

N° d'ordre : 03/2016 – M/GC

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE

FACULTÉ DE GÉNIE CIVIL



Mémoire

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

En Génie Civil

Spécialité : CONSTRUCTION

Par : FETHIZA ALI Boubaker

Sujet

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DU COMPORTEMENT DU BITUME
MODIFIE AU VIEILLISSEMENT**

Soutenue publiquement, le jeudi 11/02/2016, devant le jury composé de :

M.	R. BAHAR	Professeur, à l'USTHB	Président
M.	S. HADDADI	Professeur, à l'USTHB	Directeur de Mémoire
M.	M.N. OUDJIT	Professeur, à l'USTHB	Examineur
Mme.	M. MORSLI	Professeure, à l'ENP Alger	Examinatrice

Dédicace

A mes chers parents,

A mes frères,

A mes sœurs,

A toute ma famille,

A tous mes amis,

A tous mes enseignants,

Remerciements

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

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur HADDADI SMAIL, Professeur à la faculté de génie civil de l'USTHB, pour l'élaboration de ce mémoire, ses aides précieuses, conseils, son soutien permanent et pour tous ses efforts.

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

Je voudrais exprimer mes remerciements à Madame M .MORSLI, Professeure à l'Ecole Nationale Polytechnique à Alger, et à Monsieur M.N. OUDJIT, Professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, qui m'ont fait l'honneur d'accepter de participer au jury de ce mémoire.

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

Résumé : L'objectif de cette étude est de déterminer l'influence de la modification des bitumes par l'association (EVA - NBR - déchet plastique alimentaire) et les paramètres de malaxage (temps et vitesse de malaxage) sur le vieillissement et sur les caractéristiques rhéologiques des bitumes (purs et modifiés). Nous aborderons l'étude du vieillissement sur les aspects : vieillissement à court terme (RTFOT) et à long terme (PAV). Les résultats expérimentaux montrent que l'incorporation de l'association (EVA-NBR-déchet plastique alimentaire) dans le bitume améliore ses propriétés rhéologiques (pénétrabilité, TBA, ductilité, etc.). L'étude expérimentale sur le vieillissement des bitumes et des bitumes modifiés a montré que l'ajout de l'association (EVA-NBR-déchet plastique alimentaire) dans le bitume améliore la résistance au vieillissement à court terme et à long terme. Cette amélioration est proportionnelle à la durée et à la vitesse de malaxage. En plus de l'amélioration des caractéristiques des liants bitumineux qui se répercutera sur la durabilité des structures bitumineuses, l'environnement sera ainsi préservé par la valorisation des déchets industriels notamment les emballages et les sacs....

Mots Clés : Bitume, vieillissement, RTFOT, PAV, EVA, NBR, déchet plastique alimentaire.

Abstract: The objective of this study is to determine the influence of the modification of the bitumen by the association (EVA - NBR - plastic waste) and the parameters of malaxation (time and speed of malaxation) on the ageing and the rheological characteristics of the bitumen (pure and modified). We will approach the study of ageing on the aspects: short-term ageing (RTFOT) and long-term (PAV). The experimental results show that the incorporation of the association (EVA-NBR- plastic waste) in the bitumen improves its rheological properties (penetrability, softening point, ductility, etc.). The experimental study on the ageing of the bitumens and the modified bitumens showed that the addition of association (EVA - NBR - plastic waste) in the bitumen improves resistance to the short-term and long-term ageing. This improvement is proportional to the duration and the speed of malaxation. In addition to the improvement of the characteristics of the bitumen binders which will be reflected on the durability of the bituminous structures, the environment will be thus preserved by the valorisation of the industrial waste in particular packing and the bags....

Key Words: Bitumen, plastic waste, NBR, EVA, ageing, RTFOT, PAV

ملخص : الهدف المنشود من هذه الدراسة هو تحديد تأثير تعديل الزفت مع الثلاثية (البلاستيك -EVA-NBR) ومدة وسرعة المزج على شيخوخة الزفت وعلى الخصائص الريولوجية للزفت .سنقوم بدراسة شيخوخة الزفت على المدى القصير (RTFOT) والطويل (PAV). النتائج التجريبية تؤكد إدخال الثلاثية (البلاستيك -EVA-NBR) على الزفت تحسن خصائصه الريولوجية (الاختراق، درجة الانصهار TBA ، قابلية التمدد) . النتائج التجريبية على كبر القار و القار المعدل تثبت ان إدخال الثلاثية (البلاستيك -EVA-NBR) على الزفت تحسن مقاومته للشيخوخة قصيرة وطويلة المدى وهذا التحسن مرتبط ايضا بمدة وسرعة المزج بين الزفت والثلاثية. وبالإضافة إلى تحسين خصائص الإسفلت والتي ستؤثر على متانة الهياكل الإسفلتية، فإن البيئة هي المستفيد الثاني من إعادة معالجة النفايات الصناعية الغذائية و بما فيها العلب البلاستيكية المستعملة و الأكياس البلاستيكية.

الكلمات المفتاحية: الزفت . EVA. NBR. مسحوق البلاستيك. شيخوخة الإسفلت. RTFOT. PAV.

Table des matières

Dédicace

Remerciements

Résumé

Abstract

ملخص

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

Partie I : Etude bibliographique

Chapitre 1 : Le bitume	4
1.1. Généralités sur les liants hydrocarbonés	4
1.2. Définition du bitume	4
1.3. Fabrication des bitumes	5
1.3.1. La distillation	5
1.3.1.1. Distillation à la pression atmosphérique	5
1.3.1.2. Distillation sous vide	5
1.3.2. L'extraction (Désasphaltage)	6
1.3.3. Le soufflage	6
1.3.4. Le craquage	6
1.4. Composition chimique et structure des bitumes	7
1.4.1. Les Asphaltènes.....	7
1.4.2. Les maltènes	7
1.5. Les différentes méthodes de séparation	9
1.5.1. Séparation par distillation.....	9
1.5.2. Extraction aux solvants sélectifs	9
1.5.3. Chromatographie d'adsorption.....	9
1.5.4. Chromatographie sur Gel Perméable (GPC).....	10
1.5.5. Chromatographie sur baguette de silice (IATROSCAN).....	11
1.5.6. Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)	11
1.6. Structure colloïdale du bitume	12
1.7. Essais sur le bitume	13
1.7.1. Essai de pénétrabilité à l'aiguille (NF EN 1426)	13
1.7.2. Point de ramollissement Bille Anneau (NF EN 1427)	14

1.7.3. Ductilité (NF EN 13589)	14
1.8. Le vieillissement des bitumes	15
1.8.1. Facteurs influant sur le vieillissement	15
1.8.2. Mécanisme de vieillissement	16
1.8.3. Essais qui simulent le vieillissement	16
1.8.3.1. Essai RTFOT "Rolling Thin Film Oven Test" (NF EN 12607-1)	16
1.8.3.2. Essai PAV "Pressure Aging Vessel" (AASHTO PP1)	17
Chapitre 2 : Les Bitumes polymères	18
2.1. Introduction	18
2.2. Définition d'un polymère	18
2.3. Objectifs de la modification.....	19
2.4. Les différents agents modifiants	19
2.4.1. Les polymères thermodurcissables	19
2.4.2. Les polymères Thermoplastiques	20
2.4.2.1. Les élastomères	20
2.4.2.2. Les plastomères.....	21
2.4.3. Les polymères de synthèse	22
2.5. Mécanisme de la modification	22
2.6. Compatibilité Bitume-Polymère	25
2.6.1. En terme thermodynamique.....	25
2.6.2. En terme pratique	25
2.7. Procédés de modification.....	26
2.7.1. Le procédé humide	26
2.7.2. Le procédé sec	26
2.8. Essais spécifiques aux liants modifiés	26
2.8.1. Stabilité au stockage.....	26
2.8.2. Observation microscopique	27
2.9. Etat actuelle de recherche	29
2.10 Conclusion.....	33
Partie II : Etude expérimentale	34
Chapitre 3 : Présentations des Matériaux	35
3.1.bitume	35
3.1.1. Caractéristiques du bitum	35

3.1.2. Susceptibilité thermique	35
3.1.3. Influence du temps de malaxage sur les caractéristiques de bitume pur	38
3.2 Polymères.....	39
3.2.1. L'EVA	39
3.2.2. Poudrette de caoutchouc NBR	39
3.2.3. Le déchet plastique alimentaire (DP)	40
3.3. La modification	41
3.4. Mode opératoire de la modification.....	42
3.5. Etudes expérimentales sur les liants modifiés	42
3.5.1. L'influence de l'association (EVA- NBR - déchet plastique alimentaire) sur la pénétrabilité	42
3.5.1.1. Influence du temps de malaxage sur la pénétrabilité	44
3.5.2. L'influence de l'association (EVA-NBR-déchet plastique alimentaire) sur la température bille anneau (TBA)	45
3.5.2.1. Influence du temps de malaxage sur TBA.....	46
3.5.3. L'influence de l'association (EVA-NBR-déchet plastique alimentaire) sur la ductilité	47
3.5.3.1. Influence du temps de malaxage sur la ductilité	48
3.6. Stabilité au stockage	49
3.7. Conclusion	49
Chapitre 4 : Etude des bitumes modifiés au vieillissement	50
4.1. Pénétrabilité	50
4.2. Influence du temps de malaxage sur la pénétrabilité	51
4.3. Température bille et anneau (TBA)	52
4.4. Influence du temps de malaxage sur la TBA	53
4.5. Ductilité	54
4.6. Influence du temps de malaxage sur la ductilité	54
4.7. Influence de la vitesse de malaxage sur la consistance	55
4.8. Conclusion	57
Conclusion générale	59
Références bibliographiques	61

Liste des figures

Partie I : Etude bibliographique

Figure 1.1. Composition d'un pétrole brut	5
Figure 1.2. Principe de fabrication du bitume	6
Figure 1.3. Composition des bitumes	8
Figure 1.4. (a). Coupe d'un modèle de micelles d'asphaltènes selon Yen.....	8
(b). Macrostructure des asphaltènes selon Yen	8
Figure 1.5. Schéma de l'extraction aux solvants sélectifs	9
Figure 1.6. Chromatographie d'adsorption d'après Corbett	10
Figure 1.7. Chromatographie sur gel perméable sur bitumes	10
Figure 1.8. Séparation en groupes génériques par chromatographie IATROSCAN en fonction du temps d'élution	11
Figure 1.9. Spectre infrarouge d'un bitume modifié par un polymère SBS.....	11
Figure 1.10. Schématisation de la structure colloïdale du bitume	12
Figure 1.11. Essai de pénétrabilité	13
Figure 1.12. Détermination du point de ramollissement	14
Figure 1.13. Principe de l'essai de Ductilité	14
Figure 1.14. Essai RTFOT "Rolling Thin Film Oven Test"	17
Figure 1.15. Essai PAV "Pressure Aging Vessel"	17
Figure 2.1. Structure du SBS	20
Figure 2.2. Influence de la teneur en polymère sur le taux de gonflement	23
Figure 2.3. Mécanisme de la dispersion d'un polymère de type SBS dans le bitume	24
Figure 2.4. Structures des bitumes polymères	25
Figure 2.5. Effet de la modification sur la structure colloïdale du bitume	25
Figure 2.6. Microstructure d'un bitume polymère	27
Figure 2.7. L'influence du bitume et le type et le contenu de polymère sur la microstructure bitume modifie	28
Figure 2.8. Microstructure des bitumes EVA.....	29
Figure 2.9. Quotients Marshall en fonction de la teneur en EVA	30
Figure 2.10. Quotients Marshall en fonction de la teneur en déchet.....	30

Partie II: Etude expérimentale

Figure 3.1. Variation de la pénétrabilité des bitumes purs en fonction de la température	34
Figure 3.2. Influence du temps de malaxage sur les caractéristiques du bitume pur	38
Figure 3.3. Les granulâtes d'EVA	39

Figure 3.4. Le déchet sous forme de poudrette (NBR)	39
Figure 3.5. Déchet plastique alimentaire	40
Figure 3.6. L'association (EVA-NBR-Déchet plastique alimentaire).....	41
Figure 3.7. Appareillage de modification	41
Figure 3.8. La pénétrabilité pour les différents mélanges	42
Figure 3.9. Variation de la pénétrabilité pour les différents mélanges	43
Figure 3.10. Influence du temps de malaxage sur la pénétrabilité	44
Figure 3.11. Influence du temps de malaxage sur la variation de pénétrabilité	44
Figure 3.12. TBA pour les différents mélanges	45
Figure 3.13. Variation de la TBA pour les différents mélanges	46
Figure 3.14. Influence du temps de malaxage sur la TBA	46
Figure 3.15. Influence du temps de malaxage sur la variation de TBA	46
Figure 3.16. La ductilité (cm) pour les différents mélanges	47
Figure 3.17. Variation de la ductilité pour les différents mélanges	48
Figure 3.18. Influence du temps de malaxage sur la ductilité	48
Figure 3.19. Influence du temps de malaxage sur la variation de ductilité	48
Figure 4.1. Pénétrabilité à 25°C avant et après vieillissement pour les différents mélanges	50
Figure 4.2. Influence temps de malaxage sur la pénétrabilité après vieillissement	51
Figure 4.3. TBA (°C) avant et après vieillissement pour les différents mélanges	52
Figure 4.4. Influence temps de malaxage sur la TBA après vieillissement	53
Figure 4.5. Ductilité à 25°C (cm) avant et après vieillissement pour les différents mélanges	54
Figure 4.6. Influence temps de malaxage sur la ductilité après RTFOT	55
Figure 4.7. Influence de la vitesse de malaxage sur la pénétrabilité avant et après vieillissement	56
Figure 4.8. Influence de la vitesse de malaxage sur la TBA avant et après vieillissement	56

Liste des tableaux

Partie I : Etude bibliographique

Tableau 1.1. Différents type de structure des bitumes en fonction de leur composition générique	13
Tableau 2.1 Désignation des liants modifiés par l'association (NBR-EVA)	32
Tableau 2.2. Désignation des liants modifiés par l'association (NBR-DP)	32

Partie II : Etude expérimentale

Tableau 3.1. Caractéristiques du bitume	35
Tableau 3.2. Susceptibilité thermique	36
Tableau 3.3. Caractéristiques du bitume	38
Tableau 3.4. Représentations des mélanges	41
Tableau 3.5 .Pénétrabilité à 25°C pour les différents mélanges	42
Tableau 3.6. Variation de la pénétrabilité pour les différents mélanges	43
Tableau 3.7. TBA pour les différents mélanges	45
Tableau 3.8. Variation de la TBA pour les différents mélanges	45
Tableau 3.9. La Ductilité (cm) pour les différents mélanges	47
Tableau 3.10. Variation de la ductilité à 25°C pour les différents mélanges	47
Tableau 3.11. Les résultats de la stabilité au stockage des bitumes modifiés	49
Tableau 4.1. Pénétrabilité à 25°C avant et après vieillissement pour les différents mélanges	50
Tableau 4.2. TBA (°C) avant et après vieillissement pour les différents mélanges	52
Tableau 4.3. Ductilité à 25°C (cm) avant et après vieillissement pour les différents mélanges	55
Tableau 4.4. Influence de la vitesse de malaxage sur la pénétrabilité avant et après vieillissement.....	56
Tableau 4.5. Influence de la vitesse de malaxage sur la TBA avant et après vieillissement	56

Liste des abréviations

EVA	Acétate de vinyle et d'éthylène
DP	Déchet plastique alimentaire
NBR	Poudrette de caoutchouc
SBS	Copolymères Styrène-Butadiène-Styrène
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
PAV	Pressure Aging Vessel
RTFOT	Rolling Thin Film Oven Test
SAEL	Société d'application d'élastomère
IC	Indice d'instabilité colloïdale
UV	Ultraviolets
DMA	Analyse mécanique dynamique
GPC	Chromatographie sur Gel Perméable
FTIR	Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier

Introduction Générale

Plusieurs études ont montré que le comportement du béton bitumineux dépend essentiellement du comportement du bitume.

Comme toute matière d'origine organique, les bitumes sont soumis, en effet à des phénomènes de vieillissement qui entraînent des modifications de leurs paramètres mécaniques et rhéologiques et de leur structure chimique.

Ce vieillissement des bitumes, fait perdre aux revêtements bitumineux leur flexibilité, engendre une augmentation de la rigidité de l'enrobé et provoque la dégradation de l'enrobé lui-même causée par le phénomène de fatigue structurale. Les principaux modes de dégradation des chaussées bitumineuses sont l'orniérage, la fatigue et la fissuration.

Le phénomène de vieillissement est du essentiellement aux mécanismes suivants :

- La volatilisation (évaporation) des huiles présentes dans le bitume à cause des températures élevées au cours de la fabrication des enrobés bitumineux;
- La dégradation de certaines huiles par l'effet de la lumière (la photo dégradation) ;
- L'oxydation produite par les réactions avec l'oxygène de l'air ambiant ;

Les essais les plus représentatifs pour la simulation du vieillissement du bitume en laboratoire sont l'essai RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) et l'essai PAV (Pressure Aging Vessel). L'essai RTFOT est employé pour caractériser le vieillissement des bitumes pendant la fabrication et la mise en place d'un enrobé. Et le PAV pour caractériser le vieillissement des bitumes in-situ (après 7 à 8 années de service).

La vitesse d'évolution du bitume dépend de différents paramètres: la température, la lumière (ultraviolets), l'épaisseur du film de bitume, l'humidité des granulats. Ce phénomène peut également être influencé par la nature des granulats, certains types de granulat absorbant les fractions huileuses du bitume, ce qui provoque son évolution.

Pour réduire la portée de ces phénomènes, diverses technique ont été entreprises ; parmi lesquelles, la modification des liants avec des polymères. Cette opération permet d'améliorer les performances mécanique et de durabilité des liants bitumineux, des enrobés bitumineux et de réduire la fréquence de réparation des chaussées.

Dans cette étude nous nous proposons l'incorporation de polymères dans le bitume. Nous avons utilisé un polymère de synthèse (EVA acétate de vinyle et d'éthylène), un déchet industriel en forme de poudrette de caoutchouc (NBR) et un déchet plastique alimentaire (DP). Les déchets plastiques ne sont pas biodégradables d'où la nécessité de leur recyclage afin de diminuer les zones de stockage et par conséquent la contamination du sol.

Il s'agit dans le présent mémoire d'étudier l'incidence du vieillissement sur le bitume modifié par l'association de trois polymères. Nous aborderons l'étude du vieillissement sur les aspects : vieillissement à court terme (RTFOT) et vieillissement à long terme (PAV).

Notre étude comporte deux parties. La première partie est entièrement consacrée à une étude bibliographique qui porte sur :

- Les généralités sur les bitumes, le vieillissement des bitumes et le mécanisme de vieillissement.
- La rhéologie des bitumes.
- Les polymères (les différents agents modifiants, objectifs de la modification et compatibilité Bitume-Polymère.

La deuxième partie présente l'étude expérimentale consacrée à :

- L'influence du temps de malaxage sur les caractéristiques du bitume pur.
- L'influence de l'association (EVA – NBR - déchet plastique alimentaire) et du temps de malaxage sur la consistance du bitume (pénétrabilité, température de ramollissement, ductilité).
- L'influence de la modification des bitumes par l'association (EVA - NBR - déchet plastique alimentaire) sur le vieillissement des bitumes à court terme (RTFOT) et à long terme (PAV).
- L'influence de la vitesse et du temps de malaxage sur le vieillissement à court terme (RTFOT) et à long terme (PAV).

Ce mémoire se termine par une conclusion générale et des perspectives.

Partie: I

Etude bibliographique

Dans cette partie, nous allons présenter une étude bibliographique sur le bitume et les polymères ainsi généralité sur le vieillissement et la rhéologie des bitumes.

1.1. Généralités sur les liants hydrocarbonés :

Les liants hydrocarbonés, qui jouent un rôle important dans la technique routière moderne, sont connus et utilisés depuis longtemps.

Un liant hydrocarboné est un matériau thermoplastique, c'est-à-dire qu'il conserve ses propriétés après chauffage et que sa consistance varie avec la température. Cette modification de la consistance sur une large gamme de températures est particulièrement exploitée dans la construction routière [1].

Il est insoluble dans l'eau mais soluble dans de nombreux solvants organiques [2]. Il possède un grand pouvoir agglomérant car il adhère à la majorité des matériaux usuels : pierre, bois, béton [1].

On distingue trois familles de liants hydrocarbonés :

- ✓ Les liants naturels obtenus par broyage des roches asphaltiques est dénommée Asphalte.
- ✓ Les bitumes qui sont obtenus par raffinage des pétroles bruts.
- ✓ Les goudrons qui proviennent de la pyrogénéation à l'abri de l'air de la matière d'origine végétale.

En technique routier on utilise que les bitumes des pétroles bruts.

1.2. Définition du bitume :

Le bitume est défini comme liquide visqueux, ou solide consistant essentiellement en hydrocarbures et leurs dérivés, qui est soluble dans tri chloro-ethylene et est essentiellement non-volatile et se ramollit graduellement une fois de chauffage. Il est noir ou brun en couleurs et possède les propriétés imperméabilisantes et adhésives. Il est obtenu par des processus de raffinerie de pétrole [3].

Il a été largement utilisé comme le liant de granulats dans la chaussée de la route en raison de sa bonne propriété viscoélastique [4].

1.3. Fabrication des bitumes

Pour fabriquer des bitumes de spécifications données, la première condition consiste à choisir un pétrole brut suffisamment lourd.

Les pétroles bruts sont des mélanges complexes d'un grand nombre de fractions, souvent difficiles à séparer. Ils sont composés de figure 1.1 :

Gaz (GPL : propane et butane)	
Carburants	
Fioul	- domestique - fluide - lourd
Bitume	

Figure 1.1. Composition d'un pétrole brut

Sur les 1300 pétroles bruts environ référencés dans le monde, seul 10% sont choisis par les pétroliers pour la fabrication du bitume [5].

Les différents procédés de fabrication des bitumes sont: [2] [5]

1.3.1. La distillation :

C'est un procédé physique d'évaporation des constituants volatils où la phase vapeur est éliminée et condensée, il reste en fond de colonne du bitume.

Elle se pratique en deux étapes :

1.3.1.1. Distillation à la pression atmosphérique

Ce procédé est utilisé que pour retirer les produits légers (essence, kérosène, ...).

