

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Kasdi Merbah Ouargla



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

Département de Génie Civil et Hydraulique

THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de DOCTORAT LMD

En Génie Civil

Spécialité : GEOMATERIAUX

Par BOUCHERBA MOHAMMED

THEME

VALORISATION DES DECHETS PLASTIQUES

DANS LES ENROBÉS BITUMINEUX

BOUTOUTAOU Djamel	Professeur	UKM Ouargla	Président
BOUATABA TAHER	Professor	UKM Ouargla	Examineur
TAALLAH Bachir	MCA	UMK Biskra	Examineur
REMADNA Mohammed Saddek	MCA	UMK Biskra	Examineur
ABANI SAID	MCA	UKM Ouargla	Examineur
KRIKER Abdlouahed	Professeur	UKM Ouargla	Directeur de thèse
KEBAILI Nabil	MCB	UKM Ouargla	Co-encadreur

Année Universitaire: 2020 / 2021

Sommaire

Liste des figures	5
Liste des Photos	6
Liste des tableaux	6
I. GÉNÉRALITÉS SUR LES MELANGES HYDROCARBONÉS	3
I.1 INTRODUCTION	3
I.2 LA STRUCTURE ET TYPE DE CHAUSSÉE.....	3
I.3 COMPORTEMENT DES CHAUSSÉES TRAITÉES AUX LIANTS HYDROCARBONÉS	5
I.3.1 EFFET DU TRAFIC	5
I.3.2 EFFET DE LA TEMPÉRATURE.....	6
I.4 ENROBÉS BITUMINEUX.....	7
I.4.1 GRANULATS	7
I.4.2 LIANTS HYDROCARBONÉS	8
I.4.3 FORMULATION DES ENROBÉS BITUMINEUX	10
I.5 CONCLUSION	12
II. BITUMES : FABRICATION, STRUCTURE ET COMPORTEMENT	13
II.1 INTRODUCTION.....	13
II.2 FABRICATION DE BITUME :	13
II.3 COMPOSITION DES BITUMES.....	18
II.3.1 MÉTHODE DE DÉTERMINATION DE LA COMPOSITION DES BITUMES ...	18
II.3.2 FAMILLES GÉNÉTIQUES DE BITUME	19
II.3.3 STRUCTURE COLLOÏDALE.....	20
II.4 COMPORTEMENT DES BITUMES.....	23
II.4.1 RHÉOLOGIE DES BITUMES	23
II.4.2 COMPORTEMENT DES BITUMES	23
II.4.3 MÉTHODES DE MESURE DES CARACTÉRISTIQUES RHÉOLOGIQUES	24
II.5 CONCLUSION	26
III. COMPORTEMENT DES ENROBÉS BITUMINEUX	27
III.1 INTRODUCTION.....	27
III.2 PRÉSENTATION DU COMPORTEMENT DES ENROBÉS BITUMINEUX	27
III.3 MESURE DU MODULE DANS LE DOMAINE FRÉQUENTIEL	30
III.3.1 DÉFINITION ET PRINCIPE DE LA MESURE.....	30
III.3.2 LES TYPES D'ESSAIS	32
III.3.3 ANALYSE DES RÉSULTATS	34
III.4 CONCLUSION :	36
IV. MODIFICATION DES MÉLANGES BITUMINEUX	37
IV.1 INTRODUCTION.....	37

IV.2	HISTORIQUE DES BITUMES MODIFIÉS	37
IV.3	INSUFFISANCES DES MÉLANGES BITUMINEUX	37
IV.4	OBJECTIFS DE LA MODIFICATION.....	38
IV.5	MÉCANISME DE LA MODIFICATION	39
IV.6	CONCLUSION :	41
V.	POLYMÈRES ET INDUSTRIE DES PLASTIQUES	42
V.1	INTRODUCTION.....	42
V.2	PRODUCTION MONDIALE DES PLASTIQUES	42
V.3	PRODUCTION ET POLYMÉRISATION	43
V.4	UTILISATION ET RECYCLAGE	44
V.5	LES TYPES DE POLYMÈRES.....	46
V.6	CONCLUSION :	47
VI.	PARTIE EXPERIMENTALE	48
VII.	ANALYSE EMPIRIQUE DE BITUME MODIFIÉ	49
VII.1	INTRODUCTION.....	49
VII.2	ANALYSES DE POLYMERE	49
VII.3	PROFIL DE MODIFICATION.....	51
VII.4	RESULTATS DE MODIFICATION DE LIANT	52
VII.5	INFLUENCE DE POLYÉTHYLÈNE	54
VII.5.1	Pénétrabilité	54
VII.5.2	Point de ramollissement.....	55
VII.5.3	Indice de pénétrabilité (IP)	56
VIII.	FORMULATION DE L'ENROBÉ TÉMOIN.....	57
VIII.1	INTRODUCTION	57
VIII.2	CARACTÉRISTIQUES DES CONSTITUANTS.....	57
VIII.3	FORMULATION DE L'ENROBÉ TÉMOIN	57
VIII.3.1	COMPOSITION GRANULAIRE.....	58
VIII.3.2	TENEUR EN LIANT	59
VIII.4	PERFORMANCES MÉCANIQUES DU MÉLANGE TÉMOIN.....	60
VIII.5	CONCLUSION :	61
IX.	ANALYSE DES ENROBÉS MODIFIÉS	62
IX.1	INTRODUCTION	62
IX.2	PRESSE DE COMPACTAGE GIRATOIRE (COMPACTABILITE).....	62
IX.3	RÉSULTATS MARSHALL	66
IX.4	ESSAI D'ORNIÉPAGE.....	70
IX.4.1	Principe d'essai d'orniépage	70
IX.5	CONCLUSION :	75

X. ÉVALUATION DES ENROBÉS MODIFIÉS SUR LE COMPORTEMENT VISCO-ELASTIQUE LINÉAIRE	77
X.1 INTRODUCTION.....	77
X.2 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL	77
X.3 COURBES ISOTHERMES ET ISOCHRONES.....	79
X.4 COURBES ÉQUIVALENTES TEMPS-TEMPERATURE	86
X.5 EFFET THERMIQUE SUR LE COMPORTEMENT VEL	88
X.6 IMPACT DE MODIFICATION SUR LE DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES	92
XI. CONCLUSION GÉNÉRALE	94
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE	96
Site Web :.....	100
Liste des normes :.....	100

Liste des figures

Figure I.1. Schéma d'une coupe de chaussée [4].....	4
Figure I.2. Les différentes structures de chaussée [4].....	5
Figure I.3. Schématisation des sollicitations induites par le trafic [5].....	6
Figure I.4. Schématisation des sollicitations induites par la température [5].	6
Figure II.1. Schéma de fabrication des bitumes par raffinage du pétrole [9].	16
Figure II.2. Représentation du modèle de structure colloïdale des bitumes [21].....	20
Figure II.3. Les types de bitume selon la structure et la composition [8].	21
Figure II.4. Représentation schématique des différentes classes de comportement des bitumes en fonction de $ \epsilon $ et T [21] [28].....	24
Figure II.5. Corps d'épreuve des essais rhéologiques des bitumes [27].	25
Figure III.1. Schéma représentatif de comportement des enrobes bitumineux.....	30
Figure III.2. Exemple du signal de force (ou contrainte) et le signal de déplacement (ou déformation) lors des essais avec une sollicitation sinusoïdale [36] [7].....	31
Figure III.3. Exemple d'une courbe isotherme [3].....	34
Figure III.4. Exemple d'une superposition des courbes isothermes à une température de référence de $T_{ref} = 10\text{ °C}$ [3].....	35
Figure III.5. Exemple d'une courbe isochrone [3].....	36
Figure IV.1. Mécanismes de la dispersion d'un copolymère (polystyrène-butadiène) dans le bitume [51].....	41
Figure V.1. Taux de production des matières plastiques en 2007 [54].....	43
Figure V.2. Les différentes structures de polymère [51]	44
Figure V.3. Formulation de polyéthylène [55]	44
Figure VII.1. Analyse thermique de polyéthylène de haute densité broyée.	50
Figure VII.2. Analyse calorimétrique différentielle de polyéthylène de haute densité broyée.	50
Figure VII.3. Courbe de transition de chaleur.	51
Figure VII.4. Résultats d'essai de pénétrabilité à 25 °C.	55
Figure VII.5. Résultats d'essai de TBA.	55
Figure VII.6. Résultats d'Indice de Pénétrabilité.....	56
Figure VIII.1. La composition granulaire adoptée.....	58
Figure VIII.2. Courbe de mélanges comparativement au fuseau de référence.	59
Figure IX.1. Courbe de pourcentage de vide en fonction du nombre de girations (PEHD-broyé)....	64
Figure IX.2. Pourcentage de vide en fonction du nombre de girations (PEHD-noble).....	65
Figure IX.3. Nombre de girations en fonction du pourcentage de vide.....	66
Figure IX.4. Chargement de l'éprouvette Marshall selon la génératrice.....	67
Figure IX.5. Histogramme de stabilités Marshall.....	68
Figure IX.6. Histogramme des résultats de fluage Marshall.....	69
Figure IX.7. Histogramme des résultats de quotient Marshall.	70
Figure IX.8. Principe de l'essai d'orniérage [65].....	71
Figure IX.9. Profondeur d'orniérage en fonction du nombre de cycles.	73
Figure IX.10. Rutting cycle impact en fonction de la profondeur d'orniérage.....	74
Figure IX.11. Facteurs RCI calculés.....	75
Figure X.1. Étapes de préparation des éprouvettes trapézoïdales.....	78
Figure X.2. Modules de rigidité des quatre mélanges testés.....	81
Figure X.3. Courbe de force et déplacement en fonction du temps.....	82
Figure X.4. Courbe d'isotherme de chaque composition de PEHD broyés et le témoin.....	83
Figure X.5. Courbe d'isotherme des compositions avec PEHD broyés à une température de 25 °C.	83
Figure X.6. Courbe isochrone de chaque composition avec PEHD Broyés et le témoin.	85
Figure X.7. Courbe isochrone de chaque composition avec PEHD Broyés de fréquence à 10 Hz... 85	85

Figure X.8. Courbe maîtresse des compositions avec PEHD Broyés pour Tref = 15°C.....	87
Figure X.9. Courbes maîtresses avec les équations de tendance.	87
Figure X.10. Modules de rigidité selon les températures de mesure	89
Figure X.11. Courbe de l'indice de module de rigidité des cinq températures.....	90
Figure X.12. Angles de phasage en fonction des températures de mesure.....	91

Liste des Photos

Photo II.1. Quatre échantillons de bitume écoulent en différentes manières sous les mêmes conditions [9].	16
Photo VII.1. Polymères utilisés dans la modification.....	49
Photo VII.2. Exemple de la procédure de la modification d'un liant au laboratoire.	52
D'après les différentes recherches dans ce domaine tel que [55], l'addition de 5% de polyéthylène haute densité (PEHD) aux bitumes de grade 40/50 à 80/100 conduit à un durcissement et retrait excessif en phase de refroidissement (Séparation de phase), (Photo VII.3).	53
Photo VII.4. Séparation de phase d'un mélange bitume-PEHD après refroidissement (600 rpm)...	54
Photo IX.1. Essai de la presse pour cisaillement giratoire – PCG.	63
Photo IX.2. Orniérage superficiel.	70
Photo IX.3. Appareil de l'essai d'orniérage.....	71
Photo IX.4. Table de compactage (compacteur à roue).....	72
Photo IX.5. Mesure de la profondeur d'orniérage.	72
Photo X.1. La table de compactage (compacteur à roue).	77
Photo X.2. Opération de coupage d'une plaque.....	78
Photo X.3. Préparation d'éprouvette trapézoïdale à partir d'une plaque de 25 mm d'épaisseur.....	78
Photo X.4. Ajustement de l'appareil et fixation des éprouvettes avant les tests.....	80

Liste des tableaux

Tableau I.1. Caractéristiques des bitumes purs selon la norme EN 12591 [8].	10
Tableau II.1. Historique des procédés de raffinage [11].....	14
Tableau II.2. Caractéristiques principales des trois types de bruts [9] [12].....	15
Tableau II.3. Composition chimique élémentaire des bitumes [14]	18
Tableau II.4. Types structuraux des bitumes en fonction de leur composition [22].....	21
Tableau II.5. Consistance des bitumes en fonction de la valeur d'I _C [25].....	22
Tableau III.1. Récapitulatif des principaux essais de module complexe sur enrobés [3].....	33
Tableau V.1. Exemples utilisation et domaines de recyclage des principaux polymères [53].	45
Tableau VII.1. Résultats des analyses empiriques des bitumes modifiés.....	52
Tableau VIII.1. Résultats d'analyses des agrégats.....	57
Tableau VIII.2. Fuseau de référence de BBSG 0/14.....	59
Tableau VIII.3. Teneur en liant adopté.....	60
Tableau VIII.4. Performances PCG de l'enrobé témoin.....	60
Tableau VIII.5. Performances Marshall de l'enrobé témoin.	60
Tableau IX.1. Résultats de l'essai PCG.	63
Tableau IX.2. Résultats d'essai Marshall.....	67
Tableau IX.3. Profondeurs d'orniérage.....	73
Tableau IX.4. Facteurs RCI obtenus (cycles/mm).....	74
Tableau X.1. Résultats de l'essai du module complexe (15°C, 10 Hz).	80
Tableau X.2. Spécification de module des bétons bitumineux selon EN 13108 – 1 (15°C, 10 Hz)..	80
Tableau X.3. Influence de la température sur le module et l'angle de phase à 10Hz.	88
Tableau X.4. Coefficients d'équivalence des enrobés étudiés.....	93

INTRODUCTION GENERALE

Aujourd'hui les polymères sont les matières premières dans le domaine d'industrie et de fabrication des produits plastiques, ce dernier impact notre planète par une augmentation significative du niveau de la pollution, où les déchets plastiques sont considérés comme les principaux facteurs contribuant à cette hausse, avec un grand volume des déchets résultants pour cette industrie et le problème de la faible biodégradabilité de ces déchets. Chaque année l'Algérie produit des milliers de tonnes de déchets plastiques, selon l'Agence Nationale des Déchets (AND), la quantité produite en 2013 dépasse 1.24 Million de tonnes, en horizon 2030, celle-ci va atteindre 2.04 milliards tonnes.

A l'échelle mondiale, Le recyclage est la méthode de récupération de ces déchets, la question qui se pose dans ce cas n'est pas seulement le taux ou volume de récupération sur le volume de déchets par année. Mais aussi d'où ces récupérations diriger ? Des recherches scientifiques étudient des nouvelles techniques de recyclage et réutilisation dans divers domaines. Le présent travail vise à apporter une solution qui consiste à incorporer des poudrettes issues du recyclage de ces déchets plastiques inertes au sein des enrobés bitumineux traditionnels dans le but d'apporter une amélioration de point de vue mécanique et rhéologique.

Pour concrétiser ceci, un béton bitumineux usuel est pris comme échantillon témoin dans lequel il est incorporé un type de poudrette de fabrication locale selon plusieurs formulations pour permettre le suivi de l'influence du dosage en poudrettes sur les propriétés et performances mécaniques du béton bitumineux.

Les performances du nouveau composite 'enrobé – plastique ' seront comparés à l'enrobé ordinaire dans le but de montrer les améliorations apportées en termes de résistances mécaniques et de prédire le comportement viscoélastique d'enrobé – plastique une fois sur chaussée par étudier l'influence de ses plastiques sur la relation 'liant-enrobé' en terme rhéologique.

La méthode d'évaluer le comportement prendre l'un des essais développés dans le projet SHRP dans les années 1970, c'est le plus utilisé en France, cet essai est la flexion à deux points. Les essais sont réalisés en Laboratoire de Travaux Publics du Sud (LTPS), au but de répondre à la question de l'influence de ces déchets de polyéthylène sur le comportement viscoélastique et la capacité de répondre aux spécifications de chaussée.

I. GÉNÉRALITÉS SUR LES MELANGES HYDROCARBONÉS

I.1 INTRODUCTION

Depuis l'aube de la civilisation, l'homme départ dans la découverte des matériaux existant sur cette planète dans le but d'améliorer ses connaissances et d'utiliser ces derniers pour améliorer de sa vie.

L'asphalte naturel est découvert et utilisé sous forme de liant hydrocarboné depuis l'antiquité, il y'a plus de 5000 ans. En particulier pour le génie civil, l'utilisation de ce bitume naturel c'est comme adhésif dans des mortiers en tant qu'agent d'imperméabilisation dans certaines parties des bâtiments [1].

Dans ce jour, le bitume est largement utilisé, spécialement dans les techniques routières et depuis le début du 19ème siècle [1]. Aujourd'hui ce matériau est un produit de raffinerie à partir de la distillation fractionnée des pétroles bruts [2].

I.2 LA STRUCTURE ET TYPE DE CHAUSSÉE

La chaussée se présente sur comme des structures multicouches (Figure I.1), qui est réalisée dans le but de répartir les charges induites par le trafic le vers le sol-support pour soutenir dans le cas des chaussées traitées aux liants hydrocarbonés, la structure comprend [3] :

- Le sol support,
- La couche de forme qui protège le sol-support pendant les travaux,
- La couche d'assise (couche fondation + couche de base) qui est constituée des 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 surface (couche de liaison + couche de roulement) qui subissent directement les actions du trafic,

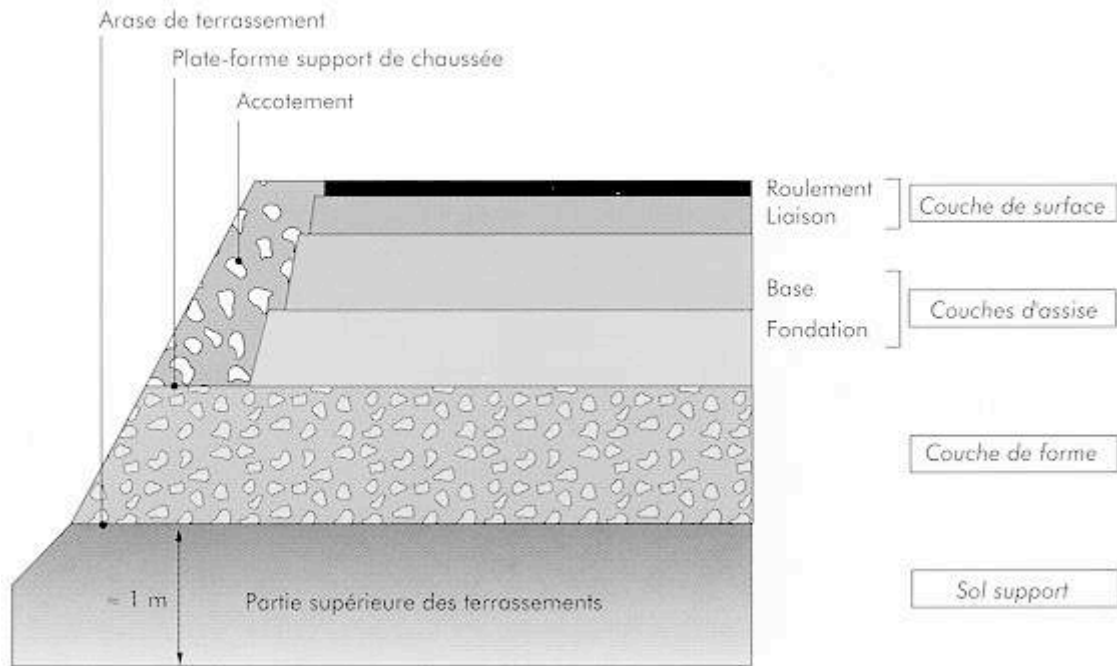


Figure I.1. Schéma d'une coupe de chaussée [4]

Les chaussées se présentent pratiquement sous deux grandes classes ; chaussées bitumineuses traitées aux liants hydrocarbonés (chaussées souples) et chaussées en béton traitées aux liants hydrauliques (chaussées rigides), cette classification distribue la structure des chaussées des autres types tels que semi-rigide, mixte ... etc. (Figure I.2).

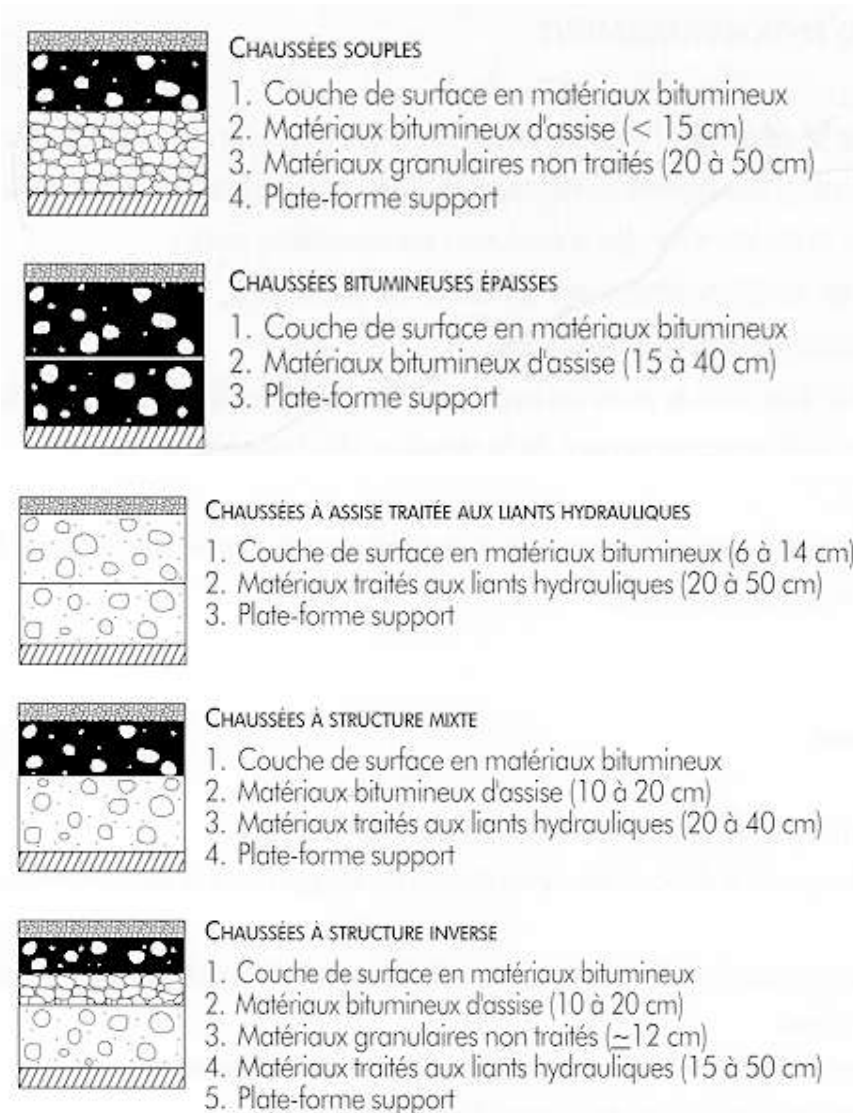


Figure I.2. Les différentes structures de chaussée [4]

I.3 COMPORTEMENT DES CHAUSSÉES TRAITÉES AUX LIANTS HYDROCARBONÉS

Les matériaux bitumineux sont employés principalement dans la couche de surface et d'assises, ils subissent l'action du trafic et de climat [3], l'effet de trafic qui représente les contraintes imposées par le passage des véhicules, et les changements climatiques et la variation de température appelés effet thermique [2].

I.3.1 EFFET DU TRAFIC

Le passage des véhicules engendre des contraintes de traction et de compression dans les différentes directions des couches de chaussée. Chaque couche de la chaussée est assimilée à une poutre qui subit des flexions sous l'effet du trafic [3].

La répétition de chargement peut être induire des dégradations au niveau les couches de chaussée, la compression répétée peuvent déduire des déformations permanentes, si elles sont importantes, se traduisent par un orniéage superficiel [2].

Même cas pour les efforts de traction sur la base de chaussée, engendre des “micros” dégradations qui, en s’accumulant, peuvent entraîner la rupture par fatigue [2].

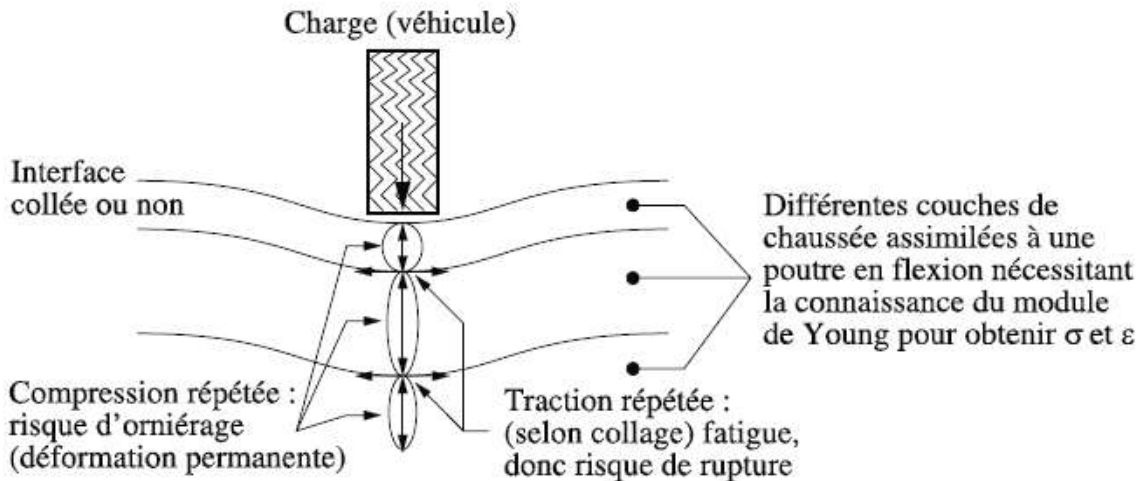


Figure I.3. Schématisation des sollicitations induites par le trafic [5]

I.3.2 EFFET DE LA TEMPÉRATURE

La température à deux effets principaux : [3]

- Le changement de la rigidité (module) du matériau, à cause des caractéristiques de susceptibilité thermique du bitume de l'enrobé.
- La création des contraintes et des déformations au sein du matériau en raison des dilatations-contractions thermiques plus ou moins empêchées lors des changements de températures (Figure I.4).

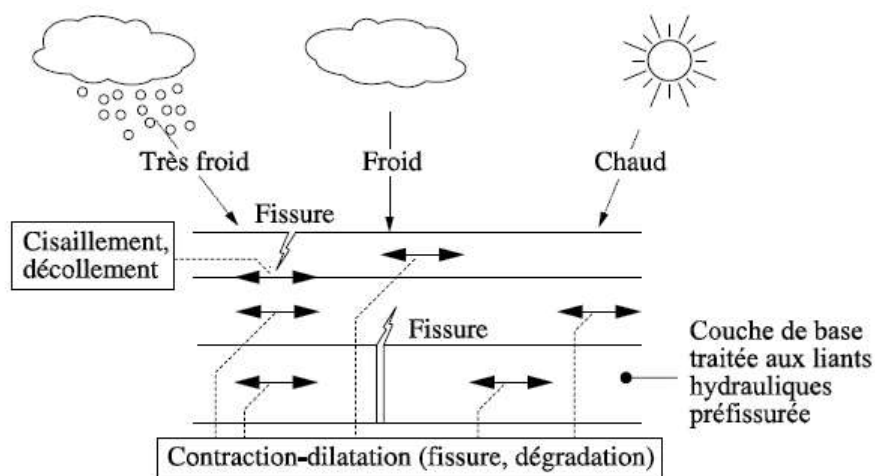


Figure I.4. Schématisation des sollicitations induites par la température [5].

I.4 ENROBÉS BITUMINEUX

On appelle enrobé bitumineux tout mélange constitué de granulats agglomérés entre eux par un liant hydrocarboné ; ce mélange peut être enrichi par des fines et éventuellement contenir des additifs en vue d'améliorer certaines propriétés mécaniques et rhéologiques [6]. Les granulats assurant la rigidité de l'enrobé et le bitume procurent la cohésion de l'ensemble et est responsable du caractère visqueux [3].

I.4.1 GRANULATS

On appelle « granulats » un ensemble de grains de diamètre entre 0 à 80mm, cet élément constitue généralement environ 95% de la masse de l'enrobé [2], sont classer en différentes classes granulaires selon la norme NF P 18-101 [3] : fines, sables, gravillons et cailloux. La présence de ces éléments dans l'enrobé et à partir sa distribution dimensionnelle qui s'appelle la granularité est exprimée par la courbe granulométrique du mélange. Celle-ci peut être continue ou discontinue selon la destination du mélange et les propriétés visées, comme le cas des enrobés drainants d'où sa courbe granulométrique est fortement discontinue, ce qui permet d'obtenir une porosité élevée après la mise en place (propriétés visées) [7].

La distribution granulaire des grains n'est pas la seule propriété visée dans les enrobés, il y'a aussi [2] :

- Les caractéristiques intrinsèques des gravillons, d'où on détermine ces caractéristiques par mesure de la qualité propre de la roche, en concernant sur la dureté (Los Anglos ou fragmentations dynamiques), sa résistance à l'usure par frottement (Micro Deval en présence d'eau) et sa résistance au polissage accéléré (CPA).
- Les caractéristiques de fabrication, d'où on détermine les caractéristiques résultantes au mode de fabrication des granulats (par exemple concasseur à mâchoire), qui est exprimé par les essais de détermination de la granulométrie, le coefficient d'Aplatissement ou l'indice de forme et la propreté superficielle.

Les spécifications des caractéristiques des granulats dépendent de [2] :

- Type de l'enrobé bitumineux (enrobé, béton, enduit, ... etc.),
- La position du l'enrobé et sa fonction (base, roulement, ... etc.),
- Le type de trafic (faible, moyen ou fort),
- Le type de climat (chaud, tempéré ou froid),

I.4.2 LIANTS HYDROCARBONÉS

Les liants hydrocarbonés sont constitués d'hydrocarbures, et donc essentiellement de carbone et d'hydrogène et présentent de faibles quantités d'oxygène, soufre et d'azote [6], les liants se divisent en trois (3) familles :

- Les liants naturels se trouvent en l'état dans la nature et plus souvent associés à des matières minérales [2], il s'agit de roches asphaltiques qui après broyage donnent la poudre d'asphalte et des bitumes naturels [5].
- Les goudrons qui proviennent de la pyrogénéation (à l'abri de l'air) de matières d'origine végétale : houille, lignite, bois, ... les goudrons routiers sont essentiellement tirés de la houille [2].
- Les bitumes, qui sont produits en raffinerie à partir de la distillation fractionnée de certains pétroles bruts, les bitumes sont employés en technique routière pour leurs propriétés agglomérant et d'étanchéité [2].

La norme EN 12591 définit et classe les liants hydrocarbonés comme suite [3]:

- Les bitumes purs (EN 12591) ;
- Les bitumes fluidifiés (EN 15322) obtenus avec un diluant d'origine pétrolière ;
- Les bitumes fluxés (EN 15322) additionnés d'une huile d'origine houillère ou pétrolière;
- Les émulsions de bitume (EN 13808) ;
- Les goudrons purs (T66-021) ou modifiés (T66-022) plus guère utilisés en technique routière ;
- Les bitumes modifiés, comportant des ajouts de substances le plus souvent macromoléculaires ayant un effet direct sur le liant, par opposition aux fins minéraux et additifs d'adhésivité. Les substances les plus couramment utilisées sont les élastomères SBS, les plastomères EVA et les poudrettes de caoutchouc afin de réduire la susceptibilité thermique du bitume de base et d'améliorer ses caractéristiques de résistance à la fatigue.

Plusieurs types d'essais permettent de caractériser les liants bitumineux. Deux catégories principales se distinguent : les essais standards de caractérisation (mis au point dans les années 1920) et les essais rhéologiques (apparus dans les années 1940) [7] :

- **Les essais standards :**

- ❑ Essai de pénétrabilité à l'aiguille selon la norme EN 1426 c'est la profondeur d'enfoncement exprimée en dixième de millimètre, d'une aiguille normalisée de 1mm de diamètre, sous une charge de 100g, appliqué pendant 5 secondes sur un échantillon de bitume maintenu à 25°C [8].
- ❑ Essai de point de ramollissement noté TBA, selon la norme EN1427 qui consiste à déterminer la température pour laquelle une bille d'acier normalisée traverse un échantillon de bitume maintenu dans un anneau métallique. Il caractérise la susceptibilité thermique de bitume, plus la TBA est faible le bitume est plus susceptible [3].
- ❑ L'essai RTFOT « **R**olling **T**hin **F**ilm **O**ven **T**est » selon la norme EN 12607 – 1, cet essai est employé pour caractériser le vieillissement des bitumes à l'enrobage. En effet, lors de la fabrication d'un enrobé, les granulats chauffés à l'environ de 160°C sont mis en contact avec le bitume chaud qui répartit en film mince autour du granulat, ce contact induisant un vieillissement du liant. Pour l'essai RTFOT, dans des conditions d'essai précises, le bitume placé en film mince est régulièrement exposé à un flux d'air chaud dont le débit est contrôlé. On mesure ensuite les propriétés habituelles du liant : pénétrabilité et température de ramollissement. Ces valeurs dites après RTFOT sont alors comparées aux valeurs initiales. Elles sont plus proches de celle du liant extrait de l'enrobé, que celle obtenue sur le bitume d'origine [7].

Il y'a aussi l'essai PAV « **P**ressure **A**ging **V**essel» qui caractérise le vieillissement de résidu du bitume après RTFOT, il fait aussi des essais de pénétrabilité et TBA après PAV et comparer aux valeurs trouvées après RTFOT. Aussi l'essai du Point de fragilité FRAAS qui correspond à la température à laquelle un film de bitume déposé sur une lamelle d'acier se fissure lorsque l'on plie cette lamelle à basse température. Il caractérise la fragilité du liant à basse température. Les valeurs obtenues sont à base des spécifications sur les bitumes. Ceux-ci sont répartis en classes correspondant à une gamme donnée de valeur de pénétrabilité à 25°C, les différentes valeurs sont représentées dans le tableau I.1.

Tableau I.1. Caractéristiques des bitumes purs selon la norme EN 12591 [8].

Caractéristique	Unité	Méthode	Désignation des classes appropriées				
			20/30	35/50	50/70	70/100	160/200
Pénétrabilité à 25°C, 100 g, 5 secs	0,1mm	EN 1426	20-30	35-50	50-70	70-100	160-200
Point de ramollissement (TBA)	°C	EN 14275	55-63	50-58	46-54	43-51	35-43
Résistance au durcissement RTFOT à 163°C		EN 12607-1					
Variation du masse (max +/-)	%	EN 12607-1	0,5	0,5	0,5	0,8	1,0
Pénétrabilité restante (min)	%	EN 1426	55	53	50	46	37
TBA après durcissement (min)	°C	EN 1427	57	52	48	45	37
Augmentation de TBA après durcissement (max)	°C	EN 1427	8	8	8	9	11
Point d'éclair	°C	EN ISO 2592	240	240	230	230	220
Solubilité (min, en masse)	%	EN 12592	99	99	99	99	99

- Les essais rhéologiques :

Strategic Highway Research Program SHRP est un programme de recherche lancé aux États-Unis en 1988 pour une durée de cinq ans, et poursuivi par une deuxième tranche en 1996 qui développée des essais de rhéologiques sur les liants et les enrobés bitumineux. L'objectif de ces essais est de pouvoir relier les caractéristiques du liant mesurées au niveau du laboratoire avec la performance de ce dernier dans l'enrobé sur chaussée, ces essais sont [7] :

- Dynamic Shear Rheometer (DSR) Mesurer les propriétés du liant à la haute et moyenne température,
- Rotation Viscometer (RV) Mesurer les propriétés de liant à haute température,
- Bending Beam Rheometer (BBR) Mesurer les propriétés à basse température,
- Essai de traction direct (TDD) Mesurer les propriétés à basse température.

I.4.3 FORMULATION DES ENROBÉS BITUMINEUX

L'objectif principal de la formulation est de déterminer une composition optimale de granulats, liant et de vides, qui permet d'atteindre les performances visées, avec le temps et l'évolution dans le domaine des enrobés bitumineux et les routes de façon générale. Il existe plusieurs méthodes de formulation, on cite les plus connues tels que la méthode Hveem qui

est développée par Francis N. Hveem Ingénieur du département de transport de Californie dans les années 1930 qui passe par les étapes suivantes :

- Choix des matériaux selon des spécifications bien définies et choix de la courbe du mélange,
- Déterminer la teneur en liant approximative selon des essais de centrifuge kérosène équivalent (CKE) et la Surface Capacité.
- Préparation des échantillons avec des teneurs en liant, -0.5%, -1,0% et + 0,5% du liant, la confection se fait par compactage,
- Test de stabilité et de ressuage effectué sur les éprouvettes confectionnées, et le choix se fait pour la teneur qui donne plus de stabilité et moins de ressuage.

La deuxième est la méthode MARSHALL MIX DESIGN qui est développée dans la fin des années 30 par Bruce Marshall, puis révisée et améliorée par l'armée américaine, cette méthode est recommandée par la norme VSS de Suisse. Dans cette méthode le choix du liant ne possédant pas une procédure de sélection, le choix est laissé à l'ingénieur qui devra réaliser des essais qu'il juge nécessaire. Ce choix est dicté par les résultats de stabilité, fluage, pourcentage de vide et compacité calculés par la mesure des densités apparentes et absolues.

La troisième méthode développée aux États-Unis et remplacée par la méthode Marshall, elle connaît une grande application dans le domaine. Ainsi, en 2000, 62% de la production totale de revêtement bitumineux s'est faite selon cette méthode. C'est une méthode développée dans le programme de recherche SHRP dans les années 90, qui s'appelle Superpave « Superior Performance Asphalt Pavement », le choix de liant prend en fonction les caractéristiques physiques de liant, des conditions climatiques et le type de trafic, le choix fait par une graduation des liants PG system qui prend ces paramètres en compte,

La fabrication de l'enrobé est faite en quatre teneurs en liant avec une marge de 0.5%, le choix est fait selon les résultats des essais de la presse cisaillement giratoire.

