

REPUBLIQUE DU SENEGAL  
UNIVERSITÉ CHEIKH ANTA DIOP



GC.2003

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE  
Centre de Thiès  
Département Génie Civil

*Projet de fin d'études  
En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur de Conception*

**Titre : ETUDE DU COMPORTEMENT DES BITUMES UTILISES EN  
ENROBES DENSES AU SENEGAL**

Auteur : Moussa SARR  
Directeur interne : M. Ibrahima Khalil CISSE  
Directeur externe : M. Abdoulaye THIAM

Année : 2002 – 2003

## ***DEDICACES***

Je dédie ce mémoire :

- ✿ à ma Mère et mon Père ;
- ✿ à mes frères et sœurs ;
- ✿ à ma tante Madjiguène NIANG ;

à qui je dois tout.

## **REMERCIEMENTS**

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

Tous mes remerciements :

- ◆ à mon Directeur interne, Monsieur Ibrahima Khalil CISSE, professeur à l'Ecole Supérieure Polytechnique de Thiès ;
- ◆ à mon Directeur externe, Monsieur Abdoulaye THIAM, responsable qualité de l'entreprise Jean LEFEBVRE SENEGAL ;
- ◆ à Monsieur Lamine LO, professeur et responsable du laboratoire de sols à l'Ecole Supérieure Polytechnique de Thiès ;
- ◆ à Monsieur Claude Alain Thété, ingénieur géotechnique responsable du laboratoire de l'entreprise Jean LEFEBVRE SENEGAL ;
- ◆ à l'ensemble du personnel de l'entreprise Jean LEFEBVRE SENEGAL ;
- ◆ à l'ensemble du personnel du département Génie Civil de l'Ecole Supérieure Polytechnique de Thiès ;
- ◆ à mes camarades de promotion.

## ***AVANT PROPOS***

Le département Génie Civil de l'Ecole Supérieure Polytechnique de Thiès forme en cinq (5) ans des ingénieurs de conception en Génie Civil.

Au Cours de la cinquième année, un projet de fin d'études doit obligatoirement être étudié par chaque élève ingénieur au sein d'une entreprise ou d'un laboratoire de recherche.

Ce projet doit faire l'objet de la rédaction d'un mémoire de fin d'études qui sera soutenu publiquement devant un jury.

C'est dans ce cadre qu'il nous a été donné l'opportunité d'effectuer ce projet à Jean LEFEBVRE SENEGAL et en même temps au laboratoire de recherche de notre école.

## ***SOMMAIRE***

Au Sénégal, on constate de plus en plus des dégradations au niveau des couches de roulement réalisées en enrobés denses. Ces problèmes qui souvent, sont difficiles à expliquer, peuvent certainement être dus au mauvais comportement des bitumes utilisés.

Ce projet, décrit l'étude du comportement des bitumes utilisés au Sénégal pour la fabrication des enrobés denses.

Nous avons procédé dans un premier temps, à une étude bibliographique portant essentiellement sur les caractéristiques d'utilisation des bitumes pour enrobés denses.

Dans un deuxième temps, nous avons essayé de faire l'inventaire des différents problèmes concernant les bitumes utilisés en enrobés denses au Sénégal.

Nous avons mené dans un troisième temps, une étude expérimentale sur les différents types de bitumes utilisés en enrobés denses au Sénégal, en vue de leur caractérisation et de leur comparaison.

Ensuite, après des études comparatives sur différents plans, nous avons essayé de choisir entre les types de bitumes, le meilleur à utiliser pour la fabrication des enrobés denses au Sénégal.

Enfin, nous avons donné des recommandations pour la résolution des problèmes de comportement des bitumes dans les enrobés denses au Sénégal.