Le pétrole brut, préalablement décanté et dessalé, est chauffé à une température voisine de 340 °C puis envoyé dans la première colonne de fractionnement maintenue à la pression atmosphérique. Le produit récupéré en fond de tour est le « brut réduit ».

1.3.1.2. Distillation sous vide:

Cette opération est nécessaire pour obtenir des produits lourds, on commence par la distillation sous pression atmosphérique. Le fond de la colonne est alors envoyé à la distillation sous vide qui consiste à la séparation des différents constituants en jouant sur les paramètres : débit, pression et température.

Plus on distille, plus le bitume obtenu est dur et plus sa pénétrabilité est faible.

1.3.2. L'extraction (Désasphaltage) :

Ce procédé est utilisé comme complément de la distillation. Il consiste à fabriquer un bitume par solubilité du fond de la distillation sous vide dans un solvant (propane ou butane).

Après Extraction du résidu sous vide, on obtient :

- Un bitume ;
- Une base pour lubrifiant de haute qualité.

Les bitumes de désasphaltage sont en général susceptibles à la température.

1.3.3. Le soufflage :

Cette opération consiste à injecter de l'air dans le résidu de la distillation sous vide sous des températures comprises entre 250 et 300°C.

Le bitume obtenu est appelé bitume soufflé, Il est peu employé en technique routière mais est plus utilisé comme produit d'étanchéité de bâtiment.

1.3.4. Le craquage:

Le craquage est un traitement des fonds de colonne sous vide à des hautes températures comprises entre 450 et 500°C et à des pressions allant de 2 à 25 bars.

Ces bitumes n'ont pas d'application routière.

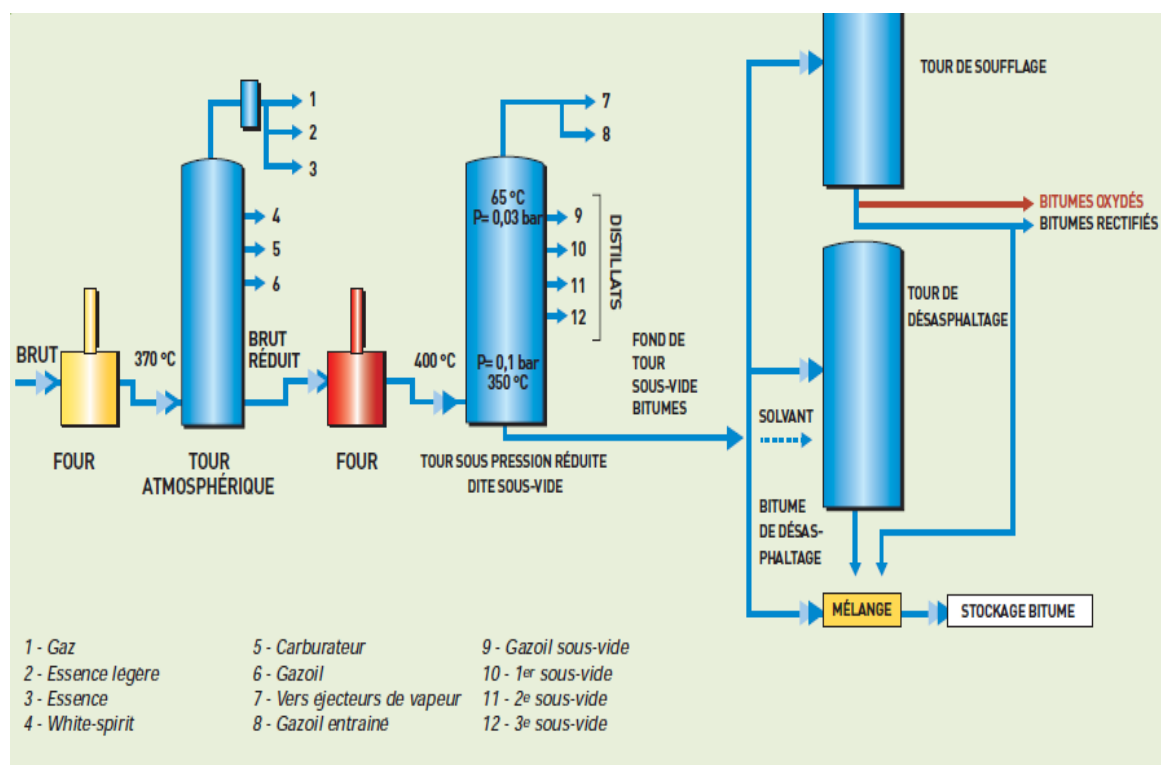


Figure 1.2. Principe de fabrication du bitume [5].

1.4. Composition chimique et structure des bitumes

Les bitumes sont mélanges complexes de composés hydrocarbonés constitués de carbone (79 à 88%) et l'hydrogène (7 à 13%). On note aussi la présence de faibles quantités d'oxygène (2 à 8%) et d'azote (jusqu'à 8%), ainsi que des traces de nombreux métaux (Fe, Ni, V, Mg, Co, ...) [6]. Ils ont des masses molaires et des structures chimiques variées.

Les premiers travaux sur la chimie du bitume sont dus à Boussingault en 1837, qui a séparé une fraction distillable (Maltène) et une fraction non-distillables, les asphaltènes. Plus récemment, le développement des techniques de chimie analytique a permis de mieux définir et caractériser ces fractions [7].

Par précipitation avec n-heptane, on peut séparer les bitumes en deux fractions :

1.4.1. Les Asphaltènes : représentent généralement entre 5 et 25 % du bitume [8]. Ils se présentent sous la forme d'un solide noir, cassant, pratiquement insoluble [5]. La masse moléculaire des asphaltènes est élevée et varie entre 800 à 300000 g/mol selon la méthode utilisée [9]. Les Asphaltènes sont constitués de carbone et d'hydrogène avec un rapport H/C généralement égale à 1,1 [10].

1.4.2. Les maltènes : la fraction soluble [8] (masse molaire jusqu'à 1250 g/mol). La phase maltène peut alors être fractionnée par chromatographie en huiles saturées, huiles aromatiques et résines.

- ✓ Les huiles saturées : Ces fractions sont incolore ou légèrement jaunâtre [12]. Ils sont essentiellement composés de carbone et d'hydrogène avec un rapport H/C qui varie de 1,9 à 2 [11] les autres éléments sont à l'état de traces. Les saturés peuvent être présent de 5 à 20% dans les bitumes [10].
- ✓ Les huiles aromatiques : Ce sont des huiles visqueuses de couleur brun sombre. Ils contiennent une quantité importante de carbone et d'hydrogène avec un rapport H/C voisin de 1.5 [11]. Ils constituent 40 à 65% du bitume totale [9] [10].
- ✓ Les résines (aromatique polaire) : Sont des solides noirs, elles sont composées de carbone et d'hydrogène, mais contiennent de plus faible quantité d'oxygène, de soufre et d'azote. Elles sont de nature très polaire et de ce fait ont des propriétés adhésives très fortes. Le rapport H/C est de 1,3 à 1,4 [10]. Leur rôle est de stabiliser la dispersion d'asphaltènes dans la matrice maltènes [7].

Les asphaltènes ne diffèrent des résines que par leur insolubilité dans un hydrocarbure donné [2].

Les asphaltènes ont tendance à adsorber la fraction des résines, ce qui permet leur dispersion dans le mélange huileux (hydrocarbures aromatiques et saturés). On dit qu'il y a peptisation.

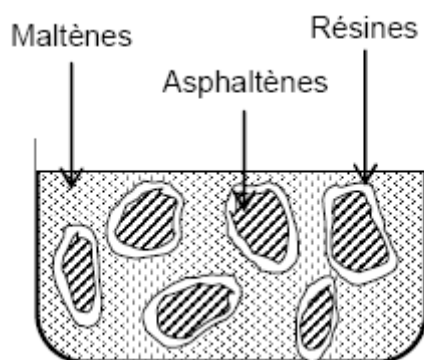


Figure 1.3. Composition des bitumes

D'une façon générale, les bitumes sont presque toujours décrits par quatre groupes différents:

Bitume = Asphaltènes + Maltènes (Satures + Aromatiques + Résines)

Selon le modèle de Yen [13], Les molécules d'asphaltènes peuvent exister sous forme de micelles ou sous forme de paquets de micelles qu'on appelle agglomérats.

Le modèle de Yen représente les micelles d'asphaltènes.

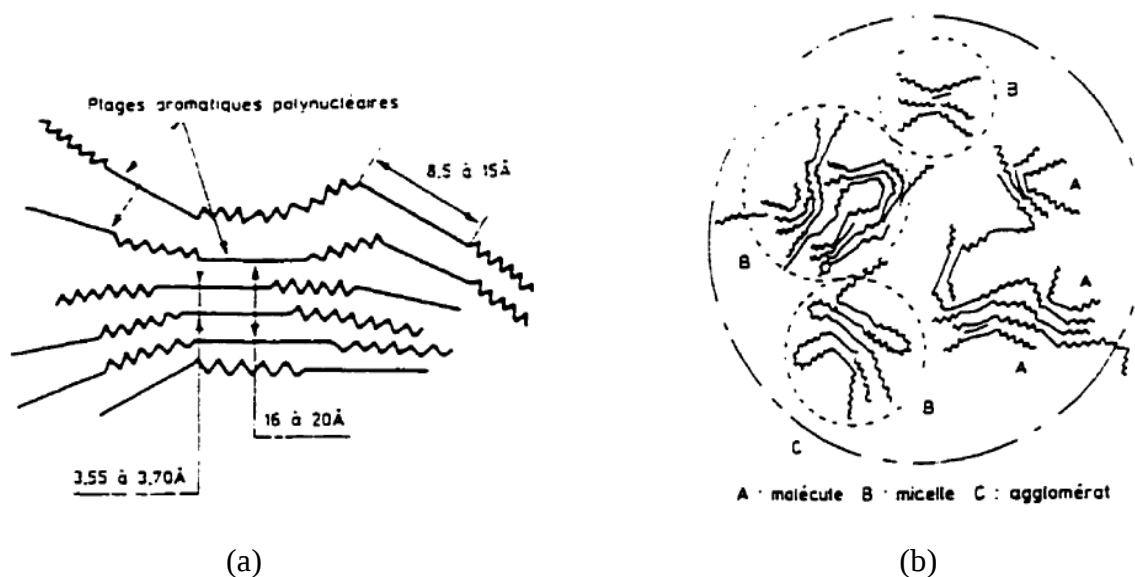


Figure 1.4. (a). Coupe d'un modèle de micelles d'asphaltènes selon Yen [13]
(b). Macrostructure des asphaltènes selon Yen [13]

1.5. Les différentes méthodes de séparation [11] :

Les méthodes de séparation des bitumes sont principalement basées sur la distillation, l'extraction aux solvants sélectifs, l'adsorption et les réactions chimiques.

1.5.1. Séparation par distillation:

Cette méthode permet de concentrer les asphaltènes et de classer les produits en fonction de leur point d'ébullition.

1.5.2. Extraction aux solvants sélectifs:

La méthode d'extraction consiste à traiter le bitume avec des solvants de polarité croissante qui précipitent des fractions de polarité décroissante.

Le procédé Schweyer et Traxler [11] qui est schématisé sur la figure suivante est un exemple typique représentant cette technique.

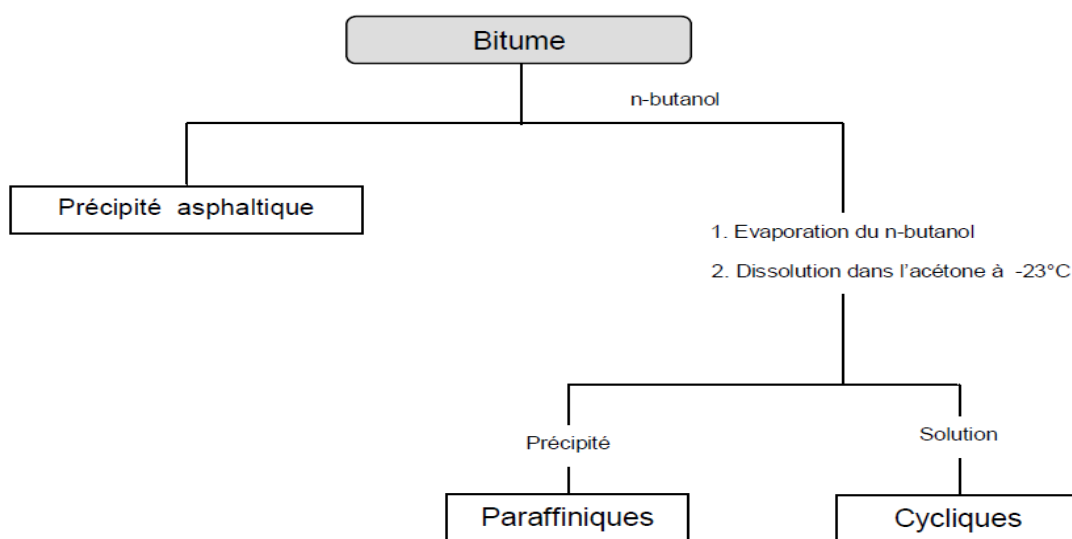


Figure 1.5. Schéma de l'extraction aux solvants sélectifs [11]

1.5.3. Chromatographie d'adsorption:

Les méthodes chromatographiques sont les techniques les plus utilisées pour la caractérisation chimique des bitumes. Elles sont basées sur l'aptitude du bitume à être séparé en différentes fractions par adsorption sélective.

Le fractionnement par chromatographie est généralement précédé d'une séparation initiale du bitume en asphaltènes et maltènes par précipitation sélective dans des alcanes à faible poids moléculaire tels que le propane, le butane, le pentane, l'hexane et l'heptane.

La procédure de fractionnement mise au point par Corbett [11] est schématisée sur la figure 1.6.

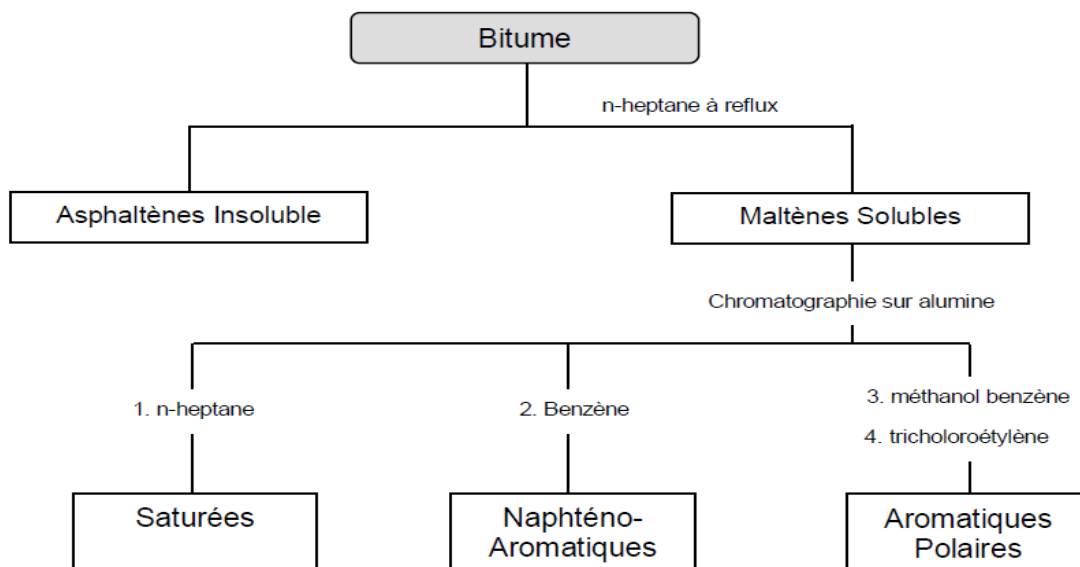


Figure 1.6. Chromatographie d'adsorption d'après Corbett [11]

1.5.4. Chromatographie sur Gel Perméable (GPC) :

Cette technique est différente des méthodes décrites ci-dessus, car elle est basée sur un fractionnement selon le volume hydrodynamique des molécules. .

La chromatographie par perméation de gel a été utilisée pour analyser la distribution en tailles moléculaires des fractions.

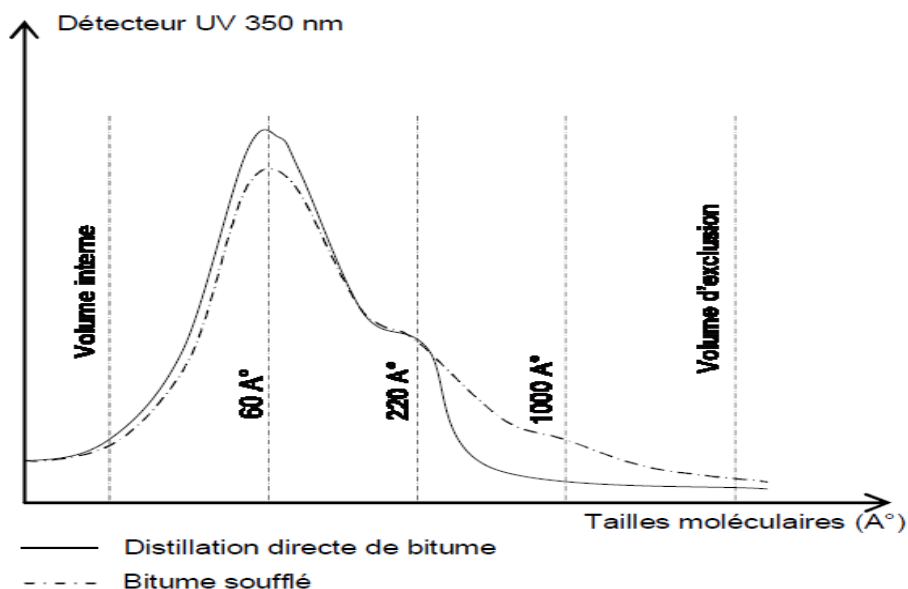


Figure 1.7. Chromatographie sur gel perméable sur bitumes [12]

1.5.5. Chromatographie sur baguette de silice (IATROSCAN) :

La chromatographie sur baguette de silice (IATROSCAN) est une technique qui est fréquemment utilisée pour déterminer la composition chimique des bitumes. Ce type de chromatographie permet de séparer les bitumes selon les quatre grandes familles de produits représentées précédemment.

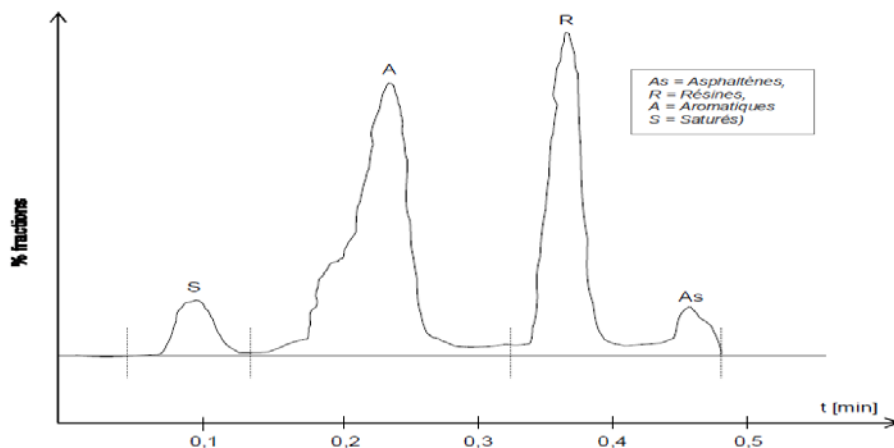


Figure 1.8. Séparation en groupes génériques par chromatographie IATROSCAN en fonction du temps d'élution [14]

1.5.6. Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)

La Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (ou FTIR : Fourier Transformed InfraRed spectroscopy) est basée sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le matériau analysé. Elle est utilisée pour détecter et analyser les bandes d'oxydation chimique des bitumes. Avec des bitumes modifiés par des polymères, on l'applique à l'identification et au dosage des polymères ajoutés au bitume (figure 1.9).

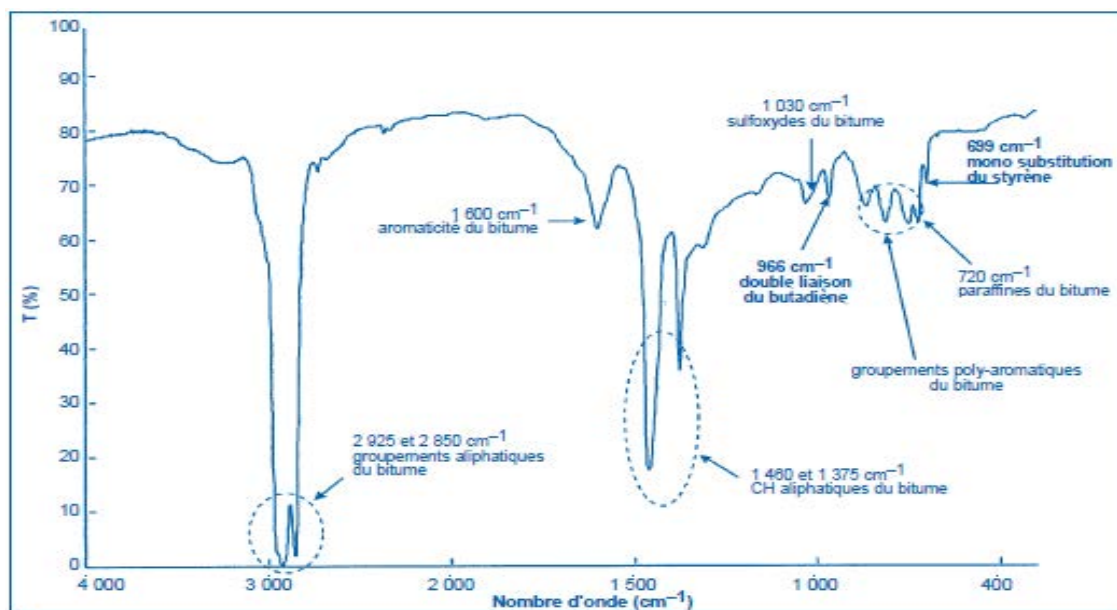


Figure 1.9. Spectre infrarouge d'un bitume modifié par un polymère SBS [14]

1.6. Structure colloïdale du bitume :

Le bitume peut être décrit comme une substance colloïdale dans laquelle les phases dispersées, constituant des asphalts sont couvertes par une couche protectrice de résines. Ce complexe appelé micelle est dispersé dans une phase de maltène qui constituent un mélange de huile aromatique et saturé [16] [17]. Cette structure a été proposée dans les années 1920 par NELLENSTEYN, qui fut le premier à décrire le bitume comme une suspension colloïdale [13].