La méthode la plus connue en Europe citée est la méthode française qui s'appelle la méthode de module de richesse, qui repose sur deux grands axes, le premier est la détermination de la quantité minimale de liant en fonction de la granulométrie du mélange, et le deuxième c'est l'utilisation la presse à cisaillement giratoire au minimum et essai tenue

à l'eau Duriez, la résistance à l'orniérage (la 1^{ère} et 2^{ème} épreuve de formulation) pour le choix de la teneur en liant optimal.

Les valeurs de teneur en liant prendre avec une marge du module de richesse k selon le type de l'enrobé et prend en compte les masses volumiques des différents éléments qui sont exprimés avec un coefficient correcteur α , la surface spécifique Σ calculée par la formule suivante :

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

D'où :

- TL : Teneur en liant,
- k : Module de richesse exprime l'épaisseur du film de bitume,
- α : Coefficient correcteur de la masse volumique absolue des granulats,
- Σ : Surface spécifique de mélange granulaire.

Il y'a aussi des méthodes analytiques avec des logiciels tels que C.R.R qui utilise le logiciel spécifique PRADO. Actuellement il y'a une version web fournis par C.R.R sous le surnom PradoWeb, vous pouvez réaliser une étude théorique approfondie avant de procéder réellement à des essais (en laboratoire). Vous pouvez ainsi limiter le nombre d'essais qui sont encore nécessaires par la suite pour optimiser la composition du mélange, ce qui représente un énorme gain de temps et d'argent.

Tous les calculs sont effectués selon des principes volumétriques. Les modifications des composants et de leurs caractéristiques et/ou des changements de composition sont calculés rapidement afin que l'utilisateur puisse optimiser le mélange dans un délai très court. Si souhaités, certains résultats peuvent être confrontés aux exigences selon les cahiers des charges types régionaux, qui sont mis à disposition et à jour dans l'application.

I.5 CONCLUSION

Au cours la discussion de ce chapitre, nous présentons des informations générales sur les routes, d'où on trouve plusieurs types des corps de chaussées, aussi différentes compositions, les chaussées souples et l'enrobés bitumineux c'est le sujet de ce projet de recherche.

On présente aussi l'impact de différents facteurs, soit température ou trafic routier, ainsi qu'un peu d'histoire sur la méthodologie dont nous évaluons les matériaux de construction utilisés dans ce domaine.

II. BITUMES : FABRICATION, STRUCTURE ET COMPORTEMENT

II.1 INTRODUCTION

Le bitume c'est une substance naturelle rencontrée dans certaines roches, aujourd'hui un produit industriel à forte valeur ajoutée, fabriqué à la demande à partir de certains pétroles bruts. Il n'y a pas un seul bitume, mais il y'en a plusieurs, d'où leurs constituants et leurs caractéristiques reflètent celles des pétroles bruts dont ils sont issus des procédés techniques avec lesquels ils sont fabriqués [8].

Sur les 1300 pétroles bruts référencés au monde, seuls 10% sont utilisés pour la fabrication des bitumes par fractionnement (distillation), cette opération est effectuée dans des conditions bien déterminées dans les différentes raffineries [9].

II.2 FABRICATION DE BITUME :

Le raffinage du pétrole est un procédé industriel qui permet de transformer le pétrole brut qui est un mélange hétérogène d'hydrocarbures divers en différents produits finis tels que l'essence, le fioul ou le naphta [10]. Cette transformation débute par la distillation, ou fractionnement du pétrole brut en vue de le séparer en différents groupes d'hydrocarbures. On transforme ensuite la plupart de ces produits de distillation en produits plus facilement utilisables, en modifiant leurs structures physique et moléculaire par craquage, reformage et d'autres procédés en conversion, puis on met les produits obtenus à divers procédés de traitement et de séparation tels que l'extraction, l'hydrocraquage et l'adoucissement pour aboutir aux produits finis.

Dans les raffineries les plus simples, on s'en tient habituellement à la distillation atmosphérique et à la distillation sous vide. Alors que, dans les raffineries intégrées, on procède au fractionnement, à la conversion, au traitement et au mélange, ainsi qu'à la production de lubrifiants, de fiouls lourds et de bitumes, celles-ci peuvent aussi comporter des installations de traitement pétrochimique. La première raffinerie, ouverte en 1861, produisait du kérosène par simple distillation atmosphérique, et du goudron et du naphta comme sous-produits. [11]

Le tableau II.1 représente l'historique des procédés de raffinage et les produits résultants.

Tableau II.1. Historique des procédés de raffinage [11]

Année	Procédé	But	Sous-produits
1862	Distillation atmosphérique	Production de kérosène	Naphta, goudron, etc.
1870	Distillation sous vide	Lubrifiants (à l'origine) Charges de craquage (années trente)	Bitume résiduel Charges de cokéfaction
1913	Craquage thermique	Production accrue d'essence	Résidus, fioul lourd
1916	Adoucissement	Réduction de la teneur en soufre et de l'odeur	Soufre
1930	Reformage thermique	Amélioration de l'indice d'octane	Résidus
1932	Hydrogénation	Élimination du soufre	Soufre
1932	Cokéfaction	Production de bases essences	Coke
1933	Extraction par les solvants	Amélioration de l'indice de viscosité des lubrifiants	Produits aromatiques
1935	Déparaffinage par les solvants	Amélioration du point d'écoulement	Paraffines
1935	Polymérisation catalytique	Amélioration du rendement en essence et de l'indice d'octane	Charges pétrochimiques
1937	Craquage catalytique	Essence à indice d'octane plus élevé	Matières premières pétrochimiques
1939	Viscoréduction	Réduction de la viscosité	Quantité accrue de distillat, de goudron
1940	Alkylation	Amélioration du rendement en essence et de l'indice d'octane	Essence aviation à indice d'octane élevé
1940	Isomérisation	Production de charges d'alkylation	Naphta
1942	Craquage catalytique fluide	Amélioration du rendement en essence et de l'indice d'octane	Matières premières pétrochimiques
1950	Désasphaltage	Charge de craquage accrue	Bitume
1952	Reformage catalytique	Conversion du naphta de moindre qualité	Produits aromatiques
1954	Hydrodésulfuration	Élimination du soufre	Soufre
1956	Adoucissement par inhibiteur	Élimination des mercaptans	Disulfures
1957	Isomérisation catalytique	Conversion en molécules à indice d'octane élevé	Charges d'alkylation
1960	Hydrocraquage	Qualité accrue et teneur en soufre moindre	Charges d'alkylation
1974	Déparaffinage catalytique	Amélioration du point d'écoulement	Paraffines
1975	Hydrocraquage résiduel	Amélioration du rendement en essence à partir de résidus	Résidus lourds

Les produits obtenus dépendent directement des caractéristiques du brut traité (Tab II.2) [11]. Avant la crise pétrolière des années 1970, en faisant appel presque exclusivement à des bruts lourds à forte densité (degré API faible) permet de fabriquer les différentes classes de bitume par distillation directe. Actuellement, les bruts de bitume ont des origines diverses, mais la plupart d'entre eux proviennent du Moyen-Orient, le reste venant essentiellement de Venezuela et du Mexique. Ces bruts sont caractérisés par des densités moins élevées (degrés API plus fort). L'augmentation de degré API pour les bruts pétroliers du Moyen-Orient était la raison de l'apparition de plusieurs techniques pour fabriquer le bitume, reposant principalement sur la distillation directe du pétrole.

Lorsque le choix d'un brut et celui d'une technique qui a été décidé, le fabricant suit rigoureusement le processus et s'y maintient. Ces choix font l'objet pour chaque fabricant de procédures d'homologation très sévère, dans le souci de fournir des produits industriels d'une qualité constante et conforme aux spécifications (Figure II.1) [9].

Tableau II.2. Caractéristiques principales des trois types de bruts [9],[12]

Caractéristique	Unité	Venezuela	Koweït	Arabie Saoudite	Algérie	
					Arzew	Bejaia
Densité à 15 °C	-	0.991	0.868	0.893	0.710	0.715
API	-	12,6	31.4	26.7	69	67
Distillation Pt initial	°C	105	45	50	38	32
Distillation 10 %		278	114	140	-	-
Distillation 30 %		-	221	257	-	-
Distillation 50 %		-	-	-	108	112
Distillation Pt final		-	-	-	262	280
Viscosité cinématique à 38 °C		mm ² /s	2990	10	29	-
Soufre	%	2.6	2.5	2.9	-	-
Paraffines	%	0.3	4.5	4.2	-	-
Point de congélation des paraffines	°C	59	54	53	-	-
Indice d'acide	mgKOH/g	4.1	0.1	0.3	-	-



Photo II.1. Quatre échantillons de bitume écoulent en différentes manières sous les mêmes conditions [9].

Pour obtenir un bitume routier, les bruts de pétrole passent par l’opération de fractionnement qui s’appelle la distillation directe, ce dernier est divisé en deux opérations, une distillation atmosphérique l’autre sous vide (Figure II.1) :

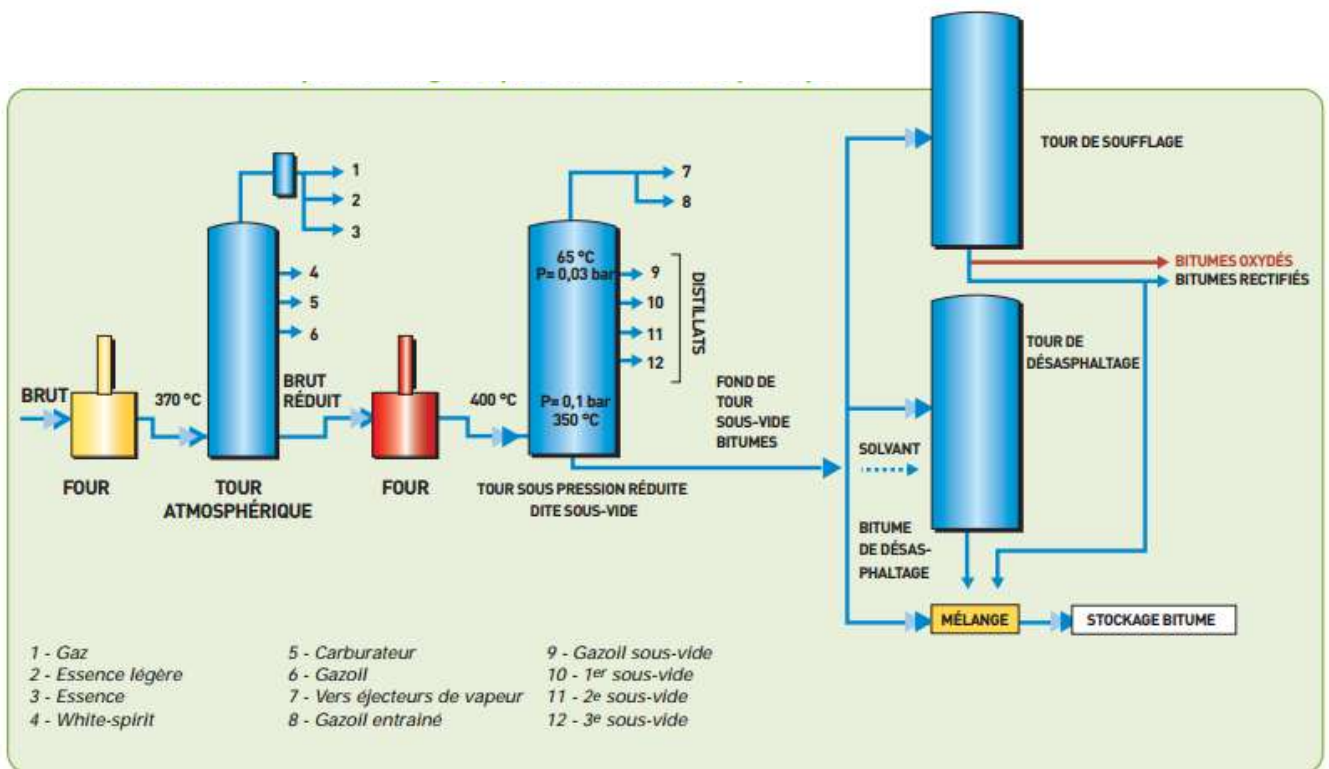


Figure II.1. Schéma de fabrication des bitumes par raffinage du pétrole [9].

- **La distillation atmosphérique :** Ce mode de raffinage consiste à chauffer en continu par passage dans un four, le brut préalablement décanté et dessalé. Ce brut, porté à une température voisine de 340°C, est envoyé dans une colonne de fractionnement de 60m de hauteur et 8m de diamètre maintenu à la pression atmosphérique [11], cette opération

permet de produire des gaz, essence, kérosène et gasoil. Le produit récupéré en fond de tour est le brut réduit [9]

- **La distillation sous vide :** À ce stade, le brut réduit provenant de la distillation atmosphérique est, après réchauffage au tour à 400°C, envoyé dans une colonne où règne une pression réduite à quelques dizaines d'hectopascals.

Les produits, alors plus volatils, ont une température d'ébullition plus faible permettant ainsi aux produits lourds d'être plus facilement récupérables. En haut de la colonne, on récupère du gasoil et à sa base du fioul lourd. Les résidus sous vide sont transformés par viscoréduction. Cette opération s'effectue en phase liquide entre 450°C et 500°C sous une pression entre 5 et 20 bars. Il s'agit d'un craquage thermique. Il permet d'obtenir des bitumes. [10]. Dans les nouvelles unités de raffinage, il est possible de fabriquer directement toutes les classes de bitumes routiers de 20/30 jusqu'à 160/220 [9].

- **Désasphaltage :** La séparation physique des constituants du pétrole brut peut aussi être effectuée sans dégradation de leur structure chimique en mettant à profit les différences de solubilité des fractions lubrifiantes et bitumineuses vis-à-vis de certains solvants [13]. Le désasphaltage au solvant est employé comme un complément dans le raffinage des bruts à huile. Il est le plus souvent pratiqué sur le fond de distillation sous vide [13]. Il est difficile de séparer complètement les fractions lubrifiantes dans les conditions normales d'utilisation des colonnes sous vide opérant sur des bruts peu denses [9].

- Selon le solvant employé, butane ou propane, on obtient différentes classes de bitume en faisant

varier la nature du fond de distillation sous vide et les conditions de fonctionnement de l'unité de désasphaltage, notamment la température et la pression. Le bitume ainsi obtenu est appelé bitume PPA (Propan Precipited Asphalt).

Selon la façon dont est conduite la fabrication du bitume, par distillation ou désasphaltage au solvant, il est possible d'obtenir des bitumes de pénétrabilité plus ou moins élevée. Cette propriété fait partie des deux caractéristiques fondamentales de chaque bitume, avec la température de ramollissement. En rajoutons la susceptibilité à la température et au vieillissement, la cohésivité et l'élasticité qui sont mesurées par des tests spécifiques [9].

II.3 COMPOSITION DES BITUMES

Le bitume est un hydrocarbure de constitution particulièrement complexe dont la composition chimique dépend essentiellement de l'origine de son brut [14].

Les méthodes d'analyses chimiques soit classiques ou les plus complexes telles celles les infrarouge (FTIR) ou Ultraviolet (UV) mettent en évidence ses constituants essentiels, carbone, hydrogène, et des faibles constituants d'oxygène, d'azote, de soufre ainsi que des traces des métaux (Vanadium (V), Nickel (N), Aluminium (Al) et Silicium (Si) [13] et aussi fer (Fe), Magnésium (Mg), Cobalt (Co), Cuivre (Cu) [14]). Le tableau II.3 présente les constituants chimiques élémentaires des bitumes :

Tableau II.3. Composition chimique élémentaire des bitumes [14]

Éléments	Concentration en % en masse
Carbone	79 – 88
Hydrogène	7 – 13
Soufre	0 – 9
Oxygène	0 – 8
Azote	0 – 3

Ces éléments chimiques sont arrangés en molécules complexes différentes par leur masse molaire qui varie entre 400 et 4000 g/mol. Généralement, ces molécules sont séparées par leur caractère plutôt aliphatique ou aromatique et la présence de groupements polaires. Il faut, par ailleurs, préciser que le bitume ne contient pas de macromolécules [14].

II.3.1 MÉTHODE DE DÉTERMINATION DE LA COMPOSITION DES BITUMES

Devant la complexité de déterminer la composition exacte des bitumes, de nombreux chercheurs [15] [16] ont eu recours à différentes méthodes chimiques et physico-chimiques afin d'obtenir une meilleure connaissance de la constitution de ces liants hydrocarbonés [14]. On distingue :

- **Les méthodes de séparation :** les méthodes de séparation ont pour but de séparer le bitume en différentes fractions. Un travail important a été réalisé depuis plusieurs décennies dans ce sens, où plusieurs méthodes ont été développées [15]. Il s'agit de la distillation, l'extraction par solvants sélectifs et la chromatographie d'adsorption.
- **Les méthodes analytiques :** ces méthodes conventionnelles d'analyse de composition chimique (analyse élémentaire, fractionnement SARA, ...etc.) détruisent l'équilibre colloïdal du bitume, rendant difficile la liaison entre les informations obtenues et la structure du liant et fortiori les propriétés d'usage. Ce

constat est encore plus vrai dans le cas de bitumes modifiés par des polymères (BMP), à conduire et à privilégier l'utilisation de méthodes non destructrices et globales (DSC, FTIR...etc.) [17].

II.3.2 FAMILLES GÉNÉTIQUES DE BITUME

Les différentes méthodes de séparation, citées ci-dessus, montrent que le bitume a été séparé en différentes fractions et que beaucoup de schémas faisant intervenir la combinaison de différentes techniques ont été proposés. Mais en fait, les études sur la constitution chimique des bitumes ont été essentiellement orientées vers la composition générique dont les quatre familles principales retenues sont : une suspension de micelles d'asphaltènes peptisées par des résines dans un milieu d'huiles saturées et aromatiques. Ce dernier c'est que l'on appelle le système colloïdal (figure II.2).

II.3.2.1 Asphaltènes

Les asphaltènes constituent la fraction la plus condensée du bitume [15], représente de 20 jusqu'à 30% du bitume [18]. Lorsque ces asphaltènes sont séparés du bitume par précipitation, ils se présentent sous la forme d'un solide dur et friable [15] [16], de couleur brun-noir [16] [19] dont le point de ramollissement est assez élevé, compris entre 150 et 200°C.

Les constituants des asphaltènes sont de carbone et d'hydrogène avec un rapport H/C généralement égal à 1,1 mais aussi d'azote, d'oxygène et jusqu'à 10% de soufre [15]. Les métaux sont également présents dans les asphaltènes, essentiellement du nickel, du fer et du vanadium [14] [15].

II.3.2.2 Résines

Les résines se présentent sous formes solides ou semi solides de couleur brun-noir, et comme les asphaltènes, elles sont composées de carbone et d'hydrogène, mais contiennent de faibles quantités d'oxygène, de soufre et d'azote. Le rapport H/C est de 1,3 à 1,4 et la teneur habituelle des résines dans les bitumes routiers se situe dans une fourchette de 13 à 25%. Elles sont de nature très polaire et de ce fait ont des propriétés adhésives très fortes. Ce sont des agents de dispersion ou de peptisation des asphaltènes et leur taille est comprise entre 1 et 5nm [19].

II.3.2.3 Saturés

Ce sont des huiles visqueuses non polaires de couleur paille ou blanche [19]. Ils sont essentiellement composés de carbone et d'hydrogène avec un rapport H/C qui varie de 1,9 à 2 [16].

Ils comportent un faible pourcentage d'alcane linéaires pouvant cristalliser [19]. Ils incluent à la fois des composés saturés paraffiniques et non paraffiniques. Les saturés peuvent être présents entre 5 et 20% dans les bitumes.

II.3.2.4 Aromatiques

Ce sont des liquides visqueux brun-noir. Ils contiennent une quantité importante de carbone et d'hydrogène avec un rapport H/C voisin de 1,5 [16], et par ailleurs principalement du soufre. Ils constituent de 40 à 65% du bitume [19].

Les aromatiques sont les fractions présentes en majorité (environ 60%) et sont notamment les espèces impliquées dans la transition vitreuse du bitume, en conjonction avec les saturés non-cristallisés [14].

II.3.3 STRUCTURE COLLOÏDALE

En général les bitumes se présentent comme un système colloïdal dans lequel les asphaltènes sont dispersés dans une matrice de maltène [14], c'est-à-dire de particules solides, sous formes de micelles de quelques microns de diamètre qui sont les asphaltènes, se trouvent dispersées dans une phase liquide continue qui sont dans ce cas les maltènes [13]. Cette structure a été proposée dans les années 1920 par Nellensteyn [14].

Cette idée fut développée dès 1940 par Pfeiffer et Saal [20] [14], où ils représentent les huiles, les résines et les asphaltènes par un système colloïdal (figure II.3).

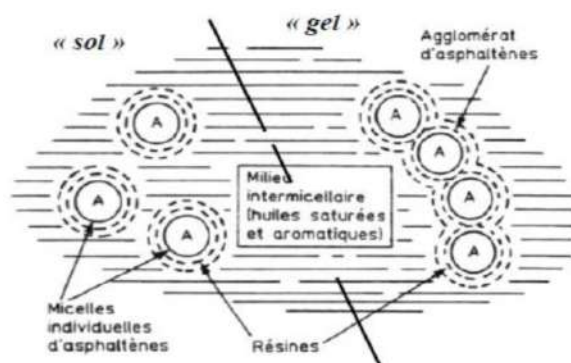


Figure II.2. Représentation du modèle de structure colloïdale des bitumes [21]

Le modèle colloïdal du bitume décrit ainsi trois types de liants à température ambiante [14], ces trois types sont proposés en 1973 par Kolbanovskaya [22].

- Les bitumes dits « Sol » dont les propriétés rhéologiques sont essentiellement newtoniennes,
- Les bitumes dits « Gel » typiquement des bitumes rigides, dont les propriétés rhéologiques à température ambiante sont nettement non-newtoniennes.
- Une classe intermédiaire, appelée « Sol-Gel », correspondant aux bitumes intermédiaires.

Suivant le caractère « Sol » ou « Gel » du bitume, ses propriétés différentes ; les bitumes Sol présentent une excellente résistance aux sollicitations rapides, mais sont plus sensibles que les bitumes « Gel » aux sollicitations lentes ainsi qu’aux variations de température.

En termes de structure, ces différences sont expliquées par le degré de dispersion des asphaltènes dans la matrice maltène : selon ce modèle, les bitumes « Sol » présentent des asphaltènes bien dispersés alors que les bitumes « Gel » possèdent plutôt une structure tridimensionnelle percolant [22].

Tableau II.4. Types structuraux des bitumes en fonction de leur composition [22]

Type de bitume	Asphaltène	Résine	Huiles
Gel	> 25	< 24	> 50
Sol	< 18	> 36	< 48
Sol/Gel	21 à 23	30 à 34	45 à 49

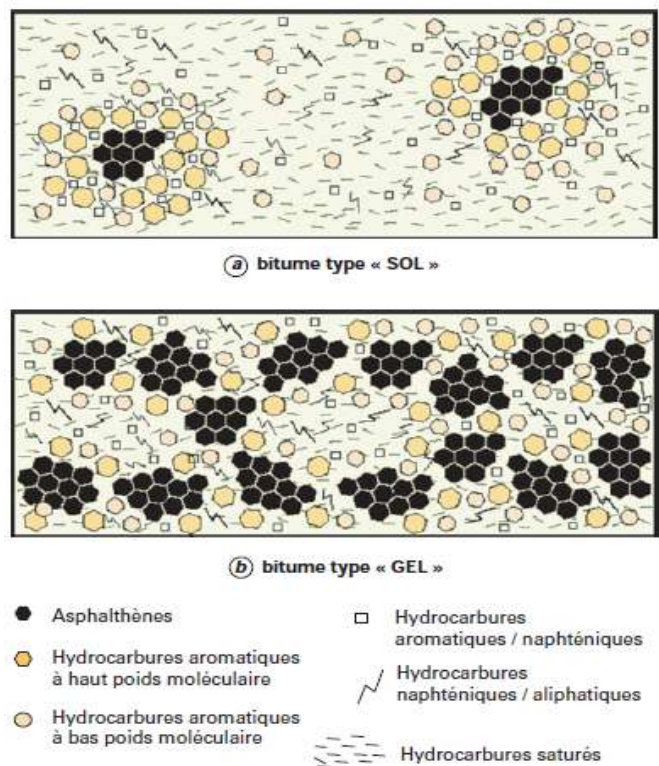


Figure II.3. Les types de bitume selon la structure et la composition [8].

Cette diversité dans les structures des bitumes pose une question sur la stabilité de la structure colloïdale, de nombreux auteurs ont tenté de caractériser la stabilité de l'état colloïdal tel que le cas de Gaestel et al. [22], qui définit un indice d'instabilité colloïdale I_C (formule II.1) [8]. Cet indice étant défini comme le rapport de la somme des teneurs en asphaltènes et huiles saturées, à la somme de la teneur en résines et huiles aromatiques.

$$I_C = \frac{(A_S + H_S)}{(H_A + R_S)} \dots\dots\dots \text{Formule II.1}$$

Avec :

- As : teneur en asphaltènes, Ha : teneur en huiles aromatiques,
Hs : teneur en huiles saturées, Rs : teneur en résines,

Plus le rapport est grand, moins les asphaltènes sont peptisés dans la phase malténique [18] et donc le bitume est de type « Gel » et plus sa stabilité colloïdale est médiocre [22]. Gaestel note également que toutes les caractéristiques du liant (point de ramollissement, ductilité, température de fragilisation, susceptibilité thermique, retour élastique, ...etc.) varient de façon sensible avec l'indice d'instabilité colloïdale, donc selon leur composition [22]. Cet indice prend les valeurs proches de 1 pour un bitume dans un état « Gel » et proche ou inférieur à 0,25 dans un état « Sol » [23] [24]

En 2007, Farcas propose le cassement représentant la consistance des bitumes selon leur indice colloïdal I_C donné par le tableau II.5 [25] [24] :

Tableau II.5. Consistance des bitumes en fonction de la valeur d' I_C [25]

Type de bitume	Sol	Sol/Gel	Gel
Gel	$I_C \leq 0,1$	$0,1 \leq I_C \leq 0,5$	$I_C \geq 0,5$

La stabilité colloïdale peut être estimée aussi par l'indice d'asphaltène (I_A) défini par Oyekunle [26] en 2006 (Formule II.2). Il représente le taux de variation d'asphaltène.

$$I_A = \frac{(A_S + R_S)}{(H_A + H_S)} \dots\dots\dots \text{Formule II.2}$$

Avec :

- As : teneur en asphaltènes, Ha : teneur en huiles aromatiques,
Hs : teneur en huiles saturées, Rs : teneur en résines,

D'après Oyekunle [26], la corrélation de ces deux indices et la composition de bitume révèle que l' I_C est un meilleur paramètre de caractérisation des bitumes que l' I_A .

II.4 COMPORTEMENT DES BITUMES

II.4.1 RHÉOLOGIE DES BITUMES

La rhéologie est une science particulièrement adaptée à l'étude des corps viscoélastiques tels que les bitumes afin de pouvoir prédire leurs comportements sous différentes sollicitations mécaniques.

Parmi les propriétés rhéologiques demandées au bitume [14], il doit d'abord être pompable et maniable à température élevée (aux environs de 160°C). Ensuite, il doit être suffisamment rigide aux températures élevées de service pour maintenir le squelette granulaire et limiter le fluage des enrobés, permettant d'éviter ainsi le phénomène d'orniérage qui se manifeste autour de 50°C, selon le trafic et le grade du bitume.

Enfin, il doit être suffisamment élastique à la basse température de service pour permettre aux contraintes de se relaxer et résister ainsi à la fissuration par fatigue ou au retrait thermique.

II.4.2 COMPORTEMENT DES BITUMES

Le bitume est un matériau thermoplastique, son comportement est celui [27] :

- d'un solide élastique pour un faible temps d'application de la charge et une basse température,
- d'un liquide visqueux pour un long temps d'application de charge et une haute température.
- d'un caractère viscoélastique pour les temps de charge et les températures intermédiaires.

Il est nécessaire donc de prendre en compte ces différents domaines pour préciser le comportement rhéologique global du matériau. Olard en 2003 [21] [28] proposa, sous forme de graphique (Figure II.5), de distinguer les principaux types de comportement des bitumes en fonction de l'amplitude de la déformation « ε » et de la température « T » pour une vitesse de déformation fixée.

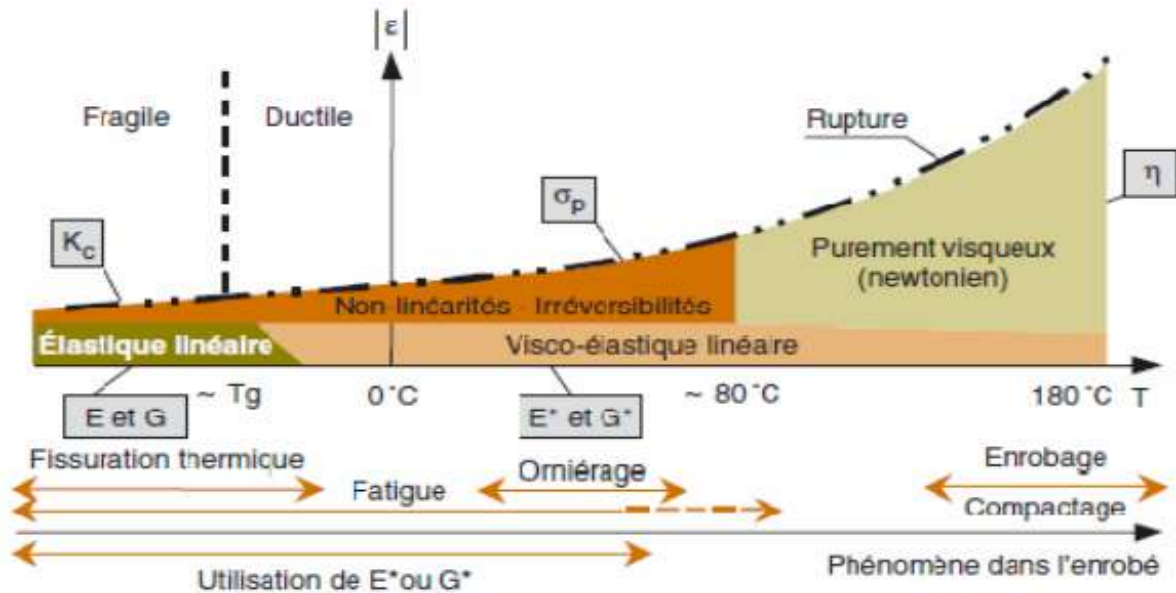


Figure II.4. Représentation schématique des différentes classes de comportement des bitumes en fonction de $|\epsilon|$ et T [21] [28]

On y distingue :

- Les domaines fragile et ductile, où la résistance à la traction σ_p peut être mesurée,
- La rupture fragile, qui peut être caractérisée par la ténacité K_C ou l'énergie de rupture G_C (Mécanique Linéaire de la Rupture),
- Le comportement élastique linéaire, caractérisé par les modules E et G ,
- Le domaine viscoélastique linéaire, caractérisé par les modules complexes E^* et G^* ,
- Le comportement purement visqueux (Newtonien), caractérisé par la viscosité η ,
- Pour des déformations de l'ordre de quelques pour cent, le domaine où le comportement est fortement non linéaire.

II.4.3 MÉTHODES DE MESURE DES CARACTÉRISTIQUES RHÉOLOGIQUES

L'approche rhéologique des matériaux nécessite différents modes de sollicitations [29], on peut citer :

- La relaxation ;
- Le fluage ;
- Les oscillations périodiques de la contrainte ou de la déformation ;
- Les essais à vitesse de déformation ou de déplacement imposée ;
- Les essais à vitesse de variation imposée de la contrainte.

Dans le cas particulier de l'étude du comportement rhéologique des bitumes, les échantillons sont soumis à des oscillations périodiques de la déformation.

Les raisons de ce choix tiennent à la richesse des informations obtenues par cette voie ; et la nature sinusoïdale de l'essai qui simule mieux les sollicitations périodiques imposées à la route par la circulation.

Lors d'une étude couvrant l'ensemble des conditions de service d'un bitume, depuis sa température d'enrobage jusqu'à - 30°C, la rigidité de ce dernier variant considérablement avec la température, il est donc nécessaire d'utiliser des corps d'épreuve différents pour respecter les limites imposées par les capteurs et les conditions de linéarité qui réduisent l'amplitude des déplacements possibles [27].

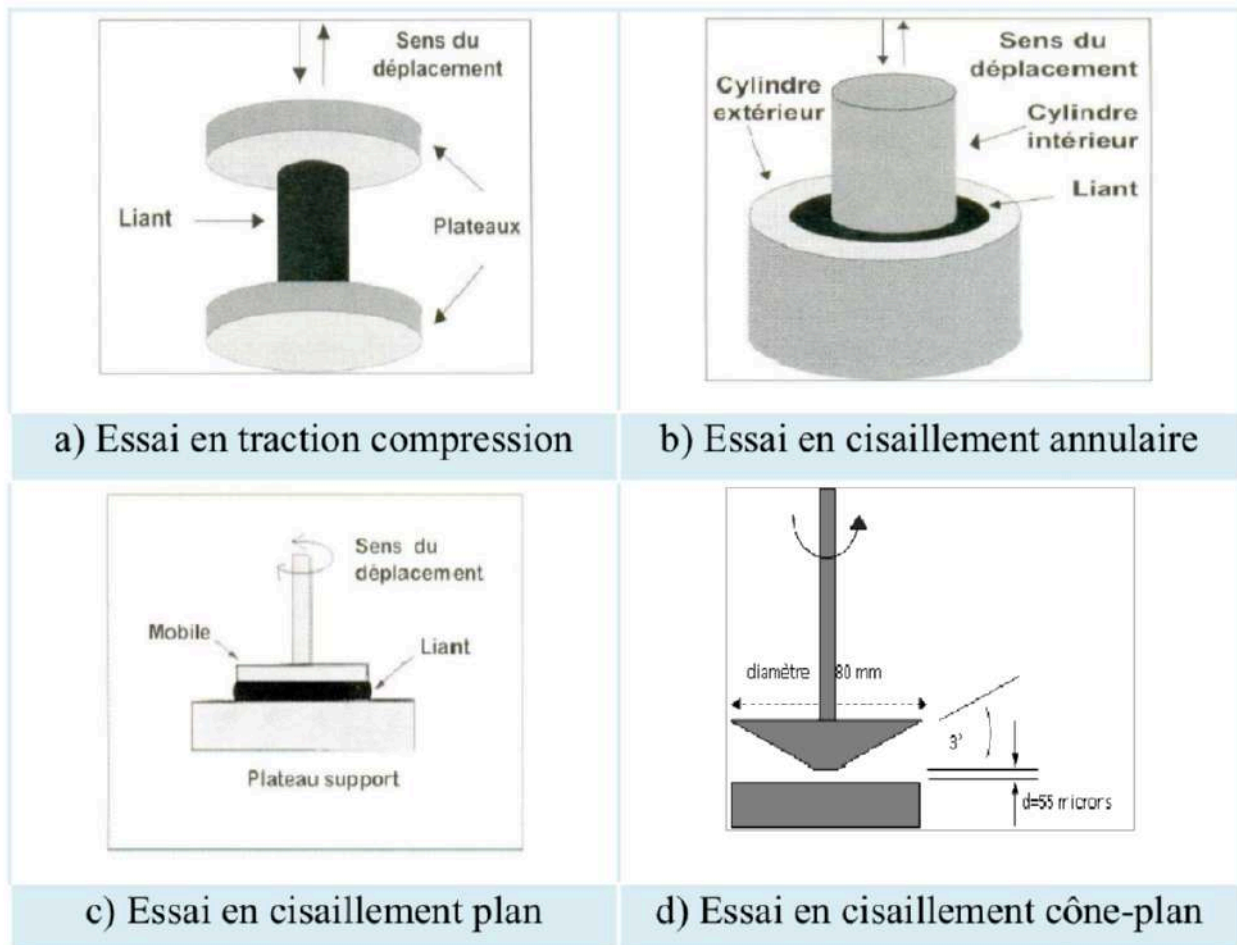


Figure II.5. Corps d'épreuve des essais rhéologiques des bitumes [27].

Les corps d'épreuve utilisés sont essentiellement en fonction du mode de sollicitation [27] :

- La traction (fig.II.5-a) ;
- Le cisaillement annulaire (fig.II.5-b) ;
- Le cisaillement radial entre deux plans circulaires (fig.II.5-c) ;
- Le cisaillement cône-plan [23] (fig.II.5-d).

Les appareils générant un mouvement longitudinal (par exemple le viscoélasticimètre Métravib utilise la traction et/ou le cisaillement annulaire). Ceux qui génèrent un mouvement circulaire (Haake, Rheometrics, ...etc.) travaillent en cisaillement radial [27]. Les appareils se diffèrent également par leur gamme de fréquences et de températures et par leur mode de régulation thermique.

II.5 CONCLUSION

Le bitume est l'objet de cette recherche, puisqu'il serait modifié, et pour cela dans ce chapitre nous abordons l'industrie de bitume, l'évaluation de ce produit, et leurs compositions, chimiques et physiques, et comment ce matériau réagissent sous la fréquence et la température qui sont les principaux facteurs influencer les routes.

III. COMPORTEMENT DES ENROBÉS BITUMINEUX

III.1 INTRODUCTION

Les enrobés bitumineux sont des corps complexes [2] où le squelette granulaire traduit le comportement élastique et le liant apporte le comportement visqueux [30], ce liant qui contient ses propriétés mécaniques dépendant de la durée de sollicitations (ou la fréquence) et la température. [7].

