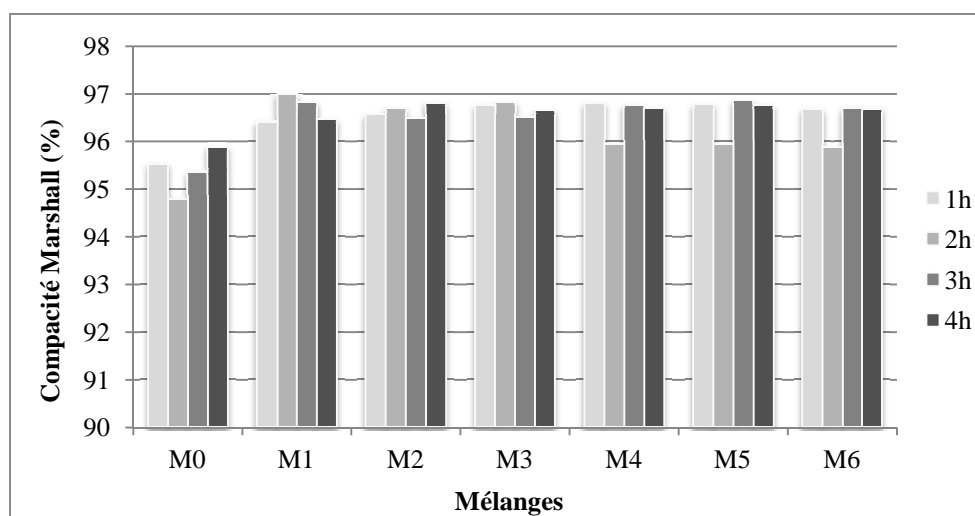


Fig 5.5 : Compacités Marshall pour les différents mélanges

### V-3.1.2 Stabilité Marshall (SM)

C'est la résistance maximale de l'éprouvette à la déformation en (KN), les résultats de la stabilité pour les différents mélanges sont représentés dans le Tableau 5.5.

Tableau 5.5 - Stabilité Marshall pour les différents mélanges.

Mélanges	SM (KN)			
	1h	2h	3h	4h
M0 (bitume pur)	8,884	8,967	9,384	9,354
M1 (2% [50%EVA+50%NBR])	9,673	9,979	9,691	9,616
M2 (2% [25%EVA+75%NBR])	9,693	10,015	10,434	10,355
M3 (5% [50%EVA+50%NBR])	9,973	9,674	10,236	9,678
M4 (5% [25%EVA+75%NBR])	9,669	9,908	10,124	10,252
M5 (2% NBR)	9,083	9,465	9,201	9,159
M6 (5% EVA)	10,080	10,174	10,100	10,079

#### a) Influence des différents mélanges sur la stabilité Marshall

Les figures 5.6 et 5.7 représentent la stabilité Marshall et sa variation pour les différents mélanges et pour chaque heure de malaxage.

- Le mélange M6 [5%EVA] a donné les meilleures stabilités pour 1 et 2 heures de malaxage (augmentation de stabilité jusqu'à 13,5% par rapport l'enrobé pur M0).
- Le mélange M5 [2% NBR] a donné de faibles stabilités surtout pour 3 et 4 heures de malaxage.
- Les associations EVA-NBR donnent en général des bonnes stabilités, le mélange M2 a donné les meilleures stabilités pour 2, 3 et 4 heures de malaxage (environ 11% d'augmentation), le mélange M3 a augmenté la stabilité à 12% pour 1 heure de malaxage.

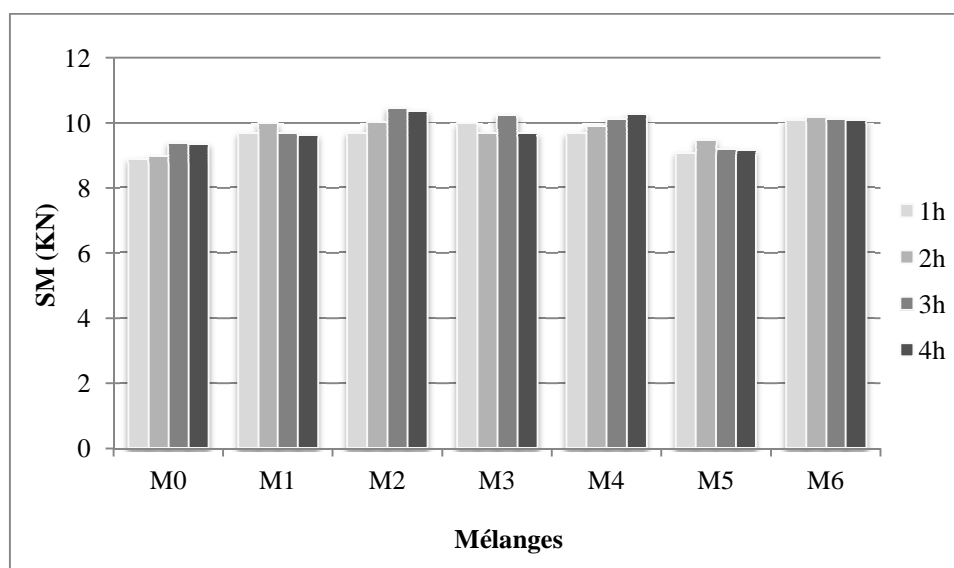


Fig 5.6 : Stabilité Marshall pour les différents mélanges.

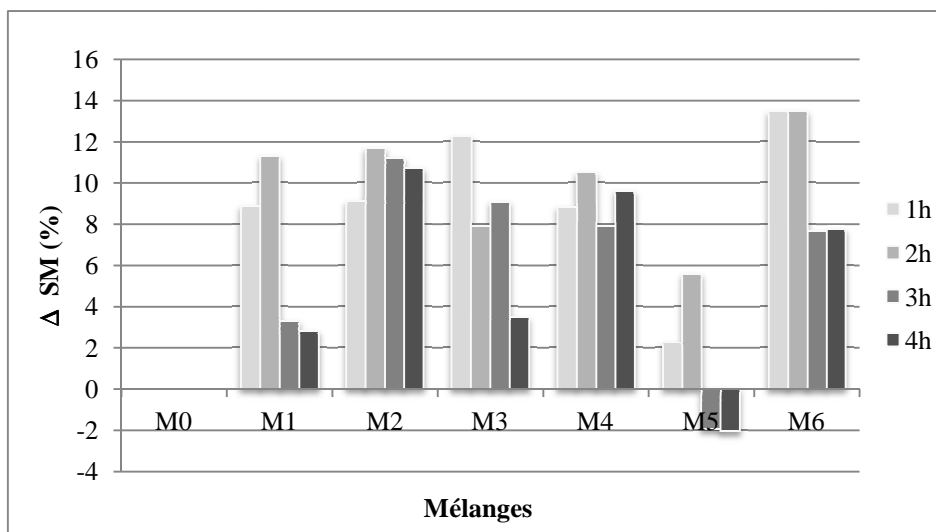


Fig 5.7 : Variation de la stabilité Marshall pour les différents mélanges.