On distingue trois types fondamentaux de structure [6] :

-Structure I (SOL) : Caractérisée par la peptisation totale des micelles d'asphaltènes Par les résines. On obtient ainsi une solution diluée et bien stabilisée d'asphaltènes dans un milieu dispersant fortement structuré par les résines. Ceci se rencontre dans les bitumes à phase maltène riche en aromatique.

Ces bitumes ont un comportement VISQUEUX.

-Structure II (GEL) : Caractérisée par l'agglomération de micelles d'asphaltènes formant ainsi un réseau continu dans un milieu dispersant faiblement structuré par les résines.

Les bitumes à structure (gel) sont riches en asphaltène et ont une phase maltène pauvre en hydrocarbures aromatiques.

Ils ont un comportement ELASTIQUE.

- Structure III (SOL-GEL) : Caractérisée par des agregats de micelles d'asphaltènes baignant dans un milieu dispersant structuré par les résines et inintermédiaire entre I et II .

Les majorité des bitumes routiers ont cette structure.

Ils ont un comportement VISCOELASTIQUE.

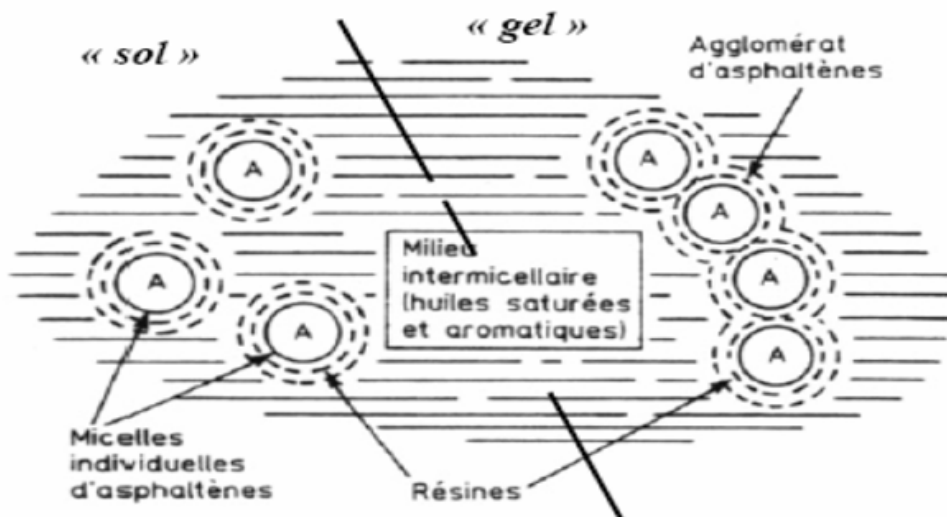


Figure 1.10. Schématisation de la structure colloïdale du bitume [18]

Gaestel et Coll [17] ont établi une relation entre les principales propriétés rhéologiques des bitumes et l'indice d'instabilité colloïdale « IC ».

$$IC = \frac{\text{Asphaltènes+ saturées}}{\text{résines+ aromatiques}} \quad (1)$$

Cet indice prend les valeurs proches de 1 pour un bitume dans un état gel et près de 0.25 dans un état sol [1]. Plus cet indice est élevé plus le bitume se rapproche de l'état gel et plus sa structure est instable [19].

On peut classer la structure du bitume selon sa composition générique à savoir (Tableau1.1).

Tableau1.1. Différents type de structure des bitumes en fonction de leur composition générique [15]

Type de structure	Asphaltènes (%)	Résines (%)	Huiles (%)
Gel	> 25	< 24	> 50
Sol	< 18	> 36	< 48
Sol - Gel	21 à 33	30 à 34	45 à 49

1.7. Essais sur le bitume

1.7.1. Essai de pénétrabilité à l'aiguille (NF EN1426)

La pénétrabilité à l'aiguille est la profondeur d'enfoncement (exprimé en dixièmes de millimètres), d'une aiguille normalisée de 1mm de diamètre, sous une charge de 100g, appliquée pendant 5 secondes sur un échantillon de bitume maintenu à 25°C.

Dans ces conditions, plus le bitume est dur, plus la valeur de sa pénétration est faible.



Figure 1.11. Essai de pénétrabilité

1.7.2. Point de ramollissement Bille Anneau (NF EN1427)

L'essai consiste à déterminer la température (notée TBA) pour laquelle une bille d'acier normalisée traverse un échantillon de bitume maintenu dans un anneau métallique. Il s'agit de la température à laquelle le bitume étudié atteint un certain degré de ramollissement.

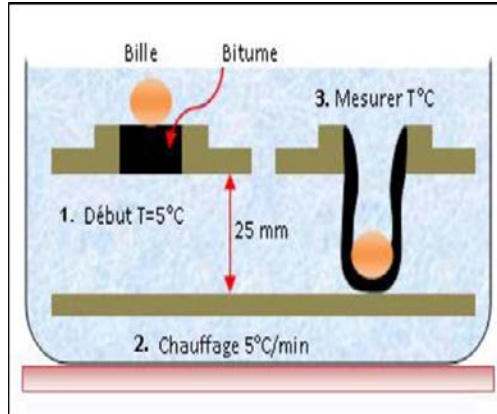


Figure 1.12. Détermination du point de ramollissement

1.7.3. Ductilité (NF EN 13589)

Cet essai consiste à mesurer l'allongement, à l'instant précis de sa rupture d'une éprouvette de forme déterminée, étirée à une vitesse de 50mm/min, et à une température de 25°C .

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

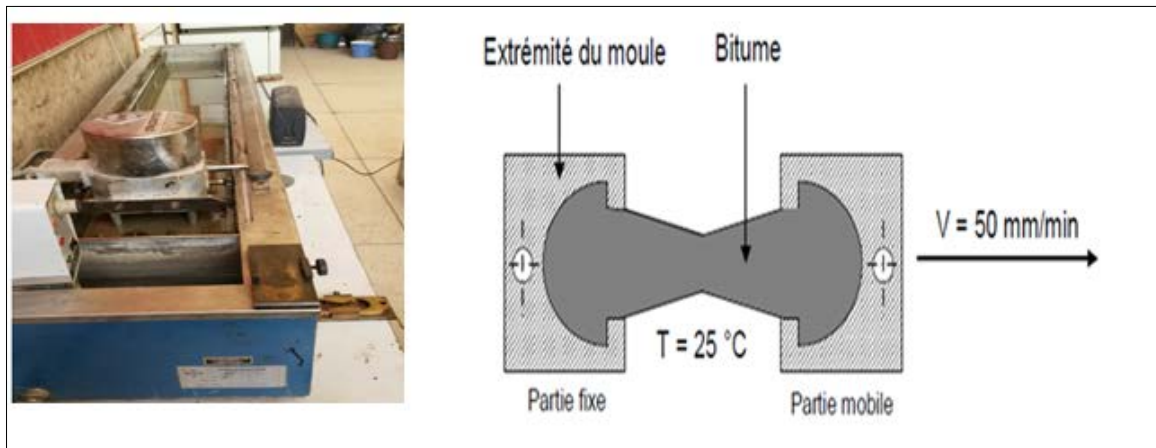


Figure 1.13. Principe de l'essai de Ductilité

1.8. Le vieillissement des bitumes

Comme toute matière d'origine organique, les bitumes sont soumis, en effet à des phénomènes de vieillissement qui entraînent des modifications de leurs paramètres mécaniques et rhéologiques et de leur structure chimique [20].

Le vieillissement du bitume est l'un des principaux facteurs responsables de la détérioration des chaussées bitumineuses (fissuration, orniérage,...). Les propriétés de vieillissement dépendent en grande partie des types et des origines de bitume [21].

Le bitume est exposé à des processus de vieillissement au cours du stockage, de mélange, de transport et de pose, et à long terme en service [22].

Le vieillissement du bitume a habituellement comme conséquence le durcissement des bitumes et de la fragilisation, à la fois lors de la mise en œuvre et de la mise en service, ce qui contribue fortement à la détérioration du revêtement [23].

L'effet de stockage du bitume conduit au vieillissement par durcissement qui se caractérise par un changement de classe (modification de la pénétrabilité et de la TBA).

Le vieillissement du bitume peut conduire à une augmentation significative de la rigidité [24].

La structure et la stabilité colloïdale de bitume est directement reliée au vieillissement [23]. Plus l'indice d'instabilité colloïdal est faible, meilleure est la résistance au vieillissement du bitume (les bitumes de type sol).

1.8. 1.Facteurs influant sur le vieillissement:

Le vieillissement est un processus très complexe qui est influencé par de nombreux facteurs : ([17] [21] [25-27]).

- L'oxydation : est une réaction chimique irréversible entre les composants de bitume et d'oxygène. Il peut se produire par différentes réactions, telles que la photo-oxydation et l'oxydation thermique. Le degré d'oxydation dépend fortement de la température, de période et d'épaisseur de film du bitume ;
- La lumière (principalement ultraviolets, UV) : le bitume est un bon absorbeur de lumière ;
- La volatilisation est l'évaporation des constituants légers du bitume et est principalement une fonction de la température ;
- Le pourcentage des vides ;
- La température ;
- La nature des granulats certains types de granulat absorbant les fractions huileuses du bitume, ce qui provoque son évolution ;
- La nature intrinsèque du bitume conditionne également son évolution.

1.8. 2. Mécanisme de vieillissement

Il y a deux mécanismes fondamentaux impliqués dans le vieillissement du liant. Le mécanisme principal de vieillissement est irréversible, caractérisé par les modifications chimiques du bitume, constitué d'oxydation des molécules de bitume et perte de composants volatils qui a ensuite un impact sur les propriétés rhéologiques des liants [25, 26, 28]. Ce processus est influencé par la nature chimique du bitume.

Lors du vieillissement, une partie des huiles aromatiques oxydées subit une polycondensation qui les convertit en résines et les résines se condensent en agrégats d'asphaltènes selon le schéma de transformation suivant :



Les conséquences des transformations chimiques sur le comportement se traduisent le plus souvent par une augmentation de la consistance et une diminution de la susceptibilité du bitume.

Le deuxième mécanisme est un processus réversible appelé durcissement physique. Il se traduit par une augmentation de la viscosité sans modification chimique des constituants [13] [25].

Pour les bitumes modifiés (PMB), les mécanismes du vieillissement sont influencés par les caractéristiques du bitume et polymère, aussi bien que l'interaction moléculaire entre les deux composants [29].

1.8.3. Essais qui simulent le vieillissement

Les essais les plus représentatifs pour la simulation du vieillissement du bitume en laboratoire sont l'essai RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) et l'essai PAV (Pressure Aging Vessel).

1.8.3.1. Essai RTFOT "Rolling Thin Film Oven Test" (NF EN 12607-1)

A l'enrobage, les granulats chauffés aux environs de 160°C sont mis en contact avec le bitume chaud qui se répartit en film mince autour du granulat, favorisant ainsi un vieillissement du liant. L'oxydation chimique est violente car l'apport énergétique est intense (température et oxygène de l'air). L'essai RTFOT est employé pour caractériser ce type de vieillissement des bitumes pendant la fabrication et la mise en place d'un enrobé. L'essai consiste à soumettre le bitume en film mince à une température de 163 °C pendant 75 minutes, en l'exposant à un flux d'air chaud dont le débit est contrôlé.

On mesure ensuite les propriétés habituelles sur le liant vieilli : pénétrabilité et température de ramollissement bille et anneau. Ces valeurs, dites après RTFOT, sont alors comparées aux valeurs initiales. Elles sont plus proches de celles du liant extrait de l'enrobé bitumineux, que de celles obtenues sur le bitume d'origine.

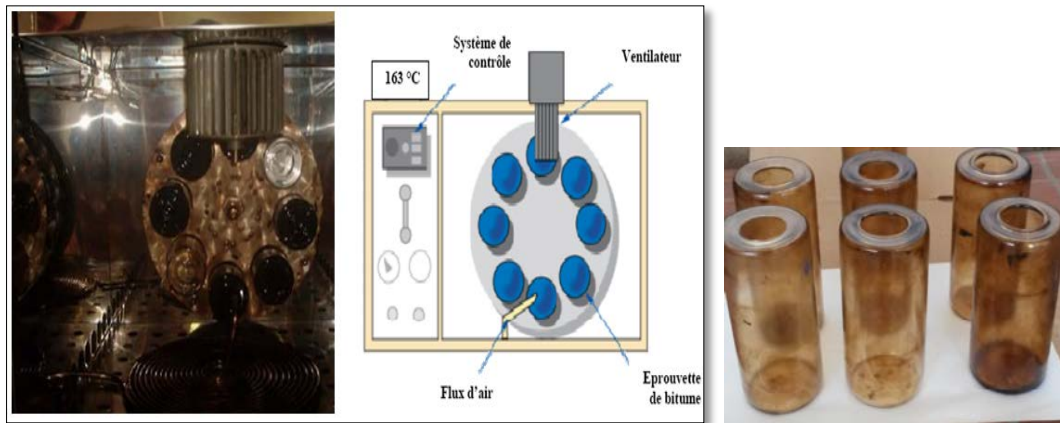


Figure.1.14. Essai RTFOT "Rolling Thin Film Oven Test"

1.8.3.2. Essai PAV "Pressure Aging Vessel"(AASHTO PP1)

Cet essai est employé pour permettre de caractériser le vieillissement des bitumes in-situ (après 7 à 8 années de service).

Le résidu de l'essai RTFOT est chauffé et versé dans des plateaux métalliques (coupelles contenant environ 50g de liant) qui constituent les éprouvettes de l'essai PAV. Ces plateaux sont rangés dans un rack qui sera placé dans un récipient dans une enceinte thermique. A la température de l'essai (100°C), une pression d'air de 21 bars est appliquée dans le récipient. Après une durée de vingt heures, la pression est diminuée lentement (8 à 10 minutes). Les plateaux d'éprouvettes sont placés ensuite dans un four à 163°C pendant 30 minutes.

On mesure alors les propriétés habituelles du liant : pénétrabilité et température de ramollissement bille et anneau. Ces valeurs, dites après PAV, sont alors comparées aux valeurs initiales et aux valeurs obtenues après RTFOT. Une schématisation de cet essai est présentée dans la figure suivante :



Figure 1.15. Essai PAV "Pressure Aging Vessel"

2.1. Introduction

Les recherches d'amélioration des propriétés des bitumes par modification de sa structure ou par l'ajout d'additif sont anciennes. Mais c'est à une trentaine d'années que l'on peut faire remonter l'essor véritable de recherches, selon diverses directions, de produits et procédés permettant de modifier les caractéristiques et propriétés des bitumes à usage routier [37].

Vers la fin des années 50, aux Etats-Unis, on relève la réalisation des bitumes modifiés par des caoutchoucs incorporés sous forme de latex [36]. Des opérations du même genre furent effectuées en Europe ; des expérimentations eurent ainsi lieu en France en 1966. Mais ces applications, souvent réalisées à titre d'essai (planches expérimentales), furent généralement considérées comme insuffisamment au point, onéreuses et non indispensables malgré l'essor important des travaux publics durant la décennie 60. Les travaux de construction routière furent réalisés à cette époque avec des bitumes purs.

Le développement significatif des liants modifiés peut être situé dans les années 70 en Europe et particulièrement en Allemagne. Ensuite, en Autriche puis en Italie, apparaissent sur chaussées autoroutières de nouveaux revêtements bitumineux à base de polyéthylène introduit au niveau du malaxeur. En France ce n'est qu'en 1972 que la première application a eu lieu sur un pont à dalles orthotropes avec un bitume modifié aux polymères [38].

2.2. Définition d'un polymère :

On appelle polymère une grande molécule constituée d'unités fondamentales appelées monomères (ou motifs monomères) reliées par des liaisons covalentes.

Un monomère est un composé constitué de molécules simples pouvant réagir avec d'autres monomères pour donner un polymère.

Contrairement au polymère, un monomère a une faible masse moléculaire.

On distingue deux types de polymères à savoir :

- ✓ Le homopolymère est un polymère qui comporte des motifs monomères tous identiques.
- ✓ Le copolymère est un polymère qui comporte des motifs monomères de deux ou plus sortes différentes.

2.3. Objectifs de la modification

La modification des bitumes consiste à ajouter des polymères permettant de modifier une ou plusieurs des caractéristiques suivantes : [36] [39-41]

- La susceptibilité thermique : caractérise la variation de la consistance en fonction de la température. La modification a pour but de réduire cette susceptibilité en élargissant l'intervalle séparant le point de fragilité à basse température et le point de ramollissement à haute température.
- La cohésion : définie comme l'énergie nécessaire pour rompre un film de liant. Elle varie en fonction de la température en passant par un maximum. Le but de la modification est d'augmenter la cohésion maximale et/ou la « plage de cohésion » et d'obtenir ainsi une consistance satisfaisante dans toute la gamme des températures de service.
- L'élasticité : définie comme l'aptitude des liants à supporter, de façon réversible sans rompre, la déformation induite par l'effet du trafic et des variations de température. La modification vise à maintenir cette élasticité dans une large gamme des températures d'utilisation.
- La résistance à la fatigue : la modification a pour but d'augmenter le capital de résistance des matériaux à basse température. Ce capital est consommé progressivement sous les sollicitations répétées sous l'effet du trafic.
- L'adhésivité passive : améliorer la résistance au désherbage sur la chaussée
- La résistance au vieillissement : la modification doit améliorer la résistance au vieillissement aussi bien à la mise en œuvre que sous les conditions d'utilisation.

2.4. Les différents agents modifiants

Les principaux agents modifiants utilisés sont :

- ✓ Les polymères thermodurcissables
- ✓ les polymères Thermoplastiques
- ✓ Latex
- ✓ Poudrettes de caoutchouc

2.4.1. Les polymères thermodurcissables

Ils durcissent de façon irréversible à une température qui dépend de leur nature chimique (structure réticulées) [37].

Il existe quatre grandes familles industrielles de résines thermodurcissables qui sont : Les polymères insaturés, les phénoplastes, les polyuréthanes et les résines époxydiques.

2.4.2. Les polymères Thermoplastiques

Ils se fluidifient et deviennent malléables sous l'effet de la chaleur, de façon réversible [37].

Ces produits sont subdivisés en deux familles : les élastomères et les plastomères.

2.4.2.1. Les élastomères

La modification des bitumes par des élastomères conduit à des liants appelés bitumes élastomères. Généralement, le bitume élastomère est obtenu par simple mélange physique [39], mais il peut être également réticulé (ajout d'un réactif chimique après dispersion du polymère dans le bitume, en général l'agent de réticulation est à base de soufre) [42-44].

Les principaux polymères élastomères sont :

- Copolymères Styrène-isoprène-styrène (SIS)
- Copolymères Styrène-Butadiène (SB)
- Copolymère statistique styrène-butadiène (SBR)
- Copolymères Styrène-Butadiène-Styrène (SBS)

Les polymères SBS sont les plus utilisés comme agent modifiant dans les bitumes.

Les bitumes modifiés par addition de SBS ont les propriétés suivantes: [43-45]

- ✓ Diminue la susceptibilité thermique ;
- ✓ Augmente la cohésion ;
- ✓ Améliore le comportement rhéologique des bitumes ;
- ✓ Les SBS sont incompatibles avec les liants.

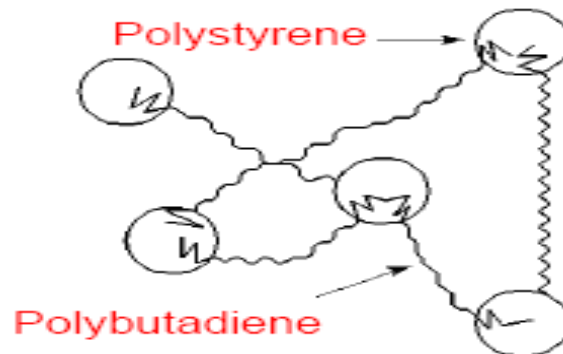


Figure 2.1 Structure du SBS [12].

Lu et Isacson (1998), ont examinés Les propriétés de vieillissement des bitumes modifiés par SBS (styrène-Butadiène-Styrène) ont été évaluées en utilisant analyse mécanique dynamique (DMA), Chromatographie sur Gel Perméable (GPC) et Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (ou FTIR : Fourier Transform Infrared spectroscopy). Les liants étaient âgés au moyen du TFOT (Thin Film Oven Test) et RTFOT(Rolling Thin Film Oven Test) respectivement [46].

Les résultats de la recherche montrent que :

- ✓ Le vieillissement a eu comme conséquence la dégradation du polymère de SBS (diminution de la masse moléculaire du polymère) et de l'oxydation du bitume (augmentation de la teneur en molécules polaires contenant de l'oxygène et augmenter en bitume de la masse moléculaire) ;
- ✓ Le vieillissement augmente des composés carbonyles. Et le polymère a été observée à résister à la formation de sulfoxydes ;
- ✓ L'indice de vieillissement est obtenu en utilisant en grande partie DMA influencée par la température et la fréquence.

G. Liu et al (2014), ont examinés les propriétés de vieillissement des bitumes modifiés par SBS (styrène-Butadiène-Styrène) au laboratoire et sur le terrain. Le bitume modifié par SBS d'origine avait été gardé pendant 23 ans au laboratoire et le liant vieilli sur terrain a été extrait de la chaussée après un temps de service de 22 ans. Le test de vieillissement a été réalisé pour simuler le vieillissement à court et long terme du liant d'origine dans le laboratoire. Le rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR) a été utilisé pour caractériser la viscosité et la réponse dynamique du liant d'origine et des liants âgées. La chromatographie de gel perméable (GPC) a été adoptée pour analyser la distribution des masses moléculaires de tous les liants. Les résultats montrent que [47] :

- Le liant âgé de 22 ans extrait de la chaussée avait une viscosité plus élevée que le liant du laboratoire âgé de 9 jours ;
- Le liant extrait de la chaussée a une réponse dynamique similaire avec le liant du laboratoire après un vieillissement simulé de 5 jours ;
- Le résultat de GPC a montré que le vieillissement appliqué de laboratoire a produit plus d'asphaltenes que le vieillissement de terrain.