## TABLE DES MATIERES

<b>REMERCIEMENTS</b>	<b>I</b>
<b>AVANT PROPOS</b>	<b>II</b>
<b>SOMMAIRE</b>	<b>III</b>
<b>TABLE DES MATIERES</b>	<b>IV</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b>	<b>1</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b>	<b>2</b>
<b>INTRODUCTION</b>	<b>4</b>
<b>Chapitre I : GENERALITES SUR LES BITUMES</b>	<b>7</b>
<b>I-1- DEFINITION</b>	<b>7</b>
<b>I-2- COMPOSITION DES BITUMES</b>	<b>8</b>
<b>I-3- LES PRODUITS BITUMINEUX</b>	<b>9</b>
I-3-1- Le Cut-back (bitume fluidifié ou bitume liquide )	9
I-3-1-1- Le cut-back à prise rapide (RC)	9
I-3-1-2- Le cut-back à prise moyenne (MC)	9
I-3-1-3- Le cut-back à prise lente (SC)	9
I-3-1-4- Le cut-back abat-poussière	10
I-3-2- Les émulsions de bitume	10
I-3-3- Les bitumes pour couche d'impression	10
I-3-4- Les bitumes fillérisés	11
<b>I-4- LES MELANGES BITUMINEUX</b>	<b>11</b>
I-4-2- Le béton bitumineux	11
I-4-3- Le micro béton bitumeux	12
I-4-4- Les enrobés denses	12
I-4-5- Mélange préparé en centrale et posé à froid	12
I-4-6- Mélange préparé en chantier	12
<b>Chapitre II : CARACTERISTIQUES D'UTILISATION DES BITUMES</b>	<b>14</b>
<b>II-1- VISCOSITE DES BITUMES</b>	<b>14</b>
II-1-1- Pénétration standard des bitumes	15
II-1-2- Point de ramollissement	15
<b>II-2- SUSCEPTIBILITE DES BITUMES</b>	<b>16</b>
<b>II-3- COHESION INTERNE</b>	<b>20</b>
<b>II-4- DUCTILITE DES BITUMES</b>	<b>21</b>
<b>II-5- L'ADHESIVITE</b>	<b>22</b>
<b>II-6- LA RESISTANCE AU VIEILLISSEMENT</b>	<b>23</b>
II-6-1- Le vieillissement à court terme	23

II-6-2- Le vieillissement à long terme	24
II-6-2-1- Présentation de la technique PAV	25
II-6-2-2- Présentation de la technique RCAT	25
II-6-2-3- Temps de vieillissement équivalent RCAT-PAV avec ou sans RTFOT préalable.	26
II-6-4- Temps de vieillissement équivalent PAV-RTFOT et RCAT- RTFOT	27
<b>II-7- AUTRES CARACTERISTIQUES DES BITUMES</b>	<b>28</b>
<b>Chapitre III : CARACTERISTIQUES DES ENROBES</b>	<b>31</b>
<b>III-1- CARACTERISTIQUES MARSHALL</b>	<b>31</b>
III-1-1- Préparation du mélange et confection des éprouvettes	32
III-1-2- Ecrasement des éprouvettes Marshall	32
<b>III-2- CARACTERISTIQUES DURIEZ</b>	<b>33</b>
III-2-1- Préparation du mélange et confection des éprouvettes	33
III-2-2- Ecrasement des éprouvettes	34
<b>Chapitre IV : LES DIFFERENTES SORTES DE BITUMES UTILISES EN ENROBES DENSES AU SENEGAL</b>	<b>36</b>
<b>Chapitre V : SPECIFICATION DES BITUMES UTILISES EN ENROBES DENSES AU SENEGAL</b>	<b>38</b>
V-1- SPECIFICATIONS DU BITUME 40 / 50	38
V-1- SPECIFICATIONS DU BITUME 60 / 70	39
<b>Chapitre VI : PROBLEMATIQUE DES BITUMES UTILISES EN ENROBES DENSES AU SENEGAL</b>	<b>41</b>
<b>Chapitre VII : ETUDES EXPERIMENTALES</b>	<b>44</b>
<b>VII-1- CARACTERISTIQUES D'IDENTIFICATION DES BITUMES 40 / 50 ET 60 / 70</b>	<b>44</b>
VII-1- 1- Les essais de laboratoire utilisés	44
VII-1-2 Les résultats	44
<b>VII-2- ETUDE DE LA VARIATION DE LA PENETRABILITE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE</b>	<b>46</b>
VII-2-1- Essais à effectuer	46
VII-2-2- Résultats de l'étude	46
<b>VII-3- ETUDE DE LA SUSCEPTIBILITE THERMIQUE DES DEUX TYPES DE BITUMES</b>	<b>48</b>
VII-3-1- Procédure	48
VII-3-2- Résultats	48
<b>VII-4- STABILITE ET FLUAGE DES ENROBES DENSES REALISES AVEC LES BITUMES 40 / 50 ET 60 / 70</b>	<b>51</b>
VII-4-1- Conformité des matériaux aux spécifications	51
VII-4-1-1- Granulométrie	51
VII-4-1-2- Densité relative	52
VII-4-1-3- Coefficient de forme ou d'aplatissement	52
VII-4-1-4- Essai Los Angeles	53