**b) Influence du temps de malaxage sur la stabilité Marshall**

Les figures 5.8 et 5.9 représentent la stabilité Marshall et sa variation en fonction de la durée de malaxage pour chaque mélange.

La stabilité Marshall augmente entre 1 et 2 heures de malaxage pour tous les mélanges, et elle est augmenté pour certains mélanges et diminué pour les autres entre 2h et 3h de malaxage, puis elle va se stabiliser entre 3h et 4h de malaxage.

La meilleure stabilité est trouvée pour 3h de malaxage.

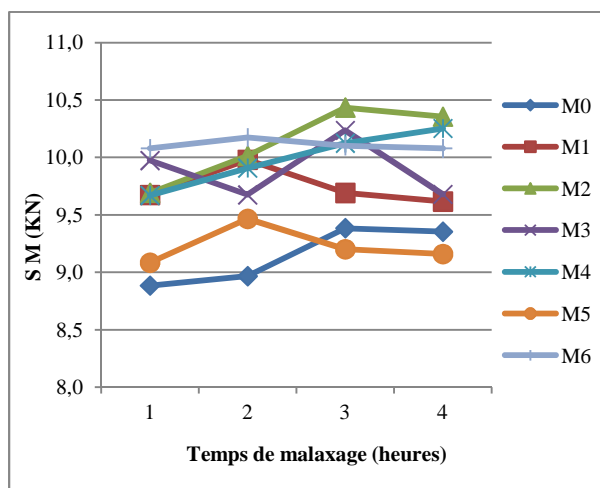


Fig 5.8 : Influence du temps de malaxage sur la stabilité Marshall.

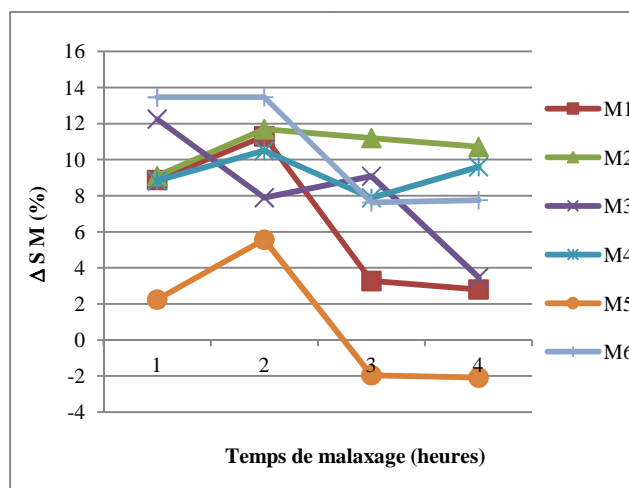


Fig 5.9 : Influence du temps de malaxage sur la variation de stabilité Marshall.

### V-3.1.3 Fluage Marshall (FM)

C'est la valeur d'affaissement de l'éprouvette selon son diamètre vertical au moment de la rupture en (mm), les résultats du fluage pour les différents mélanges sont représentés dans le tableau 5.6.

Tableau 5.6 - Fluage Marshall pour les différents mélanges.

Mélanges	FM (mm)			
	1h	2h	3h	4h
M0 (bitume pur)	3,605	3,333	3,425	3,552
M1 (2% [50%EVA+50%NBR])	3,867	3,692	3,581	3,665
M2 (2% [25%EVA+75%NBR])	3,709	3,370	3,386	3,955
M3 (5% [50%EVA+50%NBR])	3,732	3,386	3,382	3,415
M4 (5% [25%EVA+75%NBR])	3,428	3,640	3,624	3,429
M5 (2% NBR)	3,296	3,315	3,175	3,259
M6 (5% EVA)	3,248	3,077	3,031	3,143

#### a) Influence des différents mélanges sur le fluage Marshall

Les figures 5.10 et 5.11 représentent le fluage Marshall et sa variation pour les différents mélanges et pour chaque heure de malaxage.

- Le mélange M6 [5%EVA] a donné les meilleurs résultats au fluage Marshall pour tous les durées de malaxage (diminution de fluage jusqu'à 11,5% pour 3 et 4 heures de malaxage et entre 7 et 10% pour 1 et 2 heures de malaxage).
- Le mélange M5 [2% NBR] a diminué le fluage d'environ 8% pour toutes les durées de malaxage sauf pour 2 heures de malaxage.
- Les associations EVA-NBR n'ont pas en général amélioré le fluage Marshall (augmentation du fluage), sauf par les mélanges M4 pour 1 et 4 heures de malaxage, M3 pour 3 et 4 heures de malaxage et M2 pour 3 heures de malaxage mais dans des proportions négligeables.

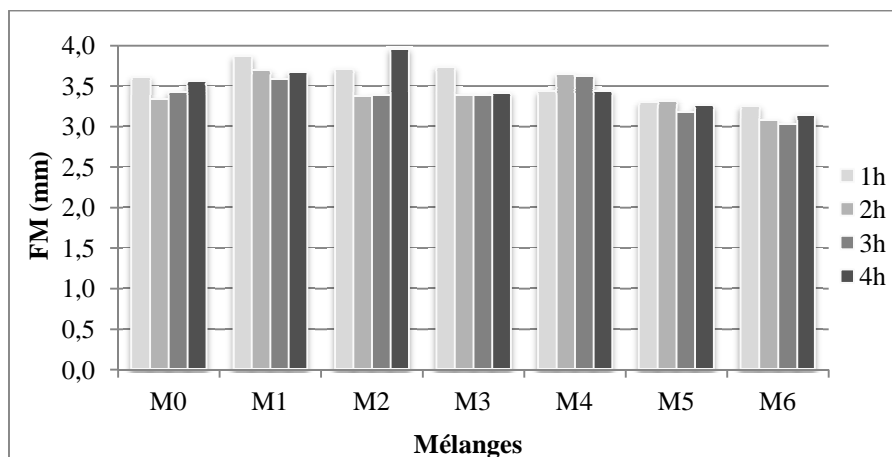


Fig 5.10 : Fluage Marshall pour les différents mélanges.