III.2 PRÉSENTATION DU COMPORTEMENT DES ENROBÉS BITUMINEUX

Dans la littérature, les matériaux bitumineux sont généralement considérés comme étant homogènes, isotropes, viscoélastiques, linéaires et thermo-susceptibles [7].

- Milieu continu :

Bien que sa structure composite grenue confère à l'enrobé utilisé couramment sur chaussées a un caractère hétérogène, on peut faire l'hypothèse d'homogénéité macroscopique à l'échelle d'une couche de chaussée.

Pour les éprouvettes de laboratoire, on considère généralement qu'un rapport de 10 entre la taille du plus gros granulats et celle de l'éprouvette est nécessaire pour considérer celle-ci comme homogène. Bien que ce rapport ne soit pas toujours respecté (environ 3 pour certaines éprouvettes testées à la fatigue), on fait l'hypothèse d'homogénéité [7].

- Isotropie :

Le mode de mise en œuvre de l'enrobé sur chaussées (répandage du matériau foisonné par couche et compactage par passage successif de compacteurs à la surface) confère au matériau une certaine anisotropie (gradient de densité dans le sens de l'épaisseur de la couche, orientation privilégiée des grains par le compactage).

De la même façon, les éprouvettes fabriquées en laboratoire présentent ce type de propriétés. Des mesures du module en traction-compression réalisées sur des échantillons cylindriques prélevés suivant trois axes de carottage dans des plaques d'enrobés fabriquées en laboratoire, ont montré des variations pouvant atteindre 20% [7].

Pour minimiser ces effets, on réalise souvent les essais sur des échantillons prélevés à cœur du matériau. Dans les calculs de dimensionnement routier, on fait l'hypothèse d'isotropie du matériau [7].

- Viscoélasticité :

L'enrobé bitumineux hérite des caractéristiques viscoélastiques du liant qu'il contient. Ce qui provoque aussi des matériaux thermo-susceptibles.

Lorsque les charges sont appliquées très lentement, il présente un comportement à prédominance fluide visqueux. Lorsqu'il est appliqué très rapidement, il présente un comportement pratiquement élastique. Entre ces deux cas de figure extrêmes, il présente un comportement viscoélastique dont la linéarité dépend du niveau de déformation.

- Linéarité :

On considère que les enrobés bitumineux présentent un domaine de sollicitation pour lequel leur comportement est linéaire (figure III.1). C'est dans le domaine de linéarité que sont réalisées les mesures du module des matériaux bitumineux. Ceci nécessite l'application des petites déformations [31] [7] [32].

L'hypothèse d'un comportement viscoélastique linéaire des enrobés bitumineux suppose la validité du principe de superposition de BOLTZMANN. Ce principe suppose que la réponse d'un matériau à une sollicitation composée d'un certain nombre de sollicitations élémentaires est la somme des réponses à chacune de ces sollicitations élémentaires [7] [33].

Dans cette hypothèse, il existe plusieurs modes de mesure de la rigidité des enrobés. Les modes les plus fréquents sont le mode temporel où on applique une charge quasi-statique et le mode fréquentiel où on applique une charge sinusoïdale. Il existe aussi des modes mixtes reposant généralement sur des méthodes en "impulsions", c'est à dire avec contrôle de la valeur maximale de sollicitation appliquée, mais sans un réel pilotage de la loi de chargement comme dans les deux cas précédents.

L'hypothèse de comportement viscoélastique linéaire des enrobés bitumineux est utilisée pour décrire de façon fine la réponse temporelle de ces matériaux. On l'utilise, par exemple, pour retrouver par le calcul d'allure des signaux de déformations transversales ou longitudinales mesurées à la base des couches bitumineuses au passage des charges roulantes [7] [34], ou lorsque l'on veut évaluer la dissipation visqueuse liée à l'accumulation des sollicitations.

Dans certains cas, on se contente de l'hypothèse d'élasticité linéaire pour décrire le comportement du matériau. Cette hypothèse est utilisée pour le calcul des contraintes et des

déformations dans les couches bitumineuses, dans le cadre de dimensionnement des chaussées en France [35].

- Influence de la température :

La température est un paramètre déterminant le comportement du matériau bitumineux. En effet, comme le liant entre dans sa composition, l'enrobé bitumineux est thermo-susceptible, c'est-à-dire que ses propriétés dépendent fortement de sa température.

À température basse, l'enrobé possède sous sollicitation usuelle (trafic routier) une rigidité élevée et il peut se montrer fragile.

À température élevée, il présente un module faible et une déformabilité importante. Ces propriétés peuvent être responsables du phénomène d'orniérage qui peut être accentué par une faible vitesse de sollicitation.

La figure III.1 identifie les principaux types de comportement des enrobés bitumineux, en fonction de l'amplitude de la déformation « ϵ », et le nombre des cycles de chargement appliqué "N" [2] :

- Pour des chargements de quelques centaines de cycles et des déformations de faibles amplitudes ($<10^{-4}$ m/m) le comportement est considéré, en première approximation, viscoélastique linéaire.
- Pour un faible nombre de chargements et des déformations de quelques pour cent, le comportement observé est fortement non linéaire.
- Lors de chargements de plusieurs milliers de cycles et sous faibles déformations, des phénomènes d'endommagement apparaissent, le matériau se « fatigue ».
- Lorsque des cycles déviatoires en contraintes sont appliqués à partir d'une contrainte nulle, des déformations irréversibles non négligeables se produisent pour des amplitudes de déformation proches de la rupture. Leur accumulation crée de l'orniérage.

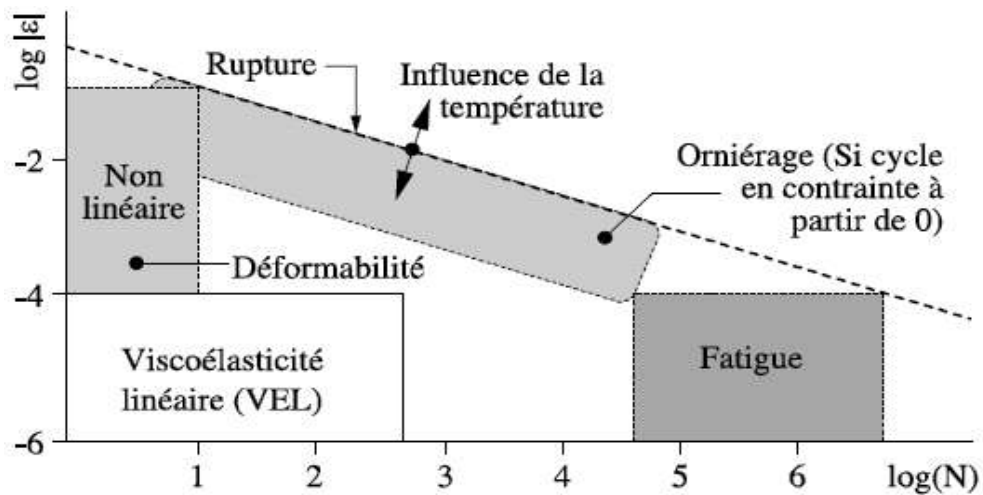


Figure III.1. Schéma représentatif de comportement des enrobés bitumineux
(ϵ : déformation, N : nombre de cycles chargement) [2]

Le comportement des matériaux traités en liants hydrocarbonés, sont caractérisés par quatre propriétés mécaniques [3] qui sont :

- La rigidité ou le module (comportement viscoélastique linéaire VEL),
- Le comportement à la fatigue
- Le comportement à l’orniéage qui correspond à l’accumulation de déformations permanentes.
- La fissuration et la propagation des fissures. En particulier, les phénomènes de fissuration par apparition de contraintes liées aux variations de température (dilatation et/ou contraction thermique) sont un aspect important qui introduit un couplage thermomécanique,

III.3 MESURE DU MODULE DANS LE DOMAINE FRÉQUENTIEL

III.3.1 DÉFINITION ET PRINCIPE DE LA MESURE

Ce type d’essai consiste à soumettre le matériau à des sollicitations sinusoïdales de fréquences variées. Ces mesures sont effectuées dans le domaine des petites déformations pour lequel l’enrobé se comporte principalement comme un matériau viscoélastique linéaire. La sollicitation peut être en mode de contraintes ou en mode de déformations [7]. La réponse à cette sollicitation sera aussi sinusoïdale avec la même pulsation [32].

Sollicitation soumise	⇒	La réponse
$\epsilon(t) = \epsilon_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$	⇒	$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$
$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$	⇒	$\epsilon(t) = \epsilon_0 \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi)$

Compte tenu du caractère viscoélastique du matériau, dans le cas d'une sollicitation à température constante, la déformation accuse un retard sur la contrainte qui se traduit par un angle de déphasage φ entre les deux signaux (Figure III.2).

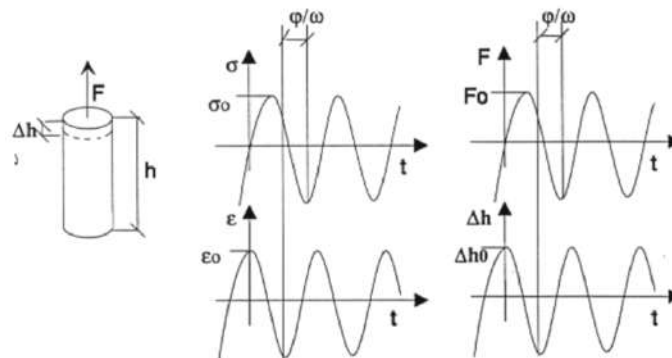


Figure III.2. Exemple du signal de force (ou contrainte) et le signal de déplacement (ou déformation) lors des essais avec une sollicitation sinusoïdale [36] [7]

Mathématiquement, il est plus avantageux de traiter les relations sinusoïdales en notation complexe. Ainsi, la sollicitation en contrainte et la réponse en déformation deviennent complexes [7] :

$$\sigma^*(t) = \sigma_0 \cdot e^{i\omega t} \quad \& \quad \varepsilon^*(t) = \varepsilon_0 \cdot e^{i(\omega t - \varphi)}$$

On définit le module complexe par analogie avec le module de YOUNG en élasticité :

$$E^* = \sigma^* / \varepsilon^* = \sigma_0 / \varepsilon_0 \cdot e^{i\varphi} = |E^*| \cdot e^{i\varphi}$$

$|E^*|$ est appelé le module de rigidité, sa valeur est utilisée dans le dimensionnement des chaussées.

L'angle φ est varié entre 0 et $\pi/2$. Il caractérise le comportement visqueux du matériau. Sa valeur donne une idée sur la prédominance élastique ou visqueuse du comportement.

Pour un matériau parfaitement élastique, φ est nul et le module devient un nombre réel. On peut distinguer la partie élastique et visqueuse du module complexe en séparant ses parties réelle et imaginaire en utilisant l'écriture suivante :

$$E^* = E_1 + iE_2$$

Dans cette formule :

- E_1 est la partie réelle du module complexe. Elle est en phase avec la contrainte et représente la partie récupérable de l'énergie conservée,
- E_2 est la partie imaginaire correspondante à un comportement visqueux irréversible,

Le module complexe permet de généraliser au corps viscoélastique, les lois mécaniques en principe réservées au seul corps élastique.

Une autre caractéristique importante est le coefficient de POISSON qui intervient dans le dimensionnement des chaussées et permet d'évaluer les déformations latérales.

La déformation latérale d'un corps viscoélastique linéaire est soumise à un chargement sinusoïdal et aussi sinusoïdale avec la même pulsation mais déphasée de β par rapport à la déformation axiale.

Si l'on considère une sollicitation en mode de déformation du type :

$$\varepsilon_1^*(t) = \varepsilon_0^1 \cdot e^{i\omega t}$$

La déformation latérale sera :

$$\varepsilon_3^*(t) = \varepsilon_0^3 \cdot e^{i(\omega t + \beta)}$$

Le coefficient de POISSON complexe se définit par :

$$\nu^* = -\frac{\varepsilon_0^3}{\varepsilon_0^1} \cdot e^{i\beta}$$

ν^* est à priori un nombre complexe, cependant, des expériences de mesure directe de coefficient de poisson avec une pression de confinement [37] ou sans pression de confinement [38] tendent à montrer que la valeur de l'angle β est égale ou très proche de 180° .

Pour les matériaux bitumineux testés, la valeur de coefficient de poisson varie entre 0.2 et 0.44 selon la température et la fréquence.

III.3.2 LES TYPES D'ESSAIS

On peut classer les essais de module complexe existant en deux grandes catégories, les essais homogènes et les essais non homogènes qui ont été recensés par Di Benedetto en 1990 [3].

Les essais homogènes permettent d'avoir accès directement aux contraintes et aux déformations contrairement aux essais non homogènes qui nécessitent la prise en compte de la structure de l'éprouvette (données géométriques) pour le calcul du module du matériau.

De manière générale, pour tous les essais, à partir des valeurs de force « F » et déplacement « d » appliquées à l'éprouvette et du déphasage φ entre les deux signaux, on peut déterminer le module complexe de l'enrobé bitumineux à l'aide de deux facteurs :

- Un facteur de forme " γ ", dépendant des dimensions de l'éprouvette ;

- Un facteur de masse " μ " prenant en compte (si nécessaire) les effets d'inertie liés à la masse M de l'éprouvette en mouvement et à la masse m de l'équipage mobile (casques de fixation, liaison éprouvette-organe moteur etc.).

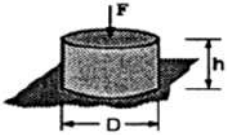
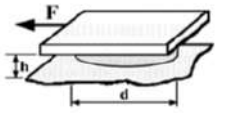
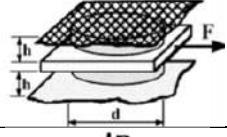
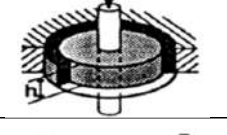
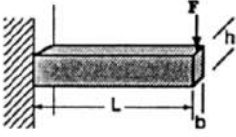
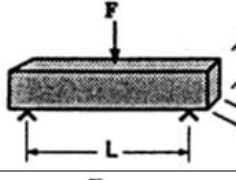
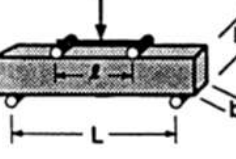
Les parties réelles et imaginaires du module complexe sont alors données par [32] :

$$E_1 = \gamma \left(\frac{F}{d} \cos \varphi + \mu \omega^2 \right), E_2 = \gamma \left(\frac{F}{d} \sin \varphi \right)$$

Où ω , désigne la pulsation.

Le tableau III.1 regroupe les différents essais selon la classification précédente (homogènes et non homogène), avec leur schéma, leur facteur de forme et masse, avec les références indiquées mentionnées dans le même tableau [3] :

Tableau III.1. Récapitulatif des principaux essais de module complexe sur enrobés [3]

		Schéma de principe	Facteur de forme γ	Facteur de masse μ	Référence
Essai homogène	Traction Compression		$\frac{h}{\pi D^2}$	-	[35] [39]
	Essai de cisaillement à hauteur constante		$\frac{h}{\pi D^2}$	-	[40][41]
	Shearing Test machine		$\frac{h}{\pi D^2}$	-	[42]
	Co – axial shear test		$\frac{\ln \left(\frac{d}{D} \right)}{2\pi h}$	-	[43]
Essai non homogène	Flexion 2 points		$\frac{4L^3}{bh^3}$	$\frac{M}{4} + m$	[44]
	Flexion 3 points		$\frac{24L^3}{\pi^4 bh^3}$	0.5M+m	[16]
	Flexion 4 points		$\frac{2L^3 - 3L.l^2 + l^3}{8.b.h^3}$	0.5M+m	[45]

III.3.3 ANALYSE DES RÉSULTATS

Les différentes composantes du module complexe varient avec la température et la fréquence de sollicitation, fixées pour chaque essai élémentaire. Les résultats expérimentaux $|E^*|$, φ , E_1 , E_2 , sont usuellement exprimés à l'aide des représentations classiques décrites dans ce qui suit :

a) Courbes isothermes

Elles sont obtenues en traçant la norme du module complexe $|E^*|$ En fonction de la fréquence pour chacune des températures d'essais T , généralement en coordonnées bi-logarithmiques (Figure III.3).

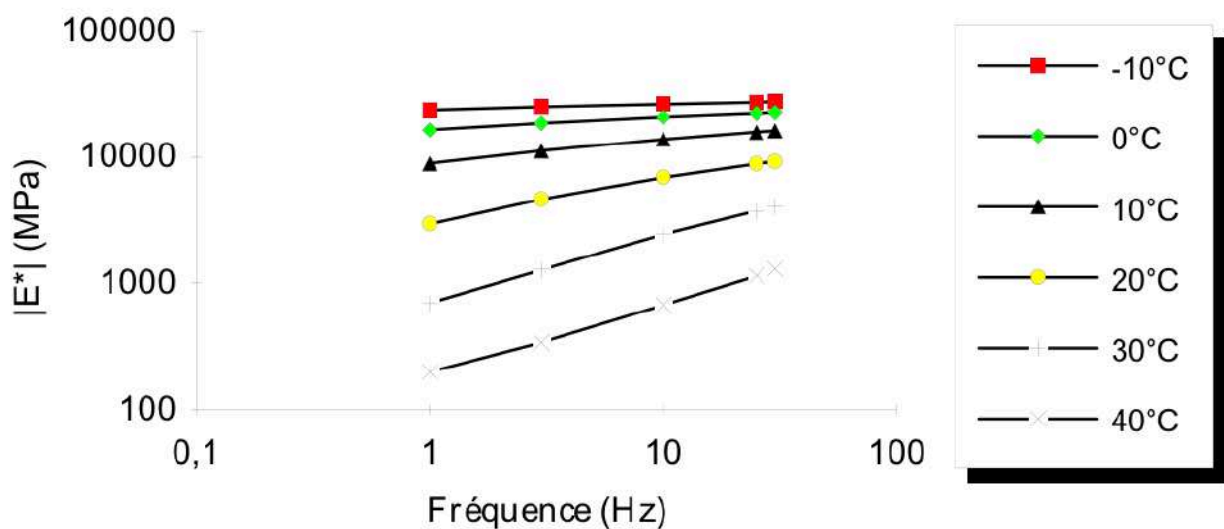


Figure III.3. Exemple d'une courbe isotherme [3]

Outre les valeurs du module directement utilisables pour les calculs de dimensionnement, la pente des isothermes permet d'estimer la **susceptibilité cinétique** du matériau bitumineux (c'est-à-dire la variation du module avec la vitesse de la sollicitation) [3].

- Principe d'équivalence temps – température

Généralement le comportement viscoélastique linéaire dépend de la température. Le module complexe $E^*(\omega)$ qui dépend à la fois de la pulsation ω et de la température T s'écrit sous la forme : $E(\omega, T)$.

Le principe d'équivalence temps-température permet d'énoncer que pour certains matériaux, notamment les enrobés bitumineux, l'augmentation de la fréquence de sollicitation a un effet équivalent à une diminution de la température.

Grâce à ce principe, la translation à une température de référence des résultats obtenus à une

température donnée est possible par la détermination des fréquences équivalentes.

La translation d'une courbe à température donnée, T_i , vers une température de référence T_{ref} consiste essentiellement à multiplier chaque fréquence par un facteur de translation « a_t » et associer la valeur du module mesuré à T_i à cette nouvelle fréquence. (Figure III.4)

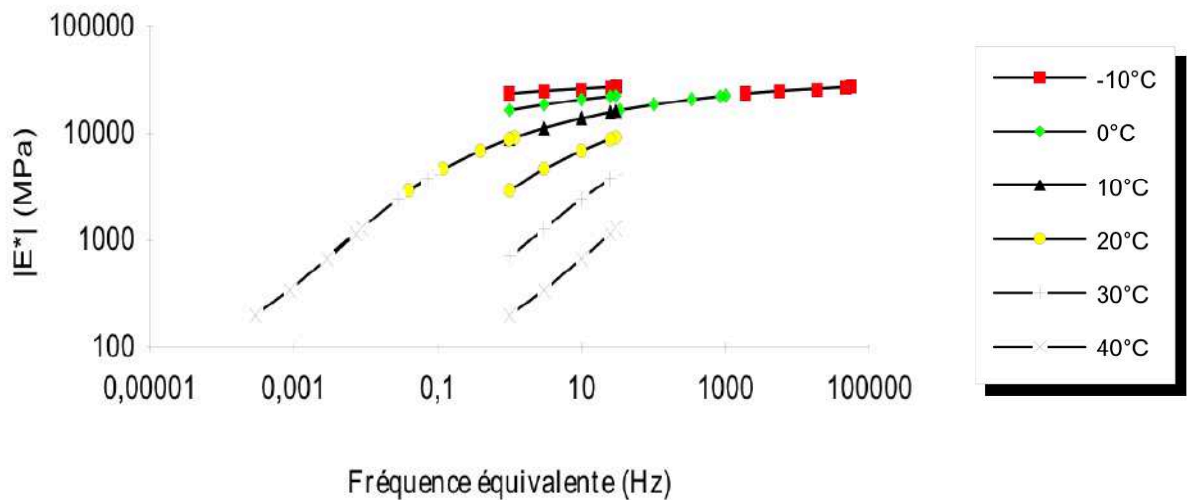


Figure III.4. Exemple d'une superposition des courbes isothermes à une température de référence de $T_{ref} = 10\text{ °C}$ [3]

Pour les polymères, la relation de Williams, Landel et Ferry, WLF, est utilisée pour effectuer la translation.

Le facteur de translation « a_t » est défini par la relation suivante Aklonis et MacKnight en 1983 :

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T_i - T_{ref})}{C_2 + (T_i - T_{ref})}$$

C_1 et C_2 sont des constantes qui varient en fonction du matériau testé. Selon Di Benedetto et De La Roche, la relation de WLF traduit correctement les évolutions obtenues expérimentalement sur les enrobés bitumineux [46].

À partir des résultats expérimentaux du module complexe mesuré à diverses fréquences et températures, un facteur de translation à T_{ref} est déterminé pour chacune des isothermes.

Il est possible de tracer l'évolution des facteurs de translation par rapport à la température d'essai et de déterminer alors les paramètres C_1 et C_2 suivant la relation de l'équation précédente.

Sur la base du principe de correspondance temps-température, on peut établir des courbes maîtresses.

Une courbe maîtresse est une courbe isotherme établie à une température de référence qui donne l'évolution de la norme du module complexe par rapport à une plage de fréquences étendue. L'intérêt des courbes maîtresses est non seulement de résumer les courbes isothermes en une seule courbe, mais elles permettent aussi de prévoir les caractéristiques rhéologiques du matériau étudié dans des zones technologiquement intéressantes, mais expérimentalement inaccessibles ; effet de choc (fréquence de sollicitation très rapide) ou fluage de type orniérage (température de sollicitation élevée) [47]

b) Courbe isochrone

Il s'agit du même type de représentation de la courbe isotherme, mais il est exprimé en coordonnées semi-logarithmiques en inversant les paramètres fréquence et température (Figure III.5).

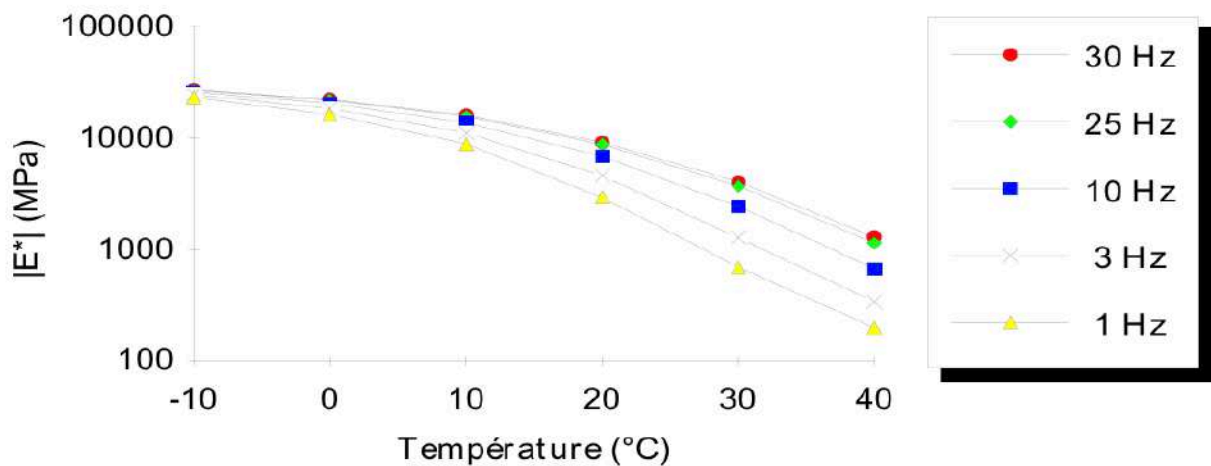


Figure III.5. Exemple d'une courbe isochrone [3]

De même que les courbes isothermes, cette représentation permet cette fois d'estimer la **susceptibilité thermique** de l'enrobé bitumineux (variation du module pour une variation de température).

III.4 CONCLUSION :

La modification du bitume n'est pas la fin de ce projet, il est important de comprendre comment la température et la fréquence vont affecter le produit final, le béton bitumineux.

Dans ce chapitre, nous présentons comment ces deux facteurs ont un impact important sur les mélanges, et comment le module, le principal paramètre du dimensionnement des chaussées, est affectés par ces facteurs, l'augmentation de température réduit sa valeurs, et la réduction de fréquence fait le même impact.

IV. MODIFICATION DES MÉLANGES BITUMINEUX

IV.1 INTRODUCTION

L'amélioration des caractéristiques des chaussées souples routières s'avère indispensable devant la croissance des trafics et les performances des véhicules de plus en plus grandes. Cette amélioration s'est développée par l'introduction de nouvelles techniques et procédés de modification des produits bitumineux [48]. La modification est définie comme étant une modification dans les propriétés rhéologiques pendant la fabrication par l'emploi d'un ou plusieurs agents chimiques.

Dans ce contexte, le terme agent chimique comprend le caoutchouc naturel, les polymères synthétiques, le soufre et certains composants organométalliques, mais pas l'oxygène, ou ces divers produits tels que les chlorures ferriques ... etc. qui ne sont pas considérées comme modificateurs du bitume.

Et dans ce contexte, on parle ici des bitume-polymères qui sont définis comme des cas particuliers, d'où le modificateur utilisé est un ou plusieurs polymères organiques [13].

IV.2 HISTORIQUE DES BITUMES MODIFIÉS

La première apparition d'un bitume-caoutchouc revient à l'année 1939 et fut fondamentale dans la journée d'étude des bitumes-caoutchouc organisée par LCPC en mai 1964. Mais ce développement significatif avec des processus industrialisés pendant les années 70 en Europe, particulièrement en Allemagne.

En Italie et dans la même période, apparut une chaussée autoroutière avec un revêtement constitué de mélanges bitumineux à base de polyéthylène introduit lors du malaxage.

L'augmentation progressive du trafic routier d'une part, ainsi que les crises pétrolières de 1973 puis de 1979 d'autre part ont constitué des facteurs essentiels du développement des liants modifiés. En effet, la recherche d'économie des projets de construction et également dans le domaine routier, a conduit à rechercher des solutions innovantes en particulier dans le domaine des couches de roulement avec des revêtements réduits en épaisseur (< 5 cm).

IV.3 INSUFFISANCES DES MÉLANGES BITUMINEUX

Le bitume pur, lorsque son grade est bien choisi pour le produit bitumineux concerné (enrobé ou enduit) et dans une application donnée, répond dans une grande majorité de cas à l'objectif qui est de garantir des propriétés d'adhésion et mécaniques satisfaisantes dans les conditions de trafic et de climat auxquelles il est confronté.

Cependant, l'accroissement du trafic en poids lourds avec une augmentation de la charge et de la pression pneumatiques ont induit un risque d'apparition d'orniérage des chaussées bitumineuses. En effet, le poids total en charge est passé de 19 à 26 tonnes entre 1960 et 1970 pour atteindre 40 tonnes depuis 1989 [49]. Ces dernières années, des super poids lourds de 60 tonnes sont en circulation dans certains tronçons routiers.

Ces conditions de trafic liées à des impératifs d'économie (investissements plus durables dans le temps, couches de plus en plus minces) ont amené les bitumes purs à certaines limites d'emploi [50] [13] :

- Le bitume pur ne permet plus à l'enrobé de type traditionnel (béton bitumineux 0/10 ou 0/14 à granulométrie continue, semi-grenu ou grenu) d'assurer dans tous les cas une résistance à l'orniérage satisfaisante sous trafic très lourd et canalisé pour des températures durablement élevées, même en choisissant un grade dur (35/50 par exemple); un grade plus dur, s'il apporte à l'enrobé un meilleur comportement à l'orniérage accroît à l'inverse les risques de fissuration thermique à basse température;
- Certains mélanges enrobés de granularité ouverte n'auront pas la résistance mécanique souhaitée du fait de la cohésivité et de l'adhésivité obtenues avec un bitume pur, ni même une durabilité satisfaisante du fait d'une richesse en liant faible ;
- De même, les enduits superficiels sous trafic élevé et lourd ne présentent pas la même durabilité lorsqu'ils sont formulés avec un bitume pur pour les mêmes raisons de qualités mécaniques et d'adhésivité.

IV.4 OBJECTIFS DE LA MODIFICATION

Les objectifs recherchés par la modification des bitumes par des polymères sont multiples. Il s'agit avant tout de modifier le comportement thermique, où on conserve une consistance suffisamment élevée aux hautes températures pour éviter le ressuage et la déformation permanents, diminuer la fragilité à basse température pour éviter la fissuration et l'arrachement de gravillons.

Ces objectifs dépendent aussi des domaines d'application et des techniques projetés [50] :

- Enduits superficiels ;
 - Amélioration de la résistance sous les sollicitations de traction et de cisaillement;
 - Assurer la durabilité ;
 - Éviter le ressuage ;
 - Améliorer l'adhésivité/tenue à l'eau.
- Enrobés ouverts
 - Améliorer les propriétés antidérapantes ;
 - Augmenter la viscosité aux températures d'application.
- Enrobés à chaud épais (> 5cm), enrobés minces (3 à 4cm)
 - Assurer la résistance à l'orniérage ;
 - Améliorer le comportement à basse température ;
 - Améliorer le comportement à la fatigue.
- Couche d'assise de chaussée
 - Augmenter la résistance à la fatigue sous les chargements répétés du trafic ;
 - Apport d'une certaine flexibilité.

IV.5 MÉCANISME DE LA MODIFICATION

Pour préparer un enrobé modifié, il existe deux principaux procédés. Le polymère peut être ajouté directement au bitume, pour obtenir un BMP (Bitume Modifié par Polymère) qui peut ensuite être utilisé pratiquement comme bitume, cas de cette étude.

Deuxièmement, certains modifiants sont plutôt ajoutés à la centrale d'enrobage comme additifs, au même moment que les granulats. Dans ce cas, le bitume et le polymère n'ont pas le temps d'obtenir la morphologie d'un liant modifié. Le comportement du modifiant relève donc soit de la modification du squelette granulaire, ou celle du liant, ou les deux [18]

Les liants modifiés sont des liants bitumineux dont les propriétés ont été modifiées par emploi d'un agent chimique qui est introduit dans le bitume de base, modifiant la structure chimique et/ou les propriétés physiques et mécaniques.

Il s'agit du liant préfabriqué soit dans une usine distante du lieu d'utilisation, soit immédiatement avant l'emploi par une unité mobile spécialisée. Le liant modifié peut-être caractérisé après la séparation du mélange bitumineux (extraction).

La modification des propriétés des bitumes par l'addition de polymère est souvent expliquée

par le gonflement du polymère par les huiles du bitume. Pour qu'un polymère soit utilisable dans la modification d'un bitume, il doit être au moins gonflable, éventuellement soluble dans les fractions hydrocarbonées de faibles masses moléculaires du liant [18]. Cela induit qu'un liant bitume-polymère peut être considéré comme un système à deux phases :

- 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.

Différentes procédures ont été développées pour produire les bitume-polymères. Les principaux facteurs influençant le taux de dispersion des polymères dans la matrice bitumineuse sont les dimensions des particules de polymère, la température, et le cisaillement appliqué aux mélanges.

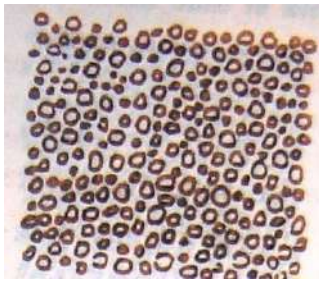
La température de mélange est généralement comprise entre 150°C et 200°C ou plus. La durée de mélange varie de quelques minutes à quelques heures. La durée optimale du mélange est atteinte quand les propriétés désirées du bitume-polymère sont atteintes [18].

Une des hypothèses les plus souvent avancées pour tenter d'expliquer la modification des propriétés des bitumes par adjonction de polymère thermoplastique est leur gonflement par les huiles du bitume [51].

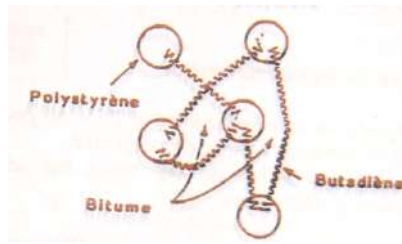
KRAUS pense que lorsque le polymère est ajouté au bitume préalablement chauffé, ce dernier commence immédiatement à pénétrer dans les particules du polymère sous l'influence du cisaillement de l'agitation, le polymère gonflé devient mobile et se disperse dans le bitume [51].

Le taux de dispersion est liée aux des paramètres suivants [51]:

- La température : la vitesse de diffusion du bitume dans les particules de polymère augmente avec la température,
- La taille des particules : plus elles sont petites, plus la surface de l'échange est importante,
- Le cisaillement : malgré le gonflement les molécules deviennent d'autant plus mobiles qu'elles ont été rompues (étape 3 et 4).



Étape 01 : fines particules de polymère en suspension dans le bitume



Étape 02 : microstructure du polymère



Étape 03 et 04 : domaine de polystyrène gonflé par le bitume et dispersion ultérieure par cisaillement

Figure IV.1. Mécanismes de la dispersion d'un copolymère (polystyrène-butadiène) dans le bitume [51]

On voit que la compatibilité des systèmes macromoléculaires thermoplastiques est assurée par un processus de dissolution - gonflement du polymère par les huiles du bitume.

L'incorporation de polymère même à faible dose entraînera une augmentation brutale de la viscosité des maltènes, et donc une meilleure résistance à l'écoulement. De plus, il faut noter que cet ajout de polymère enrichi la phase bitume en asphaltènes, diminue la distance inter-micellaire et conduit à susceptibilité thermique faible [51].

IV.6 CONCLUSION :

La modification de bitume est l'objectif principal de ce projet de recherche, c'est pourquoi dans le chapitre 04, nous discutons du mécanisme de modification, et la relation entre les polymères et les composants du bitume (asphaltène, maltène), et l'absorption de l'huile aromatique qui est l'évènement principal de ce mécanisme.

V. POLYMÈRES ET INDUSTRIE DES PLASTIQUES

V.1 INTRODUCTION

Parmi les 5000 types de plastiques connus, seule une cinquantaine présente un intérêt économique. Plus de 90% de la production mondiale se compose des cinq familles de plastiques suivantes :

- Polyéthylène (PE) comprend le polyéthylène à basse densité (LDPE) et le polyéthylène à haute densité (HDPE)
- Polypropylène (PP),
- Chlorure de polyvinyle (PVC),
- Polystyrène solide (PS) et polystyrène expansé (PSE)
- Polyéthylène téréphtalate (PET) [52].

L'augmentation moyenne de la production et la consommation mondiales de plastiques est d'environ 9% par an depuis 1950. La production mondiale totale est passée d'environ 1,5 million de tonnes en 1950 à 260 millions de tonnes en 2007 [53].

L'Europe représente 25% de la production mondiale, avec environ 65 millions de tonnes par an, l'Allemagne et l'Italie totalisant près de 40% de cette production européenne. En Suisse, la demande de matières plastiques par les plasturgistes est de 900 mille tonnes par an (à titre de comparaison, la demande en Allemagne est de 12,2 millions de tonnes par an) [53].

Aujourd'hui ces polymères sont les matières premières dans le domaine d'industrie et la fabrication des produits plastiques. Malheureusement le handicap le plus important de cette industrie résulte du volume important des déchets résultants ainsi le problème de non-biodégradabilité de ces derniers. Chaque année l'Algérie produit des milliers de tonnes de déchets de plastique, en 2013 la quantité produite est plus de 1.24 million de tonnes selon l'Agence Nationale des Déchets (AND) et à l'horizon 2030 la production mondiale dépassera 2.04 milliards de tonnes par an.