VII-4-1-5- Essai Micro Deval	53
VII-4-2- Résultats essais de fluage et de stabilité (MARSHALL)	54
VII-4-2-1- Avec le bitume 40 / 50	54
VII-4-2-2- Avec le bitume 60 / 70	57
<b>VII-5- RESISTANCE MECANIQUE ET RESISTANCE AU DESENROBAGE PAR L'EAU DES ENROBES</b>	<b>60</b>
<b>Chapitre VIII : ETUDES COMPARATIVES</b>	<b>62</b>
<b>VIII-1- SUR LE PLAN DE LA QUALITE TECHNIQUE</b>	<b>62</b>
VIII-1-1- Conformité aux spécifications	62
VIII-1-2- Sensibilité à la variation de température	62
VIII-1-3- Résistance au vieillissement	63
VIII-1-4- Caractéristiques Marshall et Duriez	64
<b>VIII-2- SUR LE PLAN ECONOMIQUE</b>	<b>65</b>
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	<b>68</b>
<b>RECOMMANDATIONS</b>	<b>69</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	<b>70</b>
<b>ANNEXES</b>	<b>71</b>

## **LISTE DES TABLEAUX**

<i>Tableau 1 : Spécifications des bitumes 40-50</i>	38
<i>Tableau 2 : Spécifications des bitumes 60-70</i>	39
<i>Tableau 3 : Caractéristiques des bitumes 40-50 et 60-70</i>	44
<i>Tableau 4 : Conformité des caractéristiques des bitumes aux spécifications</i>	45
<i>Tableau 5 : Variation de la pénétration en fonction de la température</i>	46
<i>Tableau 6 : Densité relative</i>	52
<i>Tableau 7 : Coefficient de forme des granulats</i>	53
<i>Tableau 8 : Coefficient Los Angeles des granulats</i>	53
<i>Tableau 9 : Coefficient Micro Deval</i>	53
<i>Tableau 10: Résultats essais Marshall sur le bitume 40 / 50</i>	54
<i>Tableau 11: Récapitulatif des résultats des essais Marshall sur le bitume 40 / 50</i>	56
<i>Tableau 12: Résultats essais Marshall sur le bitume 60 / 70</i>	57
<i>Tableau 13: Récapitulatif des résultats des essais Marshall sur le bitume 60 / 70</i>	59
<i>Tableau 14 : Résultats des essais Duriez</i>	60
<i>Tableau 15 : Susceptibilité des deux types de bitumes</i>	62
<i>Tableau 16 : Valeurs expérimentales et valeurs CPTP des caractéristiques Marshall et Duriez.</i>	64

## ***LISTE DES FIGURES***

<b><i>Figure 1 : Variation de la pénétration en fonction de la température pour le bitume 40 / 50</i></b>	<b><i>47</i></b>
<b><i>Figure 2 : Variation de la pénétration en fonction de la température pour le bitume 60 / 70</i></b>	<b><i>47</i></b>
<b><i>Figure 3 : Courbe de tendance de la pénétration en fonction de la température du bitume 40 / 50.</i></b>	<b><i>49</i></b>
<b><i>Figure 4 : Courbe de tendance de la pénétration en fonction de la température du bitume 60 / 70.</i></b>	<b><i>50</i></b>
<b><i>Figure 5 : Variation des caractéristiques Marshall des enrobés denses réalisés avec le 40/50</i></b>	<b><i>55</i></b>
<b><i>Figure 6 : Variation des caractéristiques Marshall des enrobés denses réalisés avec le 60/70</i></b>	<b><i>58</i></b>
<b><i>Figure 7 : Courbe de tendance de la pénétration en fonction de la température des bitumes ( 40 / 50 et 60 / 70 )</i></b>	<b><i>63</i></b>