En général, le vieillissement réel des bitumes est très complexe et difficilement limité par le vieillissement de laboratoire. Les paramètres rhéologiques et chimiques de bitume sont nécessaires pour élaborer la relation entre le vieillissement en laboratoire et sur la pratique.

2.4.2.2. Les plastomères

Les plastomères sont caractérisés par le ramollissement durant le chauffage et par le durcissement durant le refroidissement [48].

L'éthylène-acrylate de méthyle (EMA), L'éthylène-acrylate de butyle (EBA), L'éthylène-acétate de vinyle (EVA), Le polyéthylène (PE), sont les principaux polymères plastomères.

Ces polymères augmentent la viscosité et la rigidité du bitume aux températures normales de service [48] [49].

L'acétate de vinyle et d'éthylène (EVA) est l'un des plastomères les plus utilisés en technique routière [50]. Il est composé du copolymère d'éthylène et du comonomère acétate de vinyle (OCOCH₃) [42].

La modification du bitume avec l'EVA est caractérisée par une diminution de la pénétrabilité et une augmentation de la température bille et anneau.

D'une façon générale, les EVA présentent les avantages suivants: [8] [45] [51]

- ✓ Une meilleure résistance à la fatigue ;
- ✓ Diminue la susceptibilité thermique ;
- ✓ Améliore la résistance à la déformation du bitume ;
- ✓ Les EVA sont compatibles avec les liants ;
- ✓ Leur cout raisonnable.

Le bitume peut être aussi modifié par adjonction d'un élastomère (SBS) et d'un plastomère (EVA). Ces liants fortement modifiés, de coût élevé, sont utilisés dans divers types d'enrobés de couche de roulement sur des sites fortement sollicités pour lesquels il est prévu une amélioration importante des résistances à la fissuration et à l'orniérage [19] .

2.4.3. Les polymères de synthèse : il s'agit notamment de la poudrette de caoutchouc et des latex.

2.5. Mécanisme de la modification

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

En effet, si le polymère n'est pas soluble au sens moléculaire du terme (ce qui n'est pas nécessairement souhaitable), il est au moins gonflable par la fraction huileuse légère du bitume. Il se constitue alors deux phases [6]:

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

Ceci permet une augmentation de la viscosité et le développement du caractère « Gel » du liant. Le polymère gonflé rend donc, même à faible teneur, le bitume plus élastique et plus résistant à l'écoulement [6].

BRION [53] a fait une étude assez approfondie sur ce phénomène de gonflement par des tests de centrifugation lui permettant de déterminer un taux de Gonflement. Il a montré que:

- ✓ La composition générique du bitume était sans influence sur le taux de gonflement ;
- ✓ La composition du polymère joue un rôle minime sur le taux de gonflement;
- ✓ Ce taux de gonflement suit une loi linéaire décroissante en fonction de la teneur en polymère.

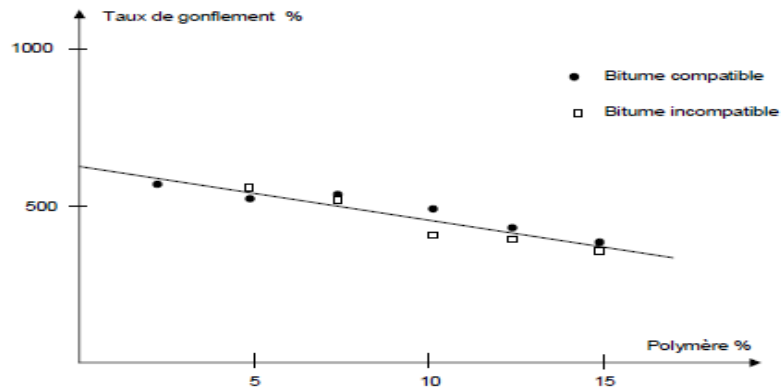


Figure 2.2. Influence de la teneur en polymère sur le taux de gonflement [6].

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 (Figure 3.4) [6]:

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

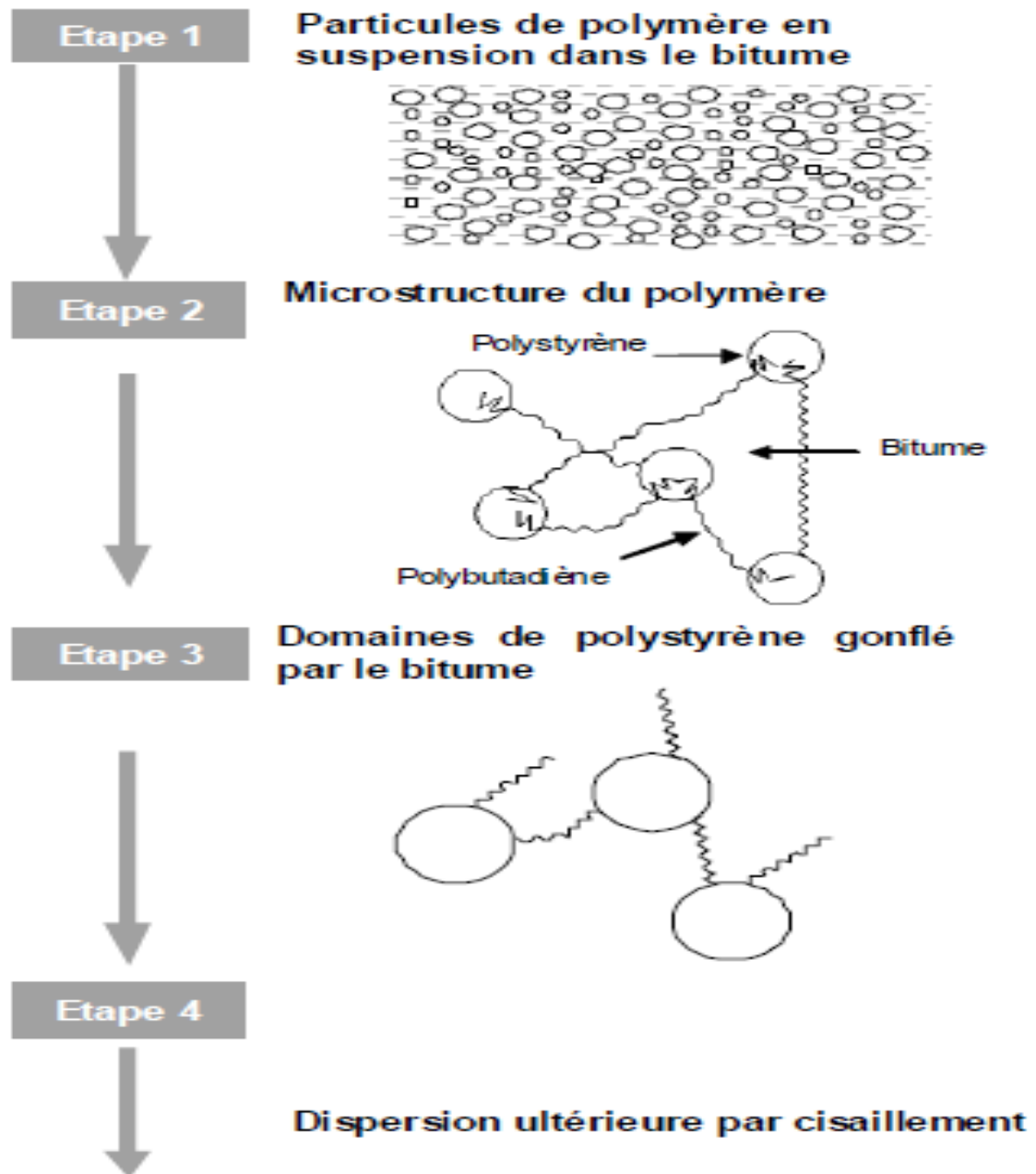


Figure 2.3. Mécanisme de la dispersion d'un polymère de type SBS dans le bitume

2.6. Compatibilité Bitume-Polymère [42]

La compatibilité peut être définie de deux façons :

- ✓ En terme thermodynamique
- ✓ En terme pratique

2.6.1. En terme thermodynamique

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

2.6.2. En terme pratique

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

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

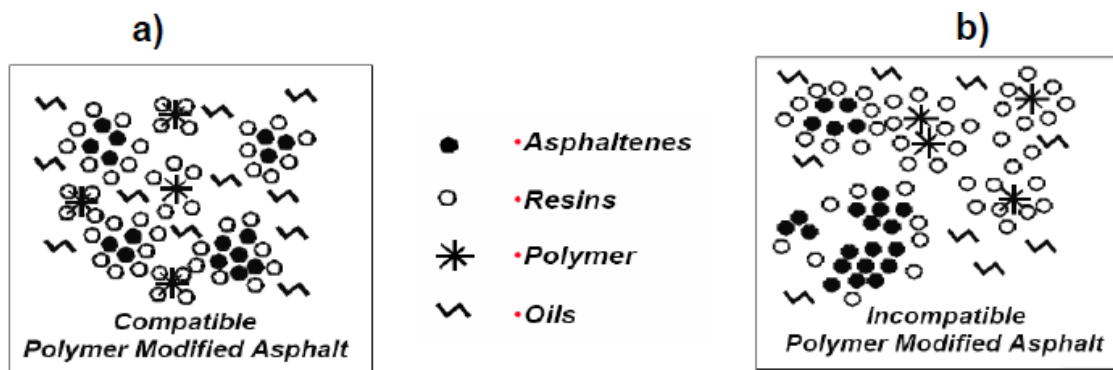


Figure 2.4. Structures des bitumes polymères : a) compatible, b) incompatible [12]

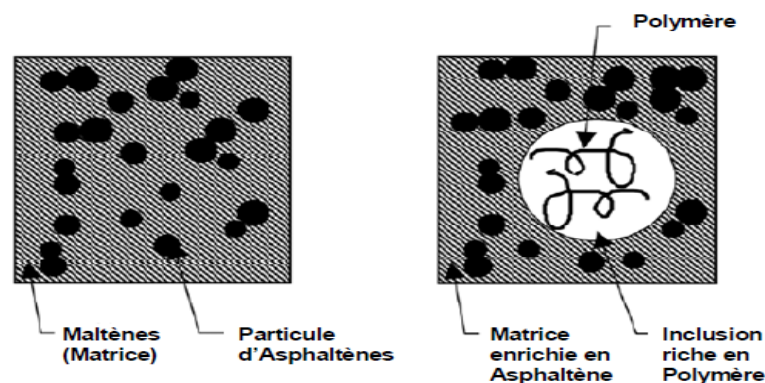


Figure 2.5. Effet de la modification sur la structure colloïdale du bitume
Bitume original (gauche) et BMP (droit). [7]

Certains chercheurs ont formalisé la notion de compatibilité bitume - polymère selon des principes généraux qui permettent d'anticiper grossièrement l'aptitude d'un bitume à former de bons bitumes polymères [7] :

- Une forte teneur en asphaltènes diminue la compatibilité bitume – polymère.
- L'aromaticité des Maltènes doit se situer dans une gamme optimale pour garantir une bonne compatibilité.

2.7. Procédés de modification

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

2.7.1. Le procédé humide

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

Différentes procédures ont été développées pour produire les bitume - polymères. La méthode la plus adoptée au laboratoire ou en usine est basée sur les principes suivants :

- La température de mélange est généralement comprise entre 150°C et 200°C.
- La durée de mélange (agitation mécanique, vitesse de malaxage est de 300 – 400 tr/min) varie de 1 heures à 12 selon le type de polymère.

2.7.2. Le procédé sec

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

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

Pour évaluer l'effet des polymères sur les performances mécaniques de l'enrobé, nous avons effectué l'essai Marshall.

2.8. Essais spécifiques aux liants modifiés

2.8.1. Stabilité au stockage

Le principe de cet essai est de maintenir un tube contenant le liant en position verticale pendant un temps déterminé, de le refroidir brusquement et de procéder à son découpage en trois parties égales [37]. La séparation éventuelle des phases est appréciée par la détermination de certaines caractéristiques (en premier lieu la TBA) sur les parties supérieure et inférieure.

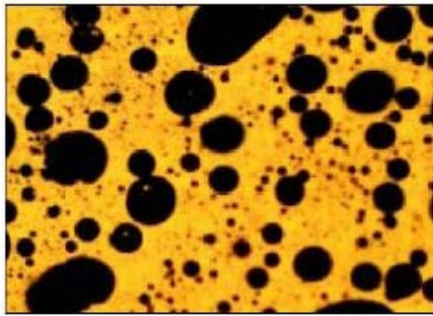
Si la différence entre les points de ramollissement des parties est inférieure à 2,5°C le bitume-polymère est considéré comme stable [41] [44].

La stabilité de stockage dépend du bitume et du type de polymère (la nature et la teneur en polymère). Lorsque la teneur en polymère augmente la stabilité au stockage des bitumes modifiés diminue [50].

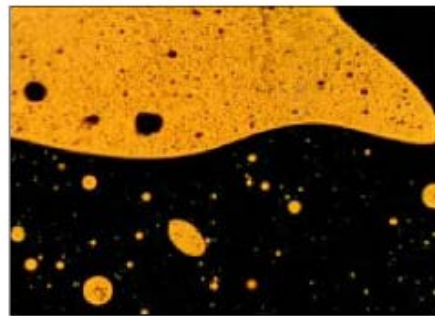
2.8.2. Observation microscopique

Les techniques d'observation microscopique pour connaître l'état de dispersion de la phase polymère dans le bitume ou l'émulsion.

Cette technique est basée sur le principe que les polymères gonflés par certains composants de bitume auquel ils sont ajoutés sont fluorescents lorsqu'ils sont éclairés par une lumière ultra-violette. Ils réémettent une lumière jaune - vert alors que le bitume lui-même reste noir.



Bitume modifié avec 7% d'EVA.



Bitume modifié avec 7% de SBS,

Figure 2.6. Microstructure d'un bitume polymère [12]

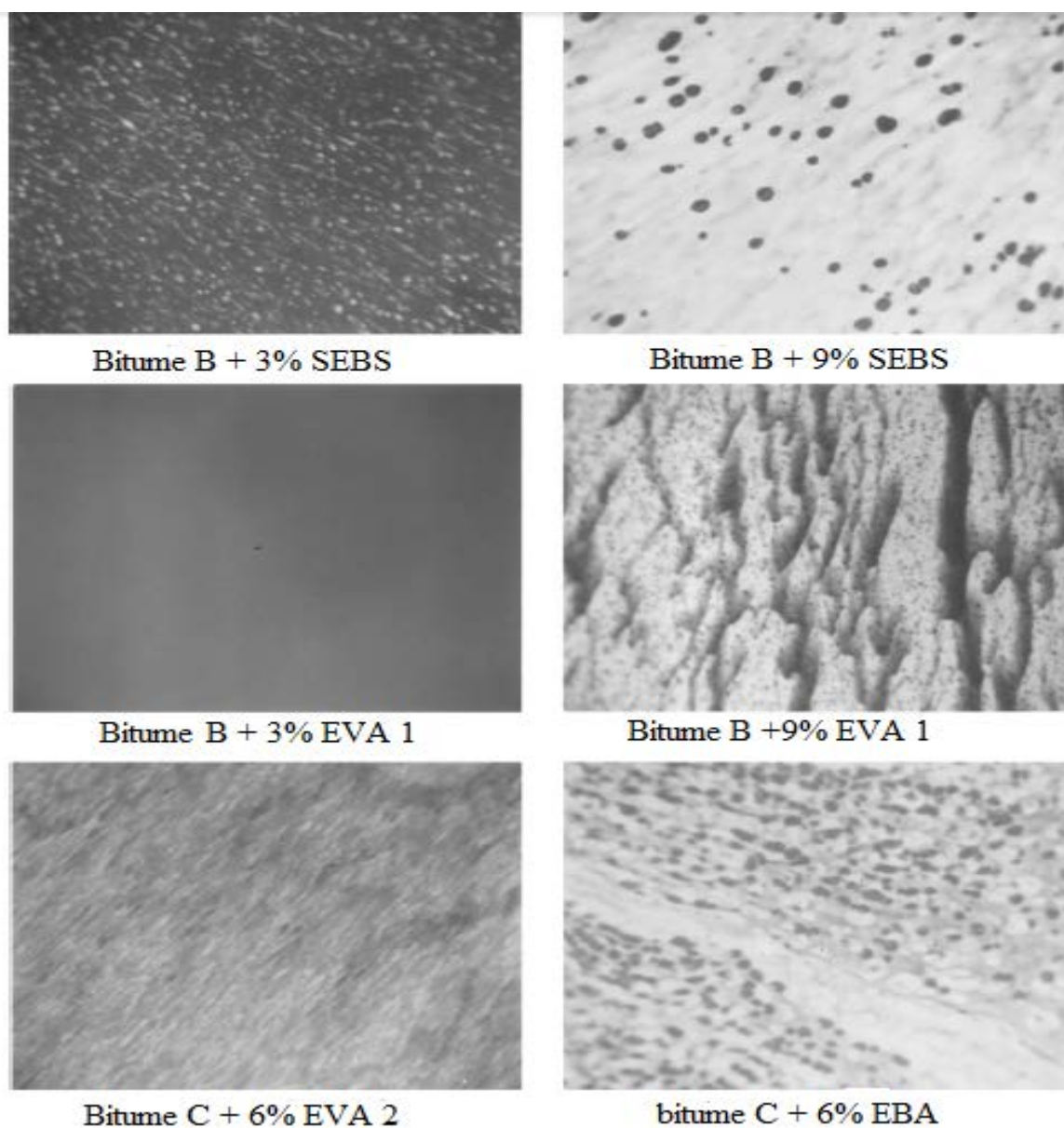


Figure 2.7. L'influence du bitume et le type et le contenu de polymère sur la microstructure du bitume modifié [50]

2.9. Etat actuelle de recherche

Nous allons présentes dans ce qui suit quelques travaux.

a) Airey (2002), a utilisé trois bitumes (A, B et C) de différentes provenances modifiés par le polymère EVA à différentes teneurs. Les bitumes ont été modifiés à trois pourcentages (3, 5 et 7%) et fabriqués à une température comprise entre 170°C et 185°C. La morphologie, les propriétés thermiques et les caractéristiques rhéologiques des bitumes modifiés par des EVA ont été analysé en utilisant le microscope à fluorescence, l'analyse calorimétrique différentielle (DSC) et le rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR). Les résultats de la recherche montrent que la modification par le polymère EVA augmente la rigidité et l'élasticité du bitume aux températures de service élevées et aux basses fréquences de chargement. Le degré de modification dépend du bitume de base, de la compatibilité bitume-polymère et de la teneur en polymère [52].

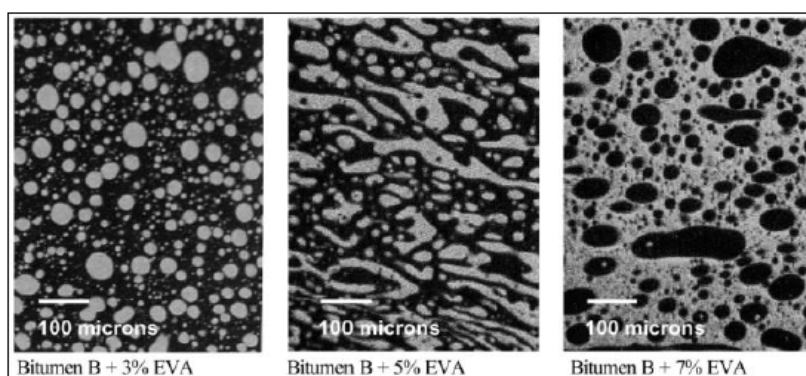


Figure 2.8. Microstructure des bitumes EVA [52]

b) Haddadi (2008) [54] ont été effectué une étude de vieillissement de bitume de grade 70/100 et sur les bitumes modifiés par l'EVA a des teneurs 3, 5 et 7%.

Il a testé donc le vieillissement des liants modifiés avec l'essai RTFOT.

Il ressort de l'examen de l'essai RTFOT que tous les bitumes subissent un vieillissement. Ce vieillissement s'exprime par un durcissement qui est du à l'oxydation et engendre :

- la diminution de la pénétrabilité,
- L'augmentation de la température bille et anneau (TBA).

c) Saoula et al (2009) [19] ont étudié l'influence de deux polymères (EVA et un déchet de semelles de chaussures, il contient entre 50 et 60% d'EVA) sur les caractéristiques de bitume et l'enrobé bitumineux modifié, et ils ont utilisé pour la fabrication d'enrobé modifié les deux procédés de modification sec et humide.

Ils ont utilisé :

- Un bitume de classe 80/100
- Les modifiants utilisés sont l'EVA et un déchet de semelles de chaussures, il contient entre 50 et 60% d'EVA. Les deux modifiants proviennent de la S.A.E.L. (Société Algérienne d'élastomère)
- Trois fractions granulaires (0/3, 3/8, 8/15) sont utilisés. Ils sont obtenus à partir des

carrières du nord de l'Algérie. Le sable (calcaire) provient de Keddara situé à Bouira et les graviers (basalte) proviennent de Cap-Djinet à Boumerdes

Les paramètres de modification sont :

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

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

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

- Le premier noté M0 est obtenu en mélangeant le bitume pur et les agrégats. C'est le mélange témoin ;
- Le deuxième noté M1 pour les EVA et D1 pour les déchets est obtenu en mélangeant le bitume modifié aux agrégats (procédé humide -A-) ;
- Le troisième noté M2 pour les EVA et D2 pour les déchets est obtenu en malaxant les agrégats, le bitume pur et le modifiant en même temps. L'incorporation des modifiants a été faite progressivement afin d'assurer l'homogénéité des mélanges (procédé sec -B-).

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

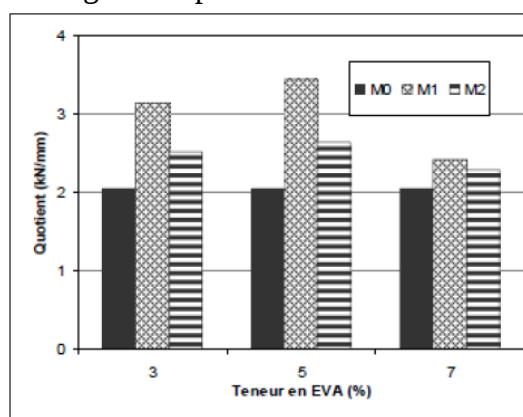


Fig 2.9 : Quotients Marshall en fonction de la teneur en EVA.