V.2 PRODUCTION MONDIALE DES PLASTIQUES

La consommation de matières plastiques varie d'une région à l'autre. En Europe, elle s'élève à environ 100 kg par habitant et par an ; au Japon à 89 kg ; en Asie, elle est estimée à 20 kg en moyenne, la figure V.1 présente la variation de la production volumétrique en différentes régions du monde :

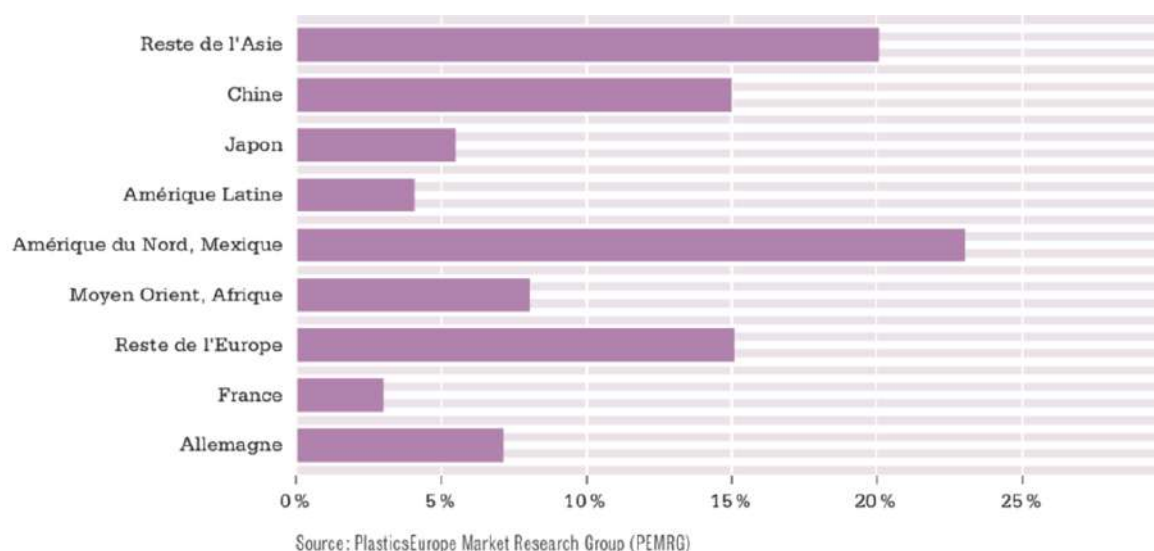


Figure V.1. Taux de production des matières plastiques en 2007 [54]

V.3 PRODUCTION ET POLYMÉRISATION

Le plastique est fabriqué à base de résines, issues principalement de la transformation de pétrole. Les autres composants comprennent notamment des plastifiants et des additifs, choisis en fonction des propriétés recherchées (légèreté, absence d'oxydation, solidité, transparence ou opacité, souplesse ou rigidité, isolation, résistance au chaud ou au froid, etc.) [51].

Du point de vue chimique, les plastiques sont des molécules en chaîne, qu'on obtient par polymérisation (enchaînement) d'une molécule simple (monomère).

Le monomère est obtenu soit directement par raffinage du pétrole brut, soit après traitement avec des additifs (exemple : remplacement de certaines parties des molécules issues du raffinage par des atomes de chlore).

Dans les tableaux suivants, les symboles permettent de reconnaître les familles de plastiques qui vont être indiqués. Ils se retrouvent sur chaque élément fait de matière synthétique pour en faciliter le tri.

Ces polymères sont des substances généralement organiques, liquides ou solides à température ambiante, de masse moléculaire élevée. Elle est caractérisée par la répétition d'un ou de plusieurs types de motifs monomères liés les uns aux autres par des liaisons covalentes.

Le nombre moyen de monomères dans un polymère est le degré de polymérisation. Le haut polymère est celui dont le degré de polymérisation est élevé, si celui-ci est faible, le composé est un oligomère [51].

La polymérisation est la procédure d'où un monomère est relié en long chaîne par une réaction chimique. Ces chaînes forment le polymère, cette étape est responsable de la forme de polymère résultant soit linéaire (fig. V.2.a), ramifiée (fig. V.2.b) ou réticulée (fig. V.2.c) [55].

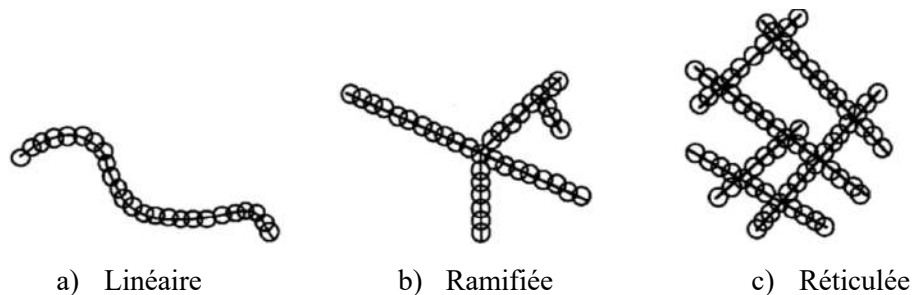


Figure V.2. Les différentes structures de polymère [51]

À titre d'exemple, si on prend l'éthylène comme exemple, d'où sa formule chimique C_2H_4 c'est à dire que les carbones reliés avec eux-mêmes et l'hydrogène à des électrons libres, donc on peut relier l'éthylène par ces électrons libres, pour formuler un polyéthylène (figure V.3) [55].

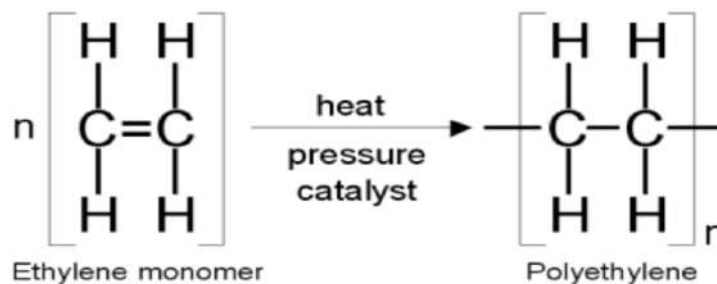


Figure V.3. Formulation de polyéthylène [55]

La notion « n » présente dans la figure V.3 exprime le degré de polymérisation « DP » et ce représente le nombre de polymères qui forment la chaîne [55].

V.4 UTILISATION ET RECYCLAGE

Dans cette partie, on présentera l'utilisation et le recyclage des principaux polymères (polyéthylène, polypropylène, chlorure de polyvinyle, polystyrène et polyéthylène téréphtalate).

Tableau V.1. Exemples utilisation et domaines de recyclage des principaux polymères [53].

Polymère	Utilisation	Recyclage
Polyéthylène	Le polyéthylène est utilisé dans les applications suivantes : <ul style="list-style-type: none"> ○ Films et sachets d'emballage, sacs, ○ Flacons d'emballage pour produits de nettoyage et cosmétiques, récipients souples, ○ Pièces moulées par injection ou par soufflage (bacs, corps creux, etc.), ○ Fils et câbles, Tuyaux, Fibres. 	En Suisse, les bouteilles en PE (bouteilles à lait) sont récupérées par les distributeurs alimentaires pour être revalorisées. Le PE recyclé est utilisé pour les produits les plus divers, sauf pour des emballages alimentaires. Les autres emballages en PE provenant des ménages ne sont pas collectés séparément (valorisation thermique).
Polypropylène	Le PP est présent sous forme : <ul style="list-style-type: none"> ○ Fibres dans les tapis et les textiles ○ Film dans les emballages ○ Sous forme moulée, dans : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Le secteur automobile (tableaux de bord, pare-chocs, etc.), ▪ L'électroménager, ▪ Les ustensiles ménagers (vaisselle pour four à microondes, boîtes pouvant aller dans le lave-vaisselle, etc.), ▪ Le mobilier de jardin, etc. 	Le polypropylène est recyclable, mais il n'existe aucune filière de récupération auprès des ménages en Suisse. Le PP utilisé dans les ménages est donc uniquement valorisé énergétiquement par incinération.
Chlorure de polyvinyle	La vaste gamme de propriétés du PVC permet de fabriquer les produits les plus divers. Mais en raison de sa résistance aux intempéries, plus de la moitié de la production européenne est destinée au secteur de la construction : <ul style="list-style-type: none"> ○ Châssis de fenêtres, ○ Canalisations d'eau et autres tuyaux, ○ Toiles et membranes de revêtement des toits et des sols mobiliers urbain, etc., ○ Câbles électriques, Chaussures, etc. ○ Bouteilles (notamment dans le domaine médical et pharmaceutique), 	Le PVC est recyclable, mais il n'existe pas de système de récupération auprès des ménages en Suisse, et aucune des rares tentatives de valorisation énergétique en cimenterie ne s'est avérée viable à la fois sur le plan écologique et économique. Il est donc incinéré avec les autres déchets ménagers.
Polystyrène	Les utilisations principales sont les suivantes : <ul style="list-style-type: none"> ○ Boîtiers de CD, ○ Vaisselle en plastique, ○ Articles de décoration ou de bureau, ○ Emballages alimentaires (gobelets de yoghourts) ○ Matériel de calage pour objets fragiles (électronique) à l'intérieur des boîtes en carton, isolants pour glacières, flotteurs, caisses à poissons, etc., ○ Isolation thermique des bâtiments, 	Le recyclage du PS est facile du point de vue industriel, mais comme cette matière n'est pas séparée des autres plastiques en Suisse par les ménages, elle n'est valorisée que sur le plan énergétique par incinération. Les entreprises peuvent par contre organiser facilement des collectes de polystyrène expansé (EPS) et remettre ce matériau à des filières courantes de recyclage.

Polyéthylène téréphthalate	<p>Les deux principales sources de consommation du PET sont les emballages ainsi que les fibres non tissées fabriquées à partir du recyclage du PET, également appelées polyester pour les vêtements. Les applications du PET sont nombreuses :</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Bouteilles, ○ Flacons, ○ Toiles (tentes, parapentes, canapés), ○ Textiles (polyester, vestes polaires) ○ Électronique (écrans), ○ Cartes de crédit, ○ Pièces pour véhicules chaussures. 	<p>Le PET est recyclable et il existe une filière de récupération des bouteilles pour boissons en PET pour les ménages (taux de recyclage de 75% pour l'ensemble de la Suisse, soit tout juste le minimum fixé par la loi)¹⁰. Hormis certaines filières industrielles, seul le PET des bouteilles pour boissons est recyclé. D'autres emballages en PET sont donc encore systématiquement ôtés des chaînes de tri, en raison du manque d'homogénéité des emballages alimentaires notamment.</p>
----------------------------	---	--

V.5 LES TYPES DE POLYMÈRES

Dans la science de matières, les polymères peuvent être classés selon différents paramètres, la structure comme étant mentionnée précédemment (§ V.3), l'origine soit naturel tels que les polymères végétaux, ou industriel comme étant mentionné précédemment.

Mais le paramètre le plus important pour l'utilisation de ces polymères que ce soit dans la fabrication des plastiques ou la modification des enrobés c'est le comportement thermique :

- Thermoplastique

Ils sont constitués de macromolécules de structure linéaire ou ramifiée qui sont liées entre elles par des liaisons faibles qui peuvent être rompues, soit par élévation de la température, qui entraîne un ramollissement progressif réversible, soit par dissolution dans un solvant adéquat. Après refroidissement ou évaporation du solvant, les liaisons se rétablissent et le polymère retrouve son état solide initial. Les thermoplastiques sont donc faciles à mettre en œuvre et recyclables et peuvent être combinés au bitume à température élevée [51].

On peut encore le subdiviser en deux familles :

- L'élastomère tel que le copolymère Styène – butadiène – Styène (SBS) [13],
- Les plastomères tel que Ethylène – Acétate de Vinyle (EVA) [13],

- Thermodurcissable

Ils sont constitués de macromolécules formants un réseau réticulé. L'élévation de la température ou l'addition d'un solvant ne permet pas de rompre les liaisons covalentes. Les thermodurcissables sont alors infusibles et insolubles après réticulation d'où ils sont non recyclables [51].

V.6 CONCLUSION :

Ce chapitre présente une idée générale sur les plastiques, les types et l'industrie, et nous pouvons également voyant le volume de l'industrie plastique, comment ces plastiques sont une source importante des déchets en Algérie ou dans le monde.

VI. PARTIE EXPERIMENTALE

La modification des liants bitumineux avec des polymères que ce soit nobles, ou recyclés vise toujours la création d'un changement dans le comportement rhéologique de ce liant, ceci est la base des essais rhéologiques qui est apparue aux États-Unis [53] et qui s'est généralisée ces dernières années en Europe [54]. En Algérie les spécifications sont basées sur des paramètres essentiellement empiriques.

Et tant que les enrobés bitumineux fonder sur les liants bitumineux pour formuler des chaussées souples, et durables ; ce changement dans le comportement rhéologique du liant a une influence sur le comportement de ces enrobés bitumineux aussi.

La rhéologie est définie comme une science particulièrement adaptée à l'étude des corps viscoélastiques afin de pouvoir prédire leurs comportements sous sollicitations mécaniques [14], et le schéma de comportement présenté dans le chapitre trois, montre le milieu d'où ces enrobés ont un comportement viscoélastique, la zone d'une faible déformation, sous des faibles cycles de chargements [2].

Dans cette deuxième partie, une étude expérimentale détaillée du comportement viscoélastique des enrobés à base des bitumes modifiés par un polyéthylène de haute densité recyclée, cette partie se compose de :

- Analyses empiriques des bitumes modifiés,
- Formulation d'enrobé témoin,
- Évaluation de la modification de bitume sur les caractéristiques des nouveaux enrobés (à base de liant modifiés),
- Évaluation de la modification de bitume sur le comportement viscoélastique des nouveaux enrobés par des essais de flexion deux points.

VII. ANALYSE EMPIRIQUE DE BITUME MODIFIÉ

VII.1 INTRODUCTION

Ce chapitre présente les résultats d'une étude expérimentale que nous avons menée sur les différents bitumes modifiés par le polyéthylène de haute densité (PEHD).

Le but est d'évaluer l'efficacité de la modification par ce type de polymère, utilisant les différentes méthodes d'essais utilisés dans les routes algériennes, la pénétrabilité, point de ramollissement et les mesures de l'indice de pénétrabilité (IP).

VII.2 ANALYSES DE POLYMERE

Le polyéthylène (PE) utilisé dans cette étude est un polyéthylène de haute densité (PEHD), il a été obtenu après le recyclage des déchets des sacs plastiques, les déchets de ces sacs prennent la forme de poudrettes granulaires de couleur blanche après le passage par le broyeur (Photo VII.1).

Autre forme de PE non recyclé (matériel noble) utilisé aussi, le PE noble a une forme de granulats sphériques transparente, avec un diamètre de 2 à 3 cm, l'utilisation d'un matériel noble a pour but de le comparer avec la matière recyclée (Photo VII.1)



PEHD-Broyé

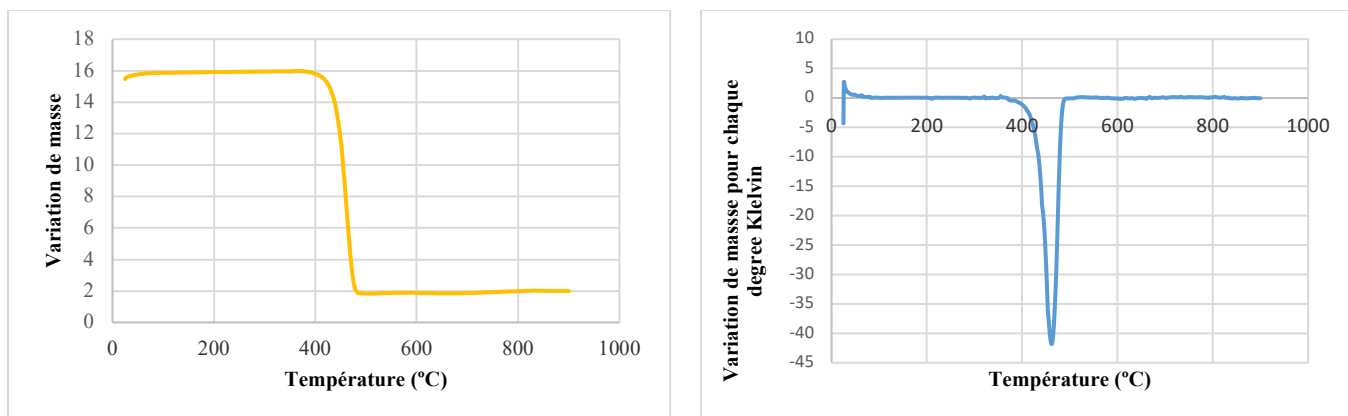


PEHD-Noble

Photo VII.1. Polymères utilisés dans la modification.

Ces polymères sont soumis à des analyses thermiques au niveau du laboratoire de polymères de l'université de Bejaia, le plan expérimental pour ce point contient deux essais, essai d'analyse thermogravimétrique (ATG) et dérivative thermogravimétrique (DTG), la première consiste à mesurer la variation de masse en fonction du temps avec le changement de température, la courbe de ATG est présentée dans la Figure VII.1.a. Le deuxième essai est efficace pour détecter le premier

dérivé de la courbe de ATG, d'où la détection des petites notices, les résultats sont présentés en Figure VII.1.b.



a- Analyse thermogravimétrique (ATG)

b- Analyse Dérivative (DTG)

Figure VII.1. Analyse thermique de polyéthylène de haute densité broyée.

D'après les courbes de ATG et DTG présentés dans la figure précédente, on peut voir que la variation de la masse en fonction de température pour ce polymère a trois (03) stages, le point de dégradation est entre 400 et 500 °C caractérisé par le pic de la DTG aux environs de 475 °C.

En plus, l'essai de DSC est réalisé pour but de déterminé la température de transition vitreuse, la température se situe entre le comportement caoutchoutière et le comportement visqueux, le résultat pour PEHD broyé est de $T_v = 116^\circ\text{C}$, la figure VII.2 présentes la variation du flux thermique en fonction de la température :

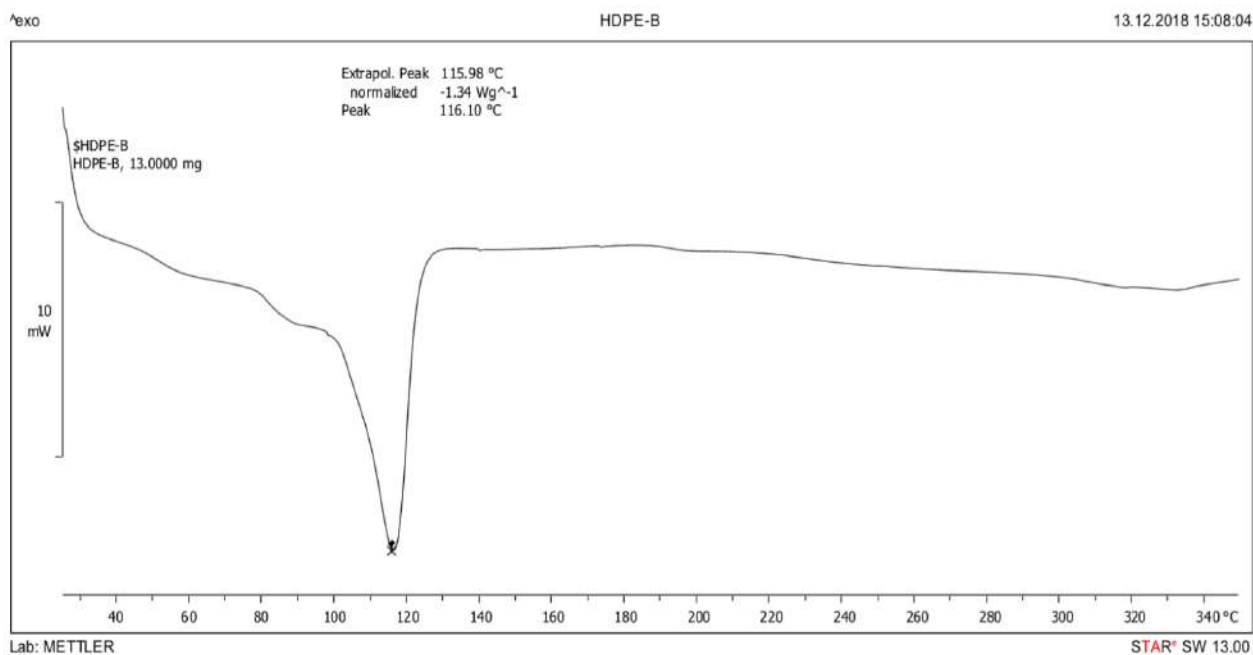


Figure VII.2. Analyse calorimétrique différentielle de polyéthylène de haute densité broyée.

Le polyéthylène noble est soumis à l'essai d'analyse calorimétrique différentielle, au but de déterminer la température de transition vitreuse (T_v), la température est de 139 °C, la courbe de transition de chaleur est présentée sur la figure VII.3.

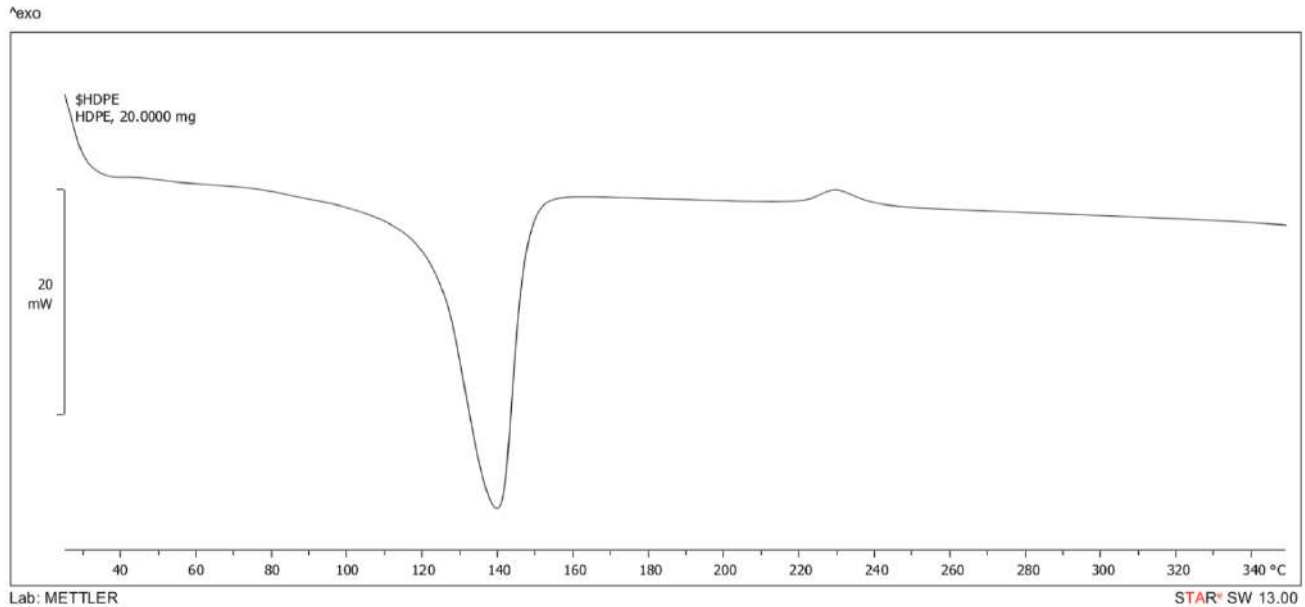


Figure VII.3. Courbe de transition de chaleur.

VII.3 PROFIL DE MODIFICATION

Le travail expérimental est composé de trois essais :

- Pénétrabilité a l'aiguille (25°C, 5s, 100g) ;
- Point de ramollissement ;
- Indice de pénétrabilité (Méthode LCPC).

L'ensemble de ces essais sont réalisés sur trois bitumes modifiés avec un polyéthylène de haute densité (PEHD) recyclé par un broyage, plus un quatrième pur de classe 35/50 non modifié considéré comme un témoin.

Chaque liant, est modifié par une vitesse de cisaillement de 1500 tr/min pendant une période de deux heures (2h) à une température de 200°C. La photo VII.2 présente l'une des opérations de modification.



Photo VII.2. Exemple de la procédure de la modification d'un liant au laboratoire.

Chaque liant est soumis aux différents essais au niveau du laboratoire des travaux publics du sud (LTPS), les résultats obtenus, sous différentes formes, sont présentés dans ce qui suit.

VII.4 RESULTATS DE MODIFICATION DE LIANT

Les résultats des différents essais réalisés sur les bitumes purs et modifiés présent dans le tableau ci - dessous

Tableau VII.1. Résultats des analyses empiriques des bitumes modifiés.

Polymère/Essai	Pénétrabilité (1/10 mm)	TBA (°C)	IP LCPC
Bitume pur	43	55	0.15
PEHD Broyé	1 %	27	0.89
	2 %	25	0.92
	3 %	22	0.88
PEHD Noble	1 %	27	0.84
	2 %	25	0.81
	3 %	20	0.83

D'après les résultats mentionnés dans le tableau ci-dessus, on constate que l'ajout de différents polyéthylènes (PE) recyclés ou nobles présente un impact positif, la diminution de pénétrabilité exprime l'augmentation de la dureté de liant, et l'augmentation du point de ramollissement démontre un comportement plus résistant sous conditions thermiques.

Le paramètre de susceptibilité à la température est plus pratique et précis quand on mesure l'essai de pénétrabilité lui-même, et non pas le point de ramollissement. Les mesures prises par la pénétration à de l'aiguille de référence dans le bitume à différentes températures (le mode opératoire de LCPC) selon la norme européenne EN 1426. Dans notre cas, cette méthode a été utilisée avec des températures allant de 20 à 40 °C avec des pas de 5°C.

D'après [13], le bitume est d'autant moins susceptible que IP est plus élevé en valeur algébrique. Le bitume pur témoin est caractérisé par un IP de 0.15, c'est la valeur standard des bitumes routiers fabriqués par distillation directe (voisin de 0 et dans l'intervalle ± 1), l'addition des trois types de

polymères minimise la susceptible de bitume, ce qui s'exprime par l'augmentation de la valeur d'IP, les bitumes modifiés par le PEHD noble sont les plus moins susceptibles par rapport à ceux modifiés par les déchets de PEHD.

Toujours selon [13], une relation étroite existe entre IP et la nature physico-chimique du bitume. Les bitumes ayant un IP bas ont tendance à avoir des caractéristiques newtoniennes et visqueuses (Type Sol), lorsque IP augmente, et c'est le cas des bitumes modifiés par PEHD, les caractéristiques sont de plus en plus non-newtoniennes et élastiques (Type Gel) et dans ce sens, on ressort que les bitumes modifiés par la matière noble ont un comportement plus élastique que les bitumes modifiés par le PEHD broyé.

D'après quelques chercheurs tels que [25], ces valeurs sont dues au changement de comportement de bitume, qui devient plus consistant, plus adhésif et moins sensible à la température avec tous les types de polymères.

D'après les différentes recherches dans ce domaine tel que [55], l'addition de 5% de polyéthylène haute densité (PEHD) aux bitumes de grade 40/50 à 80/100 conduit à un durcissement et retrait excessif en phase de refroidissement (Séparation de phase), (Photo VII.3).

Les mélanges bitume-PEHD et leurs tendances à la séparation de phase ont été signalés par [56][57][58][59], [60] et par [61]. Ceci peut s'expliquer par le fait que les PEHD, étant des polymères cristallins, n'absorbent pas l'huile des bitumes et se comportent plutôt comme des charges dans les bitumes modifiés [62].

La dispersion du polyéthylène dans le bitume atteint facilement des températures comprises supérieures à 140°C et dans des conditions de fort cisaillement. Les particules de polyéthylène fondues absorbent progressivement les composants aliphatiques du bitume et se dissolvent partiellement pour former une dispersion très visqueuse et élastique. Le point de ramollissement augmente également, en particulier lorsque la charge de polyéthylène est élevée. Juif et al ont montré que les dispersions de bitume modifié au polyéthylène (pour les applications de pavage) peuvent être stabilisées et que leurs performances sont influencées par les conditions de mélange et la présence d'agents dispersants tels que des copolymères séquencés (par exemple styrène-butadiène-styrène, SBS) [63]. Un inconvénient du bitume modifié au PE est que les particules de polyéthylène ont tendance à flotter à la surface du bitume liquide où elles se fondent en un fluide hautement visqueux sous forme d'une couche dispersante (Photo VII.5) (c'est-à-dire qu'aucun mélange n'est formé, il n'y'a qu'une dispersion physique) [64].

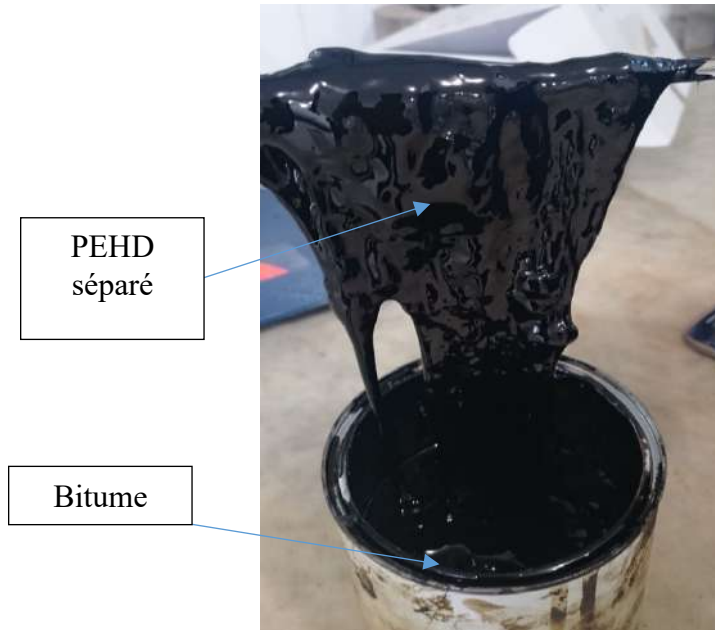


Photo VII.4. Séparation de phase d'un mélange bitume-PEHD après refroidissement (600 rpm).

VII.5 INFLUENCE DE POLYÉTHYLÈNE

Ci-dessous on discute l'influence de PEHD, par une comparaison entre la matière noble et recyclée sur les différents paramètres de liant.

VII.5.1 Pénétrabilité

La valeur de pénétrabilité est une expression de la consistance de liant, l'essai est réalisé à la température de 25°C par une aiguille de référence, qui pénètre dans le liant sous une charge de 100g pendant une durée de 5 seconds. À travers cette méthode d'essai, on mesure la consistance et la dureté du liant à température intermédiaire d'usage. Selon [13] la valeur d'enfoncement de l'aiguille est plus élevée quand le bitume est plus mou. La figure VII.4 présente l'histogramme comparatif des valeurs mesurées des bitumes modifiés par PEHD noble (N) et ceux recyclés par broyage (B).

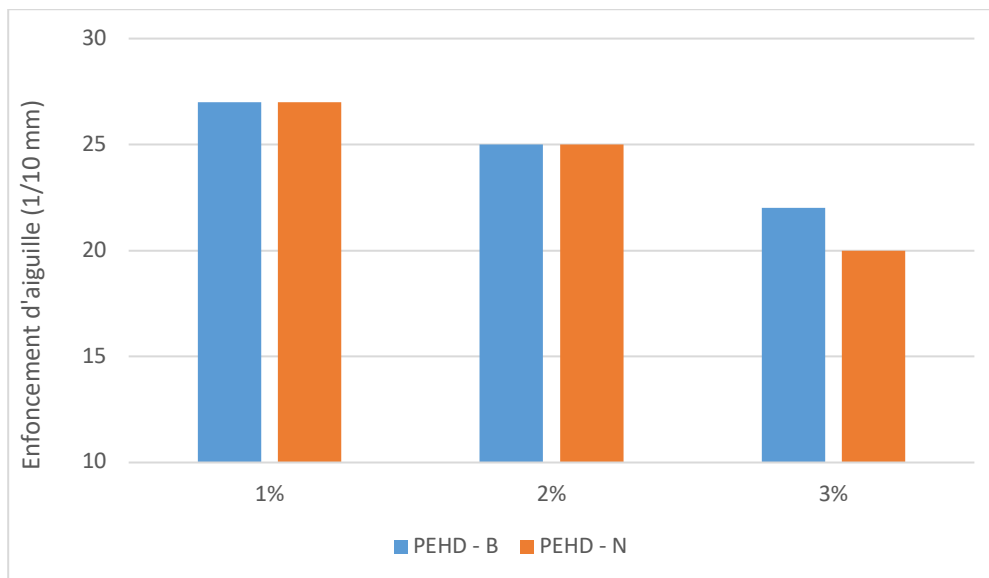


Figure VII.4. Résultats d'essai de pénétrabilité à 25 °C.

D'après ces valeurs, on remarque que la modification par 1 et 2% de PEHD noble et broyé ont presque la même influence, contrairement à 3% où le polyéthylène noble influe plus sur la valeur de pénétrabilité comparativement au PEHD broyé.

Les bitumes modifiés par la matière noble deviennent plus durs que les bitumes modifiés par la matière recyclée par broyage.

VII.5.2 Point de ramollissement

L'essai de point de ramollissement, appelé communément « Bille-Anneau » ou parfois en abrégé «TBA», l'essai consiste à mesurer la température à laquelle un échantillon de bitume atteint un certain degré de ramollissement dans des conditions normalisées. C'est une mesure de consistance du liant aux températures élevées de service [13].

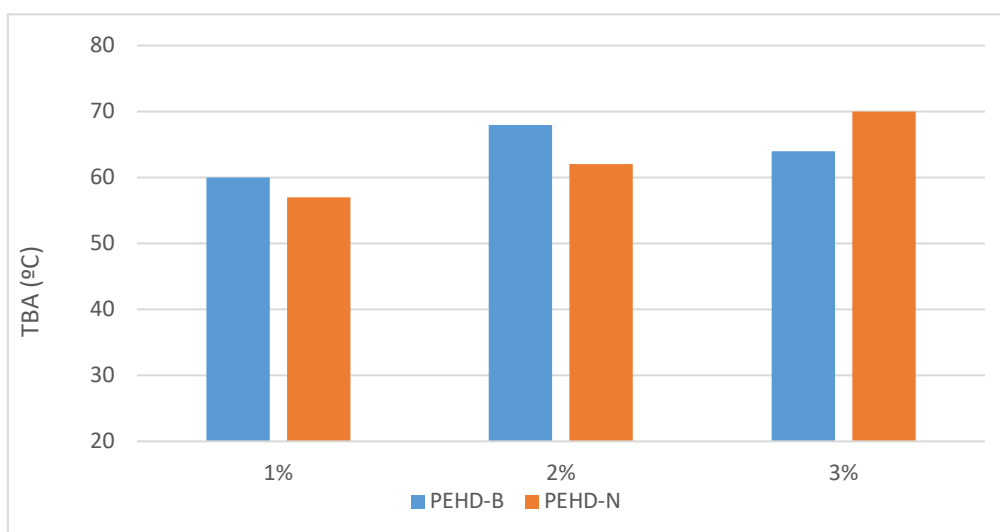


Figure VII.5. Résultats d'essai de TBA.

Contrairement à l'essai de pénétrabilité, il y'a une différence entre les valeurs mesurées pour le PEHD noble et celui recyclé, plus la température est élevée plus le bitume est moins sensible aux températures de service, c'est le cas de 2% pour PEHD-broyé et 3% de PEHD-Noble qui sont les meilleurs résultats. Les bitumes modifiés par la matière recyclée deviennent moins sensibles aux hautes températures que les bitumes modifiés par la matière noble.

VII.5.3 Indice de pénétrabilité (IP)

L'indice de pénétrabilité est un paramètre rhéologique, ce dernier est la science qui traite les déformations de matière au cours du temps, ce facteur est le plus commodément employé pour exprimer la relation consistance – température. D'après ces mesures, on peut classer les bitumes en fonction de leur susceptibilité à la température. Ci-dessous, la figure présente une comparaison de l'IP entre le PEHD noble et celui recyclé.

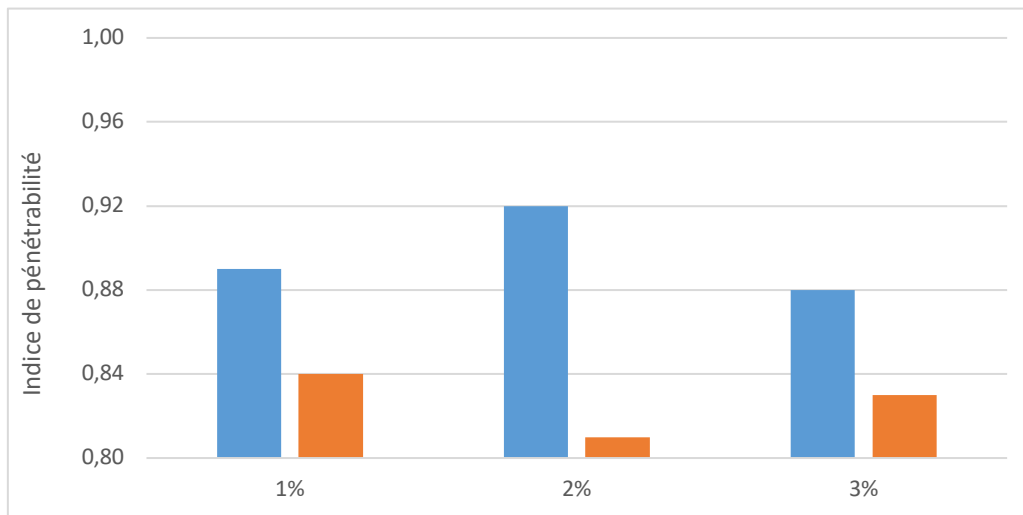


Figure VII.6. Résultats d'Indice de Pénétrabilité.

On note d'après les valeurs mesurées d'IP que les bitumes modifiés par PEHD-broyé possèdent l'IP le plus élevé, selon [13], c'est-à-dire que ce bitume modifié par PEHD broyé est le moins résistant aux déformations avec le temps par rapport à celui modifié par le PEHD noble. Selon le modèle proposé par Kobanovskaya en 1973 [22] [54] [18], [29] et [13], on distingue un changement dans la structure physique, d'où le comportement est de plus en plus non-newtonienne (élastique) de type Gel.

VIII. FORMULATION DE L'ENROBÉ TÉMOIN

VIII.1 INTRODUCTION

Ce chapitre traite la caractérisation des différents constituants minéraux, pour déterminer la formule utilisée dans la composition de notre enrobé. Nous exposons aussi la méthode de formulation et le calcul théorique de notre composition témoins, et la caractérisation de ce dernier.

VIII.2 CARACTÉRISTIQUES DES CONSTITUANTS

Pour la présente étude, on a utilisé des agrégats de nature calcaire, prélevés depuis la station de concassage d'ALCO-GAZ, au niveau de la wilaya de Ghardaïa en Algérie. Les trois classes granulaires prélevées sont : sable concassé 0/3, gravier de classe 3/8 et 8/15 pour la formulation d'un enrobé semi-grenu 0/14 selon le fuseau proposé par l'organisme national de Contrôle Technique des Travaux Publics « CTTTP-Algérie ».