# INTRODUCTION

## INTRODUCTION

Le bitume est un liant hydrocarboné ou liant noir à base d'hydrocarbure. Sa consistance pâteuse ou dure à la température ordinaire et sa capacité à devenir liquide lorsqu'on le chauffe environ entre 120 et 170° lui permettent de se mélanger à chaud avec des granulats et de donner après refroidissement un mélange solide ; ce qui fait tout son intérêt en technique routière.

Cependant, le bitume est un liant qui est très difficile à utiliser correctement vu la grande complexité d'apprécier ses qualités techniques.

Au Sénégal, les bitumes qui sont généralement importés, sont souvent de mauvaise qualité ou inadaptés ; ce qui fait qu'ils se comportent mal lorsqu'ils sont utilisés dans les enrobés denses.

Depuis très longtemps, on utilisait au Sénégal le bitume 40 – 50 dans les enrobés denses. Ce bitume, bien que résistant aux températures élevées, est supposé avoir un vieillissement rapide qui est l'une des principales causes de la dégradation des couches de roulement. Ainsi, ce bitume à cause de son vieillissement accéléré n'est presque plus utilisé au Sénégal. On utilise maintenant, le bitume 60 – 70 qui est supposé vieillir moins vite que le 40 – 50.

Jusqu'ici aucune étude n'a été faite pour montrer que le 60 – 70 est mieux adapté que le 40 – 50 pour les enrobés denses au Sénégal.

Dans ce projet, il s'agira donc de faire une étude du comportement des différents bitumes qu'on utilise en enrobés denses au Sénégal afin d'expliquer les dégradations, de trouver des solutions et enfin de connaître le bitume le plus adapté pour nos granulats.

Ce projet s'articule autour de quatre principales parties.

La première partie est une étude bibliographique portant sur :

- les généralités sur les bitumes ;
- les caractéristiques d'utilisation des bitumes ;
- les caractéristiques des enrobés ;
- les différentes sortes de bitumes utilisés en enrobés denses au Sénégal ;
- les spécifications des bitumes 40-50 et 60-70.

Dans la deuxième partie, il est question de l'inventaire des différents problèmes qu'on rencontre au niveau des bitumes et des enrobés denses réalisés avec ces derniers dans le cas du Sénégal.

La troisième partie présente l'étude expérimentale menée en vue de la caractérisation et de la comparaison des bitumes utilisés en enrobés denses au Sénégal.

Dans la quatrième partie, il sera question de discussions et de recommandations concernant le comportement des bitumes pour enrobés denses.

Ensuite, la conclusion va présenter un résumé des résultats obtenus et indiquer les directions vers lesquelles ce travail pourrait être poursuivi.

Pour terminer, nous allons essayer de formuler des recommandations intéressantes pour le développement de la qualité des revêtements bitumineux.

# CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES BITUMES

## **Chapitre I : GENERALITES SUR LES BITUMES [ 1 ]**

### **I-1- DEFINITION**

Les bitumes sont des liants hydrocarbonés ayant plusieurs origines. Certains se rencontrent à l'état naturel, comme le Trinidad ; certaines roches, telles que les calcaires asphaltites sont des roches poreuses imprégnées d'une certaine quantité de bitume naturel. La plupart de ces calcaires asphaltites contiennent moins de 10% en poids de bitume.

D'autres bitumes sont obtenus comme résidu de la distillation des pétroles asphaltites ou semi-asphaltiques. Ces bitumes de distillation sont généralement appelés brais de pétrole ; leur composition chimique diffère nettement de celle des brais de houille.