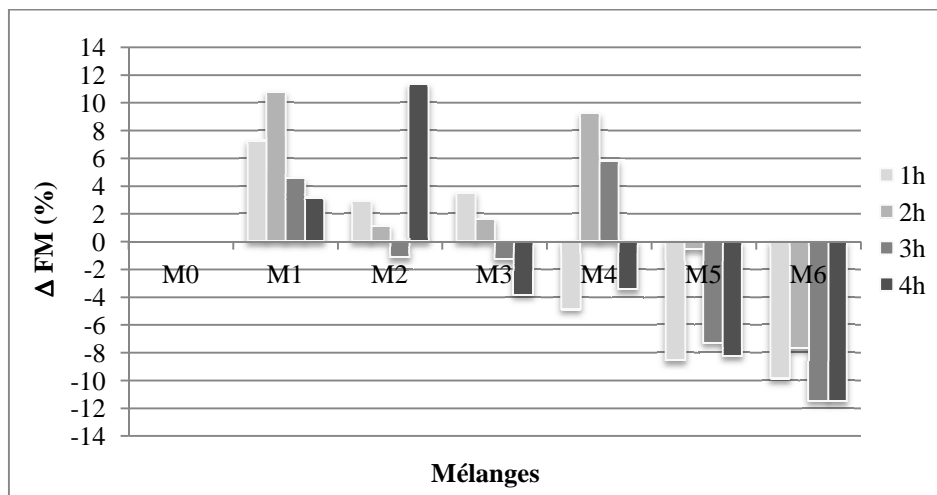


Fig 5.11 : Variation du fluage Marshall pour les différents mélanges.

**b) Influence du temps de malaxage sur le fluage Marshall**

Les figures 5.12 et 5.13 représentent le fluage Marshall et son variation en fonction de la durée de malaxage pour chaque mélange.

Le fluage Marshall décroît avec l’augmentation de la durée de malaxage entre 1h et 3h et ceci presque pour tous les mélanges, et augmenter entre 3h et 4h de malaxage.

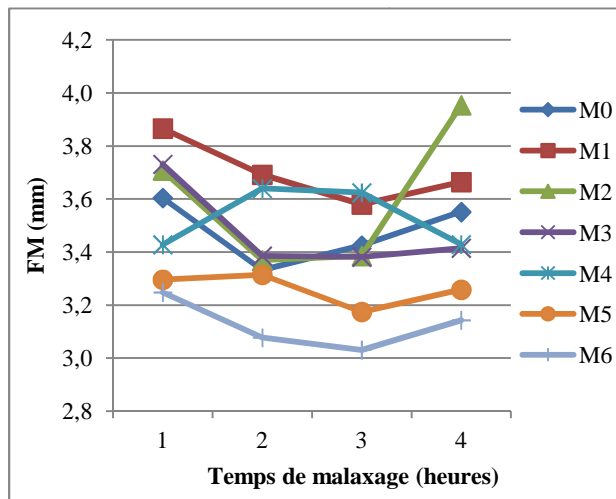


Fig 5.12 : Influence du temps de malaxage sur le fluage Marshall.

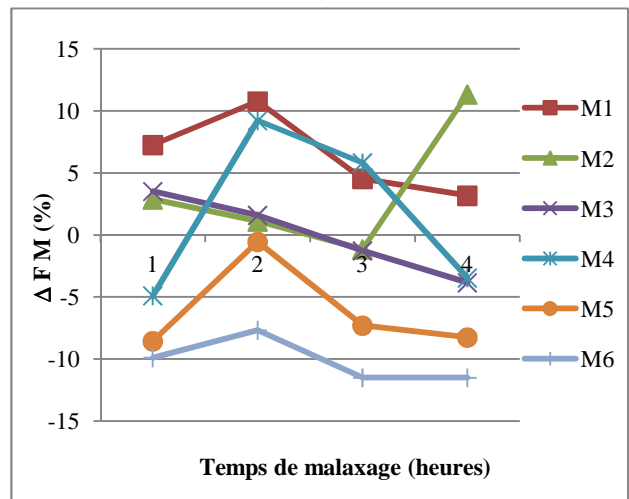


Fig 5.13 : Influence du temps de malaxage sur la variation de fluage Marshall.

### V-3.1.4 Quotient Marshall (QM)

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

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

$$Q M = \frac{S M}{F M}$$

Avec :

QM : Quotient Marshall,

SM : Stabilité Marshall,

FM : Déformation Marshall.

Les résultats du quotient Marshall pour les différents mélanges sont représentés dans le tableau 5.7.

Tableau 5.7 - Quotient Marshall pour les différents mélanges.

Mélanges	QM (KN/mm)			
	1h	2h	3h	4h
M0 (bitume pur)	2,494	2,696	2,744	2,650
M1 (2% [50%EVA+50%NBR])	2,557	2,711	2,726	2,646
M2 (2% [25%EVA+75%NBR])	2,618	2,975	3,097	2,632
M3 (5% [50%EVA+50%NBR])	2,674	2,876	3,035	2,841
M4 (5% [25%EVA+75%NBR])	2,829	2,732	2,812	3,054
M5 (2% NBR)	2,766	2,859	2,899	2,813
M6 (5% EVA)	3,108	3,374	3,335	3,213

#### a) Influence des différents mélanges sur le quotient Marshall

Les figures 5.14 et 5.15 représentent le quotient Marshall et sa variation pour les différents mélanges et pour chaque heure de malaxage.

- Le mélange M6 [5% EVA] a donné les meilleurs quotients Marshall pour toutes les durées de malaxage (augmentation du quotient entre 21 et 25% par rapport l'enrobé pur).
- Le mélange M5 [2% NBR] a augmenté le quotient Marshall entre 6 et 11%.
- Les associations EVA-NBR augmentent en général le quotient Marshall sauf le mélange M1 ; le mélange M2 a donné une augmentation de quotient entre 10 et 13% pour 2 et 3 heures de malaxage, M4 a donné une augmentation entre 13 et 15% pour 1 et 4 heures de malaxage, et M3 a donné une augmentation entre 7 et 11% pour toutes les heures de malaxage.