Ces agrégats sont soumis aux essais de caractérisation physico-mécaniques et de fabrication regroupant les essais suivants :

- Analyses granulométriques
- Masses volumiques absolues et apparentes
- Résistances à la fragmentation (Essai Los Angeles)
- Résistances à l'usure (Essai Micro Deval en présence d'eau)
- Analyses chimiques sommaires

Les résultats des différentes analyses sont groupés dans le tableau VIII.1.

Tableau VIII.1. Résultats d'analyses des agrégats.

Classes	Analyse granulométrique (% des passants)											ES	LA	MDE	Analyse chimique		
	Tamis	16	14	10	8	6.3	4	2	1	0.315	0.08				CaCO ₃	SO ₃ ²⁻	Ins.
0/3		100	100	100	100	100	97	79	53	29	15	63	/		79	Aucun e trace	1.2
3/8		100	100	100	100	83	19	2	0	0	0	/	36	10	82		2.1
8/15		98	89	58	28	6	2	0	0	0	0	/	32	22	88		1.6

D'après les résultats obtenus, on trouve que les agrégats ont de bonnes performances en termes de dureté et d'adhésion en vue du taux de carbonates important, ce qui joue un rôle important dans le but de formuler un bon témoin.

VIII.3 FORMULATION DE L'ENROBÉ TÉMOIN

L'étude de formulation des enrobés bitumineux de façon générale, contient deux phases :

- Composition granulaire

- Teneur en liant

VIII.3.1 COMPOSITION GRANULAIRE

La première phase vise à déterminer la meilleure composition granulaire, cette dernière exprimée par une courbe granulométrique de mélange, qui doit assurer une compatibilité selon le fuseau de référence relatif à un béton bitumineux semi-grenu (BBSG) de classe 0/14 (tableau ci-dessous).

Dépendant des analyses granulométriques des trois fractions 0/3, 3/8, 8/15, on trouve que la meilleure composition granulaire compatible avec le fuseau est de :

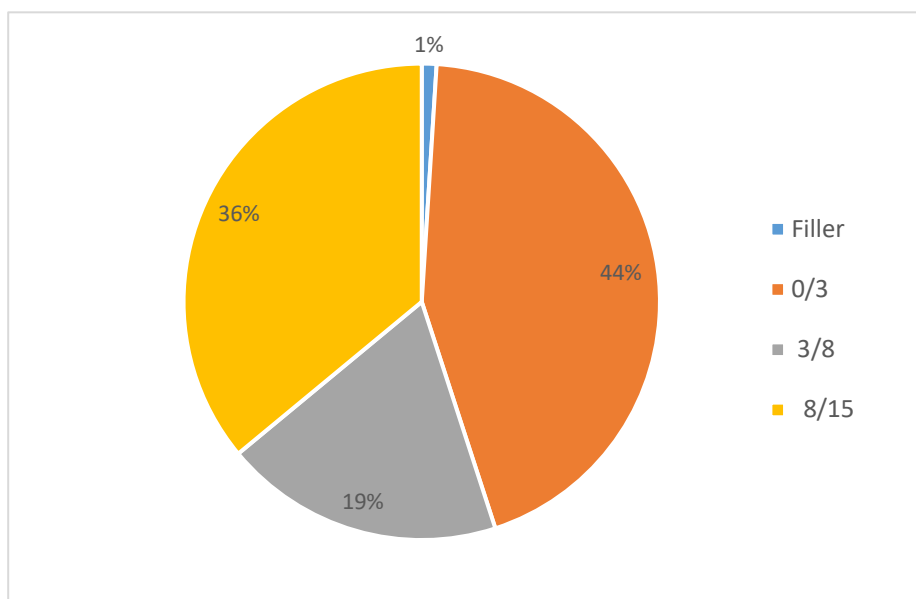


Figure VIII.1. La composition granulaire adoptée.

Cette composition est la meilleure composition compatible avec le fuseau de référence mentionné dans le tableau précédent. La figure VIII.2 reflète la courbe granulométrique du mélange.

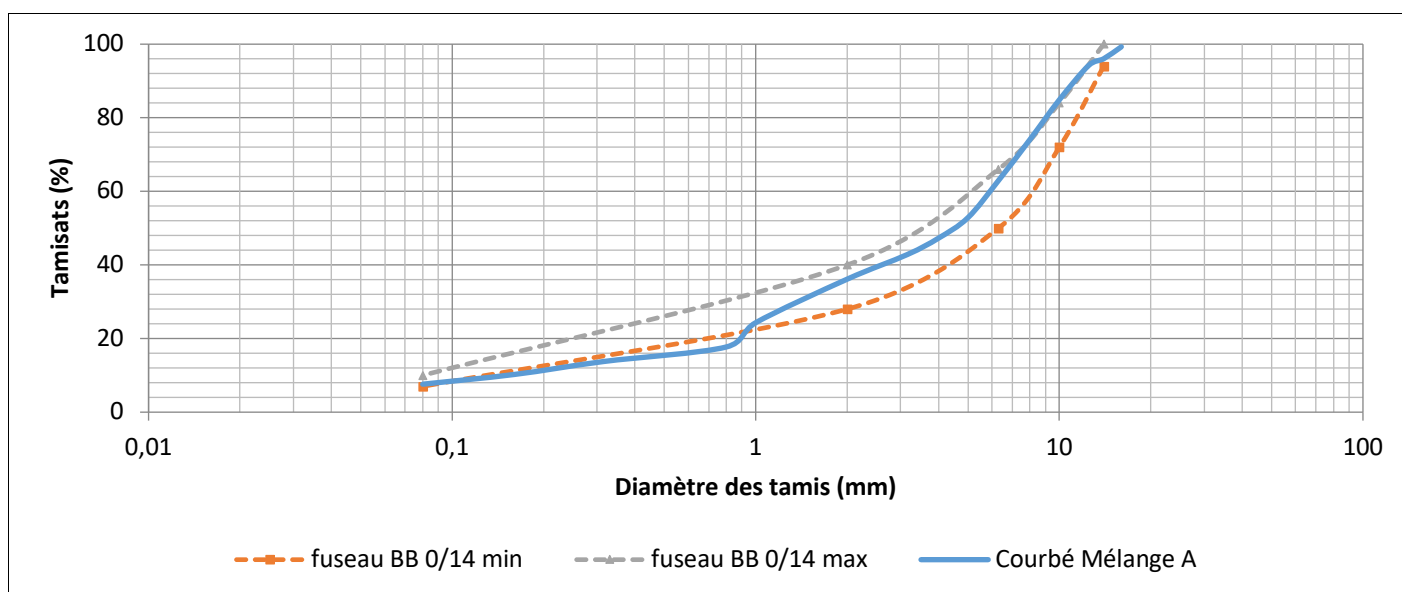


Figure VIII.2. Courbe de mélanges comparativement au fuseau de référence.

Et les valeurs de fuseau granulométrique sont comme suit :

Tableau VIII.2. Fuseau de référence de BBSG 0/14

Tamis (mm)	Min	Milieu	Max
14	94	97	100
10	72	78	84
6.3	50	58	66
2	28	34	40
0.08	7	8.5	10

VIII.3.2 TENEUR EN LIANT

L'objectif de cette phase est l'obtention d'un enrobage complet de l'ensemble du squelette minéral. La méthode choisie est la méthode française, le module de richesse et le dosage en liant adopté dans cette étude sont issus des caractéristiques physiques :

- **Coefficient correcteur de la masse volumique α :**

$$\alpha = 2,65 / MVR_g$$

Selon les proportions des constituants et ces masses volumiques, on a :

$$MVR_g = 2.628 \Rightarrow \alpha = \frac{2,65}{MVR_g} = 1.009$$

- **Surface spécifique de mélange :**

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

D'où

G : proportion des éléments supérieure à 6.3 mm

S : proportion des éléments compris entre 6.3 et 0.315 mm

s : proportion des éléments compris entre 0.315 et 0.08 mm

f : proportion des éléments inférieure à 0.08 mm.

Donc on trouve que la surface spécifique $\Sigma = 12.223 \text{ m}^2/\text{kg}$

Et pour la teneur en liant ce dernier est calculé en fonction du module de richesse (k), la formule de calcul est la suivante :

$$\text{Teneur en liant} = K \cdot \alpha \cdot \sqrt[5]{\Sigma}$$

D'où :

- TL : Teneur en liant,
- k : Module de richesse exprime l'épaisseur du film de bitume,
- α : Coefficient correcteur de la masse volumique absolue des granulats,
- Σ : Surface spécifique de mélange granulaire.

Le tableau suivant représente les valeurs de module de richesse et teneur en liant adopté pour caractériser notre témoin.

Tableau VIII.3. Teneur en liant adopté.

Module de richesse	3.55	3.73	3.85
Coefficient correcteur	1.009		
Surface spécifique (m ² /kg)	12.223		
Teneur en liant extérieure (%)	5.9	6.2	6.4
Densité théorique (g/cm ³)	2.422	2.413	2.407

VIII.4 PERFORMANCES MÉCANIQUES DU MÉLANGE TÉMOIN

Au but d'adopter la meilleure composition après examen des liants modifiés, on a réalisé des essais sur ces mélanges au niveau du laboratoire, la confection s'est faite suivant la norme NF EN 12697-35 sous une température de 160°C. Des essais à la presse de compression giratoire (PCG) et Marshall selon le protocole normalisé NF EN 12697-31 et NF EN 12697-34 ont été réalisés.

Les mesures PCG ont été faites au moment de l'essai, d'où la mesure de l'évolution du pourcentage de vide en fonction du nombre de girations, contrairement à l'essai Marshall où les valeurs de stabilité et de fluage sont mesurées après 24 heures à température ambiante.

Dans chaque composition on a examiné 2 éprouvettes de PCG et 04 pour l'essai Marshall. Les valeurs moyennes des résultats sont résumées dans les tableaux VIII.4 et VIII.5.

Tableau VIII.4. Performances PCG de l'enrobé témoin.

Module de richesse	3.55	3.73	3.85
Teneur en liant extérieure (%)	5.9	6.2	6.4
Densité théorique (g/cm ³)	2.422	2.413	2.407
Pourcentage de Vide à 80 girations (%)	6.21	5.99	4.58
Spécifications : Volume de vide à 80 girations entre 4 à 9%			

Tableau VIII.5. Performances Marshall de l'enrobé témoin.

Module de richesse	3.55	3.73	3.85	Spécifications
Teneur en liant extérieure (%)	5.9	6.2	6.4	
Densité théorique (g/cm ³)	2.422	2.413	2.407	
Stabilité (kN)	12.1	12.7	11.4	> 10.5 kN
Fluage (mm)	3.8	4.5	4.9	< 4 mm

VIII.5 CONCLUSION :

Les résultats relatifs aux essais physiques des enrobés sont acceptables en termes de d'aptitude de compactage et de pourcentages de vides, contrairement au fluage qui ne répond pas favorablement aux valeurs recommandées par CTTTP-Alger qui est de 4mm.

Sur la base des différents résultats de chaque dosage, le dosage 5.9 présente les résultats acceptables est adopté comme béton témoin.

IX. ANALYSE DES ENROBÉS MODIFIÉS

IX.1 INTRODUCTION

L'analyse empirique de la modification des caractéristiques des enrobés par des polymères et déchets polymériques dans notre cas, commence après le choix de la formule de base de l'enrobé témoin, et après l'analyse du modifiant choisi qui est le polyéthylène de haute densité (PEHD).

Le liant utilisé est celui de classe 35/50 modifié par trois teneurs en polyéthylène.

Comme nous l'avons signalé, à l'issue de l'étude expérimentale des bitumes (cf. chapitre VII), les liants modifiés présentent un comportement viscoélastique moins sensible à la température par rapport au bitume de référence.

La vérification des performances physico-mécaniques est présente dans ce chapitre par des essais empiriques qui sont :

- La presse de compactage giratoire pour la compactabilité,
- L'essai Marshall et l'essai d'orniérage pour mesurer la résistance à la déformation permanente.

IX.2 PRESSE DE COMPACTAGE GIRATOIRE (COMPACTABILITE)

La presse à cisaillement giratoire permet d'étudier l'aptitude au compactage des enrobés bitumineux par l'estimation du pourcentage de vides en fonction de l'épaisseur de la couche d'enrobé [65].

L'enrobé est compacté à une température constante dans un moule cylindrique tournant sur lui-même en créant un effet de pétrissage. On observe l'augmentation de compacité (diminution de pourcentage de vide) en fonction du nombre de girations, simulant l'effet de compacteur à pneus sur chantier [65].

Au but de réaliser l'essai, 10 kg d'agrégats chaud (à 200°C) mélangés avec différents liants justes après terminer la modification de liant (2h) pour éviter le retour élastique des polymères et la séparation de phase.

On verse le mélange dans un moule de 150 mm avec un poids spécifique (Photo IX.1), ce dernier choisi suivant une hauteur minimale de 115mm, ce qui est compatible avec la condition :

$$0.66 \leq h_{\min}/D = 0.76 \leq 1.05$$

Mettez le moule dans la presse et commencez à expérimenter avec 200 girations et notez les résultats.



Photo IX.1. Essai de la presse pour cisaillement giratoire – PCG.

Le tableau ci-après résume les principaux résultats de l'essai PCG, qui sont la masse volumique apparente des éprouvettes au moment d'essai et le pourcentage de vide.

Tableau IX.1. Résultats de l'essai PCG.

N ^{bre} de Girations	0% PEHD	1% PEHD		2% PEHD		3% PEHD	
	témoin	Indice de Vide (%)					
		Noble	Broyé	Noble	Broyé	Noble	Broyé
5	15.6	13.3	12.3	12.4	13.6	10.6	12
10	13.3	11.0	10.1	10.1	11.3	8.2	9.5
15	11.9	9.5	8.7	8.7	9.9	6.8	8.0
20	10.9	8.4	7.7	7.7	8.9	5.8	6.9
25	10.1	7.6	6.9	6.9	8.1	5.0	6.1
30	9.4	6.9	6.2	6.2	7.4	4.4	5.4
40	8.5	5.9	5.2	5.3	6.4	3.5	4.4
50	7.7	5.1	4.5	4.5	5.6	2.8	3.7
60	7.1	4.5	3.8	4.0	5.1	2.4	3.2
80	6.2	3.6	2.9	3.1	3.8	1.8	2.5
100	5.5	2.9	2.3	2.5	3.5	1.3	2
120	5.0	2.4	1.8	2.0	2.9	1.1	1.7
150	4.4	1.9	1.2	1.4	2.3	0.8	1.3
200	3.7	1.2	0.6	0.8	1.5	0.5	0.9

Selon les résultats obtenus des différents mélanges, on constate que les compositions à base de bitumes modifiés présentent des pourcentages de vides inférieurs à ceux du bitume témoin, les valeurs sont inférieures aux spécifications (de 4 à 9% à 80 girations), ce qui caractérise des bétons bitumineux semi-grenus.

Les taux de vide à 80 girations diminuent de 53%, 34% et 60% pour 1%, 2% et 3% respectivement pour le cas des enrobés à base du bitume modifié par PEHD broyé. Pour les enrobés à base du bitume modifié par PEHD nobles diminuent par 42%, 50% et 71% pour 1%, 2% et 3 % respectivement.

Cette diminution est due à l'augmentation de phénomène de lubrification et maniabilité dans ces mélanges modifiés dû à la diminution de viscosité des bitumes. Ce phénomène est discuté par le guide technique de mise en place des enrobés de Québec, dans l'édition 2009 [66].

À haute température comme notre cas, à 180 °C au but de compacter le mélange, le liant est lubrifié, suffisamment pour enrober les granulats, et le mélange résultant se déplace sous la charge appliquée par le piston de PCG (6 bars). Donc l'ajout de PEHD dans tous les cas influe sur le bitume ce qui devient plus fluide (moins visqueux), d'où il possède alors les propriétés de lubrification qui augmentent la tendance au compactage du mélange et finalement avec moins de pourcentage de vide.

L'évolution du pourcentage de vide devient faible à une grande énergie de compactage tels que 200 girations, les enrobés modifiés ont un taux de vide très faible et proche de zéro, c'est-à-dire un taux de compacité de 100%. Ce dernier signifie que ces enrobés sont très rigides par rapport au témoin.

Pour un nombre de girations de 10, les normes européennes recommandent une valeur supérieure ou égale à 10% pour éviter le risque d'apparition des déformations permanentes tels que l'orniérage, ce dernier est le cas de l'enrobé témoin, et c'est le même cas pour les enrobés modifiés par 01 et 02 % de PEHD.

Les enrobés modifiés par 03 % de PEHD ne répond pas à cette recommandation, donc ils présentent un risque d'apparition d'orniérage.

L'évolution des pourcentages de vide est exprimée sur les courbes présentes en figure IX.1.

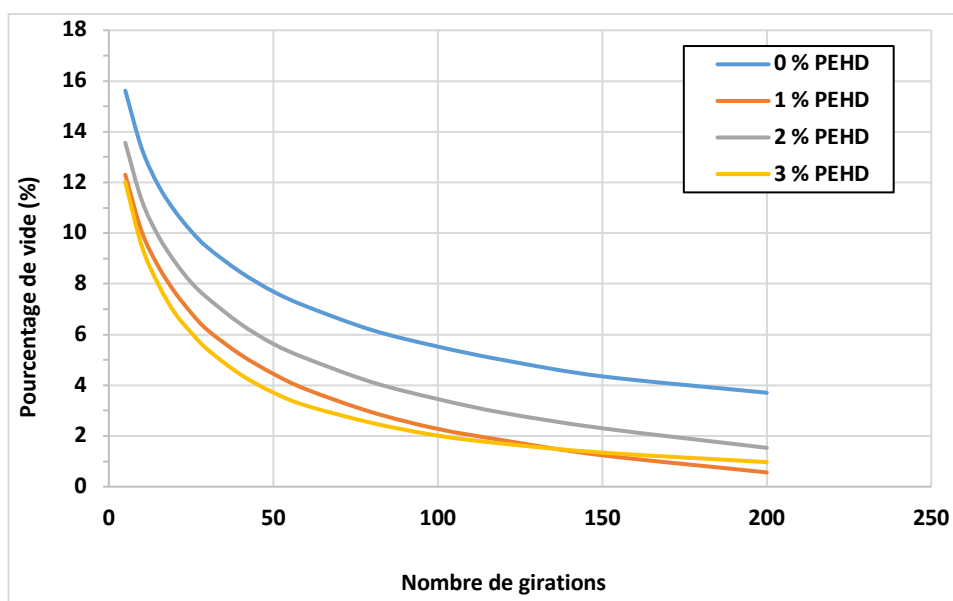


Figure IX.1. Courbe de pourcentage de vide en fonction du nombre de girations (PEHD-broyé)

On note que les courbes des enrobés modifiés commencent avec des taux de vide inférieurs à ceux de l'enrobé témoin, cela est dû probablement à la bonne lubrification et maniabilité du mélange qui reçoit une consistance ferme sous faible énergie de compactage (5 girations) en gardant la même allure jusqu'à la fin de l'essai.

Ci-dessous on présente la courbe d'évolution du pourcentage de vide en fonction du nombre de girations pour le PEHD noble.

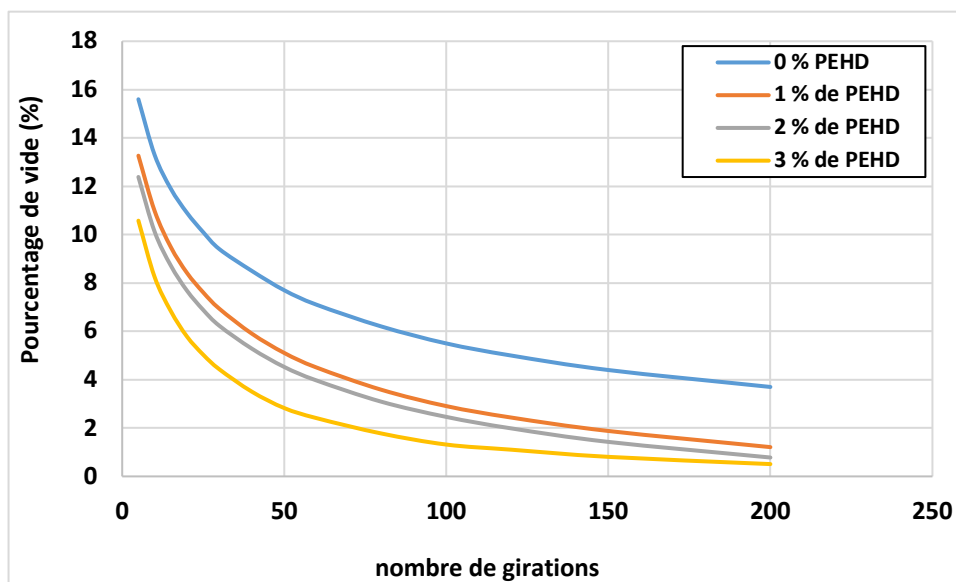


Figure IX.2. Pourcentage de vide en fonction du nombre de girations (PEHD-noble)

Le même phénomène se produit dans le cas de PEHD noble, les enrobés modifiés présentent des taux de vide inférieurs à celui de l'enrobé témoin au départ. Plus la teneur en PEHD augmente plus le pourcentage de vide diminue, et la compacité augmente. La courbe de 3% prend une forme parallèle à l'axe d'abscisse X (nombre de giration), cela indique que cet enrobé n'est plus compactable.

La deuxième présentation est l'inverse des précédentes, est qui le nombre de girations en fonction du pourcentage de vide, cette disposition exprime le taux d'énergie nécessaire pour passer d'un taux de compacité à un autre.

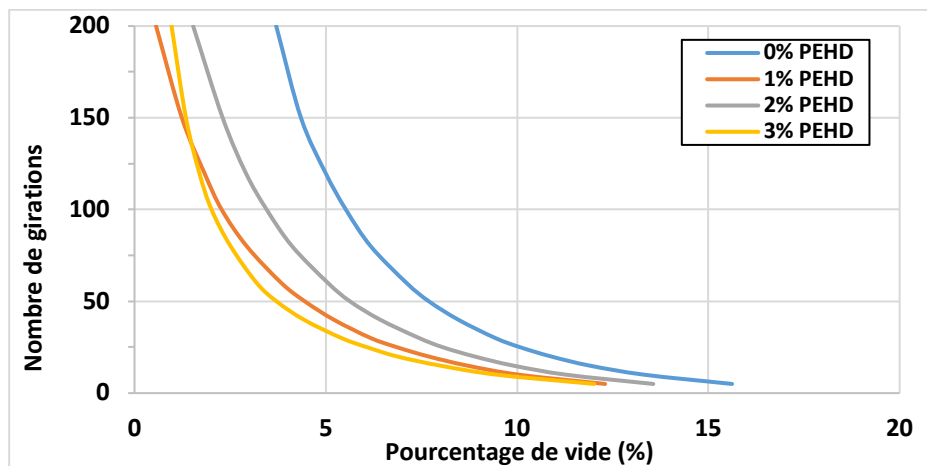


Figure IX.3. Nombre de girations en fonction du pourcentage de vide.

D'après la figure IX.3, on note une bonne compactabilité pour les enrobés modifiés, plus la courbe est proche à 0% de vide signifie que ce mélange demande moins d'énergie de compactage pour atteindre la compacité acceptable sur site.

La composition à base d'un bitume modifié par 1% de polyéthylène est plus proche de zéro pour cent, c'est-à-dire plus compactable et plus sensible au nombre de passes du compacteur sur site.

IX.3 RÉSULTATS MARSHALL

Le concept de l'essai Marshall a été développé par Bruce Marshall en 1948 au « Mississippi State Highway Department, USA » [67]. Cet essai permet de mesurer au laboratoire, à une température et une énergie de compactage données, la résistance d'une éprouvette à la déformation sous l'application graduelle d'une charge, et la déformation subie par cette éprouvette au moment de sa rupture sous l'application de la charge maximale dite stabilité et fluage Marshall.

Le principe de l'essai est l'application d'une force de compression exercée suivant la génératrice d'une éprouvette cylindrique semi-frettée (Figure IX.4). Cette compression est appliquée sur l'éprouvette après 40 minutes d'immersion dans un bain d'eau à 60°C et à une vitesse de 50 mm/min \pm 1 mm/min.

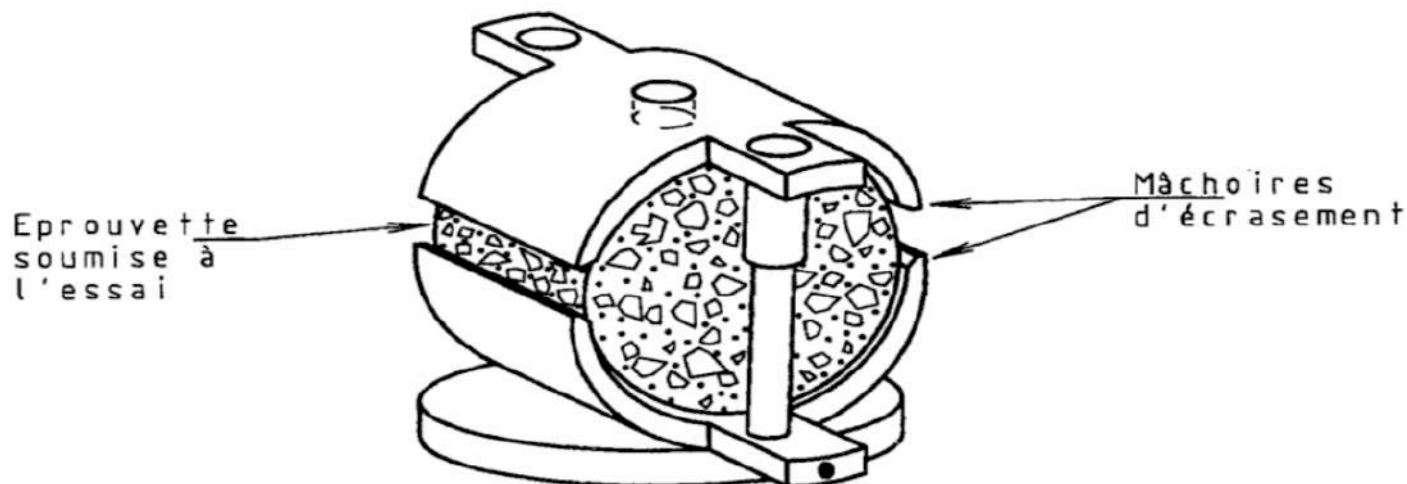


Figure IX.4. Chargement de l'éprouvette Marshall selon la génératrice.

L'essai est réalisé sur les différents mélanges modifiés et non modifiés, sur un ensemble d'éprouvettes préparées selon un compactage par impact (damage), selon la norme EN 12697-30, avec 50 coups/face.

Les éprouvettes sont conservées pendant 24 heures avant démoulage et 40 min dans un bain d'eau réglé à 60°C. Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau suivant :

Tableau IX.2. Résultats d'essai Marshall.

	Témoin	Broyé			Noble		
PEHD (%)	0	1	2	3	1	2	3
Stabilité (kN)	12.1	20.1	19.87	19.72	26.5	25.75	22.43
Fluage (0.1mm)	3.8	2.78	2.82	2.9	3.41	3.36	3.21

Ci-dessous la figure présente les caractéristiques d'essai MARSHALL des deux mélanges modifiés par PEHD noble et broyé comparativement à l'enrobé témoin :

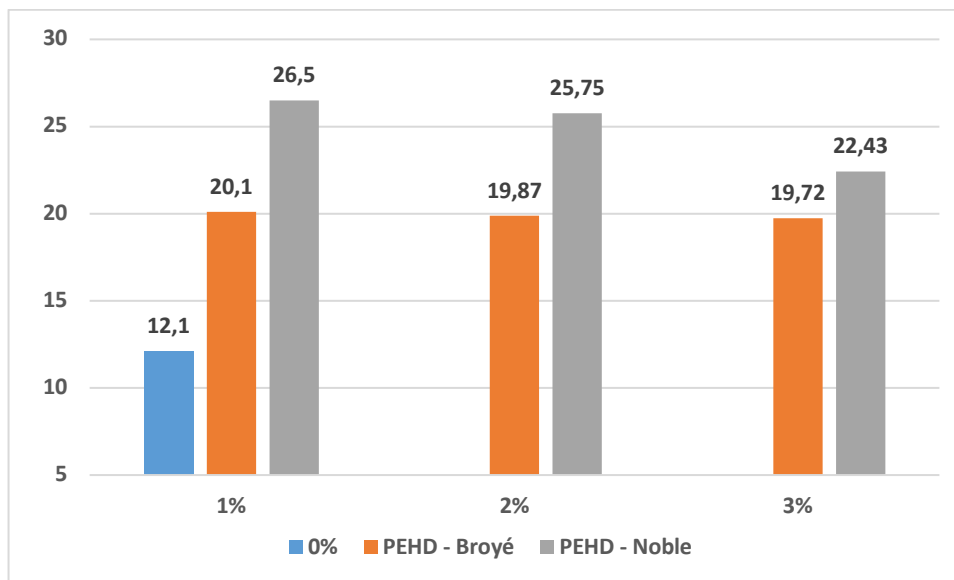


Figure IX.5. Histogramme de stabilités Marshall.

Selon la figure IX.5, les valeurs de stabilité des enrobés modifiés sont toujours supérieures à celles du mélange témoin. Pour le PEHD broyé, les valeurs sont très proches entre elles, quelle que soit la teneur ajoutée au liant. Tandis que pour la matière noble, on constate une grande stabilité pour 1% de PEHD, contrairement au cas de 3% où on a la plus petite stabilité. La stabilité augmente de 62 à 66% pour le PEHD broyé, et atteint 120, 112 et 85% pour 1, 2 et 3% de PEHD noble respectivement.

Puisqu'on parle de la même composition granulaire (figure VIII.1), l'amélioration des résultats de la stabilité Marshall est due d'après notre point de vue au paramètre liaison bitume-granulats, selon [67], les propriétés mécaniques et la durabilité des enrobés bitumineux sont assurées par la stabilité du squelette granulaire, par les propriétés cohésives du bitume et par une bonne adhésion entre le bitume et les granulats.

Dans ce cas, et d'après les résultats trouvés on peut dire que le PEHD a augmenté l'énergie d'adhésion, ce qui a conduit à une augmentation de la résistance (stabilité), cette augmentation due au changement de la structure physico – chimique du bitume, et le changement du comportement du bitume, qui devient plus consistant, plus adhésif et moins sensible à la température. Cette interprétation est discutée clairement par différents chercheurs tels que [25] [68] [67].

La figure IX.6 présente l'évolution de la déformation permanente qui s'appelle le fluage dans l'essai Marshall.

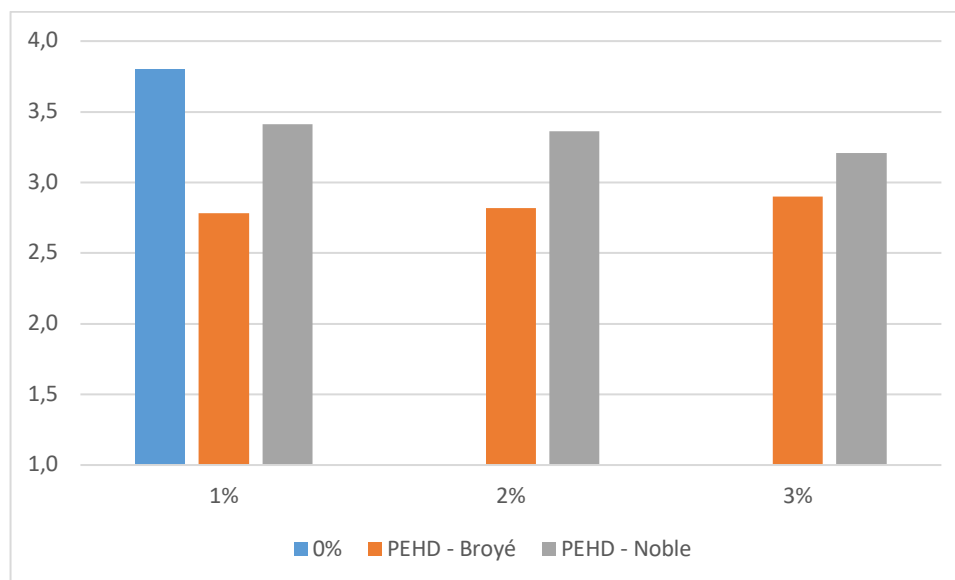


Figure IX.6. Histogramme des résultats de fluage Marshall.

Contrairement aux valeurs de stabilité, les déformations ont diminué de 24 à 27% pour le PEHD broyé respectons le seuil minimal des spécifications américaines qui préconisent un fluage minimal de 02 mm. Le même impact est constaté pour le PEHD noble, le taux de diminution a été entre 10 à 15%. Et dans les deux cas de polyéthylène (noble est broyé), ils présentent un effet positif à travers la réduction de taux de déformation des enrobés.

La différence des valeurs de fluage entre les deux polyéthylènes d'ûe à la différence de l'impact sur la structure physico – chimique, la matière broyée absorbe plus des îles aromatiques comparativement à la matière noble. Ce changement forme des enrobés plus visqueux, de type Gel (riche en asphaltène).

Le paramètre suivant n'est pas trop discuté par les chercheurs, malgré son importance sur le comportement des enrobés bitumineux, il s'agit du quotient Marshall. Selon [69] le quotient Marshall est le rapport de stabilité au fluage Marshall, il représente la mesure de la résistance aux déformations permanentes tel que l'orniérage des enrobés à chaud. Plus la valeur est élevée, plus le matériau est résistant aux déformations permanentes, la figure ci-dessous présente les valeurs calculées des enrobés modifiés au PEHD.

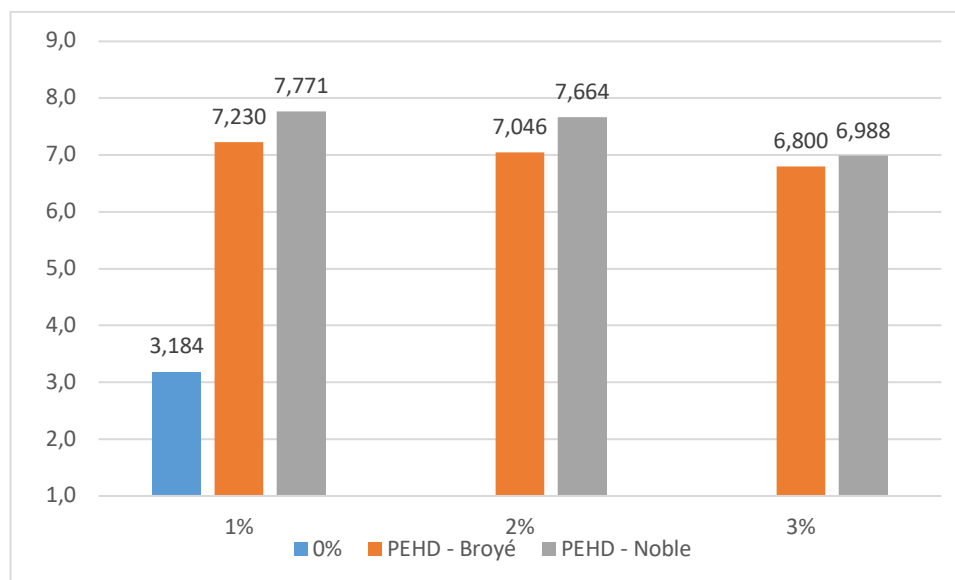


Figure IX.7. Histogramme des résultats de quotient Marshall.

L'ajout de PEHD broyé au liant augmente le quotient Marshall (résistance à l'orniérage), de 127, 121 et 113% pour 01, 02 et 03% respectivement, le PEHD noble augmente cette résistance avec des taux de 144, 140 et 120% pour les trois teneurs respectivement.

Les valeurs obtenues sont meilleures et atteignent 7.2 et 7.7 kN/mm. Cela nous soulage de l'anxiété qui survient lorsque l'essai PCG réalisé (risque d'appartient d'orniérage selon la recommandation européenne paragraphe)

IX.4 ESSAI D'ORNIÉRAGE

L'orniérage est une dégradation de la chaussée facilement mesurable et visible en surface, des traces permanentes sont creusées dans la chaussée font leur apparition suite aux passages répétés des véhicules notamment le poids lourd (photo IX.2). Il s'agit de l'un des problèmes majeurs de dégradation des chaussées flexibles [70].



Photo IX.2. Orniérage superficiel.

IX.4.1 Principe d'essai d'orniérage

Le corps d'épreuve est une plaque parallélépipédique de 50 mm ou de 100 mm d'épaisseur, selon l'épaisseur de mise en œuvre de l'enrobé est inférieure ou supérieure à 5 cm. Cette plaque est soumise au trafic d'une roue équipée d'un pneumatique (1 Hz, 5 kN, 6 bars), dans des conditions sévères de température (60 °C) (Figure IX.8) [71] l'essai est réalisé dans un appareil capable de simuler le trafic (Photo IX.3).

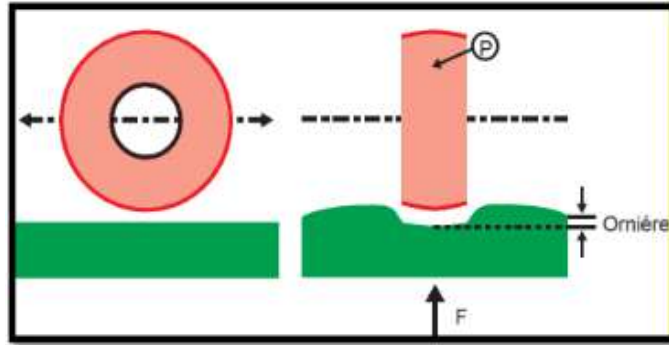


Figure IX.8. Principe de l'essai d'orniérage [65].



Photo IX.3. Appareil de l'essai d'orniérage.