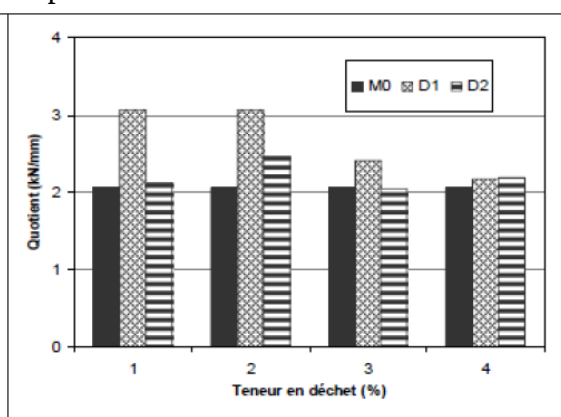


Fig 2.10: Quotients Marshall en fonction de la teneur en déchet

Le mélange M1 à 5% d'EVA atteint la valeur maximale du QM par rapport à l'enrobé témoin.

Par ailleurs, les mélanges M1 (3%) et D1 (1 et 2%) présentent pratiquement les mêmes résistances ceci montre tout l'intérêt d'utiliser ce type de déchet. L'application du procédé B donne des résistances très satisfaisantes particulièrement avec les mélanges

M2 (3 et 5%) et D2 (2%). Cependant, le mélange D2 (3%) n'améliore pas le QM comparé à celui de l'enrobé témoin. Le mélange D2 (2%) présente une meilleure résistance que celle du mélange D1 (3%), ceci se traduit par un gain en énergie (pas de modification du liant) aussi par une réduction de la quantité du déchet à utiliser.

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

d) Haddadi (2007) [14] a étudié l'influence d'un polymère (déchet industriel de type NBR sous forme de poudrette) sur les caractéristiques de bitume et l'enrobé bitumineux modifié.

Il a utilisé :

- Un sable 0/3 présente une forte teneur en carbonates (CaCO_3), il s'agit d'un sable calcaire.
- Des gravillons 3/8 et 8/15 sont de nature Siliceuse.
- Un déchet industriel de type NBR sous forme de poudrette provenant de la société d'application d'élastomère (SAEL). Sa densité est de 1,22 mesurée par rapport à l'éthanol dont la densité est de 0,79.
- Un bitume de grade 35/50 provient des raffineries de Naftal.

La modification a été effectuée selon les conditions suivantes :

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

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

Les résultats montrent que :

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

e) Bensaada (2012) [53] a étudié l'influence de la modification des bitumes (35/50) par le déchet plastique, par l'association (EVA - déchet plastique alimentaire) et par l'association (EVA-NBR) sur le vieillissement à court terme (RTFOT) et sur les propriétés physiques et mécaniques du bitume.

Le bitume a été modifié aux teneurs suivantes :

- 1, 2, 3,4 et 5% pour le déchet plastique.
- 2% et 5% pour l'association [EVA-NBR].

- 3% et 5% pour l'association [EVA-DP].

Tableau 2.1. Désignation des liants modifiés par l'association (NBR-EVA)

Mélanges	Teneurs totales des modifiants (NBR-EVA) (%)	NBR (%)	EVA (%)	Temps de malaxage
M1	5	50	50	2
M2	5	75	25	2
M3	2	50	50	2
M4	2	75	25	2

Tableau 2.2. Désignation des liants modifiés par l'association (DP-EVA)

Mélanges	Teneurs totales des modifiants (DP-EVA) (%)	Déchet plastique alimentaire (%)	EVA (%)	Temps de malaxage (heures)
M1	5	50	50	2
M2	5	75	25	2
M3	3	50	50	2
M4	3	75	25	2

Il est adopté les conditions de modification suivantes :

- une vitesse de rotation de 600 tr/mn,
- une température de $180^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$,
- un temps de malaxage de 2 heures

Les résultats montrent que :

- La modification du bitume par le déchet plastique alimentaire ou l'association (EVA-DP) ou l'association (EVA - NBR) à améliorer les propriétés du bitume tel que la pénétrabilité, la susceptibilité thermique, le point de ramollissement et la ductilité.
- Les bitumes modifiés par 3% de déchet plastique, 5% de l'association [EVA-DP] et 5% de l'association [EVA-NBR] présentent une meilleure amélioration.
- Les bitumes modifiés par le déchet plastique alimentaire ou l'association [EVA-DP] ou l'association [EVA – NBR] résistent au vieillissement (à court terme) mieux que le bitume pur.

La modification des bitumes améliore le comportement des enrobés bitumineux. Cette amélioration se traduit par :

- Une augmentation de la stabilité, la compacité, et le quotient Marshall,
- Une diminution du fluage Marshall,
- Une augmentation de la résistance à la traction indirect des enrobés bitumineux.

2.10. Conclusion

Nous avons donné dans cette étude bibliographique, quelques résultats de la littérature sur les liants modifiés par les polymères et le vieillissement.

Nous nous sommes donc limités dans cette synthèse à des résultats utilisable pour :

- La connaissance du bitume et des agents modifiés,
- La compatibilité entre le bitume et le polymère,
- Le mécanisme de modification actuellement assez bien connu,
- Mécanisme de vieillissement.

Partie II

Etude expérimentale

Dans cette partie nous allons présenter la campagne d'essais effectuée sur le bitume, en associant un polymère (EVA - NBR-déchet plastique alimentaire) afin de suivre son influence sur le comportement rhéologique et le vieillissement des liants modifiés.

Nous aborderons l'étude du vieillissement sur les aspects : vieillissement à court terme (RTFOT) et à long terme (PAV)

Ce travail fait suite aux travaux réalisés par Bensaada [53] sur étude de l'influence de l'association [EVA-NBR] et l'association [EVA-DP] sur le bitume et le vieillissement du bitume à court terme (RTFOT). A l'issu des études, les optimums sont obtenus pour les teneurs de 5% de l'association [EVA-DP] et 5% de l'association [EVA-NBR]. A la base de ces résultats, on fixe le pourcentage de 5% de l'association (EVA - NBR-déchet plastique alimentaire) comme un pourcentage optimal dans cette étude. Les pourcentages seront de [50% EVA-25% NBR -25% DP], [25% EVA-50% NBR-25% DP] et [25% EVA-50% NBR-50% DP]. Ces pourcentages ont été choisis pour valoriser le déchet industriel NBR et le déchet plastique, l'EVA étant une matière première.

Donc dans cette partie des essais de caractérisation du bitume sont réalisés : pénétrabilité à l'aiguille, bille anneau et ductilité. Des tests de simulations du vieillissement à court terme (RTFOT) et à long terme (PAV) ont été conduits sur les différents mélanges de bitumes modifiés et purs.

3.1. Bitume

L'étude expérimentale a été effectuée sur un bitume de classe 35/50. Il provient de l'entreprise des travaux publics EVSM de Réghaia.

3.1.1. Caractérisation du bitume

Pour le caractériser nous avons effectué les analyses suivantes au laboratoire de routes et aérodromes de la faculté de génie civil / USTHB :

- Essai de pénétrabilité à l'aiguille (NF EN1426).
- Essai de ramollissement bille et anneau (NF EN1427).
- Essai de ductilité (NF EN 13589).
- Essai RTFOT "Rolling Thin Film Oven Test" (NF EN 12607-1).

Le tableau 3.1 résume les résultats des différents essais effectués sur le bitume.

Tableau 3.1. Caractéristiques du bitume.

Type d'essai		Résultat	Spécification
Pénétrabilité à 25 °C (1/10 mm)		44	35 - 50
Température bille et anneau « TBA » (°C)		51.2	50-58
Indice de pénétrabilité « IP » (méthode LCPC)		0.53	$-3 \leq IP \leq +7$
Ductilité (cm)		>100	100
Après RTFOT	Pénétrabilité à 25 °C (1/10 mm)	31	
	TBA (°C)	58	> 52
	Pénétrabilité restante [%]	70.45	> 53
	ΔTBA [°C]	6.8	< 8

Le tableau 3.1 montre que les caractéristiques de ce bitume coïncident avec les spécifications préconisées dans la norme NF EN 12591 « Spécifications des bitumes routiers » pour la classe 35/50.

3.1.2. La susceptibilité thermique :

La susceptibilité thermique du bitume pur est estimée à partir de la variation de la pénétrabilité en fonction de la température selon la méthode LCPC. Pour cela, on effectue des essais de pénétrabilité à différentes températures afin de voir son évolution. Pour le bitume de grade 35/50 les températures sont : 20 ; 25 ; 30 ; 35 et 40°C.

Les résultats des essais de pénétrabilité en fonction de la température sont représentés dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2. Susceptibilité thermique

T (°C)	20	25	30	35	40
Pénétrabilité 1/10 mm	28	44	71	107	157
Log Pen	1.45	1.64	1.85	2.03	2.19

Les résultats des essais de pénétrabilité en fonction de la température sont représentés dans la figure 3.1.

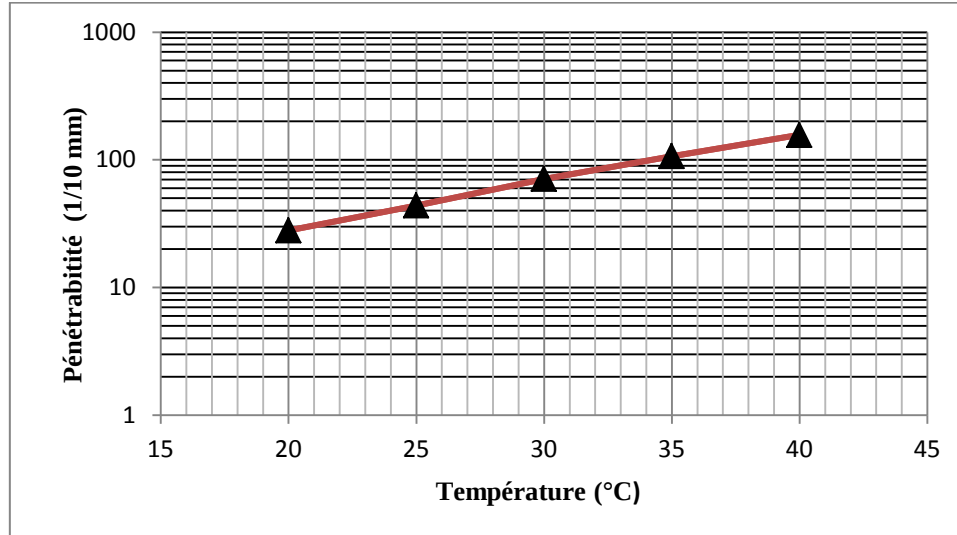


Figure 3.1. Variation de la pénétrabilité des bitumes purs en fonction de la température.

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

Cette courbe montre qu'il existe une variation linéaire en coordonnées semi logarithmiques entre la pénétrabilité et la température. La susceptibilité thermique du bitume est estimée par le coefficient A qui représente la pente de la droite.

$$\text{Log [Pen]} = AT + C \quad (18)$$

Avec A : est la susceptibilité thermique

C : une constante

La susceptibilité thermique des bitumes routiers est représentée par un indice appelé indice de pénétrabilité (IP) exprimé par les relations suivantes :

$$50A = \frac{20 - IP}{10 + IP} \quad (19)$$

Où:

$$IP = \frac{20 - 500A}{1 + 50A} \quad (20)$$

Selon la susceptibilité à la température, l'indice de pénétrabilité IP va de -3.0 (bitumes très susceptible) jusqu'à environ +7.0 (bitumes moins susceptible).

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

Les valeurs de A et d'IP peuvent être calculées à partir des mesures de pénétration à deux températures T1 et T2, à l'aide de la relation suivant :

$$A = \frac{\log[\text{pen}(T2)] - \log[\text{pen}(T1)]}{T2 - T1} \quad (21)$$

Après le calcul on a :

$$A = 0.037 \quad \text{et} \quad IP = 0.53 \quad -3 \leq IP \leq +7 \quad 0.15 \leq A \leq 0.06$$

Donc le bitume utilisé dans la présente étude est un bitume routier car la valeur de « A » qui est égale à 0.037 est comprise entre 0,015 et 0,06 (intervalle des bitumes routiers) et IP est égale 0.53 est comprise entre -3 et +7. Le bitume n'est pas susceptible à la température.

3.1.3. Influence du temps de malaxage sur les caractéristiques du bitume pur

L'objectif de cette partie est d'étudier l'influence du temps de malaxage sur les caractéristiques classiques du bitume pur.

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

Nous avons adopté les paramètres de malaxage suivants :

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

Les caractéristiques classiques du bitume pour les différentes durées de malaxage sont résumées dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3. Caractéristiques du bitume.

Essais \ Temps de malaxage	0h	1h	2h	3h
Pénétrabilité à 25°C (1/10 mm)	44	42.6	39.6	33
Température bille et anneau «TBA» ($^\circ\text{C}$)	51.2	52	53.3	57
Ductilité à 25°C (cm)	134	123	113	78

La figure ci-dessous représente l'influence du temps de malaxage sur les caractéristiques classiques du bitume pur.

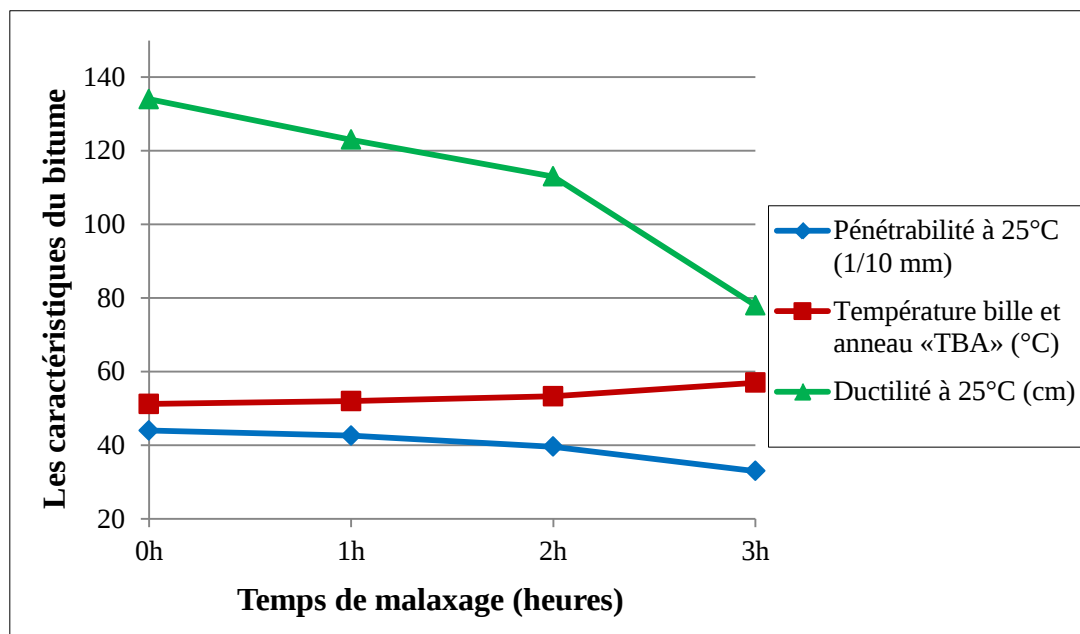


Fig 3.2. Influence du temps de malaxage sur les caractéristiques du bitume pur.

On remarque que la consistance du bitume augmente avec l'augmentation de la durée de malaxage (amélioration des caractéristiques du bitume). A partir de 2 heures le bitume durci et perd sa ductilité.

3.2. Polymères

Dans nos travaux nous avons utilisé un polymère de synthèse acétate de vinyle et d'éthylène (EVA), un déchet industriel en forme de poudrette de caoutchouc (NBR) et un déchet plastique alimentaire (DP). La figure 3.6 montre leurs aspects.

3.2.1. L'EVA

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

En technique routière, il est conseillé d'utiliser des copolymères dont la teneur en acétate de vinyle varie entre 18 et 33.

Il se présente sous forme de lentilles blanchâtres (2 à 5 mm de diamètre). La densité de l'acétate de vinyle et d'éthylène (EVA) est de 0.93. La figure 3.3 montre son aspect.



Figure 3.3. Les granulâtes d'EVA

3.2.2. Poudrette de caoutchouc NBR

C'est un déchet industriel de couleur noirâtre sous forme de poudrette provenant de la société d'application d'élastomère (SAEL). La figure 3.4 montre son aspect. L'analyse granulométrique montre que la poudrette de caoutchouc est constituée de grains inférieurs à 0,8 mm. La densité de la poudrette est de 1,22 mesurée par rapport à l'éthanol dont la densité est de 0,79.



Figure 3.4. Le déchet sous forme de poudrette (NBR)

3.2.3. Le déchet plastique alimentaire (DP)

Les déchets en matière plastique rougeâtre utilisés pour ce travail sont principalement constitués de polyéthylène téréphtalate, et sont obtenus à partir de sacs d'emballage de la pomme de terre.

La procédure de préparation du déchet plastique est de couper les sacs plastiques en petits morceaux de longueurs variant de 2 à 5 mm. La densité du déchet plastique alimentaire est de 0,89 mesurée par rapport à l'éthanol dont la densité est de 0,79.

La figure 3.5 montre le déchet plastique alimentaire utilisé dans cette étude.



Figure 3.5. Déchet plastique alimentaire FGC/USTHB

Dans notre étude on modifie le bitume par l'association (EVA-NBR-Déchet plastique alimentaire). La figure 3.6 représente les additifs EVA, NBR et Déchet plastique alimentaire.

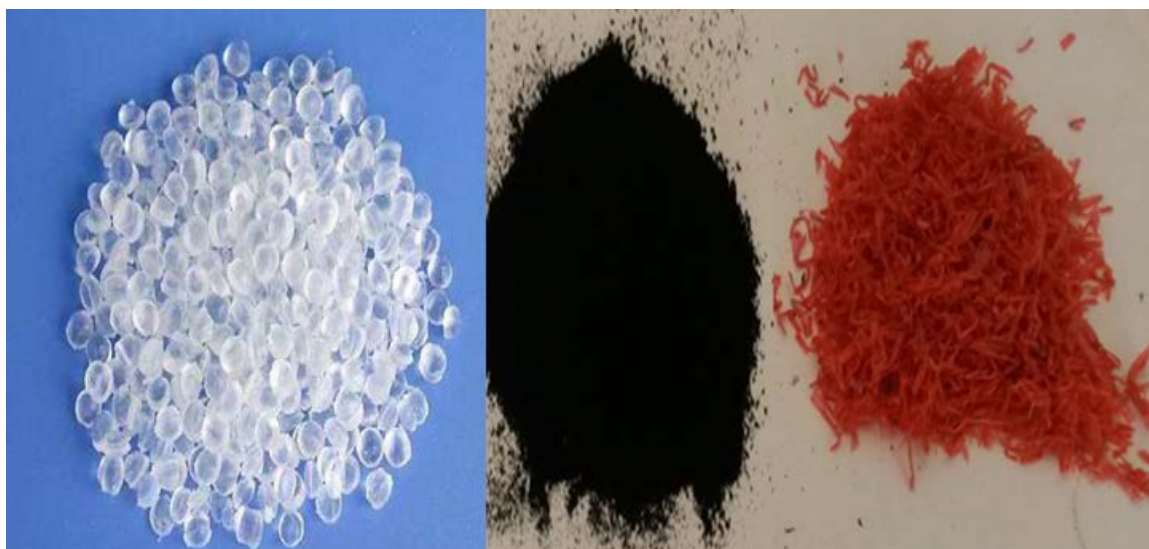


Figure 3.6. Les additifs EVA, NBR et Déchet plastique alimentaire

3.3. La modification

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

Dans notre étude la modification a été réalisée au laboratoire de routes et aérodromes de la faculté de génie civil de l'USTHB. Nous avons pour cela utilisé, un appareillage se composant (figure 3.7):

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

Nous avons adopté les paramètres de modification suivants :

- Un volume de bitume d'environ 500g.
- Une température du mélange de $180 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Une vitesse de malaxage : $600 \text{ tr/min} \pm 10 \text{ tr/min}$.
- Une durée de malaxage de 1, 2 et 3 heures.

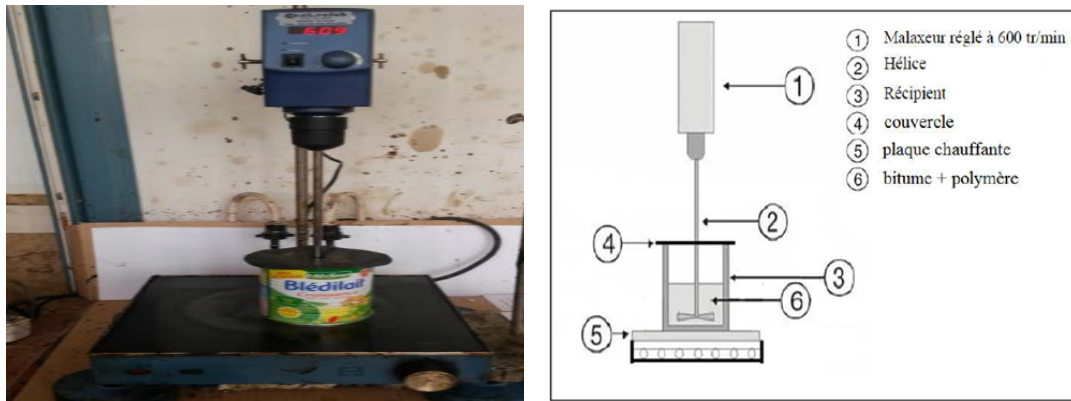


Fig 3.7. Appareillage de modification

Dans notre étude on modifie le bitume par l'association (EVA-NBR-Déchet plastique alimentaire). Nous avons réalisé les essais suivants :

- Essai de pénétrabilité à 25°C (NF EN1426) ;
- Essai de température de ramollissement bille et anneau (NF EN1427);
- Essai de ductilité à 25°C (NF EN 13589).

Le tableau 3.4 représente les différents mélanges de cette association :

Tableau 3.4. Représentations des mélanges.