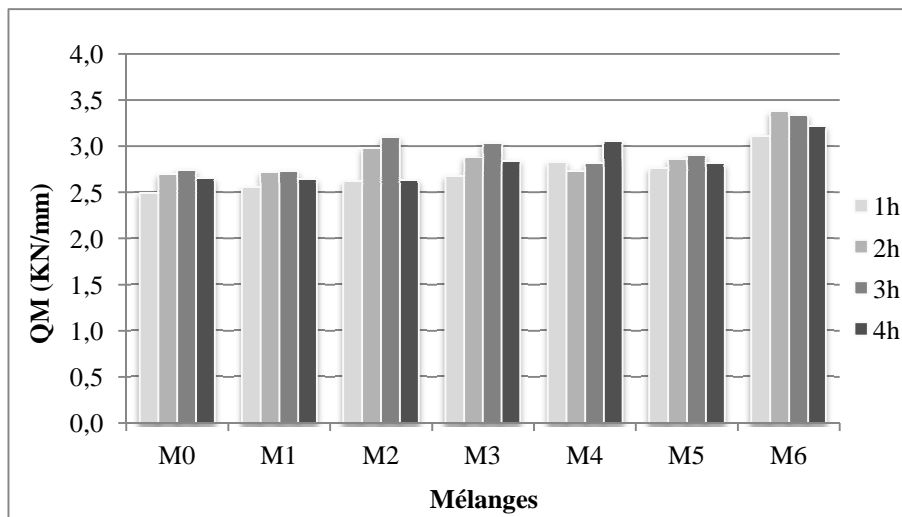


Fig 5.14 : Quotient Marshall pour les différents mélanges

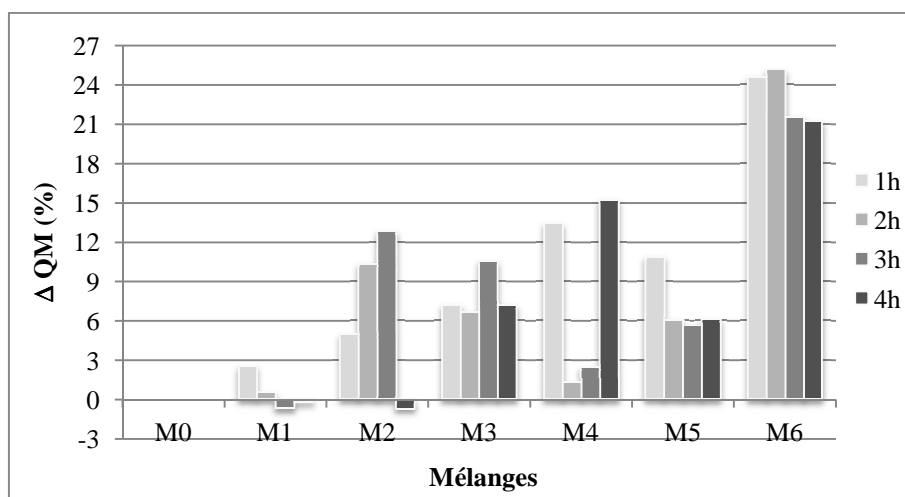


Fig 5.15 : Variation du quotient Marshall pour les différents mélanges.

Ces résultats sont en concordance avec ceux de plusieurs auteurs tels que :

Haddadi [Had 2007], Saoula et al [Sao 2009], Sangita et al [San 2011], M. Attaelmanan et al [Att 2011], qui ont trouvé que la modification de l'enrobé par des différents polymères a amélioré les caractéristiques Marshall (Stabilité, Fluage, Quotient). (Voir le chapitre II)

#### b) Influence du temps de malaxage sur le quotient Marshall

Les figures 5.16 et 5.17 représentent le quotient Marshall et son variation en fonction de la durée de malaxage pour chaque mélange.

Le quotient Marshall augmente avec l'augmentation de la durée de malaxage entre 1h et 3h et ceci presque pour tous les mélanges, et diminue entre 3h et 4h de malaxage.

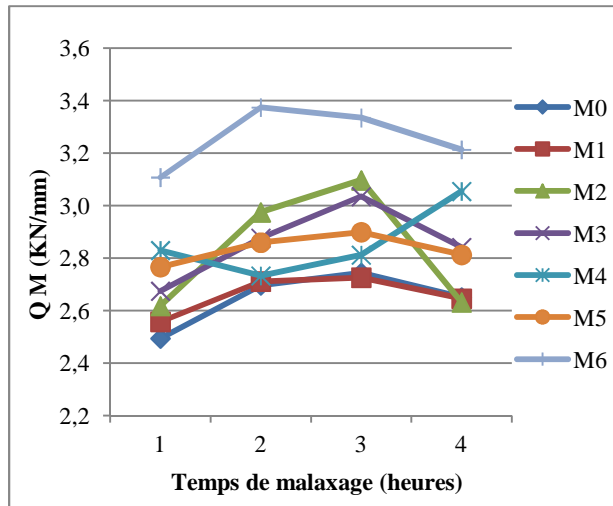


Fig 5.16 : Influence du temps de malaxage sur le quotient Marshall

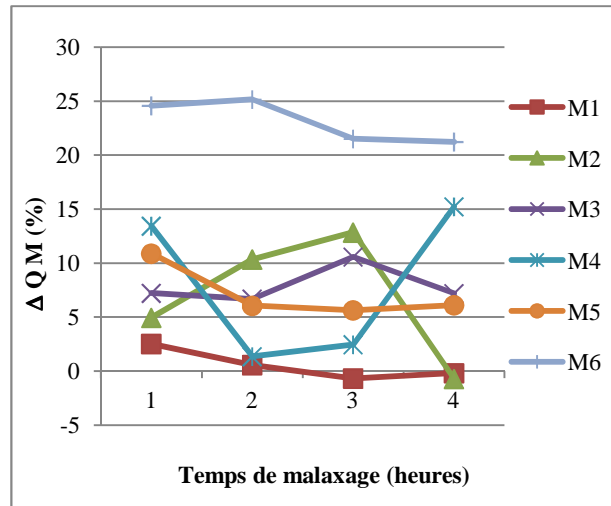


Fig 5.17 : Influence du temps de malaxage sur la variation de quotient Marshall

### V-3.2 Essai traction indirecte

L'essai de traction indirecte (fendage) permet de déterminer la résistance à la traction indirecte (ITS) d'éprouvettes cylindriques sous chargement diamétral jusqu'à rupture, à une température d'essai spécifiée et à une vitesse de déplacement spécifiée de la presse d'essai.

Le mode opératoire est décrit comme suit :

Aligner l'éprouvette entre les bandes de chargement (figure 5.18) et exerce une compression (charge diamétrale) avec la presse (figure 5.4), après avoir conservé les éprouvettes dans un bain thermostatique pendant 2 heures avec la protection d'éprouvette de tout contact avec l'eau en l'enveloppant dans un sac en matière plastique souple pour assurer une bonne transmission thermique.

A l'issu de l'essai, nous avons enregistré la force maximale (P) ainsi que la déformation correspondante.

On adopte les conditions d'essais suivants :

- L'écrasement s'est effectué à la vitesse de 0,85 mm/s
- Les températures d'essai sont : 20°C et 40°C
- Quatre (04) éprouvettes ont été testées dans chaque cas.

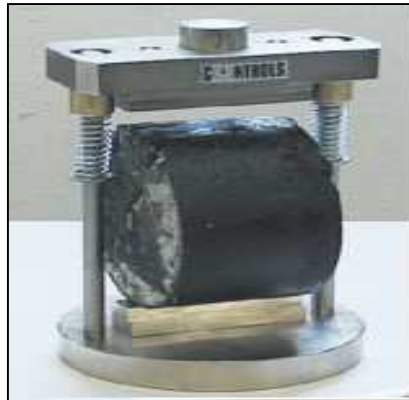


Fig 5.18 : Moule de la traction indirecte.

Le tableau 5.8 ci dessous représente les résultats de la traction indirecte aux les températures (20°C et 40°C) pour les différents mélanges.

Tableau 5.8 – Charges maximales et déformations à la rupture par la traction indirecte pour les différents mélanges.