L'essai d'orniérage est réalisé sur les différents enrobés modifiés par PEHD noble et broyé, six mélanges sont préparés avec le dosage optimal de bitume qui est 5,9%. 22 kg au minimum sont nécessaires pour préparer des plaques d'enrobé de dimensions 500x180x100mm au moyen de la table de compactage (Photo IX.4) selon la norme EN 12697-33 et application des étapes d'un compactage par une roue avec chargement lourd (1 bar, 6 bars).



Photo IX.4. Table de compactage (compacteur à roue).

On laisse la plaque pendant deux jours après compactage, puis on simule sur l'appareil d'orniérage 1000 cycles (aller-retour) de passage des véhicules avec des pneus de 6 bars de pression d'air et 5 kN de charge à la température ambiante, ce qu'on appelle 1000 cycles à froid.

Après avoir terminé l'application de 1000 cycles à froid, on conserve ces plaques pendant 16 heures dans notre cas à 60 °C à l'intérieur de l'appareil d'orniérage, et nous commençons la simulation de 1000, 3000, 10 000 et 30 000 cycles.

La photo IX.5 montre la méthode de prendre les lectures après l'application de chaque palier de cycles demandés.

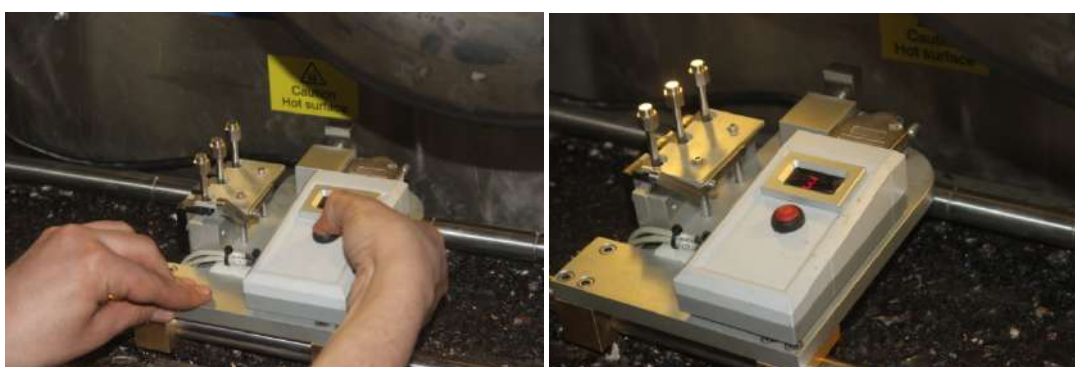


Photo IX.5. Mesure de la profondeur d'orniérage.

Le tableau suivant présente les profondeurs mesurées d'orniérage dans les deux cas :

Tableau IX.3. Profondeurs d'orniérage.

N ^{bre} de cycles PEHD (%)	Témoin	PEHD-Broyé			PEHD-Noble		
		1	2	3	1	2	3
Profondeur d'orniérage en %							
0	0	0	0	0	0	0	0
1.000	2.91	1.61	1.45	0.95	0.80	0.96	0.99
3.000	3.93	2.53	1.96	1.83	1.26	1.21	1.31
10.000	5.40	3.44	2.70	2.42	1.72	1.69	1.81
30.000	6.66	4.10	3.33	3.45	2.05	2.47	2.29

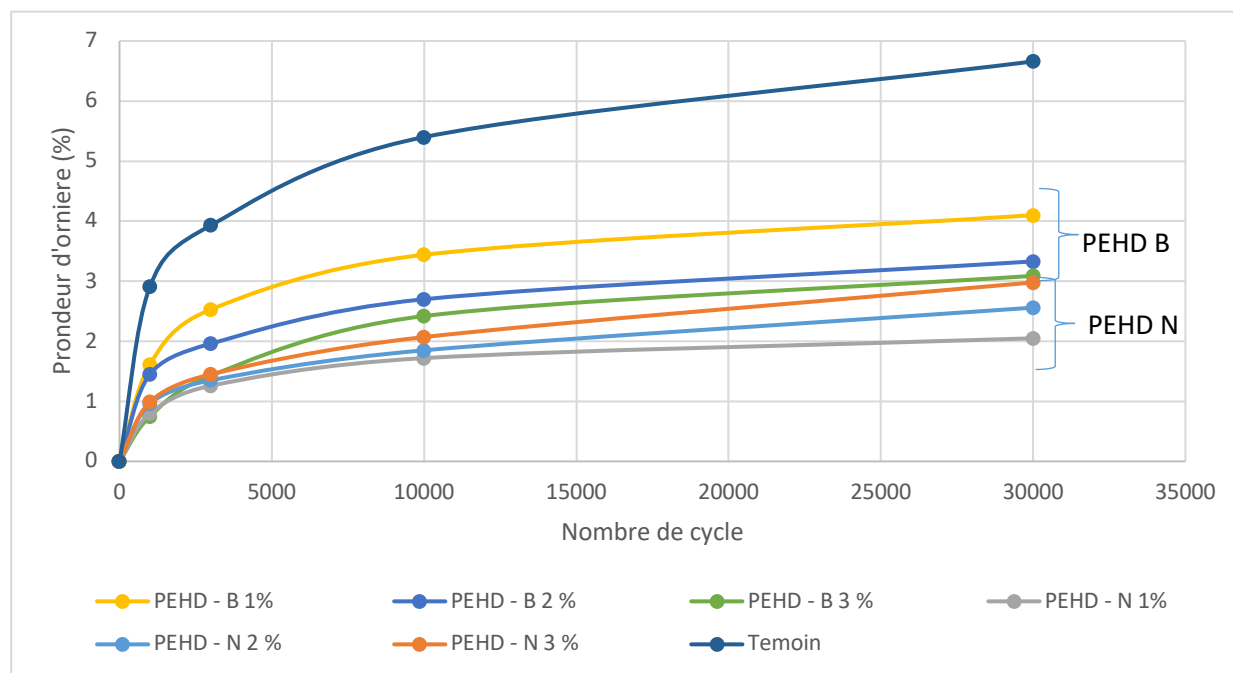


Figure IX.9. Profondeur d'orniérage en fonction du nombre de cycles.

Les résultats d'essai d'orniérage simulent la résistance des enrobés à la déformation permanente sous l'effet du trafic routier à haute température, on note que tous les enrobés modifiés en PEHD noble ou recyclé présentent des taux de déformation inférieurs à la déformation témoin ; en plus les enrobés à base de bitume modifié en PEHD noble sont plus résistants que les enrobés en PEHD broyé.

Ces résultats correspondent bien aux résultats de l'essai Marshall spécialement le quotient Marshall, qui représente la résistance à la déformation permanente selon plusieurs chercheurs (figure IX.5).

La diminution dans la déformation enregistrée se situe entre 38 à 59% pour la matière recyclée, et entre 63 et 70% dans les cas de la matière noble.

Actuellement on quantifie la résistance à l'orniérage par la profondeur d'ornière mesurée durant l'essai, donc plus la profondeur est élevée, plus la résistance est faible et vice versa.

On propose une notion pour quantifier la résistance à l'orniérage nommée, *Rutting Cycle Impact (RCI)* c'est le rapport du nombre de cycles à la profondeur d'ornière résultante en mm, le rapport représente le nombre de cycles nécessaire pour produire une déformation permanente de 1 mm d'épaisseur de la plaque d'enrobé. Donc plus la valeur de *RCI* est élevée, plus l'enrobé est résistant à la déformation permanente et vice versa.

Le tableau suivant représente le *rutting cycle impact* relatif à notre étude.

Tableau IX.4. Facteurs RCI obtenus (cycles/mm).

N ^{bre} de cycles	Témoin	PEHD-Broyé			PEHD-Noble		
PEHD (%)	0	1	2	3	1	2	3
1.000	343.6	621.1	689.7	1333.3	1250.0	1041.7	1010.1
3.000	763.4	1185.8	1530.6	2097.9	2381.0	2222.2	2069.0
10.000	1851.9	2907.0	3703.7	4132.2	5814.0	5405.4	4830.9
30.000	4504.5	7317.1	9009.0	9708.7	14634.1	11718.8	10067.1

La figure IX.10 est une représentation graphique du facteur RCI, la figure possède un nuage de points sur une échelle semi-logarithmique, où on peut le présenter sous forme des courbes de tendance d'une fonction exponentielle, de forme $RCI = A. \exp(B.P)$

Où :

- P : profondeur d'orniérage en mm,

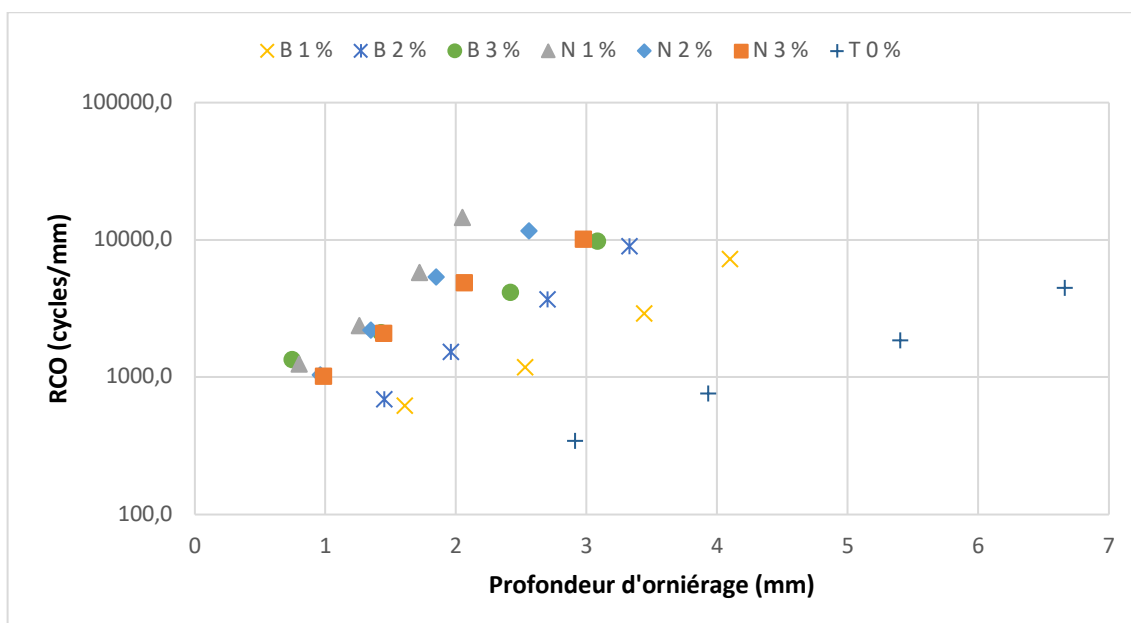
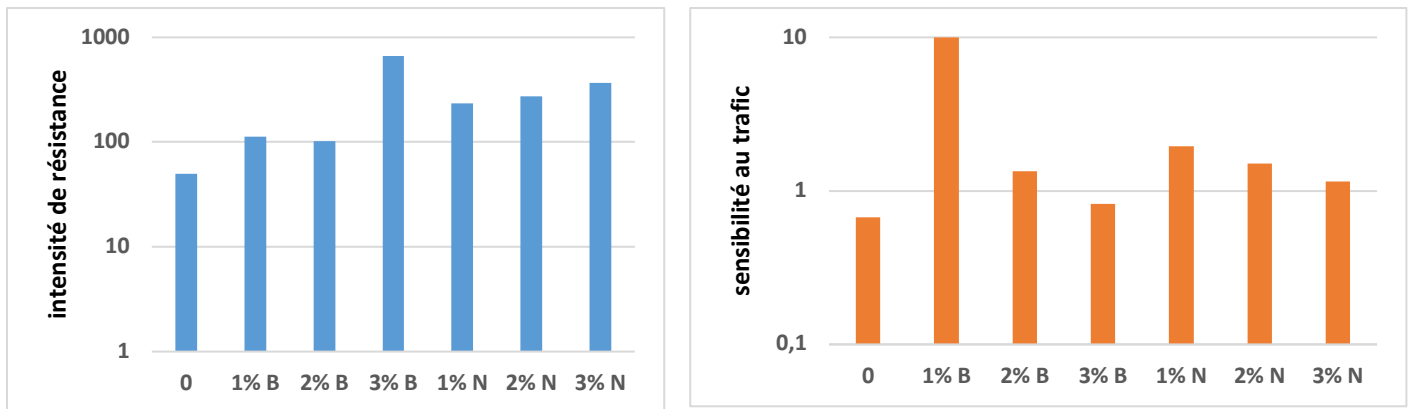


Figure IX.10. Rutting cycle impact en fonction de la profondeur d'orniérage.

Les paramètres de cette courbe sont les facteurs de la RCI, ces facteurs sont A et B.

Plus le facteur A est élevé, plus l'intensité de résistance au trafic est élevée, et plus le facteur B est élevé plus la sensibilité au trafic est faible.

On détermine les facteurs A et B à partir de la formule de la courbe de tendance proposée par Excel dans ce cas, ces facteurs de la courbe sont représentés dans la figure IX.11.



a) Facteur A des courbes de tendance.

b) Facteur B des courbes de tendance.

Figure IX.11. Facteurs RCI calculés

D'après la figure IX.11.a, on remarque que le facteur A est plus grand dans les enrobés modifiés comparativement à l'enrobé témoin, ce facteur représente l'intensité de résistance aux déformations.

Idem pour le facteur B qui représente la sensibilité au chargement cyclique (la figure IX.11.b).

Ces facteurs peuvent être l'objet des futures études, actuellement on peut lier l'amélioration de l'intensité de résistance (A), et la sensibilité au chargement cyclique (B) au changement de comportement de liant après la modification.

IX.5 CONCLUSION :

D'après les différents résultats des essais réalisés dans ce projet, on trouve que, les enrobés modifiés par la matière noble sont plus performants en terme physique et mécanique comparativement à l'enrobé à base de matières recyclées, à l'exception de 1% de PEHD broyé, ce qui nous permet de conclure que :

- Les enrobés à base des bitumes modifiés par la matière noble présente une bonne aptitude de compactage, donc moins de vide.
- Les enrobés à base de bitumes modifiés en PEHD noble sont plus résistants aux déformations permanentes selon les résultats du quotient Marshall et l'essai de simulation (essai d'orniérage)
- Les enrobés à base de bitumes modifiés en matières nobles favorisent la stabilité et la cohésion avec le squelette granulaire.

- La meilleure teneur de modifications en PEHD broyé est 1%, la modification en PEHD avec cette teneur nécessite une énergie thermique élevée (température de modification), mais on conclut que le liant modifié est le plus proche vers un liant élastique et stable (idéale) et la cause c'est le teneur faible de PEHD (gonflement total dans la matrice bitumineuse, et la phase bitume est une phase continue). Selon plusieurs chercheurs tels que [63], la dispersion du polyéthylène dans le bitume atteint facilement des températures de modification supérieures à 140°C, ce qui dans notre cas, et dans des conditions de fort cisaillement. Les particules de polyéthylène fondues absorbent progressivement les composants aliphatiques du bitume et se dissolvent partiellement pour former une dispersion très visqueuse, élastique, cohérente et adhésive [63].

X. ÉVALUATION DES ENROBÉS MODIFIÉS SUR LE COMPORTEMENT VISCO-ELASTIQUE LINÉAIRE

X.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous évaluons le comportement visco-élastiques des enrobés modifiés par déchets plastiques uniquement, cette évaluation faite par l'essai de module complexe. Au début, on présente les étapes suivies de la préparation des éprouvettes, l'application d'un chargement dynamique et par la suite, ont conclu avec des présentions des résultats obtenus sous forme de courbes isochrones, isothermes et le plus essentiel qui est le système de superpositions temps-température.

X.2 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Après avoir validé les caractéristiques physiques de chaque enrobé à base de bitume modifié. On prépare 22 kg d'enrobés avec le dosage optimal (5.9%), cette quantité est utilisée dans la préparation d'une plaque de 500 x 180 x 100 mm en utilisant la table de compactage à roue suivant la norme EN 12697-33, on utilise un profil de compactage avec une seule roue et une énergie lourde (Photo X.1), ce profile utilise des pressions de roue de 1 bar avec une force de compactage de 1kN au début ; et suivi par une pression de 6 bars avec une force de 5 kN après quelques étapes.



Photo X.1. La table de compactage (compacteur à roue).

La plaque d'enrobé a été coupée par une scie mécanique suivant des profils mentionnés dans la norme NF P 98 250-3 tel que présenté en figure X.1 (Photo X.2). Le but est de

formuler des éprouvettes de forme trapézoïdales de 56 mm en base et 25mm en tête, avec une hauteur de 250mm et épaisseur de 25mm avec une tolérance de ± 1 mm (Photo X.3).

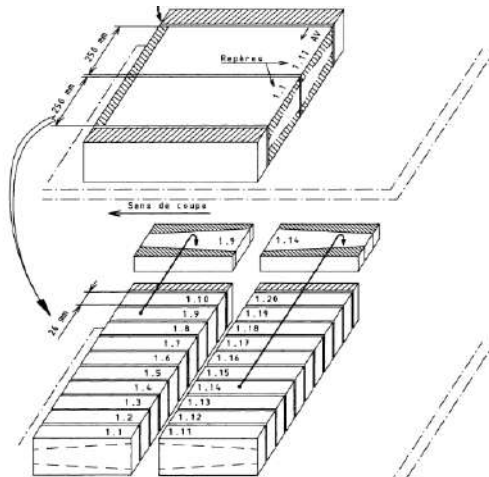


Figure X.1. Étapes de préparation des éprouvettes trapézoïdales.



Photo X.2. Opération de coupage d'une plaque.



Photo X.3. Préparation d'éprouvette trapézoïdale à partir d'une plaque de 25 mm d'épaisseur.

Dans notre cas, quatre éprouvettes ont été préparées et divisées en quatre groupes (Photo X.3) de masse volumique ($\pm 1\%$) et d'indice de vide ($\pm 0.7\%$).

Après 15 jours de conservation à température ambiante, les éprouvettes ont été testées pour déterminer le module au moyen de l'appareil de flexion deux points (système console) avec une microdéformation de $38 \mu\text{def}$ (10^{-6}m/m) ce qui est inférieur à la microdéformation maximale ($50 \mu\text{def}$) pour éviter tous les risques de fatigue au moment du chargement.

X.3 COURBES ISOTHERMES ET ISOCHRONES

Les essais de module complexe sur enrobés bitumineux ont été effectués en utilisant l'appareil de flexion deux points (2PT) fabriqué par Cooper Technologie et réalisés au niveau du Laboratoire des Travaux Publics du Sud (LTPS-Ghardaïa). La force est mesurée par l'intermédiaire d'une cellule de capacité $\pm 2.5\text{kN}$. Les déformations sont mesurées à l'aide de *Linéaire Différentiel Variable Transformers* (LVDTs) placé en tête de l'éprouvette. L'ensemble est placé sur le système de Thermostatisation de température réglable entre -20 jusqu'à $+30^\circ\text{C}$.

En ce qui concerne le système de pilotage, il est possible d'agir sur la force, le déplacement du piston, ainsi l'acquisition des données performées par un ordinateur séparé équipé de la carte "National Instrument 6329 DAQ and data acquisition par LabVIEW" pour collectionner les données.

Au but de tracer les courbes isochrone et isotherme, en utilise un profile constitué de cinq températures qui sont de $+10$ à $+30^\circ\text{C}$ avec des pas de 5°C conserver à 4h pour chaque température, et de fréquences de 0.5 Hz, 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz, 10 Hz, 20 Hz et 30 Hz, avec une période de chargement de 30 secondes pour chaque fréquence.



Photo X.4. Ajustement de l'appareil et fixation des éprouvettes avant les tests.

Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau X.1.

Tableau X.1. Résultats de l'essai du module complexe (15°C, 10 Hz).

		Témoin	1% PEHD-B	2% PEHD-B	3% PEHD-B
Module de Rigidité (MPa) $ E^* $		7968	12402	11451	8471
Angle de phase φ	(°)	18.1	10.7	10.6	15.2
	Rad	$\pi/10$	$\pi/6$	$\pi/6$	$\pi/8$
Module dynamique E1		7580	12185	11256	8176
Module de perte E2		2456	2302	2100	2216

Selon la norme européenne EN 13108-1 qui classe les BBSG et BBME selon leur module de rigidité à une température de 15 °C et une fréquence de 10 Hz en trois classes ; le tableau suivant présente la classification.

Tableau X.2. Spécification de module des bétons bitumineux selon EN 13108 – 1 (15°C, 10 Hz)

Classes	BBSG	BBME
01	$\geq 5\ 500$ MPa	$\geq 9\ 000$ MPa
02	$\geq 7\ 000$ MPa	$\geq 11\ 000$ MPa
03		

Notre enrobé est transformé d'un BBSG de classe 03 qui est un enrobé classique (avant la modification), à un BBME de classe 03 un des meilleures enrobées bitumineux de couches de roulement, la valeur de la rigidité a augmenté de 36% pour le liant modifié par 1% de PEHD, 30% pour la teneur de 2% de PEHD, mais avec seulement 6% de l'enrobé à base de bitume modifié avec 3% de PEHD.

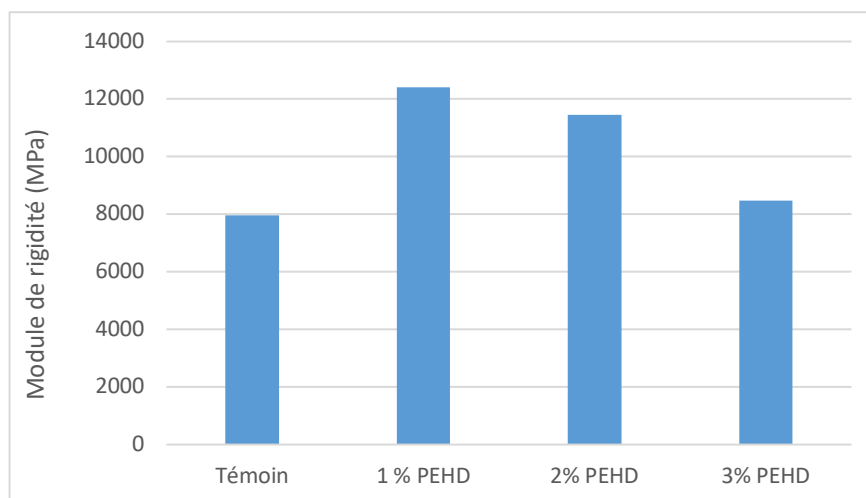


Figure X.2. Modules de rigidité des quatre mélanges testés.

Cette augmentation de la valeur du module de rigidité est due principalement au changement dans la structure physico - chimique du liant (ϕ VI. 3). Absorbant un taux de maltène, en particulier les huiles aromatiques et saturées, résultant un liant riche en asphaltènes.

Selon certains chercheurs [25], ce changement physique produit un changement de comportement du liant de Sol vers Gel, où il devient plus cohérent, plus adhésif. De façon plus simple et pratique, le liant devient plus dur.

D'après [3] la valeur de l'angle de phase φ caractérise le comportement d'enrobé, sa valeur donne une idée sur la prédominance élastique ou visqueuse du comportement, pour un matériau parfaitement élastique, φ est nul, et le module devient un nombre réel.

Dans notre cas, cet angle de phase est caractérisé par un déphasage entre la courbe d'application de force et la courbe de déformation en cours de l'essai de flexion en deux points (Figure X.3). On trouve que sa valeur est diminuée dans le cas d'utilisation des liants modifiés par les déchets de polyéthylène, selon la description de [3] cette diminution exprime que le comportement élastique est devenu dominant.

Le taux de diminution de l'angle de phase est de 10% pour 3% de PEHD, mais pour les deux teneurs 1 et 2% de PEHD cette diminution est de 69%. Cette différence d'angle particulièrement pour 01 et 02% de PEHD rend le comportement élastique dominant, et c'est ce que nous préférons lorsque la valeur de la perte d'énergie est diminuée.

Le phénomène de déphasage est discuté dans la thèse de Monsieur Yann LEFEVEUR en 2001, il exprime que la présence d'un déphasage entre l'application de chargement et la réponse due à l'énergie de chargement dissipée dans le matériau provoque le retard entre l'application de charge et la déformation.

Le déphasage et la dissipation de l'énergie exprimés par les valeurs du module de perte E_2 qui varient de 2100 à 2456 MPa.

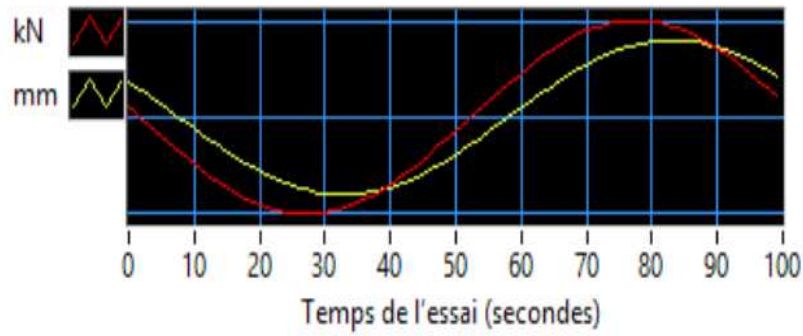
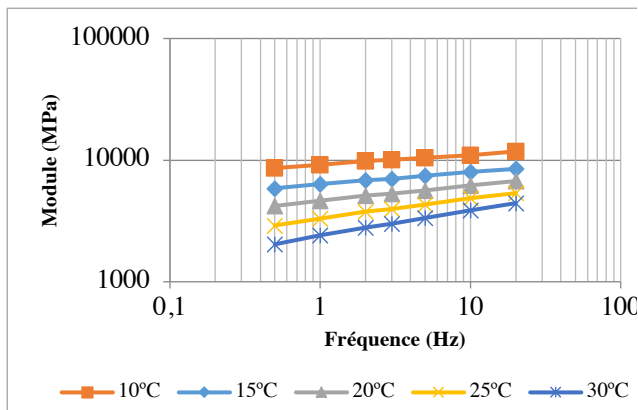


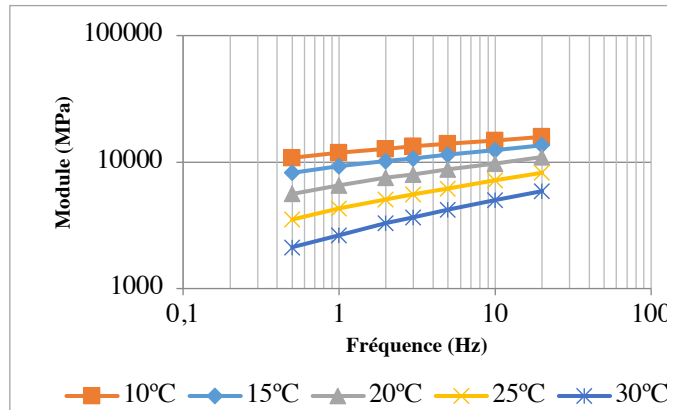
Figure X.3. Courbe de force et déplacement en fonction du temps.

Le plus important dans ces types d'essais n'est pas d'évaluer ces enrobés sur une seule température telle que 15°C utilisé en général dans les spécifications françaises. L'essai peut être utilisé aussi pour évaluer le comportement de ces matériaux à différentes températures, la figure X.4 représente la variation de module de rigidité (norme de module complexe) en fonction de la fréquence pour chacune des températures d'essais T, en coordonnées bi-logarithmiques, cette représentation s'appelle la courbe isotherme.

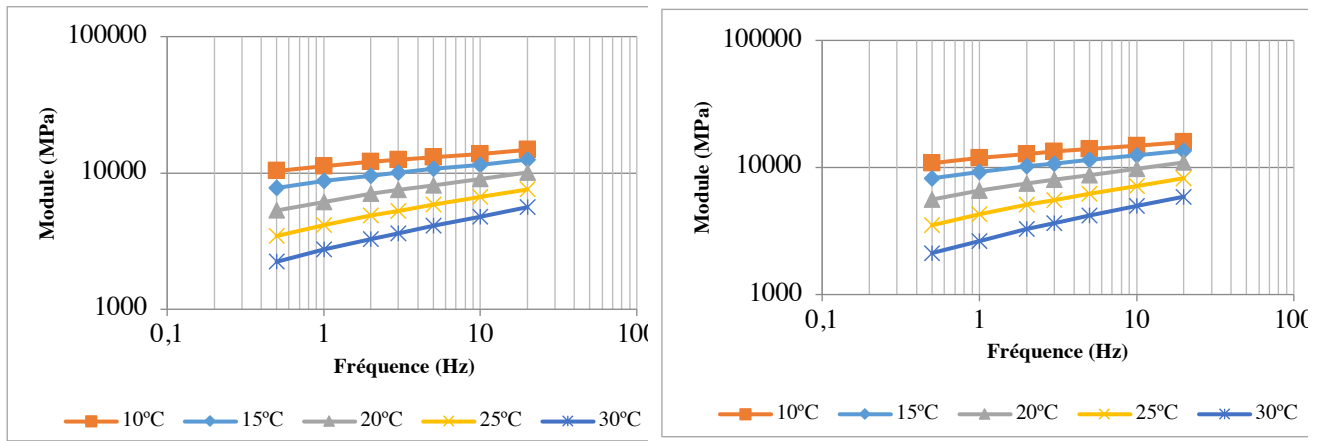
La courbe isotherme montre la sensibilité cinétique (c'est-à-dire la variation du module avec la vitesse de la sollicitation).



a) Courbe isotherme de mélange témoin



b) Courbe isotherme de mélange avec 1 %



c) Courbe isotherme de mélange avec 2 %

d) Courbe isotherme de mélange avec 3%

Figure X.4. Courbe d’isotherme de chaque composition de PEHD broyés et le témoin.

On note que le module varie linéairement dans le même sens que la fréquence (trafic routier) ; en plus il semble que les courbes de variation du module de chaque température se rapprochent les unes des autres avec l’augmentation de la fréquence, ce qui exprime qu’à une haute fréquence le module augmente et devient moins sensible à la température.

La figure X.5 présente les courbes isothermes de chaque composition à la température de 25°C, accompagnée par des courbes de tendance.

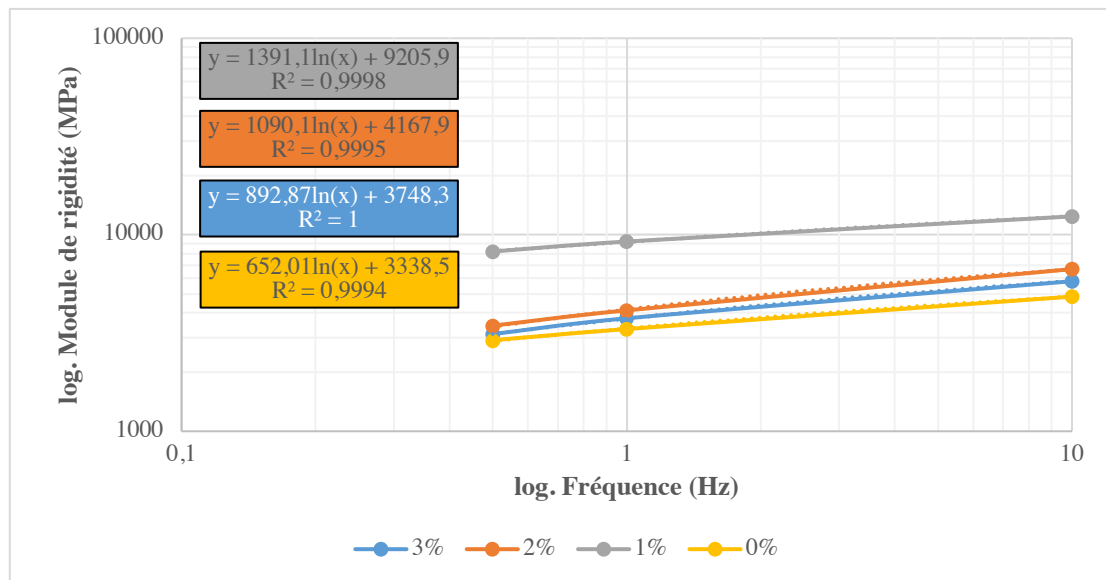


Figure X.5. Courbe d’isotherme des compositions avec PEHD broyés à une température de 25 °C.

Les isothermes de module sont portées sur la figure X.5. Leurs valeurs ont une relation avec la fréquence, les pentes des courbes de tendance déterminées ($R^2= 0.0001$) pour chaque composition sont différentes, la forme des courbes de tendance est :

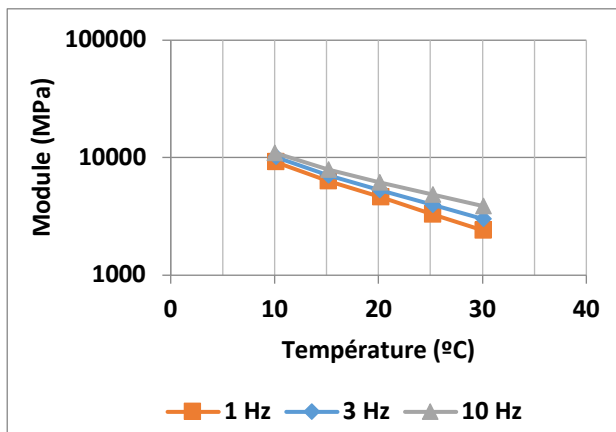
$$E(\omega, T) = A. \ln(\omega) + B$$

- À : est la pente qui exprime la sensibilité cinétique de la courbe maîtresse,
- B : est l'intersection avec l'axe des modules, où c'est la valeur de module à 1 Hz, d'où \ln approche au zéro.

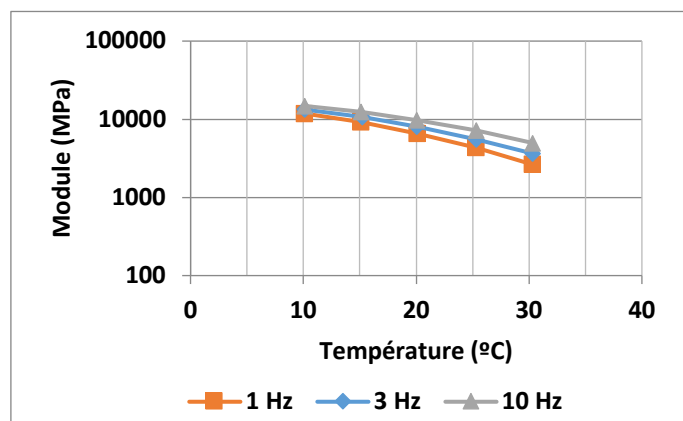
La modification du liant augmente la valeur de la pente entre 27 et 53%, ce que signifie que les mélanges modifiés sont moins sensibles au trafic routier et plus résistant à la variation de la vitesse du chargement par rapport au cela de témoins.

La figure X.6 représente une courbe du module de rigidité en fonction de la température pour chacune des fréquences d'essais, en coordonnée semi-logarithmique, cette présentation s'appelle la courbe isochrone.

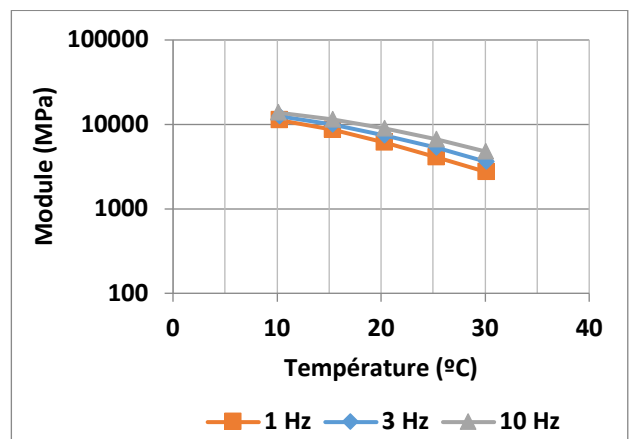
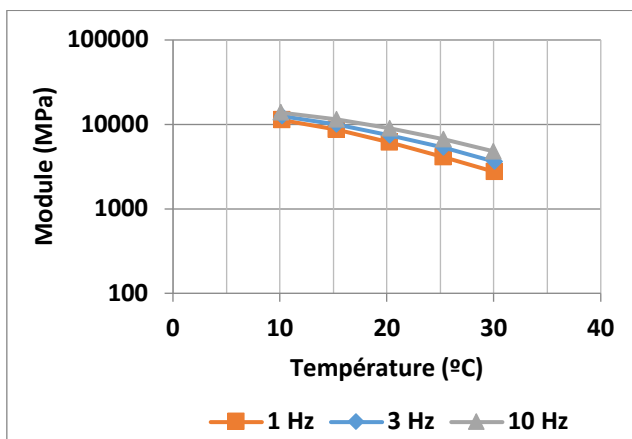
La présentation isochronique responsable de montrer la sensibilité thermique (c'est-à-dire la variation du module en fonction de la température).



a) Courbe isochrone de mélange témoin



b) Courbe isochrone de mélange avec 1%



c) Courbe isochrone de mélange avec 2%

d) Courbe isochrone de mélange avec 3%

Figure X.6. Courbe isochrone de chaque composition avec PEHD Broyés et le témoin.

On note que la valeur de module de la rigidité diminue avec la croissance de la température, donc la relation entre le module et la température est inverse ou négative. La basse température a une valeur plus élevée du module, et la cause est qu’avec la croissance de température, la consistance du bitume diminue et ce dernier devient moins dur ou plus mou.