	Teneurs totales des modifiants (EVA+NBR+DP)	% EVA	% NBR	% Déchet Plastique alimentaire (DP)
Mélange 0 (M0)	0 %	0 %	0 %	0 %
Mélange 1 (M1)	5 %	50 %	25 %	25 %
Mélange 2 (M2)	5 %	25 %	25 %	50 %
Mélange 3 (M3)	5 %	25 %	50 %	25 %

3.4. Mode opératoire de la modification

- ❖ Le bitume est chauffé dans le récipient sur la plaque chauffante jusqu'à atteindre une température comprise entre 175 et 185 °C (La température est atteinte dans le bitume au bout de 60 min). le récipient est équipé d'un couvercle hermétique pour empêcher l'évaporation des huiles lors du chauffage.
- ❖ A cette température, le polymère à la dose choisie est introduit et l'agitateur à hélice mis en marche à la vitesse de 600 tr/min.
- ❖ Durant toute la manipulation, la température doit être maintenue dans l'intervalle 175 et 185 °C en réglant la plaque chauffante, la vérification de la température s'effectue régulièrement à l'aide du thermomètre digital.
- ❖ Arrêter le malaxeur après le temps de malaxage fixé (1h, 2h, 3h).
- ❖ Le déversement est alors effectué rapidement dans les coupelles en laiton pour l'essai de pénétrabilité, les anneaux pour la TBA et dans le moule du ductilimètre.

3.5. Etudes expérimentales sur les liants modifiés

3.5.1. L'influence de l'association (EVA – NBR - déchet plastique alimentaire) sur la Pénétrabilité

Les résultats de la pénétrabilité pour les différents mélanges et pour chaque temps de malaxage sont présentés dans le tableau 3.5 et schématisé par la figure 3.8.

Tableau 3.5 .Pénétrabilité à 25°C pour les différents mélanges.

Mélanges \ Temps de malaxage	1h	2h	3h
M0 (Bitume pur)	42.6	39.6	33
M1 (5% [50% EVA+25% NBR+25% DP])	33.6	31.6	25
M2 (5% [25% EVA+25% NBR+50% DP])	35.3	31	27
M3 (5% [25% EVA+50% NBR+25% DP])	35.6	35	32

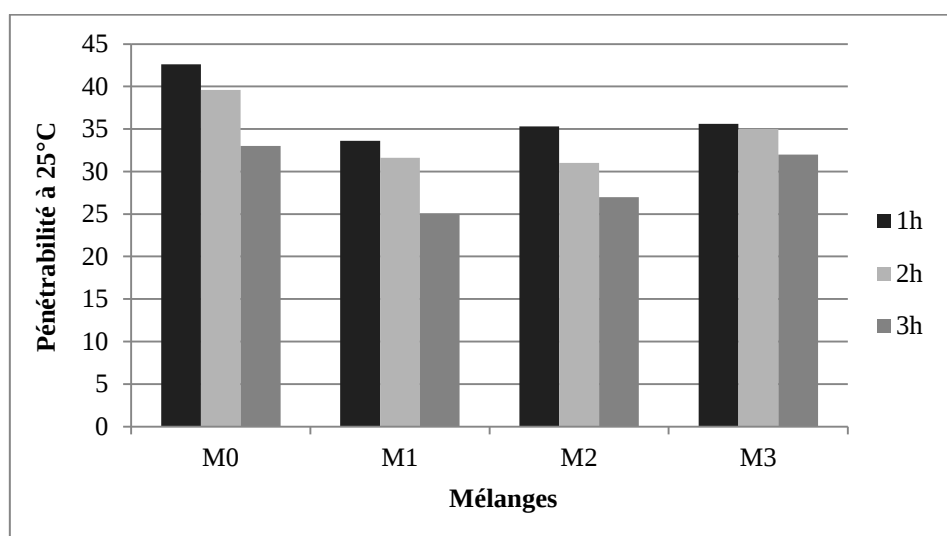


Fig 3.8. La pénétrabilité pour les différents mélanges.

La variation de pénétrabilité est calculée par la formule suivante :

$$\text{La variation de péné (\%)} = \frac{\text{péné (bitume pur)} - \text{péné (bitume modifié)}}{\text{péné (bitume pur)}} * 100 \quad (22)$$

Les résultats de la variation de pénétrabilité pour les différents mélanges sont présentés dans le tableau 3.6 et schématisé par la figure 3.9.

Tableau 3.6. Variation de la pénétrabilité pour les différents mélanges.

Mélanges \ Temps de malaxage	1h	2h	3h
M1 (5% [50% EVA+25% NBR+25% DP])	21.26	20.20	24.24
M2 (5% [25% EVA+25% NBR+50% DP])	17.14	16.66	18.18
M3 (5% [25% EVA+50% NBR+25% DP])	16.43	7.57	3.03

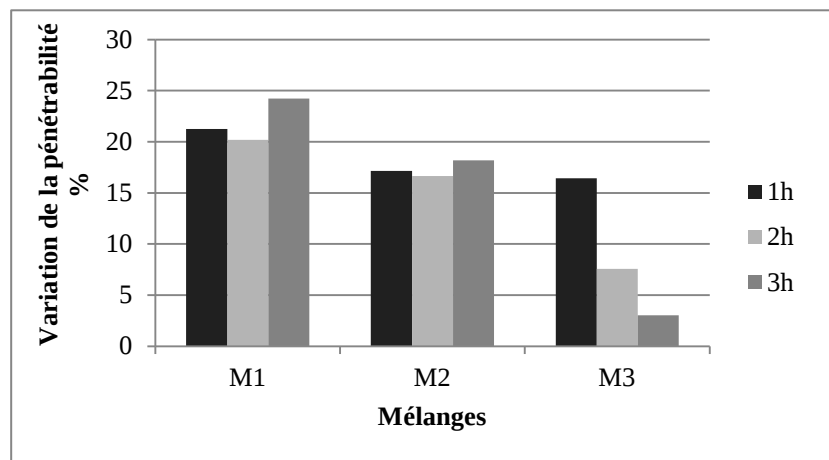


Fig 3.9. Variation de la pénétrabilité pour les différents mélanges

Les figures 3.8 et 3.9 montrent que :

- La pénétrabilité des bitumes modifiés à différents mélanges est diminuée par rapport au bitume de base pour toutes les durées de malaxage (amélioration de la résistance au cisaillement).
- Les pénétrabilités obtenues avec le mélange M1 [50% EVA+ 25%NBR+ 25%DP] sont les plus importantes pour toutes les durées de malaxage. La pénétrabilité obtenue avec le mélange M1 (3h) est la plus importante.
- Les gains en pénétrabilité obtenus avec le mélange M1 sont les plus grands.

3.5.1.1. Influence du temps de malaxage sur la pénétrabilité

Les figures 3.10 et 3.11 représentent la pénétrabilité et sa variation en fonction de la durée de malaxage pour chaque mélange.

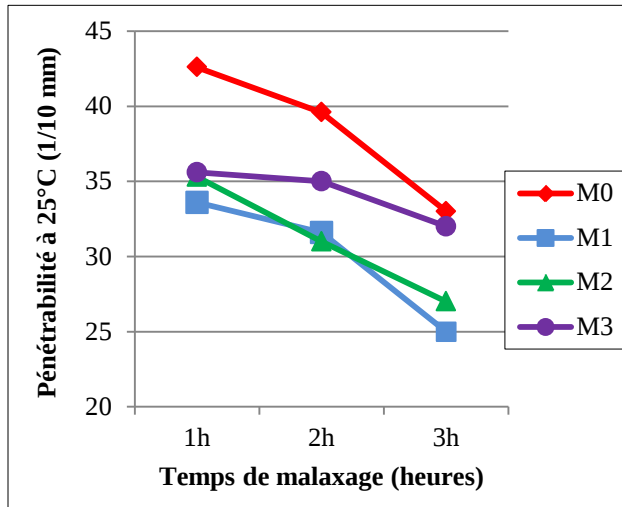


Fig 3.10. Influence du temps de malaxage sur la pénétrabilité

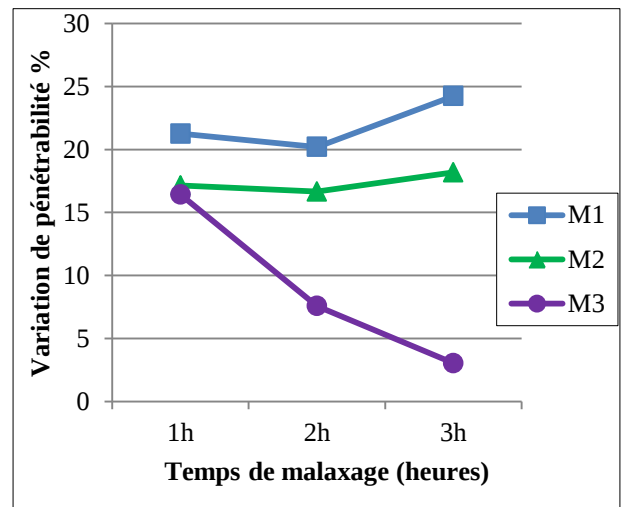


Fig 3.11. Influence du temps de malaxage sur la variation de pénétrabilité

On remarque que :

La pénétrabilité des bitumes modifiés à différents mélanges diminue en fonction du temps de malaxage, par rapport au bitume de base. La pénétrabilité la plus petite est obtenue par le mélange M1 quelque soit le temps de malaxage.

3.5.2. L'influence de l'association (EVA-NBR-déchet plastique alimentaire) sur la température bille anneau (TBA)

Les résultats de la température bille anneau pour les différents mélanges et pour chaque temps de malaxage sont présentés dans le tableau 3.7 et schématisé par la figure 3.12.

Tableau 3.7. TBA pour les différents mélanges

Mélanges \ Temps de malaxage	1h	2h	3h
M0 (Bitume pur)	52	53.3	57
M1 (5% [50% EVA+25% NBR+25% DP])	62.1	65.7	70.3
M2 (5% [25% EVA+25% NBR+50% DP])	60	62	65
M3 (5% [25% EVA+50% NBR+25% DP])	57.3	57.6	60.1

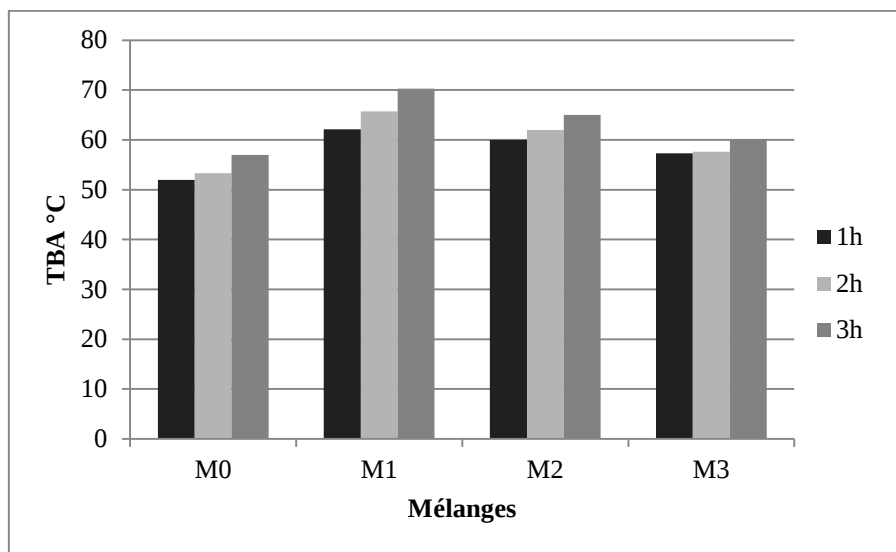


Fig 3.12. TBA pour les différents mélanges.

La variation de TBA est calculée par la formule suivante :

$$\text{La variation de TBA (\%)} = \frac{\text{TBA (bitume pur)} - \text{TBA (bitume modifié)}}{\text{TBA (bitume pur)}} * 100 \quad (23)$$

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

Tableau 3.8. Variation de la TBA pour les différents mélanges

Mélanges \ Temps de malaxage	1h	2h	3h
M1 (5% [50% EVA+25% NBR+25% DP])	-18,18	-23,26	-23,33
M2 (5% [25% EVA+25% NBR+50% DP])	-15,38	-16,32	-14,03
M3 (5% [25% EVA+50% NBR+25% DP])	-10,20	-8,07	-5,44

La variation de la TBA pour les différents mélanges et pour chaque temps de malaxage est présentée à la figure 3.13.

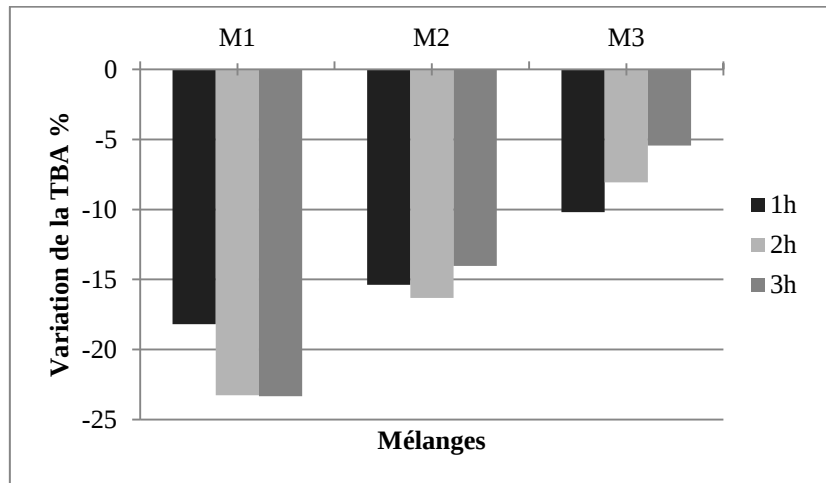


Fig 4.13. Variation de la TBA pour les différents mélanges

Les figures 3.12 et 3.13 montrent que :

- L'incorporation de l'association (EVA-NBR-Déchet plastique alimentaire) dans le bitume, influe sur la température de ramollissement qui augmente avec la durée de malaxage (amélioration de la résistance à la déformation permanente (orniérage))
- Les TBA obtenues avec le mélange M1 sont les plus importantes.
- Les gains en température bille et anneau obtenus avec le mélange M1 sont les plus importants.

3.5.2.1. Influence du temps de malaxage sur TBA

Les figures 3.14 et 3.15 représentent la TBA et sa variation en fonction de la durée de malaxage pour chaque mélange.

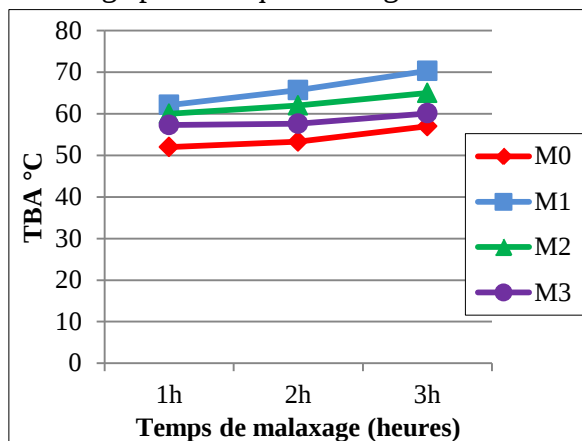


Fig 3.14. Influence du temps de malaxage sur la TBA

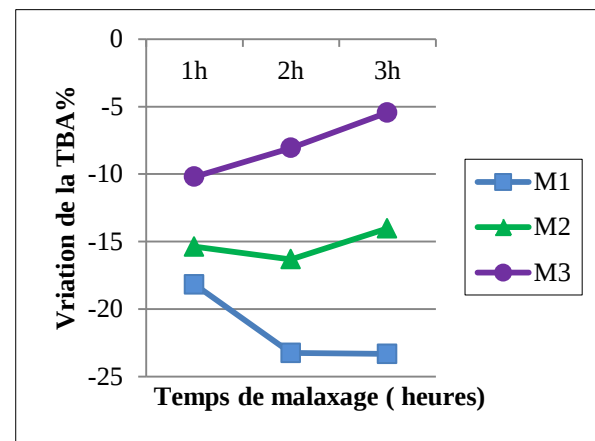


Fig 3.15. Influence du temps de malaxage sur la variation de TBA

On remarque que :

- La TBA des bitumes (purs et modifiés à différents mélanges) augmente en fonction du temps de malaxage.

3.5.3. L'influence de l'association (EVA-NBR-déchet plastique alimentaire) sur la ductilité

Les résultats de la ductilité pour les différents mélanges et pour chaque temps de malaxage sont donnés dans le tableau 3.9 et schématisé par la figure 3.16.

Tableau 3.9. La ductilité (cm) pour les différents mélanges.

Mélanges \ Temps de malaxage	1h	2h	3h
M0 (Bitume pur)	123	113	78
M1 (5% [50% EVA+25% NBR+25% DP])	15	12	10
M2 (5% [25% EVA+25% NBR+50% DP])	15	13	11
M3 (5% [25% EVA+50% NBR+25% DP])	16	11	9

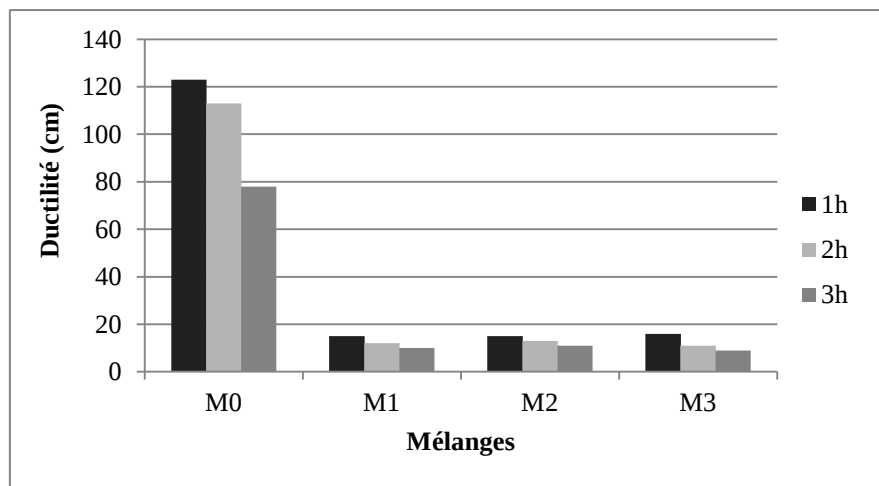


Fig 3.16. La ductilité (cm) pour les différents mélanges

La variation de ductilité est calculée par la formule suivante :

$$\text{La variation de ductilité (\%)} = \frac{\text{ductilité (bitume pur)} - \text{ductilité (bitume modifié)}}{\text{ductilité (bitume pur)}} * 100 \quad (24)$$

Les résultats de la variation de ductilité des bitumes modifiés par rapport au bitume pur pour les différents mélanges et pour chaque temps de malaxage sont présentés dans le tableau 3.10 et schématisé par la figure 3.17

Tableau 3.10. Variation de la ductilité à 25°C pour les différents mélanges

Mélanges \ Temps de malaxage	1h	2h	3h
M1 (5% [50% EVA+25% NBR+25% DP])	87.80	89.38	87.17
M2 (5% [25% EVA+25% NBR+50% DP])	87.80	88.50	85.90
M3 (5% [25% EVA+50% NBR+25% DP])	86.99	90.26	88.46

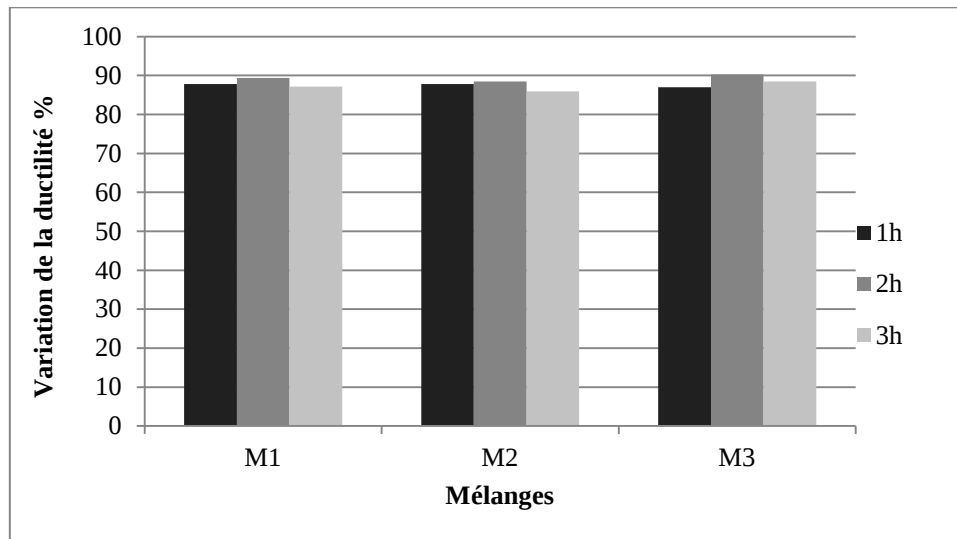


Fig 3.17. Variation de la ductilité pour les différents mélanges.

Les figures 3.16 et 3.17 montrent que :

- La ductilité décroît pour les différents mélanges par rapport au bitume de base ce qui se traduit par une augmentation de la résistance à la traction.
- La ductilité du bitume modifié est quasi stable quelque soit les teneurs des modifiants.

3.5.3.1. Influence du temps de malaxage sur la ductilité

Les figures 3.18 et 3.19 représentent la ductilité à 25°C et sa variation en fonction de la durée de malaxage.

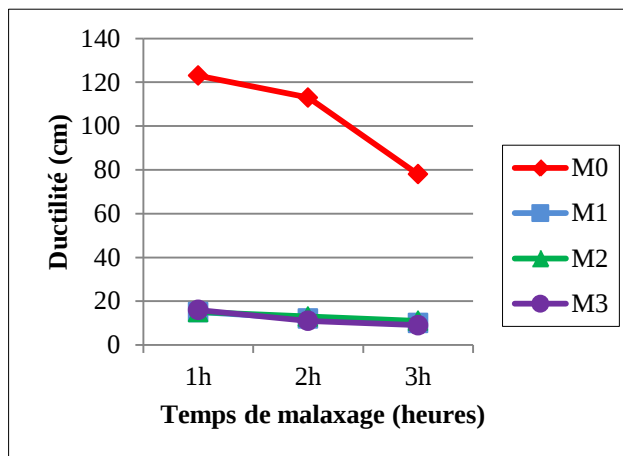


Fig 3.18. Influence du temps de malaxage sur la ductilité.