Mélanges	P (KN)		Déformation (mm)	
	20°C	40°C	20°C	40°C
M0 (bitume pur)	15,177	3,138	1,751	1,276
M1 (2% [50%EVA+50%NBR])	16,611	3,524	1,698	1,238
M2 (2% [25%EVA+75%NBR])	17,974	4,087	1,517	1,266
M3 (5% [50%EVA+50%NBR])	18,103	4,982	1,637	1,425
M4 (5% [25%EVA+75%NBR])	16,997	4,153	1,593	1,291
M5 (2% NBR)	17,012	3,968	1,674	1,526
M6 (5% EVA)	19,595	5,316	1,700	1,580

Les résultats du tableau 5.8 sont illustrés dans les figures de 5.19 à 5.22.

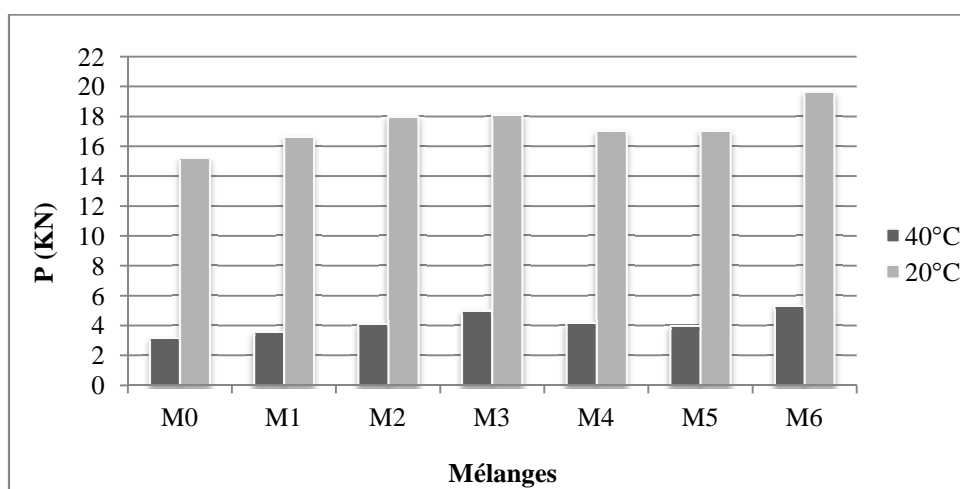


Fig 5.19 : Charge maximale à la traction indirecte pour les différents mélanges.

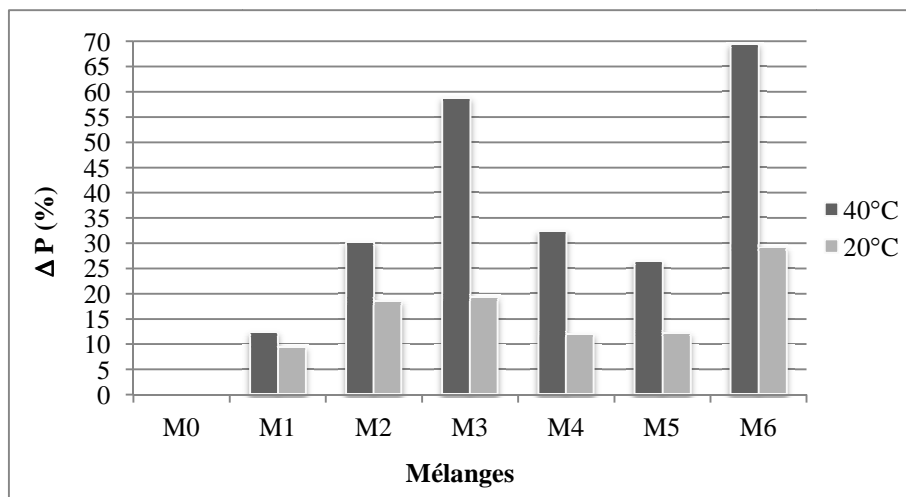


Fig 5.20 : Variation de la charge maximale à la traction indirecte pour les différents mélanges.

On remarque que :

- Les enrobés bitumineux testés à 20°C donnent des bonnes stabilités (supporter des charges entre 15 et 20 KN avant la rupture), au contraire les enrobés testés à 40°C supportent des charges maximales entre 3 et 6 KN seulement avant la rupture.
- Les différents mélanges augmentent la stabilité, et les meilleurs résultats sont obtenus avec le mélange M6, le mélange M3 a aussi donné des bonnes stabilités, et ceci pour les deux températures d'essai 20°C et 40°C.

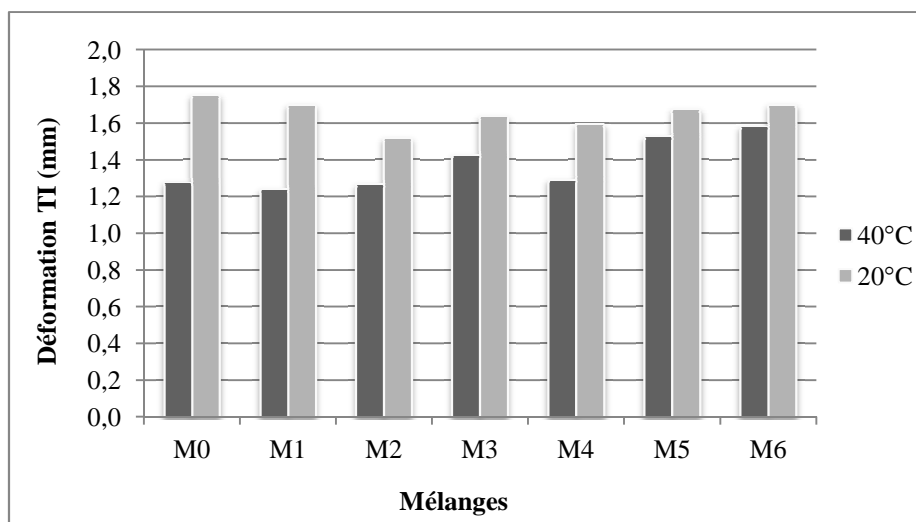


Fig 5.21 : Déformation à la traction indirecte pour les différents mélanges.

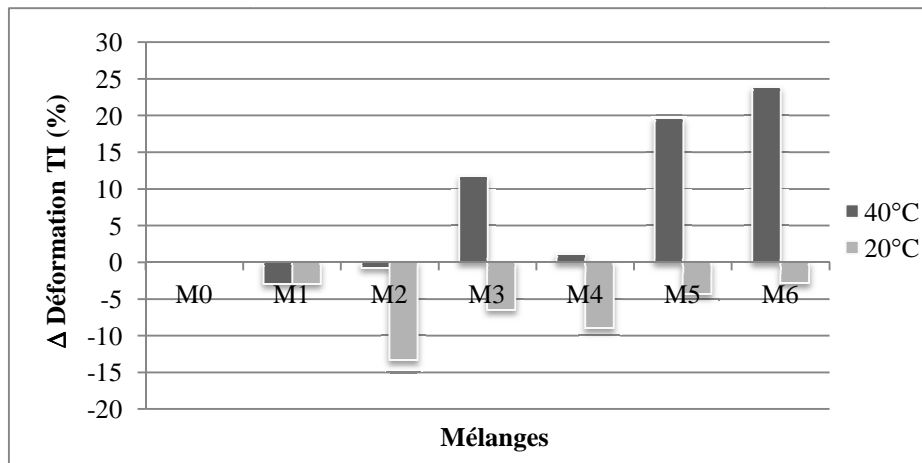


Fig 5.22 : Variation de la déformation à la traction indirecte pour les différents mélanges.