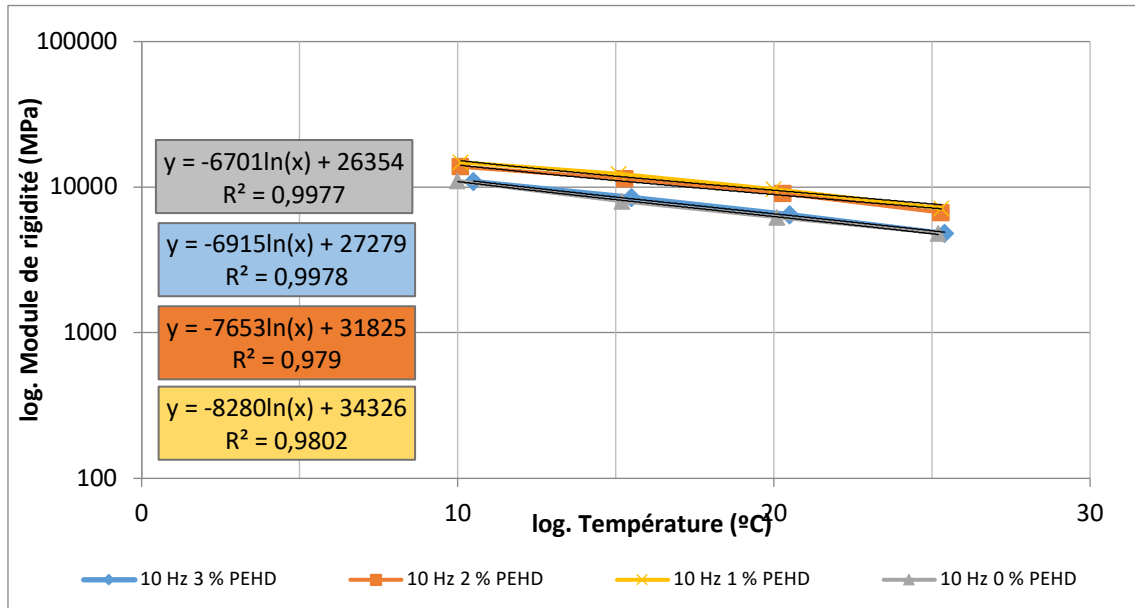


Figure X.7. Courbe isochrone de chaque composition avec PEHD Broyés de fréquence à 10 Hz

Les isochrones du module sont représentées en figure X.7. On constate que le module est inversement proportionnel à la température.

Les pentes de courbes de tendance déterminées ($R^2 = 0.01$) sous la forme :

$$E(\omega, T) = A. \ln(Température) + B$$

- À : est la pente, qui exprime la sensibilité thermique de la courbe isochrone,
- B : est l’intersection avec l’axe Y du module, où c’est la valeur du module à 1°C, d’où \ln s’approche de zéro.

La modification de bitume diminue la valeur de la pente entre 3 et 19%. La pente exprime la sensibilité thermique ce qui veut dire que les mélanges à base du liant modifié résistent mieux à la variation de température, et devient moins sensible à la température par rapport aux témoins.

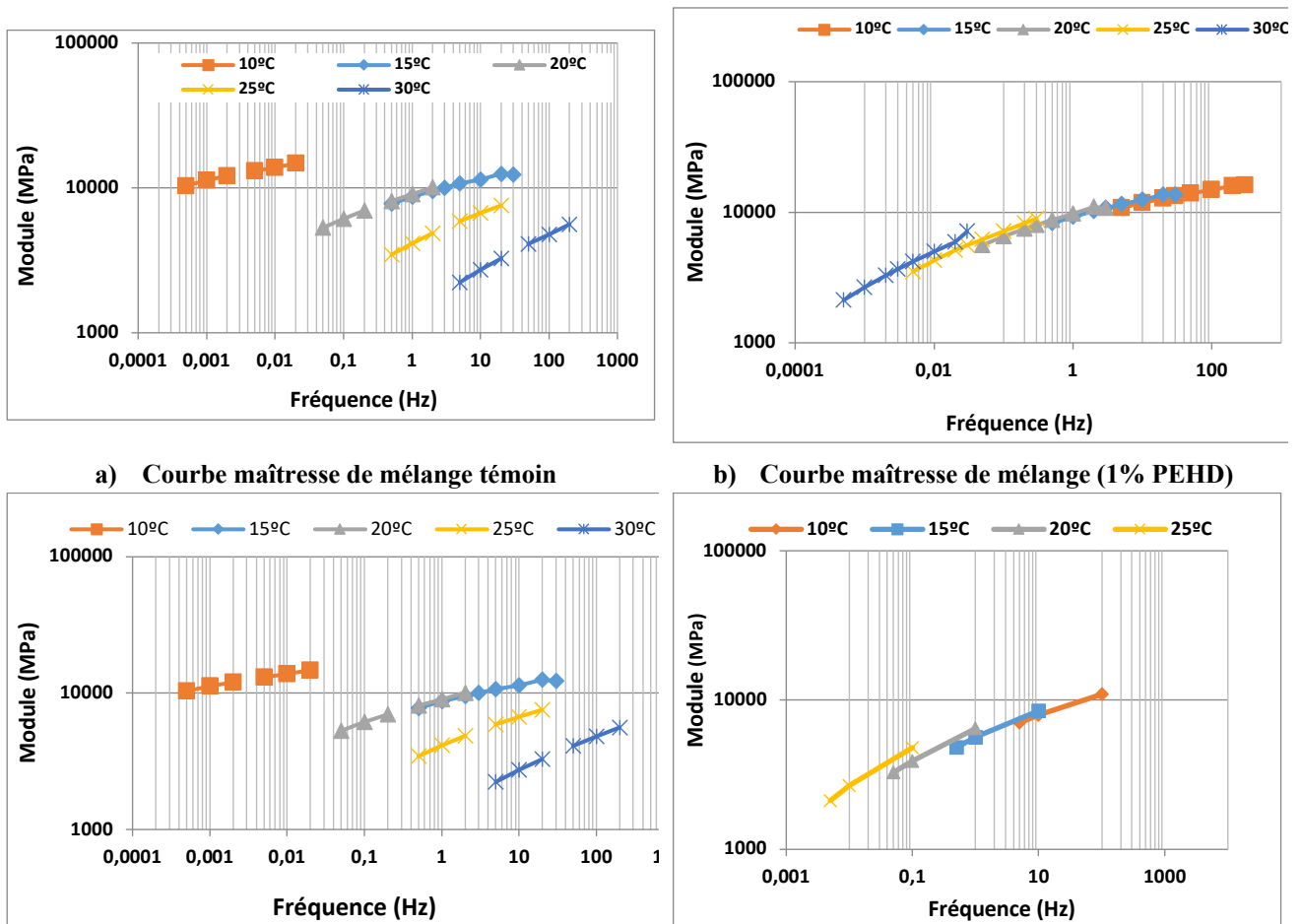
X.4 COURBES ÉQUIVALENTES TEMPS-TEMPERATURE

Le module de rigidité ou le module complexe $E^*(\omega)$ dépend de la pulsation ω et de la température T qui doit s'écrire $E^*(\omega, T)$. Par conséquent, lorsqu'un module complexe est attribué à un enrobé bitumineux, il est impératif d'associer la température et la fréquence pour avoir une signification au résultat.

Le principe d'équivalence temps-température permet d'énoncer que pour certains matériaux, notamment les enrobés bitumineux, l'augmentation de la fréquence de sollicitation a un effet équivalent à une diminution de la température. Grâce à ce principe, la translation de la température de référence des résultats obtenus à une température donnée est possible en déterminant des fréquences équivalentes.

La translation d'une courbe de température donnée « T_i » vers une température de référence, « T_{ref} », consiste essentiellement à multiplier chaque fréquence par un facteur de translation « a_t » et d'associer la valeur du module mesuré à « T_i » à cette nouvelle fréquence.

Sur la base du principe de correspondance temps-température, on peut établir des courbes maîtresses ci-dessous pour chaque composition, pour la température de référence de 15°C.



c) Courbe maîtresse de mélange (2% PEHD)

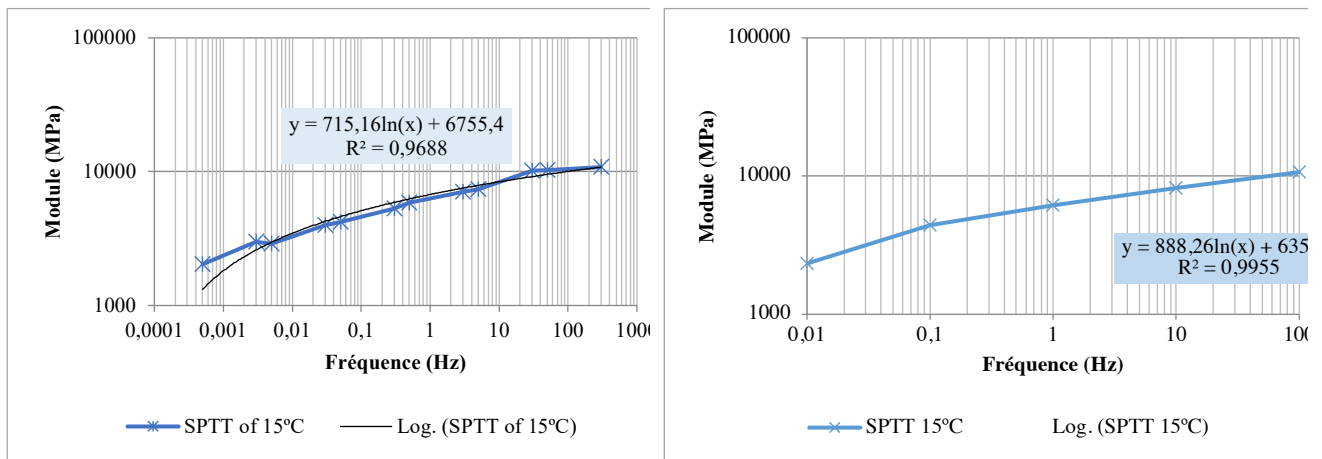
d) Courbe maîtresse de mélange (3% PEHD)

Figure X.8. Courbe maîtresse des compositions avec PEHD Broyés pour Tref = 15°C.

Une courbe maîtresse est une courbe isotherme établie à une température de référence qui donne l'évolution du module de rigidité par rapport à une plage de fréquences étendues.

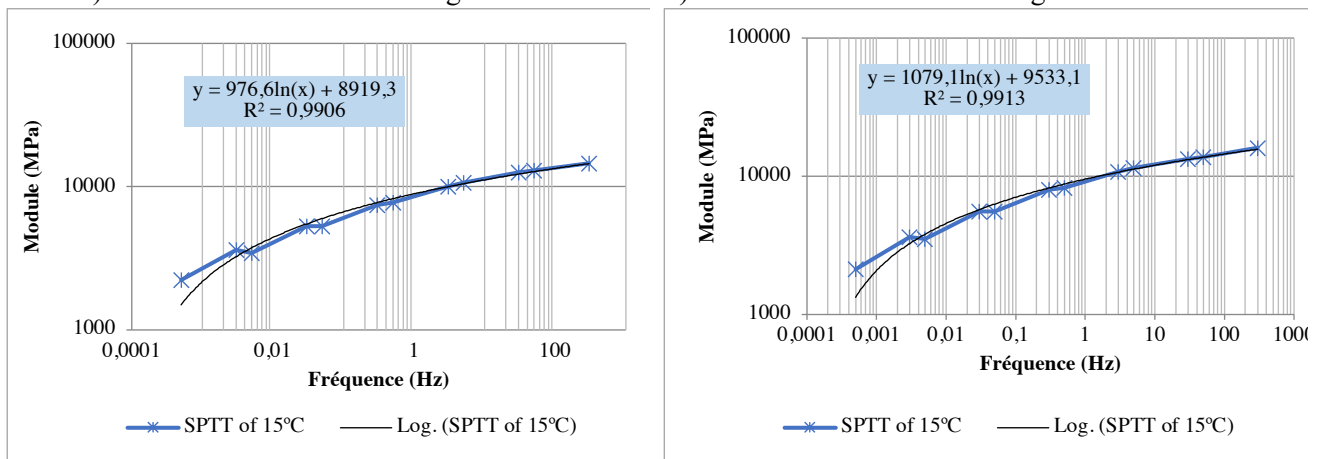
L'intérêt des courbes maîtresses est non seulement de résumer en une seule courbe toutes les données acquises, mais elles permettent aussi de prévoir les caractéristiques rhéologiques du matériau étudié dans des zones technologiquement intéressantes, mais expérimentalement inaccessibles, effet de choc (fréquence de sollicitation très rapide) ou fluage de type orniérage (température de sollicitation élevée).

Les figures ci-dessous présentent les courbes maîtresses avec les formules pour chaque composition à la température de références 15°C :



a) Courbe maîtresse de mélange témoin

b) Courbe maîtresse de mélange avec 3 % de PEHD



c) Courbe maîtresse de mélange avec 2 % de PEHD

d) Courbe maîtresse de mélange avec 1 % de PEHD

Figure X.9. Courbes maîtresses avec les équations de tendance.

Les courbes maîtresses résultantes du principe de superposition temps-température tracées à une température de référence de 15°C sont représentées sur la figure X.9. La valeur du module augmente avec l'augmentation de la fréquence.

Les pentes de courbes de tendance déterminées ($R^2 = 10^{-2}$) pour chaque composition sont différentes et de forme suivante :

$$E(\omega, 15^\circ C) = A \cdot \ln(\omega) + B$$

A : est la pente qui exprime la sensibilité cinétique de la courbe maîtresse,

B : est l'intersection avec l'axe Y de module, c'est la valeur de module à 1 Hz, d'où \ln s'approche de zéro.

La modification du bitume augmente la valeur de la pente avec 33%, 26% et 19% pour les enrobés à base du bitume modifié par 1%, 2% et 3% de polyéthylène respectivement.

La pente exprime la sensibilité cinétique ce qui signifie que les mélanges à base du liant modifié sont plus résistants à la variation cinétique et deviennent moins sensibles à la circulation et au trafic par rapport à ceux du témoin.

X.5 EFFET THERMIQUE SUR LE COMPORTEMENT VEL

Les matériaux bitumineux étant thermo-susceptibles ; leurs propriétés varient avec la température. Or la température dans la chaussée subit des variations importantes au fil des saisons, impact de la température est évaluée par différents chercheurs tels que [3], Yann évalue cette susceptibilité thermique par la pente des isothermes et isochrones présentées précédemment, autres chercheurs utilisent une notion plus simple et plus représentative qui s'appelle indice du module « *Stiffness Index (SI)* » ce qui est le rapport du module de rigidité à la température.

L'impact de température ne s'arrête pas à la valeur de la rigidité, le changement de température peut affecter complètement le comportement VEL, ce qui signifie une influence sur les propriétés élastiques tels que le module élastique et le module de rigidité, ainsi que les caractéristiques visqueuses telles que l'angle de phase et le module de perte.

Dans cette section on présente l'impact de modification de bitume sur la valeur du module de rigidité et la notion indice du module de rigidité (SI), angle de phase (φ), les valeurs mentionnées dans le tableau suivant correspond à la fréquence de référence (10Hz)

Tableau X.3. Influence de la température sur le module et l'angle de phase à 10Hz.

	Témoin (0%)	1% PEHD	2% PEHD	3% PEHD
--	-------------	---------	---------	---------

T (°C)	E (MPa)	SI (MPa/°C)	φ (°)	E (MPa)	SI (MPa/°C)	φ (°)	E (MPa)	SI (MPa/°C)	φ (°)	E (MPa)	SI (MPa/°C)	φ (°)
10°C	11023	1102	12.9	14812	1481	8.20	13101	1310	7.9	12693	1069	11.9
15°C	7688	513	18.1	12402	827	10.8	11451	763	10.6	8176	545	15.3
20°C	6188	309	21.5	9733	487	14.7	9024	451	14.5	6119	306	18.7
25°C	4846	194	25.3	7173	287	19.6	6688	268	19.1	4441	178	22.7
30°C	3869	129	28.4	4980	166	25.2	4791	160	23.6	3760	125	26.1

La figure X.10 résume la rigidité des différentes compositions à différentes températures :

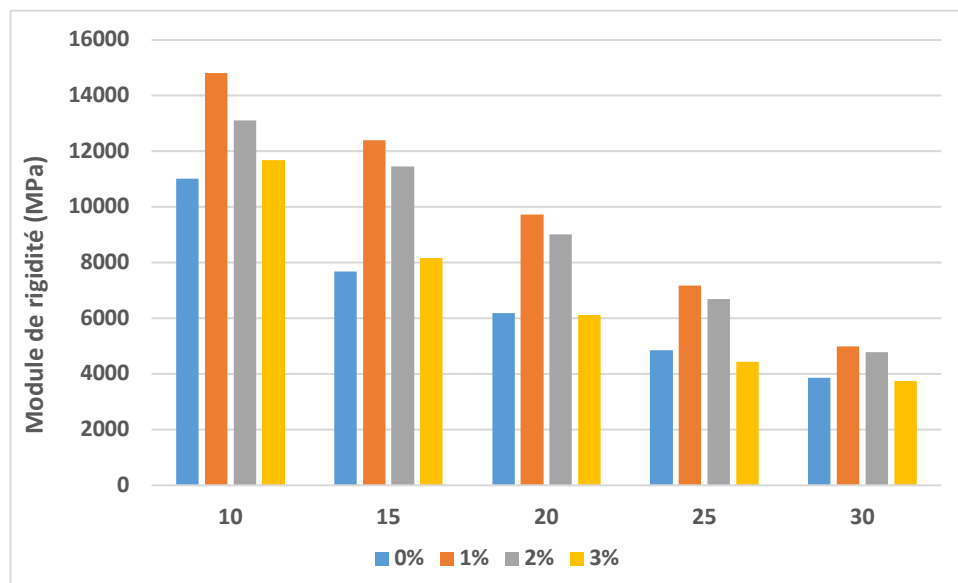


Figure X.10. Modules de rigidité selon les températures de mesure

On remarque que l'augmentation de la température a une influence négative sur la rigidité, cette influence est notée par différents chercheurs tels que [72] et [73] dans les recherches précédentes. L'augmentation de la température influe négativement sur la dureté des liants bitumineux composant ces enrobés et réduit la force d'adhésion entre la matrice bitumineuse.

Les compositions relatives à 1 et 2% de PEHD présentent une augmentation de rigidité pour les cinq températures. Contrairement aux enrobés modifiés par 3% de PEHD, leur rigidité à 10 et 15°C sont plus élevées que la rigidité de l'enrobé témoin. À une température plus élevée ($\geq 15^\circ\text{C}$), la rigidité devient presque la même.

L'impact thermique peut être quantifié par l'indice du module de rigidité (*SI*), on a mesuré cet indice pour les différentes températures, l'histogramme suivant présente l'évolution de ce paramètre.

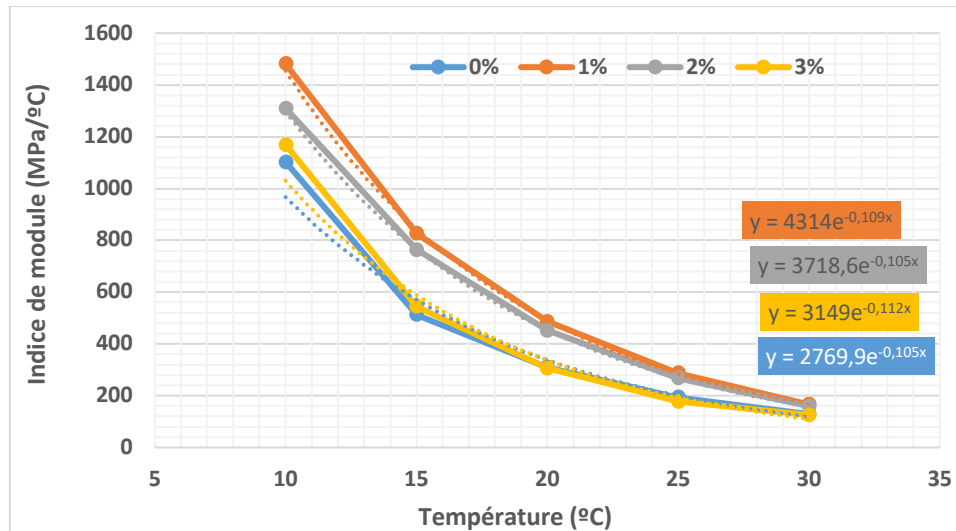


Figure X.11. Courbe de l'indice de module de rigidité des cinq températures.

On remarque que la température influence négativement sur l'indice du module.

L'indice du module représente la résistance à la déformation élastique perdue ou gagnée pour 1 °C (selon le sens de température), la diminution de sa valeur, l'enrobé il devient plus faible et plus déformable.

Le plus important ce n'est pas d'évaluer l'effet thermique uniquement, mais de quantifier cet effet, la superposition des courbes de *SI* présentées dans la figure X.11 montre que les enrobés modifiés avec 1% de PEHD, améliorent la résistance aux déformations élastiques (module) pour 1°C de variation de température, et les enrobés modifiés par 2% deviennent en deuxième position, mais ce qu'il arrive à une température supérieure à 20°C, l'amélioration devient égale avec les enrobés modifiés en 1%.

Les enrobés modifiés avec 3% viennent en troisième position et l'impact positif de la modification avec cette teneur se présente uniquement dans les deux premières températures.

Les résultats montrent que l'effet thermique sur la rigidité suit une relation exponentielle de la forme :

$$SI = A \exp(B.T)$$

SI : indice de module

T : température

A et B des constants

Finalement, l'effet thermique peut être évalué de la façon suivante :

- À une température de 10°C, la résistance à la déformation élastique augmente de 26%, 15% et 6% pour les teneurs en PEHD de 1%, 2% et 3% respectivement.
- À une température de 15°C, l'augmentation arrive à 38%, 36% et reste stable à 6% pour 1%, 2% et 3% respectivement.
- À une température de 20°C, l'augmentation est de 36 et 31% à 1% et 2% et les résistances restent quasiment inchangées pour 3% comparativement au témoin.
- À une température de 25°C, l'augmentation est de 32% et 27% pour 1% et 2% et les résistances restent inchangées pour 3% comparativement au témoin.
- À une température de 30°C, l'augmentation est de 22% et 19% pour 1% et 2% et les résistances restent toujours inchangées pour 3% comparativement au témoin.

En termes de cette expérimentation, on peut conclure que la modification avec les teneurs 1% et 2% donne les meilleurs résultats en termes de rigidité, d'adhésion et une réduction de l'effet thermique à l'enrobé, cet effet est dû généralement à une amélioration du temps de réponse d'enrobé au chargement, ce dernier s'exprime par les valeurs de l'angle de phase.

Cet angle est une expression quantitative du retard entre l'application de la charge et la réponse de l'enrobé (déformation) [3], la figure suivante présente l'effet thermique sur l'angle :

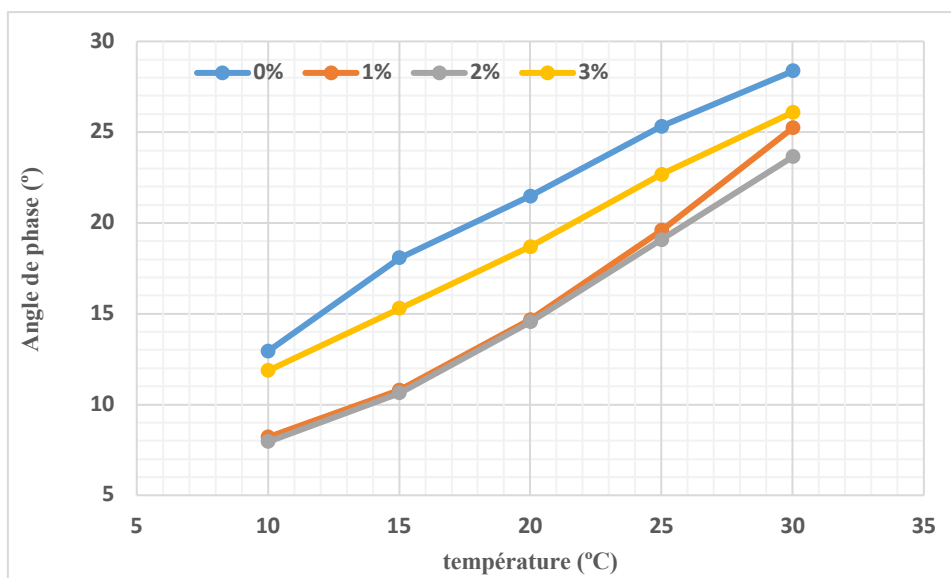


Figure X.12. Angles de phasage en fonction des températures de mesure.

On remarque que la température a un effet positif à l'angle de phase. La diminution de sa valeur exprime une amélioration du temps de réponse, une dominance de comportement élastique.

Les enrobés modifiés avec 1% de PEHD est toujours présent en première position, dans ce critère également, les enrobés modifiés avec 2% partageant la même position avec celle de 1%, où la courbe est superposée l'une à l'autre. Et les enrobés qui contient des bitumes modifiés avec 3% de PEHD arrive à la troisième place entre la courbe de 2% et la courbe de témoin.

La diminution de l'angle de phase a une relation avec les caractéristiques visqueuses du bitume, la modification avec PEHD absorbant les huiles (les éléments responsables sur les caractéristiques visqueuses et sensibilités thermiques) [13], la réduction de ces éléments dans le bitume offre aux asphaltènes (les éléments responsables de la cohésion, adhésion et rigidité) une chance de domination dans la matrice bitumineuse [13]. Ce changement physique est à l'origine des réductions de l'angle de phase et d'amélioration des temps de réponse [63].

X.6 IMPACT DE MODIFICATION SUR LE DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES

L'évaluation des caractéristiques en comportement viscoélastique n'est pas uniquement de quantifier le taux de l'amélioration sur les performances élastiques à basse température, mais ce dernier peut être exploité pour quantifier l'effet sur le dimensionnement de chaussée (épaisseur).

La méthode française de dimensionnement actuelle, le modelé de Burmister décrit la structure de chaussée comme une superposition de couches élastiques linéaires, homogènes et isotopes. Le calcul des valeurs admissibles s'appuie sur le caractère plastique (déformation plastique) des granulats non traités notés GNT. Le dimensionnement routier fait appel à une méthode de calcul de l'épaisseur de la chaussée. Il consiste à évaluer le niveau de sollicitation de la structure et de déterminer les épaisseurs à donner aux différentes couches de la chaussée afin de réduire les contraintes et déformations à des valeurs admissibles pour un trafic donné [74].

Le dimensionnement consiste à la mise en œuvre d'un système qui, à partir des paramètres d'entrée (trafic, type de structure et de plate-forme) fournit les paramètres de sortie

(épaisseurs) recherchés, le transfert d'une structure de GNT vers une structure souple, rigide ou mixte ... etc., basé sur des coefficients d'équivalence pour former une épaisseur d'équivalence en matériau bitumineux et des TUF, TVO ... etc. [74]. La formule de coefficient d'équivalence est la suivante :

$$CE = \sqrt[3]{\frac{E}{500}}$$

Le tableau suivant résume les valeurs du coefficient d'équivalence (CE) pour les cinq températures mesurées.

Tableau X.4. Coefficients d'équivalence des enrobés étudiés.

PEHD (%)	0		1		2		3	
T (°C)	E	CE	E	CE	E	CE	E	CE
10	11023	2.53	14812	2.76	13101	2.66	12693	2.66
15	7688	2.27	12402	2.62	11451	2.56	8176	2.56
20	6188	2.13	9733	2.44	9024	2.38	6119	2.38
25	4846	1.98	7173	2.22	6688	2.18	4441	2.18
30	3869	1.85	4980	1.99	4791	1.97	3760	1.97

Actuellement, les épaisseurs des couches de roulement à base de bétons bitumineux calculées par un coefficient d'équivalence de 2, la valeur réelle de notre étude est de 2.27.

La modification de liant par le polyéthylène recyclé influe positivement sur le coefficient d'équivalence, les valeurs augmentent de 2.56 à 2.62, l'influence de cette augmentation tourne à une réduction d'épaisseur de la couche de roulement (6 cm par exemple au lieu 8cm), la réduction de l'épaisseur a un impact économique, les nouvelles couches nécessitent moins de matériaux granulaires, moins de liant bitumineux, et l'étude technico-commerciale peut être un sujet indépendant pour évaluer le coût de production des liants modifiés comparativement au gain en matériaux granulaires.

XI. CONCLUSION GÉNÉRALE

À l'issue du présent projet de recherche, mené dans le but d'étudier l'influence des poudrettes de déchets plastiques sur les enrobés bitumineux ordinaires et voir les principaux titres de la méthode de modification des liants hydrocarbonés, plusieurs points sont à souligner à partir du travail expérimental mené dans les différents laboratoires (LTPS, Universités de Bejaïa, USTHB) et les résultats obtenus sont présentés. Les conclusions dont on a abouti sont les suivantes :

- L'enrobé bitumineux ordinaire c'est-à-dire à base du bitume non modifié présente des caractéristiques acceptables et satisfaisantes lorsqu'il est utilisé avec des granulats de qualité, ce qui se traduit par des modules de rigidité relativement importants.
- Le bitume modifié par les polymères présente des caractéristiques plus élevées que le bitume classique non modifié, cette amélioration s'exprime par l'augmentation de la consistance du bitume qui passe d'un bitume de classe 35/50 à un bitume très dur de classe 20/30 après modification.
- L'enrobé bitumineux à base du bitume modifié présente des performances mécaniques et rhéologiques bien meilleures que l'enrobé ordinaire en termes de stabilité Marshall, compactabilité et mise en œuvre et résistance à la déformation permanente (fluage, orniérage).
- La méthode de modification basée sur le changement rhéologique des caractéristiques du liant, s'avère être la plus efficace,
- La modification par un polyéthylène de haute densité, ou même de basse densité aboutit à un liant peu stable ce qui nécessite son utilisation directe après modification.
- Les bitumes modifiés en matières nobles sont plus efficaces, consomment plus d'énergie dans la modification et présentent des valeurs bien supérieures par rapport aux bitumes modifiés par matières recyclées.

À la lumière des avantages précédents, on peut conclure que les polymères testés présentent une influence positive importante sur les performances physico-mécaniques des bétons bitumineux. La deuxième partie du présent projet est concentrée sur le comportement viscoélastique de notre enrobé par l'intermédiaire d'un nouvel essai utilisé pour la première fois dans le cadre des recherches menées à l'université Kasdi Merbah d'Ouargla (UKMO), qui est l'essai de flexion en deux points. Ce dernier nécessite une bonne maîtrise, les résultats sont importants pour le dimensionnement des chaussées souples.

Le comportement viscoélastique des nouveaux enrobés à base du bitume modifié par le PEHD, est prédominance par le comportement élastique que visqueux, exprimé par des modules de rigidité importants, coefficient d'équivalence supérieur peut minimiser l'épaisseur des chaussées, augmenter la portance de la chaussée, et augmenter sensiblement la résistance aux changements thermiques, un point fort pour notre région saharienne.

À la fin, on peut répondre à la question principale de cette recherche posée au début « est-ce que la modification des bitumes par des poudrettes plastiques recyclées influe positivement sur les bétons bitumineux ? ». Les matières plastiques quelle que soit leur nature donne une influence positive sur les bitumes et bétons bitumineux, sauf qu'il faut toujours prendre en compte le point de la mise œuvre.

En termes de ce projet, on peut conclure que la recherche n'a jamais été encore finie, alors qu'on peut proposer des sujets de recherches tels que :

- ❑ Une étude plus précise de la relation entre les matières plastiques et les liants bitumineux au moyen des essais rhéologiques comme le DSR, BBR et DTT
- ❑ Recherche sur des méthodes de traitement des colorants dans les plastiques recyclées par régénération au but de les réutiliser dans les enrobés bitumineux.
- ❑ Valoriser d'autres types de plastiques tels que PET, PVC.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] **M'hammed MERBOUH., (2010)** : « Contribution à la modélisation du comportement rhéologique des enrobés bitumineux : influence des conditions extrêmes de température et de trafic en fatigue », Université Bordeaux 1, France.
- [2] **Mai Lan NGUYEN., (2009)** : « Étude de fissuration et de la fatigue des enrobés bitumineux », Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.
- [3] **Yann LEFEUVER., (2001)** : « Contribution à l'étude du comportement en fatigue des enrobés bitumineux – Étude de l'allongement des éprouvettes comme manifestation de l'endommagement diffus – Expérimentale et modélisation », École National des Pontset Chaussée, France.
- [4] **Guide technique., (1994)** : « Conception et dimensionnement des structures de chaussées », SERTA – LCPC, France.
- [5] **Di Benedetto et Corté., (2005)** : « Modélisation : écart entre état de connaissances et d'applications », Vol2, Hermes, 283p.
- [6] **J. Dangmo ENGLAND., (2005)** : « *Caractérisation des déformations d'orniérage des chaussées bitumineuses* », Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.
- [7] **Hassan BAAJ., (2002)** : « Comportement à la fatigue des matériaux granulaires traités aux liants hydrocarbonés », Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.
- [8] **Bernard LOMBARDI., (2007)** : « Liants hydrocarbonés : C904 », Edition Technique d'Ingénieur, France.
- [9] **Bernard LOMBARDI., (2005)** : « Bitume.info : Aménager, construire, innover », Groupement Professionnel des bitumes, France.
- [11] **Richard S.Kraus., (2004)** : « Chapitre 78 - Le raffinage du pétrole », Encyclopédie de la santé au travail.
- [13] **Document techniques des bitumes., (2004)**, TOTAL, France.
- [14] **Didier LEUSEUR., (2002)** : « La rhéologie des bitumes : principe et modification », Rhéologie Vol 2, pp 1-30.
- [15] **AJOUR et al., (1971)** : « Constitution et propriétés physico-mécaniques des bitumes », Journées d'information Bitumes et enrobés bitumineux, pp 21-139,
- [16] **M HARLIN., (1992)** : « Le bitume : Propriétés, caractéristiques, essais de laboratoire et spécifications », Formation continue E.N.P.C. Session Couche de roulement, Paris, France.
- [17] **J-P. PLANCHE, D. MARTIN, P. CHAVEROT., (2000)** : « Les relations composition micro – structure propriétés des liants », *Bitume actualités*, N°101, pp. 11-15.
- [18] **A. DONY., (1991)** : « *Liants bitumes-polymères. De la fabrication à la mise en œuvre en enrobés : influence de la nature du bitume sur leurs propriétés mécaniques, leur micromorphologie et leur stabilité thermique* », Laboratoires des Ponts et Chaussées, Paris, France.
- [19] **DI BENEDETTO H., CORTE J.F., (2004)** : « *Matériaux routiers bitumineux*, Tome 1 ».
- [20] **F. ARCAS., (1998)** : « Étude d'une méthode de simulation du vieillissement des bitumes sur route », Laboratoires des Ponts et Chaussées, Paris, France.

- [21] **François OLARD., (2003)** : « Comportement Thermomécanique des enrobés bitumineux à basse température – relation entre les propriétés du liant et de l’enrobé », Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.
- [22] **B. BRÛLÉ., F. MIGLIORI., (1983)** : « Application de la chromatographie sur gel perméable (GPC) à la caractérisation de bitumes routiers et de leur susceptibilité au vieillissement artificiel », Bulletin de liaison ponts et chaussées, N°123, pp. 107-120.
- [23] **S. CHEBIL., (1996)** : « Étude 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 », Université de Sherbrooke, Québec, Canada.
- [24] **M. OULD HENIA., (2005)** : « Modélisation et prédiction du comportement rhéologiques des mélanges bitume- caoutchouc », École polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 2005.
- [25] **F. FARCAS., G. PLATRET., (2007)** : « Méthodes physico-chimiques pour la caractérisation de matériaux du génie civil et le suivi de leur vieillissement, Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussée, Paris, France.
- [26] **L.O. OYKENLE., (2006)** : « Certain relationships between chemical composition and properties of petroleum asphalt from different origin » , Oil & Gas Science and Technology, Volume 61, pp 433-441.
- [27] **G. RAMOND, M. EPANIT., (2000)** : « Caractéristiques de bitumes utilisés en Algérie », Bulletin de liaison ponts et chaussées, N°225, pp 3-11, 2000.
- [28] **F. OLARD, DI BENEDETTO H., ECKMANN B., (2004)** : « Rhéologie des bitumes : Prédiction des résultats des tests de fluage BBR à partir des résultats de module complexe », Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, N°252-253, pp. 3-15. Paris.
- [29] **G. ROMAND, M. PASTOR, (1982)** : « Relations entre adhésion, cohésion et module complexe des bitumes », bulletin de liaison ponts et chaussées N° 118, pp. 47-52.
- [30] **Jamel NEJI., (2005)** : « le projet routier », Centre de Publication Universitaire, Tunis, Tunisie.
- [31] **R. LENDIER., (1979)** : « L’essai de traction directe à déformation imposée appliqué à l’étude des propriétés mécaniques des enrobés », Annales de Institut Technique du Batiment des Travaux Publics N° 370 pp. 21 – 31.
- [32] **C. HUET., (1963)** : « Étude par une méthode d’impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés », Université de Paris, France.
- [33] **J. SELENCON., (1983)** « Cours de Calcul des structures anélastiques viscoélastiques », École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France.
- [34] **M. HUHTALA., (1995)** : « *The Rheology of bituminous mixtures* », Eurobitume Workshop- the rheology of bituminous binders, Bruxelles.
- [35] **C. PEYRONNE., (1991)** : « Dimensionnement des chaussées 2eme Édition », École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France.
- [36] **Di. BENEDETTO et al., (1996)** : « Fatigue damage for bituminous mixtures : a pertinent approach », Journal of the Association of Asphalt Paving technologists (AAPT), France.
- [37] **P. BENSE, (1983)** : « Enrobés armés par déchets de matières plastiques », Bulletin de liaison ponts et chaussées, N°128, pp.99-106.