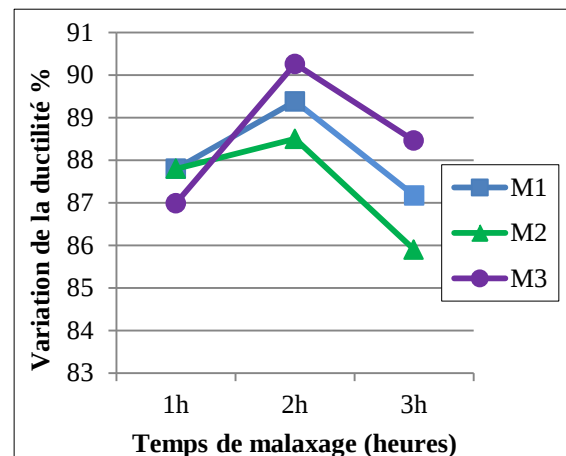


Fig 3.19. Influence du temps de malaxage sur la variation de ductilité.

Les figures 3.18 et 3.19 montrent que :

- La ductilité du bitume pur décroît en fonction du temps de malaxage.
- La ductilité du bitume modifié est quasi stable pour tous les mélanges.
- La variation de ductilité est quasi stable en fonction du temps de malaxage.

3.6. Stabilité au stockage

La stabilité des bitumes consiste à remplir des tubes en aluminium (hauteur 15cm, diamètre 4cm) avec du bitume, puis placer ces derniers verticalement dans un four à 165°C pour une durée de 48 heures. Après refroidissement, le tube est divisé en trois parties égales; le point de ramollissement est déterminé pour les parties du haut et du bas.

Les résultats de la stabilité au stockage de mélange M1 et pour chaque temps de malaxage sont représentés dans le tableau 3.11.

Tableau 3.11. Les résultats de la stabilité au stockage des bitumes modifiés (M1, 600 tr/min)

	Point de ramollissement °C			Commentaires	
	Haut	Bas	Différence		
M1, 600 tr/min, 2h	71.5	63.1	8.4	>2.5	instable
M1, 600 tr/min, 3h	72.6	64.5	8.1	>2.5	instable

On remarque que le bitume modifié par l'association (EVA- NBR-DP) n'est pas stable au stockage

3.7. Conclusion

- L'incorporation de l'association (EVA – NBR - Déchet plastique alimentaire) dans le bitume augmente la consistance de ce dernier.
- La consistance des bitumes (purs et modifiés) augmente avec l'augmentation de la durée de malaxage (amélioration des caractéristiques du bitume).
- Les mélanges M1 et M2 améliorent la consistance mieux que les autres associations, M1 étant le plus consistant.
- Le bitume modifié par l'association (EVA - NBR - DP) n'est pas stable au stockage.

4 .Etude des bitumes modifiés au vieillissement

Nous avons testé dans notre étude le vieillissement des bitumes modifiés par l'association (EVA-NBR-déchet plastique alimentaire) avec l'essai (RTFOT et PAV).

4.1. Pénétrabilité

Les résultats de la pénétrabilité pour les différents mélanges après leur passage au RTFOT et au PAV sont donnés par le tableau 4.1 et schématisé par la figure 4.1.

Tableau 4.1. Pénétrabilité à 25°C avant et après vieillissement pour les différents mélanges

Pénétrabilité (1/10mm)	1h				2h				3h			
	M0	M1	M2	M3	M0	M1	M2	M3	M0	M1	M2	M3
Avant	42.6	33.6	35.3	35.6	39.6	31.6	31	35	33	25	27	32
RTFOT	30	24	24.6	25.3	26.8	22	22.3	24.6	23	18	21	23
Pénétrabilité restant (%)	70.42	71.43	69.68	71.07	67.67	69.62	71.94	70.28	69.69	72	77.78	71.87
PAV	23	17	18	19	22	16	16.6	18.6	22	15.3	16	17

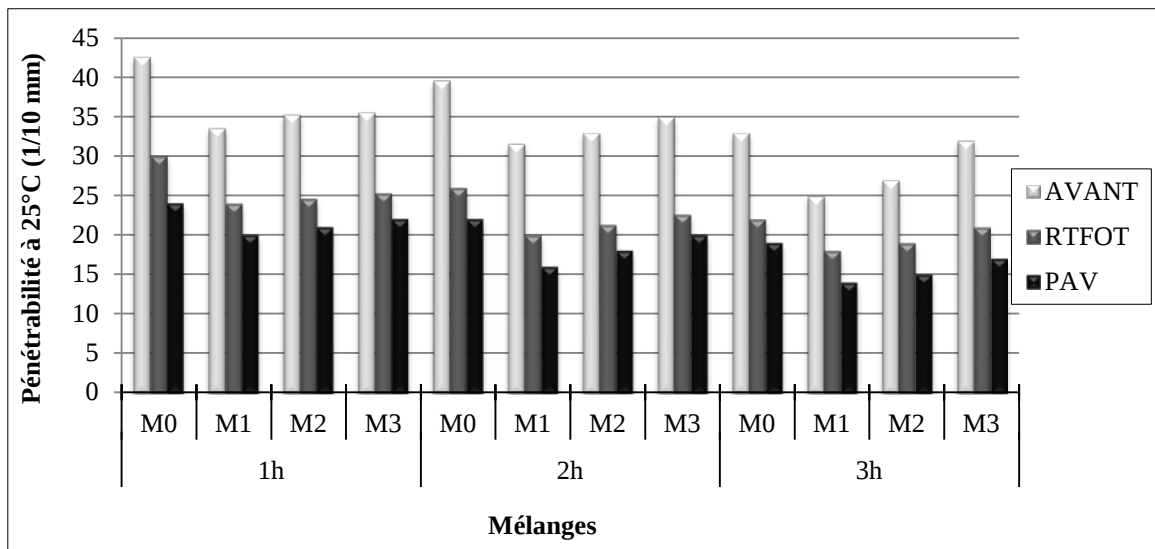


Figure 41. Pénétrabilité à 25°C avant et après vieillissement pour les différents mélanges

Interprétation des résultats

La figure 4.1 montre que :

- La pénétrabilité des bitumes (purs et modifiés) diminue après leur passage au RTFOT et au PAV (durcissement du bitume).
- Les mélanges M1 et M2 résistent au vieillissement mieux que les autres associations, M1 étant le plus résistant.
- La pénétrabilité restante des bitumes modifiés concorde avec les spécifications préconisées pour le bitume de classe 35/50 (> 53).
- La pénétrabilité du bitume de base diminue après RTFOT pour 1h (42.6 à 30) et 2h (39.6 à 28). ces dernières valeurs sont situées dans le domaine de spécification des bitumes de classe 20/30. Le vieillissement du bitume conduit donc à un changement de classe.

4.2. Influence du temps de malaxage sur la pénétrabilité

La figure 4.2 représente la pénétrabilité après vieillissement en fonction de la durée de malaxage pour chaque mélange.

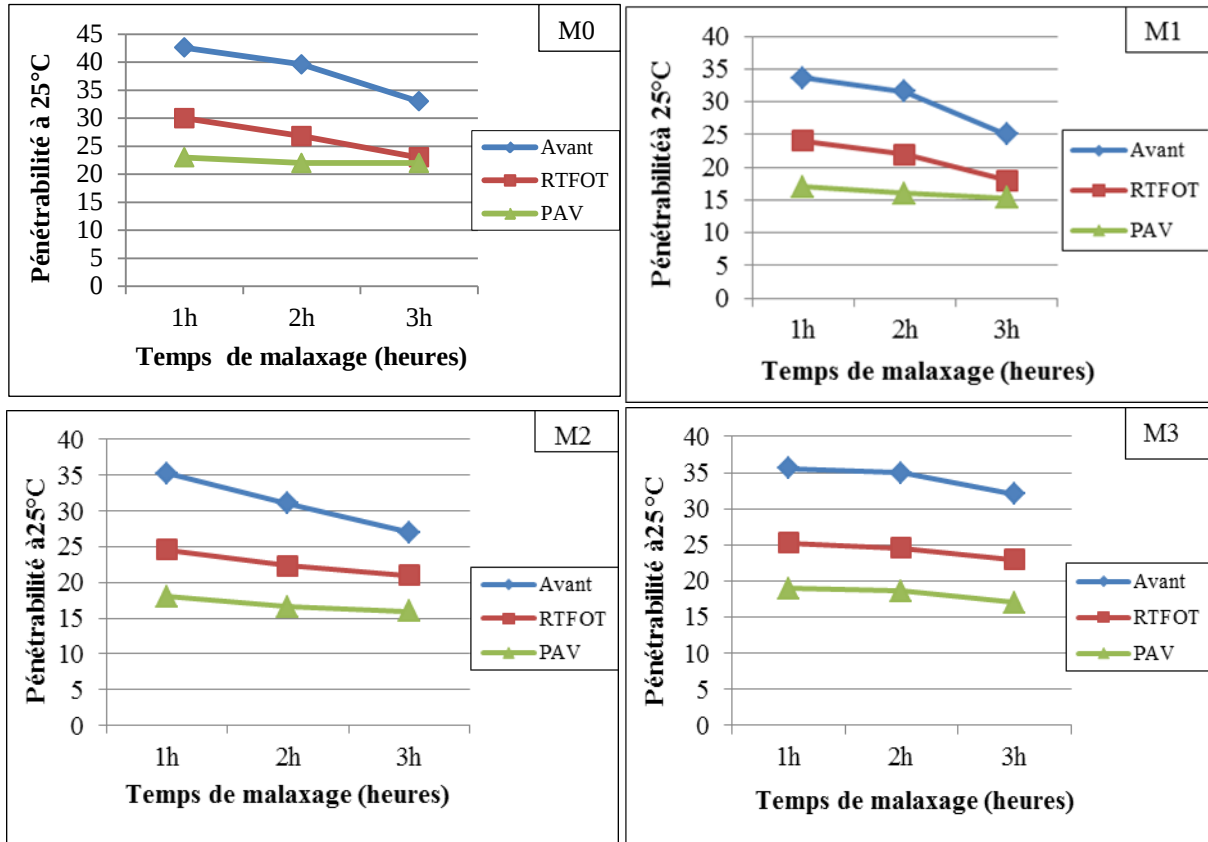


Figure 4.2. Influence temps de malaxage sur la pénétrabilité après vieillissement

Interprétation des résultats

La figure 4.2 montre que :

- Après RTFOT, la pénétrabilité des bitumes (purs et modifiés) diminue en fonction du temps de malaxage.
- Après PAV, pour chaque mélange la pénétrabilité est quasi stable en fonction du temps de malaxage (M0, 23 à 22) et (M1, 17 à 15.3) et (M2, 18 à 16).
- La résistance au vieillissement du bitume augmente avec l'augmentation de la durée de malaxage.

4.3. Température bille et anneau (TBA)

Les résultats de la TBA pour les différents mélanges après leur passage au RTFOT et au PAV sont donnés par le tableau 4.2 et schématisé par la figure 4.3.

Tableau 4.2. TBA (°C) avant et après vieillissement pour les différents mélanges

TBA (°C)	1h				2h				3h			
	M0	M1	M2	M3	M0	M1	M2	M3	M0	M1	M2	M3
Avant	52	62.1	60	57.3	53.3	65.7	62	57.6	57	70.3	65	60.1
RTFOT	59.6	69.5	66	63.6	61	72.2	68.2	64.3	64.6	76.3	69.3	66
ΔTBA	7.6	7.4	6	6.3	7.7	6.5	6.2	6.7	7.6	6	4.3	5.9
PAV	65.3	80.7	79.8	73	69.8	82.8	83.6	73.9	67.8	80.8	83.7	74.8

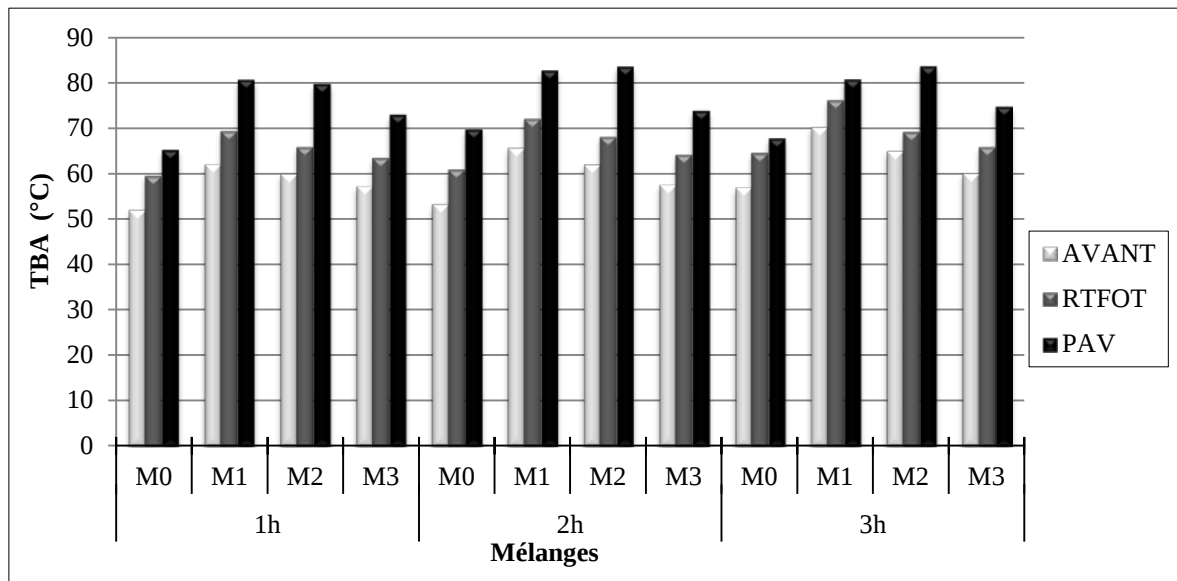


Figure 4.3. TBA (°C) avant et après vieillissement pour les différents mélanges

Interprétation des résultats

La figure 4.3 montre que :

- La TBA des bitumes (purs et modifiés) augmente après leur passage au RTFOT et au PAV (vieillissement du bitume).
- la TBA des bitumes modifiés à différents mélanges augmente par rapport au bitume de base, après leur passage au RTFOT et au PAV.
- Les variations de la température bille et anneau (ΔTBA) de bitume modifié sont inférieures à la variation donnée par le bitume pur et toujours inférieure 8.
- Les variations de la température bille et anneau (ΔTBA) du mélange M2 [25% EVA+ 25%NBR+ 50%DP] sont les plus petites.
- Après vieillissement, les TBA obtenues avec les mélanges M1 et M2 sont les plus importantes.

4.4. Influence du temps de malaxage sur la TBA

La figure 4.4 représente la TBA après vieillissement en fonction de la durée de malaxage pour chaque mélange.

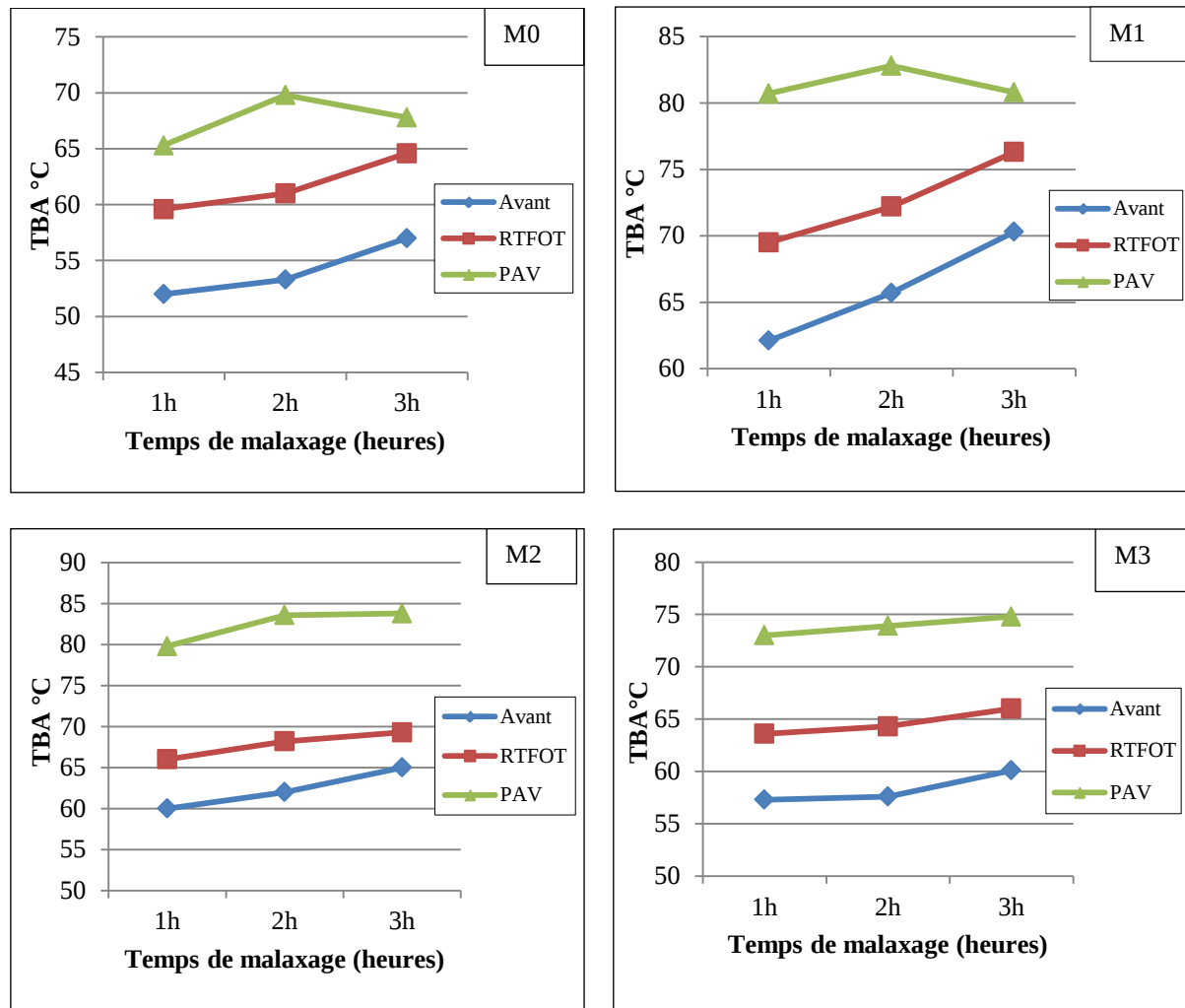


Figure 4.4. Influence temps de malaxage sur la TBA après vieillissement

Interprétation des résultats

La figure 4.4 montre que :

- la TBA après le passage des bitumes (purs et modifiés) au RTFOT et au PAV augmente en fonction du temps de malaxage.

4.5. Ductilité

Les résultats de la ductilité pour les différents mélanges après leur passage au RTFOT sont donnés par le tableau 4.3 schématisé par la figure 4.5.

Tableau 4.3. Ductilité à 25°C (cm) avant et après vieillissement pour les différents mélanges

Ductilité (cm)	M0			M1			M2			M3		
	1h	2h	3h	1h	2h	3h	1h	2h	3h	1h	2h	3h
Avant	123	113	78	15	12	10	15	13	11	16	11	9
RTFOT	31	22	13	10	9	8	9	8	6	10	8	6

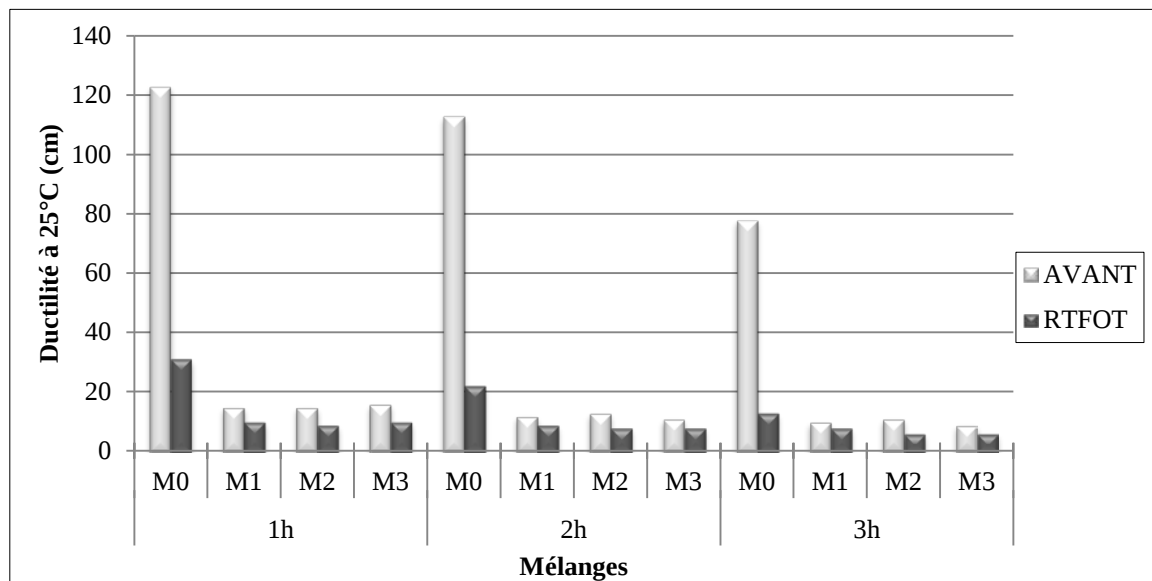


Figure 4.5. Ductilité à 25°C (cm) avant et après vieillissement pour les différents mélanges

Interprétation des résultats

La figure 4.5 montre que :

La ductilité des bitumes (purs et modifiés) diminue après le vieillissement (RTFOT). On déduit que le bitume vieilli devient plus fragile.

4.6. Influence du temps de malaxage sur la ductilité

La figure 4.6 représente la ductilité après RTFOT en fonction de la durée de malaxage pour chaque mélange.