On remarque que :

Pour 20°C : les différents mélanges diminuent la déformation, et le meilleur résultat est obtenu avec le mélange M2 (plus de 13%).

Pour 40°C : les différents mélanges donnent de mauvais résultats à la déformation (augmentent la déformation) sauf les mélanges M1 et M2 qui diminuent un peu la déformation (moins de 3%).

### V-3.2.1 La résistance à la traction indirecte

Le tableau 5.9 représente la résistance à la traction indirecte ITS pour les différents mélanges et pour chaque température d'essai, il calcule selon la formule suivante :

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

Avec :

P : est la charge maximale (KN) ;

D : est le diamètre de l'éprouvette (mm) ;

H : est la hauteur de l'éprouvette (mm).

Tableau 5.9 - Résistance à la traction indirecte (ITS) pour les différents mélanges.

Mélanges	ITS (MPa)	
	20°C	40°C
M0 (bitume pur)	1,491	0,307
M1 (2% [50%EVA+50%NBR])	1,636	0,340
M2 (2% [25%EVA+75%NBR])	1,770	0,399
M3 (5% [50%EVA+50%NBR])	1,783	0,485
M4 (5% [25%EVA+75%NBR])	1,668	0,403
M5 (2% NBR)	1,666	0,382
M6 (5% EVA)	1,927	0,520

Les figures 5.23 et 5.24 représentent la résistance à la traction indirecte ITS et sa variation pour les différents mélanges et pour chaque température d'essai.

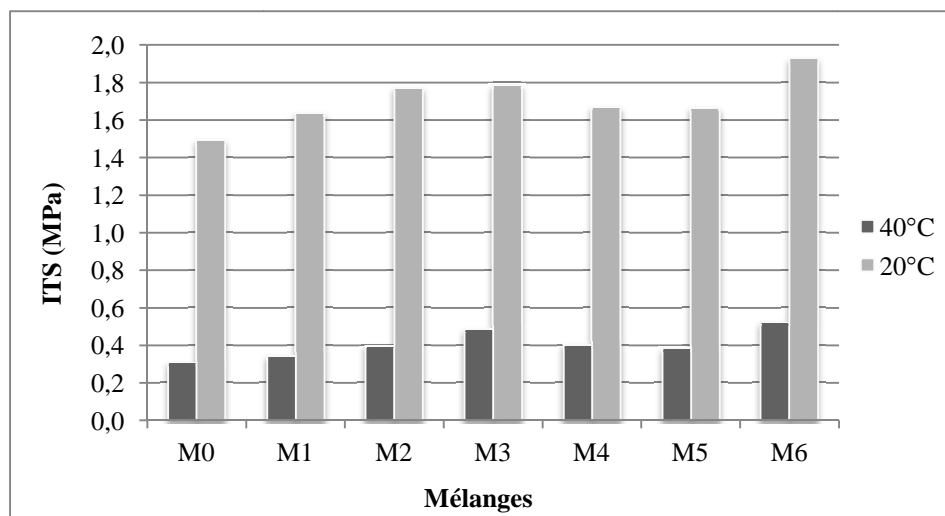


Fig 5.23 : Résistance à la traction indirecte pour les différents mélanges.

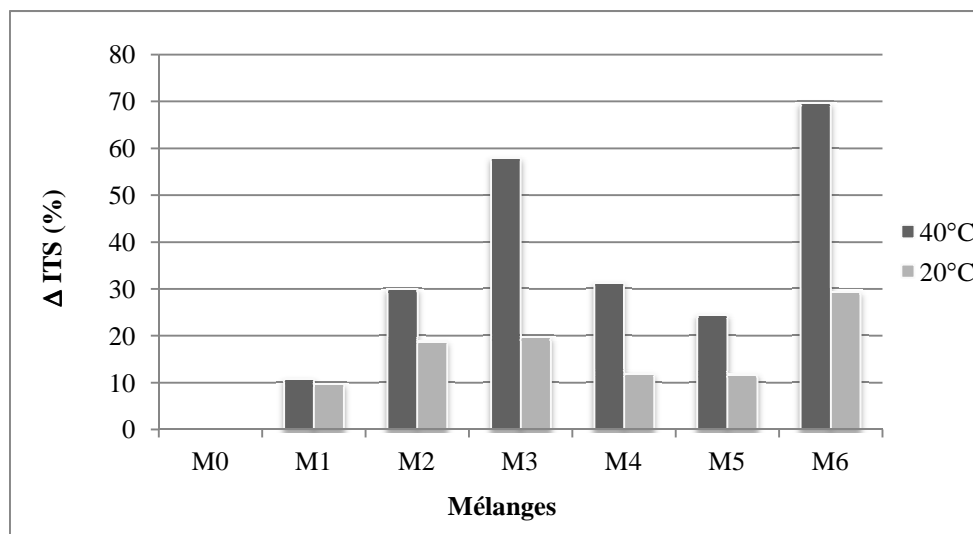


Fig 5.24 : Variation de la résistance à la traction indirecte pour les différents mélanges.

On remarque que :

- Les enrobés bitumineux testés à 20°C donnent des bonnes résistances à la traction indirecte (entre 1,5 et 1,9MPa), au contraire les enrobés testés à 40°C qui donnent de faibles résistances (entre 0,3 et 0,5MPa).
- Le mélange M6 [5%EVA] donné les meilleures résistances à la traction indirecte (augmentation de ITS jusqu'à 70% à la température 40°C, et 30% à la température 20°C).
- Le mélange M5 [2% NBR] améliore la résistance en moyenne pourcentage.

- Les associations EVA-NBR améliorent les résistances à la traction indirecte, le mélange M3 est le meilleur parmi les autres associations (augmenter la résistance jusqu'à 58% à 40°C et 20% à 20°C).

Ces résultats d'ITS sont bons par rapport à celles obtenues par autres chercheurs, comme :

- Gorkem et Sengoz [Gor 2009], qui ont utilisés deux polymères SBS et EVA, et ont trouvés des valeurs d'ITS entre 1,7 et 1,9 MPa pour 5% SBS, et entre 1,42 et 1,55 MPa pour 5% EVA, et une augmentation d'ITS par rapport l'enrobé témoin entre 32% et 50%, et entre 28% et 34%, respectivement.
- Sangita et al [San 2011] qui ont utilisés comme modifiant un mélange de caoutchouc nitrile broyé et les déchets de polyéthylène (WPM), et ont trouvés d'ITS de 6,5 kg/cm<sup>2</sup> pour le mélange conventionnel et 11,92 kg/cm<sup>2</sup> pour le mélange modifié à 8% WPM.
- M. Attaelmanan et al [Att 2011] ont utilisés comme polymère le polyéthylène haut densité (HDPE), et ont trouvés : ITS = 1,4 MPa à 5% HDPE et 16 % d'augmentation par rapport l'enrobé témoin.