- [38] **P.J. CERINO., (2001)** : « Test and Evaluation of Intergrated RFID Baggage Handing System at San Francisco International Airport – Quick Look Test Report », federal aviation Adminstration, Washington D.C, USA.
- [39] **E. Doubbaneh., (1995)** : « Comportement mécanique des enrobés bitumineux des petits aux grandes déformations ». Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.
- [40] **M. Assi., (1981)** : « Contribution à l'étude du comportement des enrobés à la fatigue en cission », École Nationale des Ponts et Chaussées, France.
- [41] **T.W. Kennedy et al., (1994)** : « The Superpave TM System - Superior Performing Asphalt Pavements - Strasse und Verkher / Route et Trafic, n° 6. Ed. VSS - Union des Professionnels Suisses de la Route, pp.347-354 ».
- [42] **U. Lempe et al., (1992)** : « Participation to Rilem Interlaboratory Test Program Part 02 – Dynamic tests – Research raport », Technische Universität München, Allemagne.
- [43] **R. Gübler., (1990)** : « Méthode d'essai par oscillation axiale pour la determination des caractéristiques mécaniques et du comportement à la fatigue des asphaltes, Proceedings of the fourth international Rilem Symposium, budapest, Ed. Chapman and Hall, pp. 432 – 444 ».
- [44] **L. Francken et al., (1994)** : « Interlaboratory Test Program – Part II, Repeated loading tests, Draft Report RILEM TC 152 PBM – Performance of Bituminous Mixtures », International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, France.
- [45] **Pronk., (1996)** : « Theory of the Four Point Dynamic Bending Test - Research Report », Ministerie van Verkeer en Waterstaat - Dienst Weg- en Waterbouwkunde - The Netherland.
- [46] **NEIFAR., (1997)** : « Coefficients de dilatation et de contraction thermiques d'un enrobe bitumineux avec et sans chargement mécanique », Mechanical Tests for Bituminous Materials Proceeding of the 5th International RILEM Symposium, Lyon 14-16 mai 1997, pp 421-428.
- [47] **A. CARTER., D. PERRATON., (2002)** : « La mesure du module complexe des enrobés bitumineux », 2nd Material Specialty Conference of the Canadian Society for Civil Engineering Montréal, Québec, Canada.
- [48] **S. SAOULA et al., (2010)** : « Approche Modéliste et Valorisation des Enrobés Modifiés par Ajout de Polymères – Impact sur l'environnement », Université des Sciences et Technologie Houari Boumediene, Alger, Algérie.
- [49] **B.J. DONGMO., (2005)** : « Caractérisation des déformations d'orniérage des chaussées bitumineuses », Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Lyon, France.
- [50] **PIARC., (1999)** : « Use of modified bituminous binders, special bitumens with additives in road pavements », Laboratoire Central des ponts et chaussée, France.
- [51] **Wassila BOUGHAMSA (2008)** : « Les bitumes modifiés par polymères », Université de Skikda, Algérie.
- [52] **OFEV., (2001)** : « Recyclage des matières plastiques en Suisse », Exposé de la position de l'OFEFP, juillet 2001
- [56] **B. BRÛLÉ., G. RAMOND., C. SUCH., (1987)** : « Relations composition-structure-propriétés des bitumes routiers », Laboratoire Centrale Ponts et Chaussées, Paris, France.

- [57] **B. BRÛLÉ., (1977)** : « Caractérisation de produits bitumineux par chromatographie sur gel perméable », Bulletin de liaison ponts et chaussées, N° spécial V, pp. 89-100.
- [58] **Bredael, P., Andriolo, P. and Killens, E., (1991)** : « A structural study of the hot storage stability of SBS-modified bitumens », Proceedings of the International Symposium on Chemistry of Bitumen, Vol. II, pp. 932–951, Rome, Italie.
- [59] **M. MURPHY., M. O'MAHONY., C. LYCETT., I. JAMIESON., (2001)** : « Recycled polymers for use as bitumen modifiers », Journal of Materials in Civil Engineering, pp. 306-314.
- [60] **Pérez-lepe A., Martinez-boza F.J., Gallegos C., Gonzalez O., Munõz m.e., Santamaria a., (2003)** : « Influence of the processing conditions on the rheological behaviour of polymer-modified bitumen », Fuel, Vol.82, pp. 1339-48.
- [61] **POLACCO G., BERLINCIONI S., BIONDI D., STASTNA J., ZANZOTTO L., (2005)** : « Asphalt modification with different polyethylene-based polymers », European Polymer Journal, Vol.41, pp. 2831-2844.
- [62] **BONEMAZZI F., BRAGA V., CORRIERI R., GIAVARINI C., SARTORI F., (1996)** : « Correlation between the properties of polymers and of polymer modified Bitumens », 1st Eurasphalt and Eurobitume Congress, Strasbourg.
- [63] **Jew P, Shimizu J A, Svazic M and Woodhams R T (1986)** : « Polyethylene-modified bitumen for paving applications », J. Appl. Polym. Sci., 31, 2685–2704.
- [64] **Tony McNALLY., (2011)**: « Polymer Modified Bitume: Propriété et caractérisation », Woodhead Publishing Limited, United Kingdom.
- [65] **Documents des essais de Colas Groupe., (2004)** : « Documents Techniques des essais », Campus Scientifique et Technique, Colas Groupe, France.
- [67] **Safia KHENGAOUL., (2013)** : « Valorisation du sable de dunes en couche de roulement : Sable – bitume », Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algeria.
- [68] **O. SOLOMATNIKOVA, (1998)** : « comportement rhéologique et propriétés cohésives et adhésives des liants bitumineux », Université Laval, Quebec, Canada
- [69] **F. HATTATOGLU et al., (2015)** : « Modeling of Marshall Quotient of Hot Asphalts by Artificial Neural Networks », International Conference on Engineering and Natural Sciences – ICENS.
- [70] **M. MEUNIER., (2012)** : « Prédiction de l'orniérage lié aux déformations permanentes des enrobés bitumineux », École Centrale de Nantes, France.
- [71] **Jean-Luc DELORME., Chantal de la ROCHE., Louise WENDLING., (2007)** : « Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés », Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France.
- [72] **Vincent DOMECH., (2005)** : « Endommagement par fatigue des enrobés bitumineux condition de trafic simulé et de température », Université Bordeaux1, France.
- [73] **A. CARTER et al., (2004)** : « La mesure du module complexe des enrobés bitumineux », 2nd material specialty conference of Canadian society for Civil Engineering Montréal, Québec, Canada.
- [74] **A.Kimbonguila et al., (2015)** : « Méthode de dimensionnement des structures de chaussées: quelle (s) adaptabilité (s) pour les matériaux granulaires alternatifs ? », Rencontres Universitaires de Génie Civil, Bayonne, France.

Site Web :

- [10] **Connaissancedesenergies.org**, consulter en 2013 :
<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/raffinage-petrolier>
- [12] **Sahara blend, 2007** : https://www.euro-petrole.com/docs/260709_143700_cDSEKQyr_document.pdf
- [66] **Guide de bonnes pratiques - La mise en œuvre des enrobés , 2009** :
<https://cdn.ca.yapla.com/company/CPYN3MoxlytcLv8TGiuQSzVUf/asset/files/Guide%20de%20bonnes%20pratiques/c74c97c89a90256file.pdf>
- [53] **Matière plastiques., (2008)** :
https://achats-responsables.ch/pdf/leguide_2015/version_appfondie/D/D03-Matieres_plastiques_version_appfondie.pdf
- [54] **PEMRG, (2007)** : <https://www.plasticseurope.org/en/resources/market-data>
- [55] **materials.unsw.edu.au** consulter en 2018

Liste des normes :

- **EN 13108-1 (2007)** : « Spécifications des matériaux - Partie 1 : Enrobés bitumineux ».
- **NF EN 12697 – 10 (2003)** : « Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 10 : Compactibilité ».
- **NF EN 12697-22, (2004)** : « Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud -Partie 22 – Essai d’Orniérage ».
- **NF EN 12697-24, (2005)** : « Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud -Partie 24 – Résistance à la fatigue ».
- **NF EN 12697-26, (2004)** : « Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud -Partie 26 – Module de rigidité ».
- **NF EN 12697 – 31, (2003)** : « Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud -Partie 31 : Confection d'éprouvettes à la presse à compactage giratoire ».
- **NF EN 12697-33, (2004)** : « Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud -Partie 33 – Confection d'éprouvettes au compacteur de plaque ».
- **NF P 98 – 250 – 3, (1992)** : « Essais relatifs aux chaussées : Préparation des mélanges hydrocarbonés - Partie 3 : confection des éprouvettes dans un bloc de mélange hydrocarboné ».
- **NF P 98- 256- 1, (2002)** : « Essais relatifs aux chaussées : Essais statiques sur mélanges hydrocarbonés -Partie 1 : Essai DURIEZ sur mélanges hydrocarbonés à chaud ».
- **NF P 98 – 260 – 1, (2001)** : « Essais relatifs aux chaussées : Détermination la résistance à la fatigue des mélanges hydrocarbonés -Partie 1 : Essai par flexion deux points à amplitude de flèche constante sur éprouvettes trapézoïdale isocèles ».

RÉSUMÉ

Ce travail résultant de travail de quatre année concentré sur des études de comportement des enrobés bitumineux valorisé par des déchets de plastiques, l'amélioration se fait au niveau du liant par des modifications mécaniques pour changer le comportement rhéologique, les résultats étant encourageant pour container vers les enrobés et le comportement de chaussée.

Les procédures proposées sont une modification par 03 teneurs de déchets de polyéthylène de haute densité, 01, 02 et 03 %, ce polymère c'est le plus utilisée dans la fabrication des sacs et bouteille en plastique, la modification fait par agitation sur un liant pur pendant deux heures sous une grande température

Après avoir vu résultats conformes ont étudié le comportement viscoélastique linéaire par l'essai français, de flexion deux points (système console), les résultats présentent par des courbes isotherme, isochrone et des courbes formulées par le système de superposition temps – température, et enfin les valeurs augmentées dans le cas de 03 % de PEHD par 16 % et atteindre le 60 % pour le 01 % de polyéthylène sur le liant.

- **Mots clés :** Béton bitumineux, flexion deux points, comportement viscoélastique, VEL, PEHD, polyéthylène de haute densité,

ABSTRACT:

This work resulting from four-year work focused on studies the behavior of bituminous mixes modified by plastic waste, the improvement is made at the level of the binder by mechanical modifications to change the rheological behavior of the binder, the results being encouraged to container towards asphalt and pavement behavior.

The proposed procedures are a modification by 03 high density polyethylene waste content, 01, 02 and 03%, this polymer is the most used in the manufacture of bags and plastic bottle, the modification made by agitation in a pure binder for two hours under high temperature.

After having a good consistent result, we studied the linear viscoelastic behavior by the French test, two-point bending (console system), the results present by isothermal curves, isochronous and curves formulated by the time-temperature superposition system, and finally the values increased in the case of 03% of HDPE by 16% and reach 60% for the 01% of polyethylene on the binder.

- **Keywords :** asphalt concrete, two-point bending, viscoelastic behavior, VEL, HDPE, High density polyethylene.

ملخص :

هذا العمل هو حصيلة أربع سنوات من العمل المتواصل المترکز على دراسة سلوكيات الخرسانة الإسفلتية المعدلة بواسطة مخلفات البلاستيك، التعديل تم على مستوى الرابط الزيتي بطريقة تهدف إلى تغيير الخصائص المرتبطة بتأثير الحرارة والقوى الميكانيكية، حيث كانت النتائج مشجعة لمواصلة الدراسة.

الطريقة المقترحة اعتمدت على تعديل باستخدام ثلاث نسب من البولي إيثيلين عالي الكثافة بنسب 01 ، 02 و 03 بالمئة، هذا النوع من البوليمير يعتبر الأكثر استخداما في صناعة الأكياس والعلب البلاستيكية، تمت عملية التعديل خلال ساعتين في درجة حرارة عالية.

وبعد الحصول على نتائج جيدة، انطلقنا في دراسة الخرسانة الإسفلتية تحت تأثير قوى دورية تعتمد على ترددات تعكس حركة المرور، مختلفة النتائج تم تعبير عنها بمنحنيات كل من isotherm و isochrones ، في النهاية تحصلنا على أن إضافة 3 بالمئة من مخلفات بولي إيثيلين عالي الكثافة حسنت من سلوك الخرسانة بـ 16 بالمئة حيث وصلت حد 60 بالمئة عند التعديل بـ 01 بالمئة من ذات النوع.

- **الكلمات المفتاحية :** خرسانة إسفلتية ، الانحناء بنقطتين ، بولي إيثيلين عالي الكثافة.

ANNEXE A

COURBES GRANULOMETRIQUES ET
CALCUL DE FORMULATION

ANNEXE : FORMULATION DE ENROBE DE REFERENCE

Tamis	filler	2	0/3	41	3/8	20	8/15	37	COURBE DE MELANGE
31.5	100	2	100	41	100	20	100	37	100
25	100	2	100	41	100	20	100	37	100
20	100	2	100	41	100	20	100	37	100
16	100	2	100	41	100	20	98	36	99
14	100	2	100	41	100	20	79	29	92
12.5	100	2	100	41	100	20	69	26	89
10	100	2	100	41	100	20	30	11	74
8	100	2	100	41	100	20	10	4	67
6.3	100	2	100	41	94	19	2	1	63
5	100	2	100	41	65	13	1	0	56
4	100	2	100	41	32	6	1	0	50
2	100	2	83	34.03	1	0	0	0	36
1.25	100	2	64	26.24	1	0	0	0	28
0.80	100	2	52	21.32	0	0	0	0	23
0.500	100	2	44	18.04	0	0	0	0	20
0.315	100	2	35	14.35	0	0	0	0	16
0.200	100	2	26	10.66	0	0	0	0	13
0.125	100	2	19	7.79	0	0	0	0	10
0.080	100	2	13	5.33	0	0	0	0	7

Calcule Σ				FORMULAIRE :
Propor.	%	Coef.	Produit	
G	37	0.25	0.09	$100.\Sigma = 0.25G + 2.3S + 12s + 135f$ G : proportion des éléments supérieure à 6.3 mm S : proportion des éléments compris entre 6.3 et 0.315 mm s : proportion des éléments compris entre 0.315 et 0.08 mm f : proportion des éléments inférieure à 0.08 mm.
S	46	2.3	1.06	
s	10	12	1.20	
f	7	135	9.45	
Σ	100		11.801	

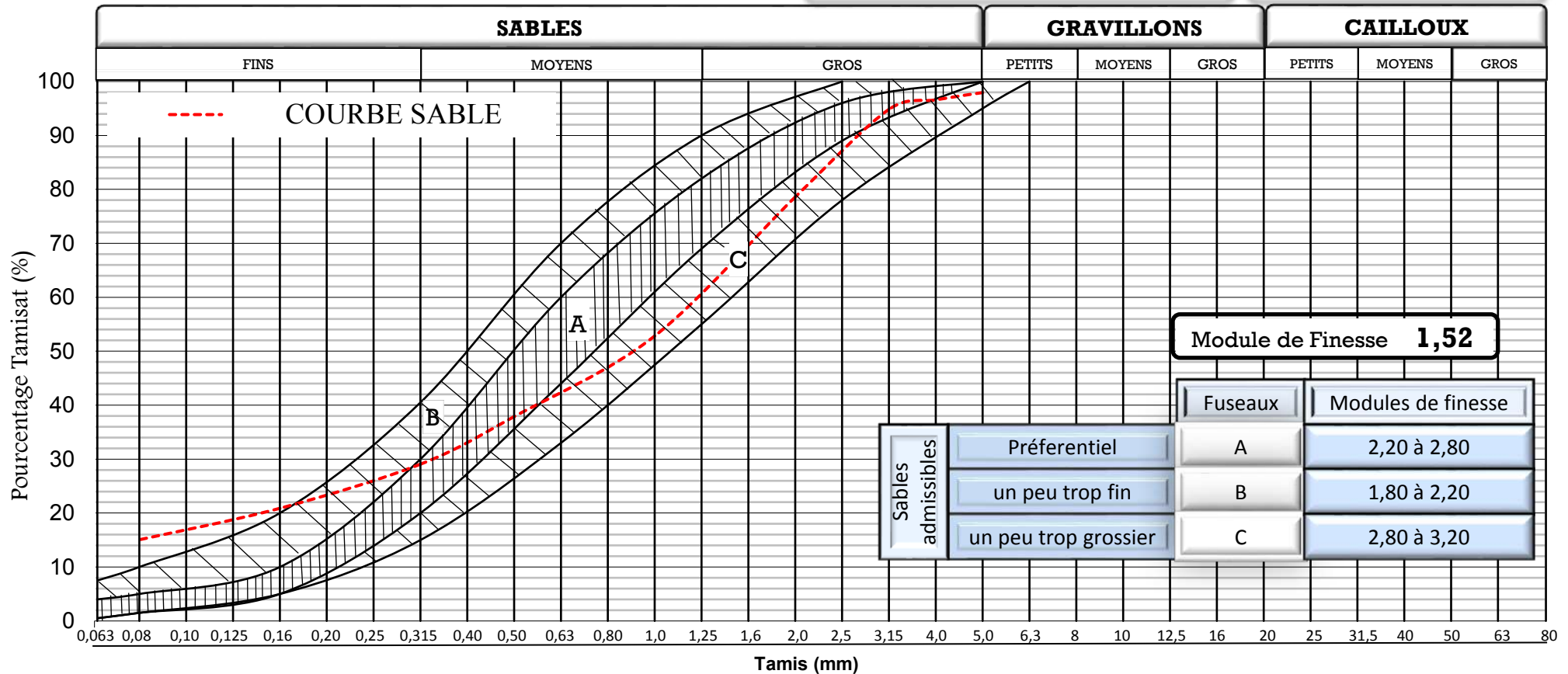


ANALYSE GRANULOMETRIQUE DU SABLE SELON NF P 18- 560

N° De Dossier interne : MED DOC

SABLE

DATE : 10/21/2017



FUSEAUX PROPOSES POUR LA GRANULARITE DES SABLES A BETON SELON DTR BE 2.1 : 2010

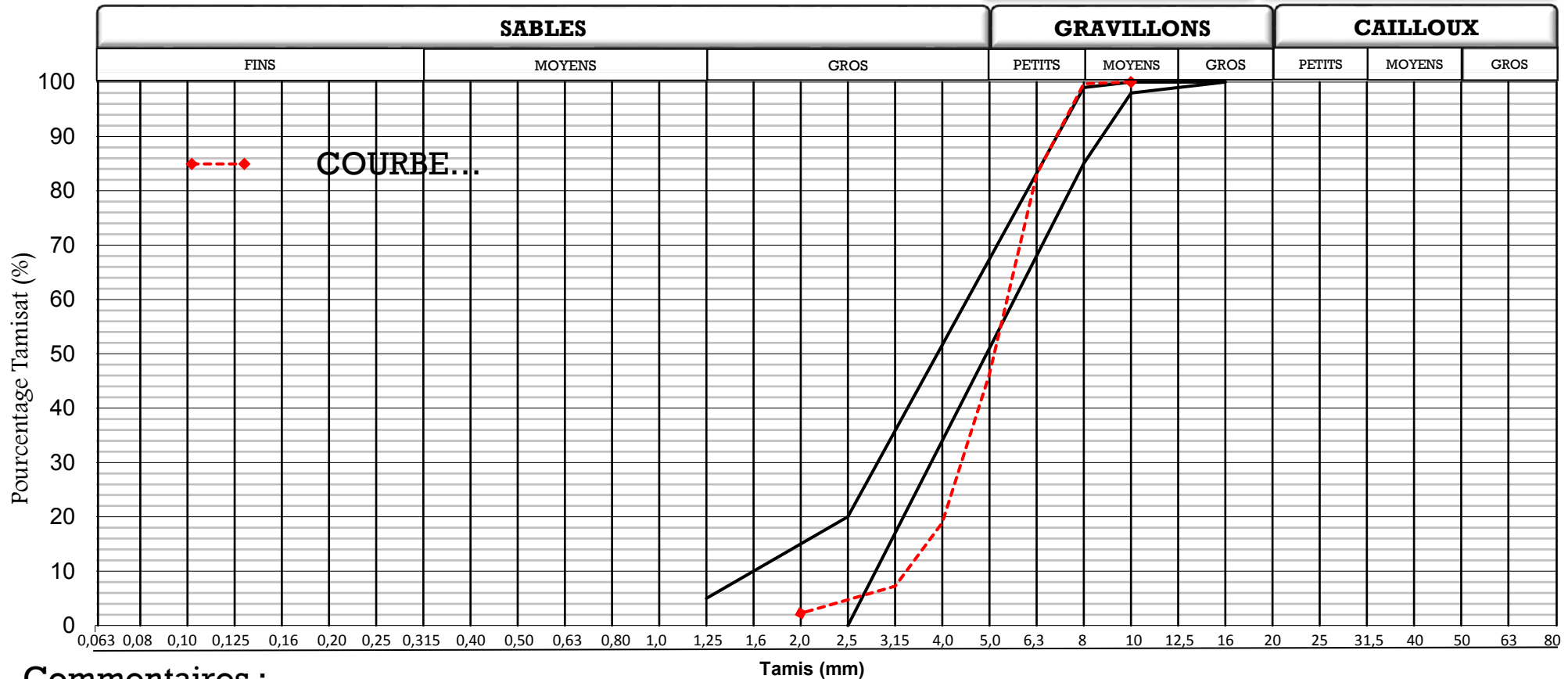


ANALYSE GRANULOMETRIQUE DES GRANULATS SELON NF P 18- 560

N° De Dossier interne : MED DOC

Gravier 3/8

DATE : 10/21/2017



Commentaires :

La Courbe Est Dans Le Fuseau de référence

FUSEAUX DE REFERENCE SELON NF EN 12620

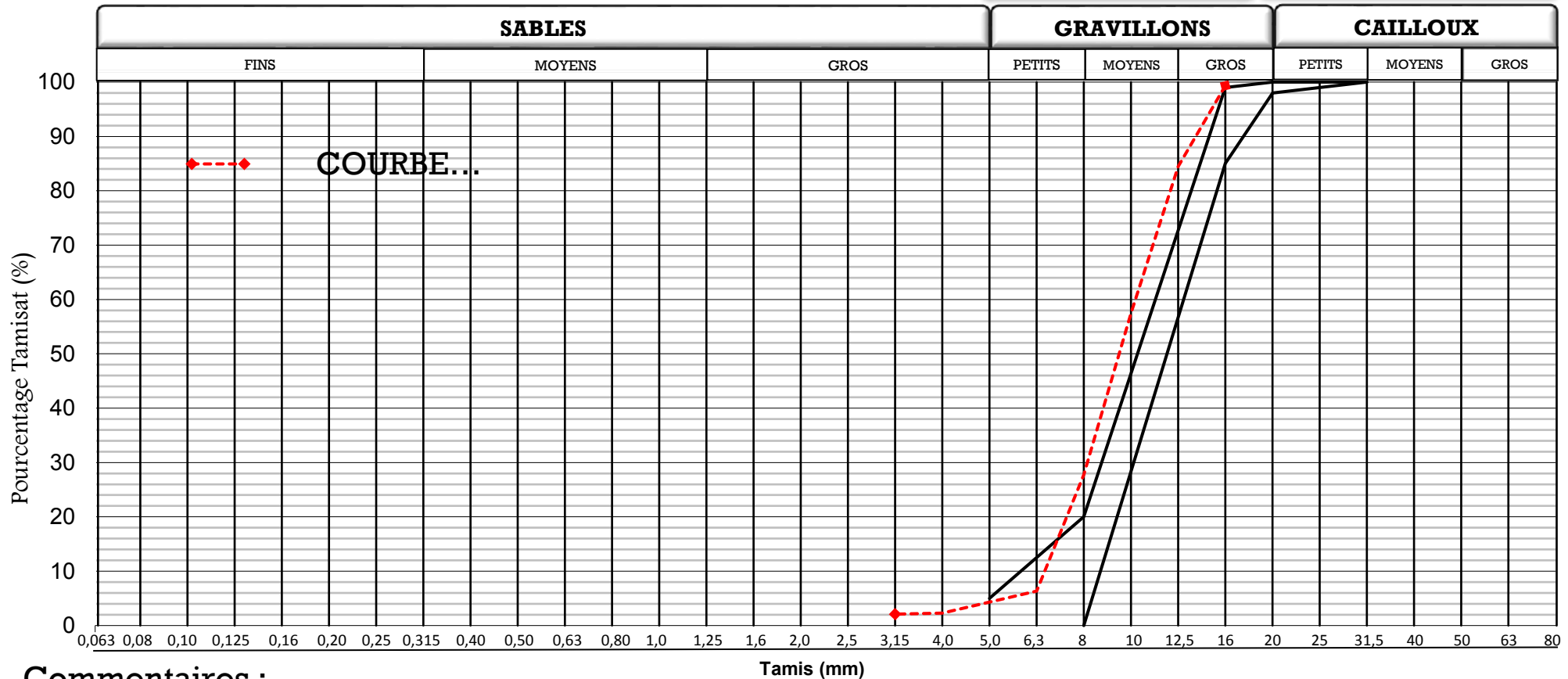


ANALYSE GRANULOMETRIQUE DES GRANULATS SELON NF P 18- 560

N° De Dossier interne : MED DOC

Gravier 8/15

DATE : 10/20/20187



Commentaires :

La Courbe Est hors Fuseau de référnce

FUSEAUX DE REFERENCE SELON NF EN 12620

ANNEXE B
RESULTATS DES MODULES
COMPLEXES

RESULTAT DE L'ESSAI MODULE SUR ENROBES A BASE DE BMP DE 1 % DE HDPE

Fréquence (Hz)	Température (°C)	Charge (kN)	Déformation (mm)	Effort (KPa)	Microdéformation	Angle de phase (°)	Rigidité (MPa)	Composant Réel E1 (MPa)	Composant Imaginaire E2 (MPa)
0.5	10.1	0.018	0.040	338.73	31.23	11.25	10808	10600	2096
1	10.1	0.023	0.045	418.76	35.29	10.40	11837	11643	2129
2	10	0.026	0.048	481.22	37.54	9.85	12795	12606	2183
3	10.1	0.027	0.048	504.09	37.81	9.42	13310	13130	2173
5	10.1	0.029	0.049	535.59	38.32	8.43	13959	13808	2043
10	10.1	0.031	0.050	584.42	39.42	8.20	14812	14662	2102
20	10.1	0.034	0.052	637.62	40.31	6.37	15819	15724	1730
30	10.1	0.043	0.066	827.55	51.36	9.03	16086	15900	2437
0.5	15.1	0.014	0.041	263.08	31.86	15.74	8219	7913	2211
1	15.1	0.018	0.046	336.43	36.29	14.15	9236	8957	2243
2	15.1	0.021	0.049	390.72	38.23	13.27	10188	9916	2326
3	15.2	0.022	0.049	414.74	38.51	12.72	10740	10477	2353
5	15.1	0.024	0.050	448.57	38.94	11.58	11495	11261	2297
10	15.1	0.027	0.051	497.03	40.00	10.78	12402	12185	2302
20	15.1	0.030	0.052	556.32	40.98	8.89	13565	13407	2058
30	15.1	0.037	0.067	709.50	52.04	10.90	13599	13373	2465
0.5	20.1	0.010	0.042	182.55	32.43	21.58	5595	5208	2037
1	20.1	0.013	0.047	239.92	36.39	19.55	6553	6178	2174
2	20.1	0.016	0.050	293.70	39.06	18.19	7488	7116	2323
3	20	0.017	0.050	315.80	39.24	17.27	8016	7656	2364
5	20.1	0.019	0.051	347.98	39.71	15.78	8732	8404	2360
10	20	0.021	0.052	397.58	40.75	14.67	9733	9420	2443
20	20	0.024	0.054	459.76	41.86	12.53	10964	10714	2324
30	20.1	0.029	0.068	572.36	52.99	13.70	10769	10494	2417

RESULTAT DE L'ESSAI MODULE SUR ENROBES A BASE DE BMP DE 1 % DE HDPE

0.5	25.3	0.006	0.042	117.09	33.07	28.26	3512	3101	1640
1	25.3	0.009	0.048	162.12	37.54	25.57	4289	3875	1829
2	25.2	0.011	0.051	204.33	39.86	23.97	5094	4660	2049
3	25.3	0.012	0.051	224.61	40.14	22.90	5564	5130	2145
5	25.3	0.014	0.052	253.25	40.59	21.19	6208	5794	2223
10	25.3	0.016	0.053	300.67	41.74	19.58	7173	6767	2372
20	25.3	0.019	0.055	354.40	42.86	17.37	8233	7880	2380
30	25.3	0.025	0.069	482.01	53.86	17.21	8963	8605	2502
0.5	30.3	0.004	0.043	72.04	33.54	33.32	2123	1783	1147
1	30.3	0.006	0.049	101.37	38.09	31.29	2639	2263	1353
2	30.3	0.007	0.052	133.80	40.37	29.88	3286	2857	1618
3	30.3	0.008	0.052	149.84	40.73	28.62	3650	3212	1730
5	30.3	0.009	0.053	174.37	41.38	27.02	4185	3736	1878
10	30.3	0.011	0.054	213.15	42.55	25.23	4980	4520	2084
20	30.3	0.014	0.056	259.45	43.79	23.10	5894	5460	2217
30	30.3	0.020	0.070	391.34	54.81	21.04	7114	6709	2362

RESULTAT DE L'ESSAI MODULE SUR ENROBES A BASE DE BMP DE 2 % DE HDPE

Fréquence (Hz)	Temp(°C)	Charge (kN)	Déformation (mm)	Effort (KPa)	Microdéformation	Angle de phase (°)	Rigidité (MPa)	Composant Réel E1 (MPa)	Composant Imaginaire E2 (MPa)
0.5	10.2	0.015	0.038	303.44	29.35	11.02	10337	10146	1976
1	10.2	0.019	0.043	376.99	33.55	10.02	11236	11064	1956
2	10.2	0.022	0.046	427.75	35.41	9.52	12080	11913	1997
3	10.2	0.023	0.046	447.54	35.74	9.19	12522	12362	1999
5	10.2	0.024	0.047	476.59	36.38	8.35	13101	12962	1901
10	10.1	0.026	0.048	516.68	37.46	7.94	13793	13662	1897
20	10.2	0.029	0.051	580.36	39.29	6.26	14773	14688	1585
30	10.2	0.035	0.064	720.99	49.51	8.18	14562	14425	1993
0.5	15.3	0.012	0.039	234.25	30.18	15.00	7762	7498	2009
1	15.3	0.015	0.045	303.34	34.83	13.84	8709	8456	2084
2	15.3	0.017	0.047	345.56	36.16	12.89	9557	9317	2131
3	15.3	0.019	0.047	368.28	36.62	12.57	10057	9816	2187
5	15.3	0.020	0.048	396.51	37.06	11.43	10698	10487	2117
10	15.3	0.022	0.049	437.97	38.25	10.62	11451	11256	2100
20	15.3	0.025	0.052	503.39	40.14	8.88	12540	12395	1898
30	15.3	0.030	0.065	615.88	50.09	9.85	12297	12131	2011
0.5	20.3	0.008	0.040	163.72	30.87	20.35	5303	4972	1845
1	20.3	0.011	0.045	213.37	34.87	18.54	6119	5801	1946
2	20.2	0.013	0.048	259.00	36.98	17.74	7003	6670	2133
3	20.3	0.014	0.048	279.74	37.40	16.91	7480	7157	2174
5	20.3	0.015	0.049	306.25	37.76	15.55	8110	7814	2171
10	20.3	0.018	0.050	351.41	38.94	14.54	9024	8739	2251
20	20.2	0.020	0.053	411.76	40.86	12.57	10077	9847	2140
30	20.3	0.024	0.066	499.83	51.05	12.73	9791	9577	2039

RESULTAT DE L'ESSAI MODULE SUR ENROBES A BASE DE BMP DE 2

% DE HDPE

0.5	25.3	0.005	0.041	108.17	31.39	25.80	3446	3102	1500
1	25.3	0.007	0.046	146.97	35.63	23.80	4124	3774	1664
2	25.3	0.009	0.049	182.57	37.65	22.63	4850	4477	1865
3	25.3	0.010	0.049	200.85	38.01	21.97	5284	4901	1975
5	25.3	0.011	0.050	225.65	38.44	20.51	5869	5499	2052
10	25.3	0.013	0.051	264.73	39.58	19.08	6688	6327	2167
20	25.3	0.015	0.054	315.00	41.65	17.34	7562	7240	2184
30	25.3	0.022	0.067	459.06	51.66	16.08	8887	8580	2313
0.5	30.1	0.004	0.041	70.57	31.64	29.28	2230	1945	1091
1	30.1	0.005	0.046	97.42	35.64	28.46	2733	2403	1302
2	30.1	0.006	0.049	124.79	38.17	27.48	3270	2901	1508
3	30.1	0.007	0.050	139.03	38.53	26.90	3609	3219	1630
5	30.1	0.008	0.050	159.09	38.86	25.19	4094	3707	1736
10	30	0.010	0.052	192.41	40.16	23.64	4791	4399	1899
20	30.1	0.011	0.055	236.90	42.24	22.53	5608	5216	2061
30	30	0.016	0.068	354.39	52.58	19.13	6740	6425	2036

RESULTAT DE L'ESSAI MODULE SUR ENROBES A BASE DE BMP 3% DE HDPE

Fréquence (Hz)	Température (°C)	Charge (kN)	Déformation (mm)	Effort (KPa)	Microdéformation	Angle de phase (°)	Rigidité (MPa)	Composant Réel E1 (MPa)	Composant Imaginaire E2 (MPa)
0.5	10.5	0.010034	0.039309	206.7854	29.36547	15.985614	7042	6770	1939
1	10.5	0.012573	0.043631	259.114	32.59434	14.763452	7950	7687	2026
10	10.5	0.019816	0.050355	410.917	37.61724	11.863477	10924	10693	2232
0.5	15.5	0.007217	0.041381	148.7262	30.91329	20.745934	4811	4499	1704
1	15.5	0.009352	0.045783	192.7485	34.20141	19.307792	5636	5319	1863
10	15.5	0.015566	0.051094	323.343	38.16966	15.286576	8471	8176	2216
0.5	20.5	0.004993	0.042022	102.9071	31.39218	25.604178	3278	2956	1417
1	20.4	0.006567	0.046495	135.3552	34.73379	23.819178	3897	3565	1574
10	20.5	0.012091	0.052223	251.7304	39.01295	18.69114	6452	6119	2047
0.5	25.4	0.003283	0.042696	67.67064	31.89575	29.897085	2122	1839	1057
1	25.4	0.004615	0.047913	95.12834	35.79264	28.605465	2658	2334	1272
10	25.4	0.009095	0.052953	189.96	39.55831	22.670371	4802	4441	1826

RESULTAT DE L'ESSAI MODULE SUR ENROBES A BASE DE BITUME PUR (BMP)

Fréquence (Hz)	Température (°C)	Charge (kN)	Déformation (mm)	Effort (KPa)	Microdéformation	Angle de phase (°)	Rigidité (MPa)	Composant Réel E1 (MPa)	Composant Imaginaire E2 (MPa)
0.5	10.1	0.015	0.039	267.02	31.02	14.62	8609	8331	2173
1	10.1	0.018	0.044	325.38	35.48	14.04	9170	8896	2224
2	10.1	0.020	0.047	369.25	37.43	13.99	9865	9573	2384
3	10.1	0.021	0.047	382.33	37.78	13.85	10120	9826	2422
5	10.1	0.022	0.048	403.57	38.42	13.21	10505	10228	2398
10	10	0.024	0.049	435.93	39.55	12.93	11023	10747	2454
20	10	0.025	0.049	467.22	39.61	11.00	11796	11587	2210
30	10	0.030	0.065	561.68	51.96	13.40	10811	10542	2395
0.5	15.2	0.010	0.040	186.83	31.81	19.98	5873	5519	2006
1	15.2	0.013	0.046	233.14	36.76	19.35	6342	5984	2101
2	15.2	0.014	0.048	260.61	38.17	19.25	6827	6446	2250
3	15.2	0.015	0.048	272.52	38.70	19.07	7041	6655	2299
5	15.1	0.016	0.049	289.76	39.14	18.61	7402	7017	2358
10	15.2	0.018	0.050	322.21	40.44	18.07	7968	7580	2456
20	15.2	0.018	0.051	343.60	40.55	16.64	8473	8136	2367
30	15.2	0.021	0.066	406.40	52.57	17.64	7730	7411	2200
0.5	20.2	0.008	0.040	136.42	32.48	24.12	4200	3833	1716
1	20.2	0.009	0.046	169.43	36.73	22.72	4613	4255	1782
2	20.2	0.011	0.049	199.02	38.99	22.83	5105	4705	1979
3	20.1	0.012	0.049	210.01	39.44	22.68	5325	4914	2051
5	20.1	0.012	0.050	224.86	39.79	21.95	5651	5243	2107
10	20.1	0.014	0.051	254.26	41.09	21.47	6188	5766	2246
20	20.2	0.015	0.051	277.19	41.21	20.02	6726	6345	2233
30	20.1	0.021	0.067	397.95	53.59	20.02	7427	7033	2384

RESULTAT DE L'ESSAI MODULE SUR ENROBES A BASE DE BITUME PUR (BMP)

0.5	25.2	0.005	0.041	95.74	32.94	27.97	2907	2568	1363
1	25.2	0.007	0.047	123.88	37.41	27.07	3312	2949	1507
2	25.2	0.008	0.049	148.76	39.56	26.81	3760	3357	1695
3	25.2	0.009	0.050	159.12	39.95	26.55	3983	3564	1778
5	25.3	0.010	0.050	174.96	40.39	25.90	4331	3899	1886
10	25.2	0.011	0.052	201.73	41.63	25.31	4846	4391	2051
20	25.2	0.012	0.052	224.15	41.91	23.92	5349	4924	2088
30	25.2	0.017	0.067	326.34	54.07	22.39	6035	5649	2125
0.5	30.1	0.004	0.041	67.55	33.22	30.94	2033	1744	1045
1	30.1	0.005	0.047	89.83	37.44	30.65	2399	2064	1223
2	30.1	0.006	0.050	111.42	40.12	30.35	2777	2397	1402
3	30.1	0.007	0.050	121.48	40.48	30.15	3001	2596	1505
5	30	0.007	0.051	136.53	40.79	29.29	3347	2922	1631
10	30.1	0.009	0.053	163.09	42.15	28.36	3869	3417	1815
20	30	0.010	0.053	187.51	42.36	27.56	4426	3969	1958
30	30	0.014	0.068	278.97	54.86	24.32	5085	4714	1909