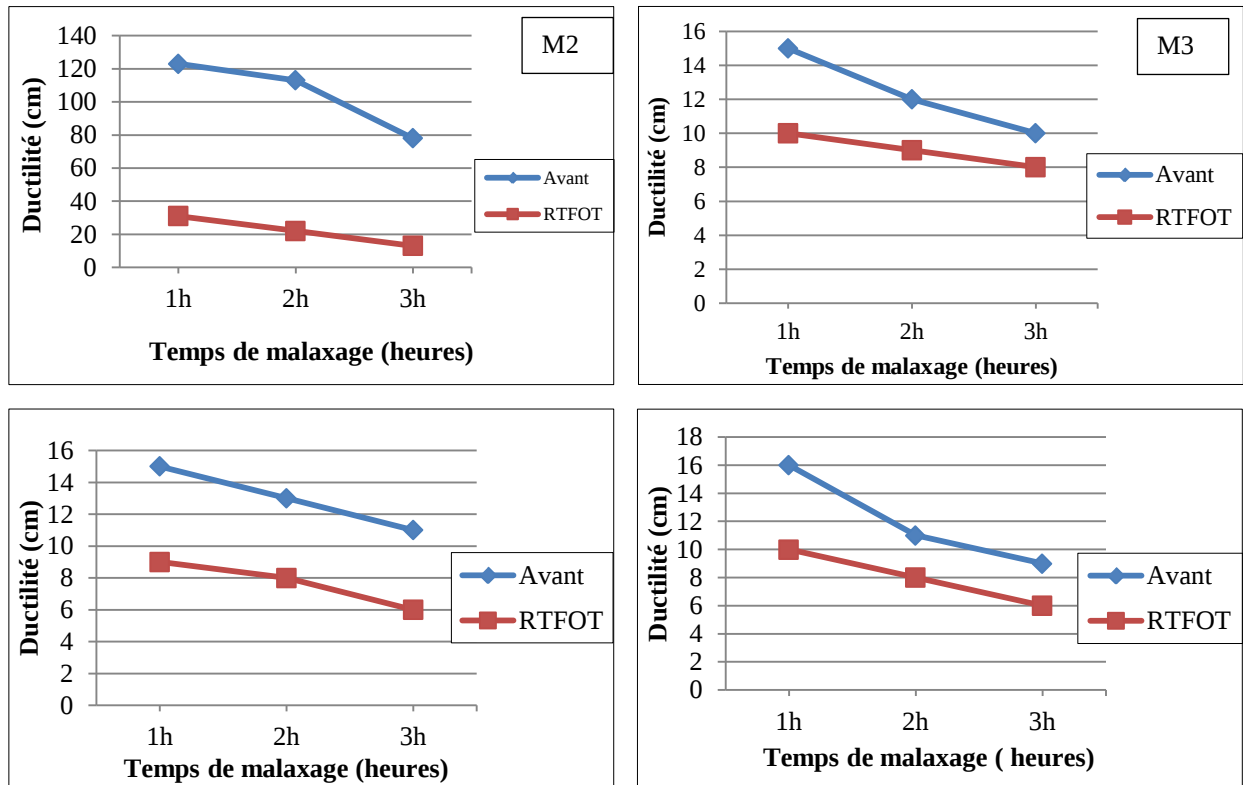


Figure 4.6. Influence temps de malaxage sur la ductilité après RTFOT

Interprétation des résultats

La figure 4.6 montre que :

Après RTFOT, La ductilité des bitumes purs diminue en fonction du temps de malaxage, et la ductilité des bitumes modifiés sont quasi stable.

4.7. Influence de la vitesse de malaxage sur la consistance (avant et après vieillissement)

Nous avons adopté les paramètres de modification suivants :

- Une température du mélange de $180 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Une vitesse de malaxage : 600 tr/min, 1000 tr/min et 1500 tr/min
- Une durée de malaxage de 2 heures.
- Mélange M1 (5%)[50% EVA + 25% NBR + 25% DP]

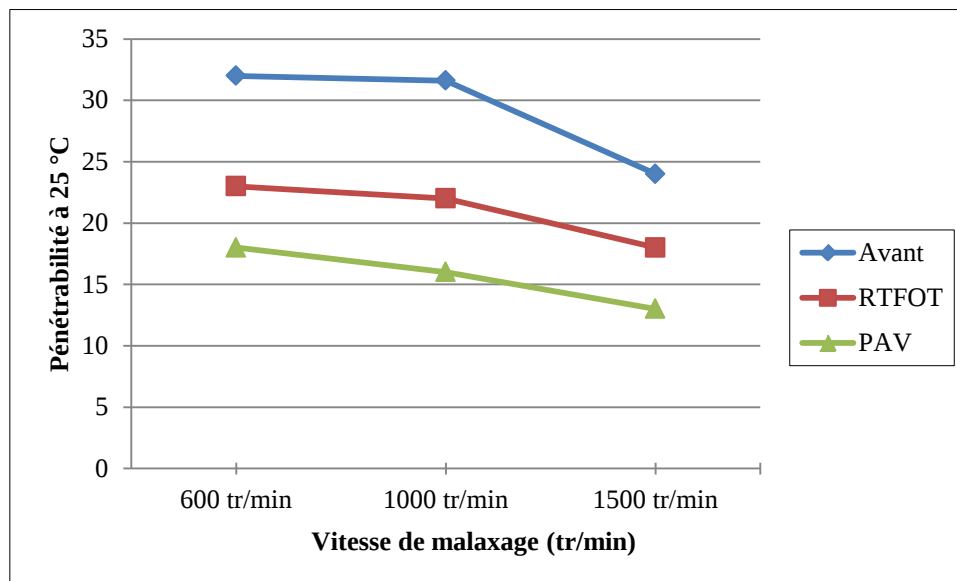
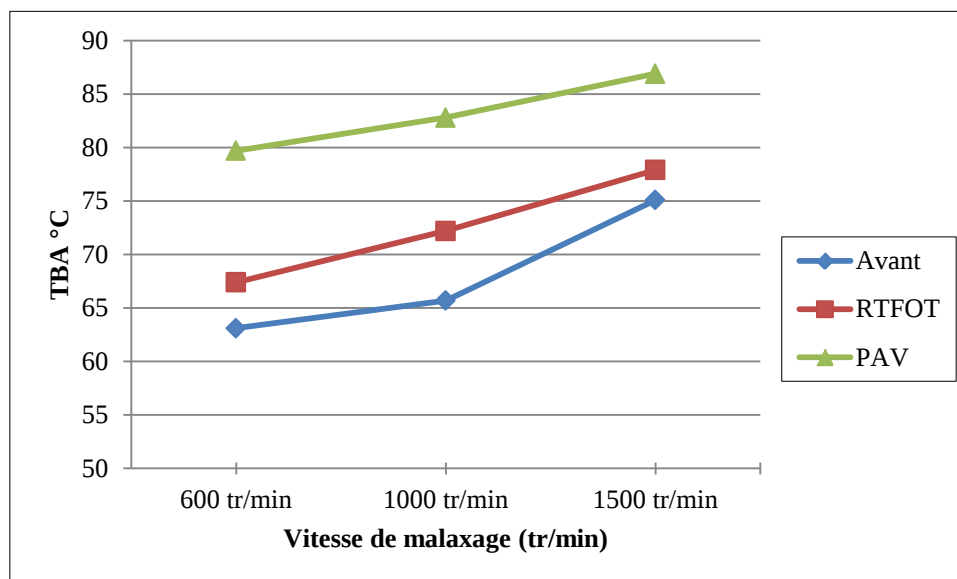
Les résultats de la pénétrabilité et la température bille anneau pour le mélange M1 et pour chaque vitesse de malaxage sont présentés dans les tableaux 4.4 et 4.5 et schématisé par les figures 4.7 et 4.8.

Tableau 4.4. Influence de la vitesse de malaxage sur la pénétrabilité avant et après vieillissement

	600 tr/min	1000 tr/min	1500 tr/min
Avant	32	31.6	24
RTFOT	23	22	18
PAV	18	16	13

Tableau 4.5. Influence de la vitesse de malaxage sur la TBA avant et après vieillissement

	600 tr/min	1000 tr/min	1500 tr/min
Avant	63.1	65.7	75.1
RTFOT	67.4	72.2	77.9
PAV	79.7	82.8	86.9

**Figure 4.7. Influence de la vitesse de malaxage sur la pénétrabilité avant et après vieillissement****Figure 4.8. Influence de la vitesse de malaxage sur la TBA avant et après vieillissement**

Interprétation des résultats

Les figures 4.7 et 4.8 montrent que :

- La pénétrabilité du mélange (M1) diminue et la TBA augmente en fonction de la vitesse de malaxage avant le vieillissement ce qui indique à l'augmentation de la consistance du bitume.
- La pénétrabilité du mélange (M1) diminue et la TBA augmente en fonction de la vitesse de malaxage après le vieillissement ce qui indique à l'augmentation de la résistance au vieillissement.

4.8. Conclusion

Après RTFOT et PAV (après vieillissement), la pénétrabilité diminue et la TBA augmente, ce qui indique un durcissement du bitume. L'effet du vieillissement à long terme est plus important que celui à court terme. La ductilité des bitumes (purs et modifiés) diminue après vieillissement. On déduit que le bitume vieilli devient plus fragile. L'incorporation de l'association (EVA-NBR-Déchet plastique alimentaire) dans le bitume améliore la résistance au vieillissement. Cette amélioration est proportionnelle à la durée et à la vitesse de malaxage. Les mélanges M1 et M2 résistent aux vieillissements mieux que les autres associations, M1 étant le plus résistant.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le présent travail s'est intéressé à étudier l'influence de la modification des bitumes par l'association (EVA - NBR - déchet plastique alimentaire) et les paramètres de malaxage (temps et vitesse de malaxage) sur le vieillissement et sur les caractéristiques rhéologiques des bitumes (purs et modifiés).

Le caractère rhéologique du bitume et des bitumes modifiés avant et après vieillissement a été évalué avec trois essais empiriques (Pénétrabilité, Température de ramollissement Bille et anneau et ductilité).

Le mécanisme de vieillissement des bitumes et des bitumes modifiés a été étudié en réalisant les essais au laboratoire de simulation du vieillissement à court et long terme (Rolling Thin Film Oven Test et Pressure Aging Vessel).

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

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

Le bitume pur :

La consistance du bitume pur augmente avec l'augmentation de la durée de malaxage (amélioration des caractéristiques du bitume).

Le bitume modifié :

- La modification du bitume par l'association (EVA-NBR-Déchet plastique alimentaire) améliore les propriétés du bitume tel que la pénétrabilité, le point de ramollissement et la ductilité.
- La consistance des bitumes (purs et modifiés) augmente avec l'augmentation de la durée de malaxage.
- Les mélanges M1 et M2 améliorent la consistance mieux que les autres associations, M1 étant le plus consistant.
- Le bitume modifié par l'association (EVA - NBR - DP) n'est pas stable au stockage.

En plus de l'amélioration des caractéristiques des liants bitumineux qui se répercutera sur la durabilité des structures bitumineuses, l'environnement sera ainsi préservé par la valorisation des déchets industriels notamment les emballages et les sacs....

Le vieillissement des bitumes :

Après RTFOT et PAV, la pénétrabilité diminue et la TBA augmente, ce qui induit le vieillissement du bitume. L'effet du vieillissement à long terme (PAV) est plus important que celui à court terme (RTFOT).

La pénétrabilité restante et ΔTBA des bitumes modifiés concordent avec les spécifications préconisées pour le bitume de classe 35/50 (> 53).

La ductilité des bitumes (purs et modifiés) diminue après le vieillissement (RTFOT). On déduit que le bitume vieilli devient plus fragile.

L'incorporation de l'association (EVA-NBR-Déchet plastique alimentaire) dans le bitume améliore la résistance au vieillissement. Cette amélioration est proportionnelle à la durée de malaxage et à la vitesse de malaxage. Les mélanges M1 (50% EVA+25% NBR+25% DP) et M2 (25% EVA+25% NBR+50% DP) résistent mieux aux vieillissements que les autres associations, M1 étant le plus résistant.

En perspective

Nous proposons les actions suivantes :

- Etudier l'influence de l'association (EVA-NBR- déchet plastique alimentaire) sur les caractéristiques physiques et mécaniques des enrobés bitumineux (fatigue, orniérage, etc.).
- Réaliser des analyses chimiques sur les bitumes modifiés, telles que la chromatographie et la SARA, pour mieux expliquer les phénomènes de réaction entre le polymère et le bitume.
- Ajouter des agents chimiques pour augmenter la stabilité au stockage.

Référence Bibliographique

- [1] M. Ould-henia. « Modélisation et prédiction du comportement rhéologique des mélanges bitume caoutchouc », Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, (2005).
- [2] Shell bitumes. « Bitumes techniques et utilisations », (1991).
- [3] P. Harshad., P. J. Gundaliya. « Review on effect of aging on paving grade bitumen using different filler material ». International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Vol. 4, Issue 3, (March 2014).
- [4] H. Zhang., J. Yu., D. Kuan. « Effect of expanded vermiculite on aging properties of bitumen ». Construction and Building Materials, Vol.26, pp. 244-248, (2012).
- [5] Groupement professionnel des bitumes, le bitume qu'est-ce que c'est ? « Genèse, constitution et caractéristiques du bitume », Bitume infos, N° spécial 1, (juin 2005).
- [6] A. Dony. « Liants bitumes-polymères. De la fabrication à la mise en œuvre en enrobés », Etude et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, série chaussée CR15, (1991).
- [7] D. Lesueur. « La rhéologie des bitumes : principes et modification ». Rhéologie, Vol.2, pp. 1-30, (septembre 2002).
- [8] O. Gonzalez, M.E. Munoz and al. « Rheology and stability of bitumen/EVA blends ». European Polymer Journal, Vol.40, 2365–2372, (2004).
- [9] H.DI Benedetto, J.F. Corte. « Matériaux routiers bitumineux ». Tome 1, Hermès, (2004).
- [10] GD. Airey. « Rheological Characteristics of Polymer Modified and Aged Bitumens ». Thèse de Doctorat, University of Nottingham, (October1997).
- [11] O. Solomatnikova. « Comportement rhéologique et propriétés cohésives et adhésives des liants bitumineux ». Mémoire pour l'obtention du grade de maître ès sciences, Université de Laval, Canada, (AVRIL 1998).
- [12] D. Magramane. « Amélioration des performances des enrobés bitumineux par la modification à base de polymère : Poudrette de caoutchouc ». Thèse de Magister ENSTP (2009).
- [13] G. Ramond, C. Such. « Bitumes et bitumes modifiés – relations structures, propriétés, composition ». Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées 168: pp 65-87. (1990).
- [14] S. Haddadi 2007. « Influence de la poudrette de caoutchouc sur le comportement au fluage des enrobés bitumineux ».Thèse de Doctorat d'état, FGC/USTHB, (2007).
- [15] D. Si Bachir. « Comportement rhéologique des bitumes modifiés par des polymères : Influence du vieillissement ».Thèse de Doctorat en sciences, FGC-USTHB, (2014).
- [16] W.Teugels, N.V .Nynas . « The black diagram, only a rheological data Presentation ». - Eurobitume- (2000).
- [17] M. Merbouh. «Contribution à la modélisation du comportement rhéologique des enrobés bitumineux Influence des conditions extrêmes de température et de trafic en fatigue ». Thèse de Doctorat, L'université Bordeaux-I, (2010).
- [18] F. Olard. « Comportement thermomécanique des enrobes bitumineux a basses températures relations entre les propriétés du liant et de l'enrobe ». Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale des Sciences Pour L'ingénieur De Lyon (génie civil), (2003).
- [19] S. Saoula. « Approche modéliste et valorisation des enrobés modifiés par Ajout de polymères - impact sur l'environnement –».Thèse de doctorat en sciences, FGC-USTHB, (2010).
- [20] C. Rebufa., J. Kister., M. Julliard., J. Lamontagne. « Etude comparative du vieillissement des bitumes routiers : Impacts Photochimique Et Thermique ». Journées Franco-Italiennes de la Chimie, Palais des Congrès de Juan-les-Pins, (2002).

- [21] D. Kuang and al. « Performance evaluation and preventive measures for aging of different bitumens ». *Construction and Building Materials*, Vol.66, 209 – 213, (2014).
- [22] M.F .Sà Araujo and al, « Rheological and thermal behavior of weathering-aged polymer modified bitumen ». *Brzilian Journal of Petroleum and Gas*, Vol. 7 (4), P. 155-167, (2013)
- [23] D. Mastrofini., M. Scarsella. « The application of rheology to the evaluation of bitumen ». Elsevier Science Ltd *Fuel*, Vol.79, pp. 1005 – 1015, (2000).
- [24] Y. Edwards., Y. Tasdemir., U. Issacson. « Influence of commercial waxes on bitumen aging properties ». *J. Energy and Fuel*, Vol.19, 2519-2525, (2005).
- [25] X. Lu., U. Isacson, « Effect of ageing on bitumen chemistry and rheology ». Elsevier Science Ltd, *Construction and Building Materials*, Vol. 16, 15 – 22, (2002).
- [26] A. Suleiman., R. Mohd. « The effect of aging on bitumen properties modified with styrene-butadiene-styrene (SBS) polymer ». *ARPJ Journal of Science and Technology*, Vol. 2, NO. 7, (August 2012).
- [27] X. Lu., Y. Talon., P. Redelius, « Aging of bituminous binders – laboratory tests and field data ». *The 4th Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Copenhagen, 21-23 (May 2008).
- [28] S. Saoula., K. Soudani., S.Haddadi and al. « Analysis of the Rheological Behavior of Aging Bitumen and Predicting the Risk of Permanent Deformation of Asphalt ». *Materials Sciences and Applications*, 4, 312-318, (2013).
- [29] X. Lu., U. Isacson. « Artificial aging of polymer modified bitumens ». Royal Institute of Technology, Division of Highway Engineering, Stockholm, Sweden, (1999).
- [30] A.Mahrez., M. Rehan. « Rheological evaluation of aging properties of rubber crumb modified bitumen ». *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol.5, pp. 820 – 833, (2003).
- [31] G. Ramond., M. Epinat. « Contribution à l'élaboration d'un mode opératoire de mesure du module complexe ». *Bitume actualités*, N°101, pp. 37-42, (2000).
- [32] S. Maillard. « Fissuration et autoréparation des liants bitumineux –apport de l'essai de rupture locale répétée sur bitume-». *Thèse de doctorat*, Université de Nantes, (2005).
- [33] G. Ramond., M. Pastor. « Rappel des notions de base et des principes d'exploitation du module complexe ». *Rapport n° 135 D96, LCPC*.
- [34] N. Laradi. « Influence de la rhéologie des bitumes sur le comportement des enrobés bitumineux ». *FGC-USTHB- IIème congrès algérien de la route*, (1996).
- [35] G. Palacco., S. Berlincioni et al. « Asphalt modification with different polyethylene-based polymer ». *European Polymer Journal*, Vol.41, pp. 2831-2844, (2005).
- [36] Y. Yildirim. «Polymer modified asphalt binders ». *Construction and Building Materials*, vol.21, pp. 66–72, (2007).
- [37] Association Internationale de la Route (AIPCR). *Use of Modified Bituminous Binders, Special Bitumens and Bitumens with Additives in Road Pavements* (LCPC Ed., Paris, 1999).
- [38] LCPC Guide Technique. « Emploi des liants bitumineux modifiés, des bitumes spéciaux et des bitumes avec additifs en technique routière. Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées ». (1999).
- [39] C.P. Valkering., W.C. Vonk., C.D. Whiteoak . «Enrobés routiers améliorés à base de bitumes modifiés par des élastomères thermoplastiques SBS ». *Revue Générale des Routes et Aérodrômes* 693, pp. 57-59, (1992).
- [40] X. Lu., U. Isacson . « Modification of road bitumens with thermoplastic polymers ». *Polymer Testing* ,Vol.20 ,pp.77–86, (2001).
- [41] HY. Fu., LD. Xie et al. «Storage stability and compatibility of asphalt binder modified by SBS graft copolymer ». *Construction and Building Materials*, Vol.21,pp.1528–1533,(2007).

- [42] Piarc. « Use of modified bituminous binders, special bitumens with additives in road pavements ». Laboratoire Central des Ponts et Chaussée, (1999).
- [43] G. Wen and al. « Rheological characterization of storage-stable SBS-modified asphalts ». *Polymer Testing*, Vol.21, pp.295–302, (2002).
- [44] D. Sun., F. Ye., F. Shi., W. Lu. « Storage stability of SBS-modified road asphalt: Preparation, morphology, and rheological properties ». *Petroleum Science and Technology*, 24:9, 1067-1077, (2006).
- [45] B. Sengoz., G. Isikyakar. « Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen ». *Construction and Building Materials*, Vol.22, pp. 1897-1905, (2008).
- [46] X. Lu., U. Isacson, « Chemical and rheological evaluation of ageing properties of SBS polymer modified bitumens ». *Fuel*, Vol. 77 Number 9/10, 961 –972, (1998).
- [47] G. Liu and al. « Rheological and chemical evaluation on the ageing properties of SBS polymer modified bitumen: From the laboratory to the field ». *Construction and Building Materials*, Vol.51, 244-248, (2014).
- [48] U. Isacson., X. Lu. « Testing and appraisal of polymer modified road bitumens - state of the art ». *Materials and Structures*, 28, - 139-159, (1995).
- [49] J. Wu. «The influence of mineral aggregates and binder volumetrics on bitumen ageing ». University of Nottingham, (May 2009).
- [50] U. Isacson., X. Lu. « Characterization of bitumens modified with SEBS, EVA and EBA polymers ». *Journal of Materials Science*, Vol .34, 3737 – 3745, (1999).
- [51] J. Bonnot., F. Perez. « Matériaux bitumineux spéciaux ». *Bulletin de Liaison du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, 144, pp.65-71, (1986).
- [52] G.D. Airey. « Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified bitumens ». *Construction and Building Materials*, Vol.16, 473-487, (2002).
- [53] A. Bensaada. « Etude de l'influence de l'association (EVA-NBR) et (EVA-déchet plastique alimentaire) sur le vieillissement à court terme des bitumes et influence de l'association (EVA-déchet plastique alimentaire) sur le comportement mécanique des enrobes bitumineux modifiés ». Thèse de Magister, USTHB (2012).
- [54] S. Haddadi, E. Ghorbel, N. Laradi. « Effects of the manufacturing process on the performances of the bituminous binders modified with EVA ». *Construction and Building Materials*, 22 ,1212–1219, (2008).