Pour plus de détails voir le chapitre II.

### V-3.2.2 Type de rupture

Les types de rupture d'éprouvette soumise à la traction indirecte sont classés en trois types :

- a) Rupture en traction nette : éprouvette cassée nette sur une ligne diamétrale, à l'exception peut-être de petites sections triangulaires à proximité des bandes de chargement.
- b) Déformation : éprouvette sans ligne de rupture clairement visible.
- c) Mixte : éprouvette présente une ligne de rupture limitée et des zones de déformation plus importantes à proximité des bandes de chargement.

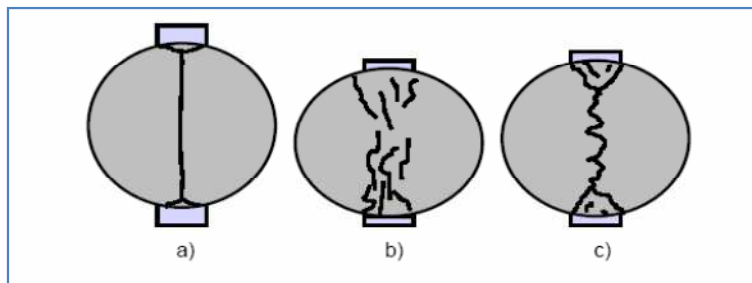


Fig 5.25 : Types de rupture.

La figure 5.26 présente des exemples sur le plan de rupture de quelques éprouvettes soumises à la traction indirecte aux températures 20°C et 40°C.



Fig 5.26 : Plan de rupture de quelques éprouvettes après la traction indirecte.

Pour notre cas le type de rupture est mixte pour la température 40°C, et tend vers la rupture en traction nette pour la température 20°C.

Après l'ouverture de l'éprouvette suivant la ligne de rupture on remarque que :

- Pour les éprouvettes testées à 40°C, les granulats sont intacts, ce qui signifie que la rupture s'est passé dans le bitume d'où la rupture mixte.
- Pour les éprouvettes testées à 20°C, les granulats sont cassés, ce qui signifie que la rupture est selon une ligne diamétrale.

### V-3.3 Conclusion

D'après les résultats précédents nous observons que :

- Le mélange M6 [5%EVA] a donné les meilleures performances pour les essais Marshall et la traction indirecte.
- Le mélange M5 [2% NBR] a donné des performances moyennes pour l'essai Marshall et la traction indirecte.
- Le mélange M3 [5% (50% EVA+50% NBR)] a donné les meilleures performances pour les essais Marshall et la traction indirecte par rapport aux autres associations.

L'association EVA-NBR améliorent les enrobés modifiés obtenus par rapport à l'enrobé témoin et aux enrobés avec 2% de NBR, aussi bien par les essais Marshall que par les essais de la traction indirecte.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

L'agression du trafic routier sur les chaussées couplé avec des sollicitations climatiques impliquent plusieurs phénomènes qui provoquent à terme la ruine de la structure : l'orniérage, la fatigue et la fissuration.

Plusieurs études ont montré que le comportement du béton bitumineux dépend essentiellement du comportement du bitume, à basse température le bitume possède un comportement fragile (donc fissuration de la chaussée), et à la température élevée il possède un comportement visqueux (problèmes d'orniérage ou déformations permanentes de la chaussée). Le bitume idéal doit donc être à la fois le moins susceptible possible aux phénomènes de fissuration thermique (à basse température) et d'orniérage (à température élevée).

L'enrobé bitumineux dans sa configuration traditionnelle n'assure pas un bon fonctionnement des chaussées, des études ont montré qu'en incorporation des polymères comme modifiant du liant améliore sensiblement les performances des chaussées.

Le présent travail s'est intéressé à étudier l'influence de l'association de deux polymères l'un est plastomère de type EVA (acétate de vinyle et d'éthylène) et l'autre c'est un déchet industriel sous forme de poudrette NBR (caoutchouc acrylonitrile butadiène) sur les caractéristiques physiques et mécaniques des liants modifiés et des enrobés bitumineux modifiés.

Ce travail a été mené au laboratoire des routes et aérodromes de la faculté de génie civil de l'USTHB.

A la lumière des résultats présentés dans ce mémoire les conclusions suivantes sont tirées :

### 1) Le bitume :

- La modification du bitume par l'association EVA-NBR a amélioré les propriétés du bitume tel que la pénétrabilité, le point de ramollissement et la ductilité.

- 
- Le mélange M3 [5% (50% EVA+50% NBR)] augmente la consistance du bitume mieux que les autres associations.
  - La consistance de bitume augmente avec l'augmentation de la durée de malaxage jusqu'à 3h de malaxage.

## 2) L'essai Marshall :

- La compacité augmente pour les différents mélanges.
- Les enrobés bitumineux modifiés à 5% EVA donnent les meilleures stabilités, fluage et résistance aux déformations permanentes par rapport aux autres mélanges.
- Les enrobés bitumineux modifiés par les associations EVA-NBR (M3, M2, M4) donnent de meilleures performances que les enrobés avec 2% de NBR mais elles sont inférieures à celles obtenus avec les enrobés modifiés avec 5% d'EVA.
- Les enrobés bitumineux modifiés à 2% NBR donnent les plus faibles performances.
- les meilleures performances sont trouvées à 3h de malaxage.

## 3) L'essai Traction indirecte :

- les meilleures résistances à la traction indirecte sont obtenues par le béton bitumineux modifié à 5% EVA à 20°C et 40°C.
- Les associations EVA-NBR (M3, M2, M4) donnent des résistances à la traction indirecte meilleurs que celles obtenus avec 2% de NBR.
- le mélange M3 [5% (50% EVA+50% NBR)] est le meilleur parmi toutes les associations.

En perspective, il serait souhaitable :

- D'étudier d'autres teneurs de l'association EVA-NBR (plus de 5%).
- D'étudier l'influence de l'association EVA-NBR sur les caractéristiques physiques et mécaniques (vieillessement de bitume, fatigue d'enrobé bitumineux, orniérage, etc.).
- De réaliser des planches d'essais pour suivre l'évolution des enrobés modifiés par cette association.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [Ada 2005] ADAMS, R. D. «Adhesive bonding: Science, technology and application», Cambridge, Woodhead Publishing Limited et CRC Press LLC,( 2005), 543 p.
- [Aip 1999] AIPCR, PIARC, LCPC, « Emploi des liants bitumineux modifiés, des bitumes spéciaux et des bitumes avec additives en techniques routières», Guide technique, (septembre 1999).
- [Att 2011] MOATASIM ATTAELMANAN, CHENG PEI FENG , AL-HADIDY AI « Laboratory evaluation of HMA with high density polyethylene as a modifier », Construction and Building Materials 25 (2011) 2764–2770
- [Ber 1992] JEAN BERTHIER « Granulats et liants routiers » Techniques de l'Ingénieur (1992)
- [Bru 1986] BRULE B «Liant modifiés par les polymères pour les enduits et enrobés spéciaux » Rapport des laboratoires PC (6 Fév.1986) P8
- [Che 1996] SAMI CHEBIL « Etude des liants bitumineux modifiés par le noir de carbone et le charbon de bois pyrolytiques, sous-produits de la décomposition thermique sous vide des pneus et du bois hors d'usage» Mémoire de maîtrise en environnement université de Sherbrooke (Québec), Canada (1996)
- [Cor 2005] CORTE JEAN-FRANÇOIS, DI BENEDETTO HERVE. « Matériaux routier bitumineux .Mécanique et ingénierie de matériaux» Tome 2-Constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges. Lavoisier, 283p ;(2005)
- [Cur 1992] CURTIS, C. W., R. L. LYTTON, C. J. BRANNAN. «Influence of aggregate chemistry on the Adsorption and Desorption of asphalt», Transportation Research Record, no 1362, (1992)
- [Dan 2006] DANG-TRUC NGUYEN « Prédiction des déformations permanentes des couches de surface des chaussées bitumineuses »Thèse pour l'obtention du diplôme de Docteur de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Spécialité : Structures et Matériaux (2006)
- [Dar 2003] DARQUE-CERETTI, ÉVELYNE, ÉRIC FELDER. « Adhésion et adhérence», Paris, CNRS Éditions, (2003), 388 p. (Collection Sciences et techniques de l'ingénieur).
- [Don 1991] DONY A., « Liants bitumes-polymères», Etudes et recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées,(Décembre 1991).

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [Dum 2004] A.-G. DUMONT A. JUNOD « Formulation et optimisation des formules d'enrobés» ASTRA 2000/421-2 (Décembre 2004)
- [Dur 1962] DURIEZ. M, ARRAMBIDE. J, « Nouveau traité de matériaux de construction», Tome III, édition Dunod, Paris (1962)
- [Eme 1997] EMERY, JOHN, HODA SEDDIK. « Moisture Damage of Asphalt Pavements and Antistripping Additives: Causes, Identification, Testing and Mitigation »Ottawa, Transport Association of Canada, (1997), 35 p
- [Gae 1971] GAESTEL C., SMADJAR R., LAMMIHAN K.A., « Contribution à la connaissance des propriétés des bitumes routiers», Revue générale des routes et aérodromes, 466, (1971), p.85-94.
- [Gor 2009] C. GORKEM et B. SENGOZ « Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime », Construction and Building Materials 23 (2009) 2227–2236
- [Had 2007] HADDADI. S, « Influence de la poudrette de caoutchouc sur le comportement au fluage des Enrobés bitumineux ».Thèse de Doctorat d'état, FGC/USTHB (2007).
- [Had 2008] S. HADDADI, E. GHORBEL, N. LARADI «Effects of the manufacturing process on the performances of the bituminous binders modified with EVA» Construction and Building Materials 22 (2008) 1212–1219
- [Kra 1980] KRAUS G., ROLLMAN K.W., «Morphology and mechanical behaviour of bitumen modified with S.B. Block polymers», Int. Rubber Conference Nürnberg, Germany, (Sep. 1980).
- [Lae 2008] LAËTITIA EL BEZE «Recyclage à chaud des agrégats d'enrobés bitumineux, Identification de traceurs d'homogénéité du mélange entre bitume vieilli et bitume neuf d'apport» Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'université Paul CÉZANNE, Faculté des Sciences et Techniques (2008)
- [Les 2002] DIDIER LESUEUR « La Rhéologie des Bitumes : Principes et Modification » Rhéologie, Vol.2, 1-30 (2002)
- [Les 2009] LESUEUR DIDIER, «The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification», science direct 145 (2009) 42-82.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [Mur 2000] M. MURPHY, M. O'MAHONY, C. LYCETT, I.JAMIESON « Bitumens modified with recycled polymers» *Materials and Structures* Vol. 33, (Aug-Sep 2000), pp 438-444
- [Per 2001] PERRET J., DUMONT A.-G., TURTSCHY J.-C., OULD-HENIA M., «Evaluation des performances de nouveaux revêtement : 1ère partie : enrobés à haut module », Rapport OFROU n° 1000. (décembre 2001).
- [Pet 1998] PETERSEN, J. CLAINE, HENRY PLANCHER. «Model Studies and Interpretive Review of the Competitive Adsorption and Water Displacement of Petroleum Asphalt Chemical Functionalities on Mineral Aggregate Surfaces», *Petroleum Science and Technology*, vol. 16 no 1 & 2, (1998), p. 89-131.
- [Ram 1990] RAMOND, G., SUCH, C., «Bitumes et bitumes modifiés», *Bulletin de liaison du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, 168, pp.65-89 (1990).
- [Sai 2010] SAIBOU DADOU A. N., TAMZAIT. S. « Etude de l'influence de l'association NBR et EVA sur le bitume». Mémoire de MASTER 2, Option: Génie civil ; FGC/USTHB (2010).
- [San 2011] SANGITA, TABREZ ALAM KHAN, SABINA, D.K. SHARMA « Effect of waste polymer modifier on the properties of bituminous concrete mixes », *Construction and Building Materials* 25 (2011) 3841–3848
- [Sao 2008] SAOUDI. N «Comportement rhéologique des bitumes modifiés au polymère (NBR) influence de la température sur la résistance et le fluage des enrobés bitumineux» Thèse de magister FGC/USTHB, (2008).
- [Sao 2009] S. SAOULA, K. AIT MOKHTAR; S. HADDADI, E. GHORBEL « Improvement of the performances of modified bituminous concrete with EVA and EVA-waste » *Physics Procedia* 2 (2009) 1319–1326
- [Set 1994] SETRA-LCPC «Conception et dimensionnement des structures de chaussées » *Guide technique*, (Décembre 1994)
- [Spi 1989] P.-M. SPILLEMAECKER, « Études des propriétés des enrobés drainants, *Revue générale des routes et aérodromes*, n° 654, (Juillet-Août 1989).
- [Yan 2001] YANN LEFEUVRE «Contribution à l'étude du comportement en fatigue des enrobés bitumineux, Etude de l'allongement des éprouvettes comme manifestation de l'endommagement diffus, Expérimentation – Modélisation »Thèse pour l'obtention du diplôme de Docteur de l'école nationale des ponts et chaussées Spécialité : Structures et Matériaux (2001).