Enfin, certains bitumes sont obtenus par des réactions d'oxydation au sein de certaines fractions de pétroles appropriés ; ce sont des bitumes soufflés ou oxydés.

Aujourd'hui, avec le développement des méthodes modernes de raffinage du pétrole brut domestique, on peut obtenir des matériaux bitumineux à coût moindre. C'est ainsi que les autres bitumes précités sont devenus non compétitifs. La plupart des pays produisent donc le bitume à partir du pétrole brut.

Les bitumes, comme tous les liants hydrocarbonés permettent la constitution de mortiers et bétons, et ont une grande analogie avec les mortiers et bétons de ciment.

En réalité, les bitumes jouent à la fois dans les mélanges, le rôle de l'eau qui mouille les agrégats et le rôle du ciment qui les agglomère ; ils n'entrent donc pas dans la composition granulométrique du squelette au même titre que les liants pulvérulents.

On utilise beaucoup les bitumes pour la construction routière et pour celle des aérodromes ; on les utilise par ailleurs pour la construction des produits d'étanchéité et de certains revêtements protecteurs contre la corrosion.

Les bitumes de distillation sont les plus employés en technique routière, notamment pour la fabrication des bétons bitumineux et des enrobés ; au contraire, les bitumes soufflés sont le plus souvent utilisés en technique d'étanchéité.

## I-2- COMPOSITION DES BITUMES

Le bitume est un système colloïdal compliqué de matériaux hydrocarbonés qui sont en général constitué par :

- **Les asphaltes**

Ils constituent le corps du bitume. Ils ont une proportion de carbone - hydrogène qui est supérieur à 80%.

- **Les résines**

Elles affectent la ductilité et l'adhérence du bitume. Elles ont une proportion de carbone - hydrogène qui varie entre 60% et 80%.

- **Les huiles**

Elles influencent la viscosité et l'écoulement. Elles ont une proportion de carbone - hydrogène qui est inférieure à 40%.

Il est à noter qu'il est impossible de déterminer avec précision la composition exacte des bitumes. Le problème vient du fait que les composants du bitume sont sensibles tant à la chaleur si on veut les séparer par distillation, qu'à l'action des agents chimiques, si on veut les séparer par un procédé chimique. Ensuite, il faut noter que, avant le traitement, la composition initiale des pétroles bruts est extrêmement variable d'un point de production à un autre du fait des différences d'origines ou d'extractions. D'une usine à une autre, les procédés de préparation des bitumes différent.

Ainsi, les bitumes commercialisés, bien qu'ils aient certaines appellations identiques parce qu'ils ont certaines propriétés importantes communes, ont cependant de

grandes différences de comportement sur le chantier. Leurs qualités techniques doivent donc être appréciées par de nombreux essais afin de les utiliser correctement.

### **I-3- LES PRODUITS BITUMINEUX**

#### **I-3-1- Le Cut-back (bitume fluidifié ou bitume liquide )**

Le Cut-back est un bitume semi-dur qui a été liquéfié. Il s'obtient par mélange avec des solvants pétroliers encore appelés diluants.

A leur exposition aux conditions atmosphériques, les solvants s'évaporent et laissent le bitume semi-dur remplir sa fonction.

##### **I-3-1-1- Le cut-back à prise rapide (RC)**

Il est composé d'un ciment bitumineux et d'un diluant de haute volatilité comme l'huile de naphte ou la gazoline.

##### **I-3-1-2- Le cut-back à prise moyenne (MC)**

Il est composé d'un ciment bitumineux et d'un diluant de volatilité moyenne comme le kérosène.

##### **I-3-1-3- Le cut-back à prise lente (SC)**

Il est composé d'un ciment bitumineux et des huiles de volatilité lente.

#### I-3-1-4- Le cut-back abat-poussière

C'est une huile pétrolière lourde, normalement un des cut-back à prise lente, grade SC.

#### I-3-2- Les émulsions de bitume

Les liants noirs peuvent être mis en émulsion pour être utilisés à températures moins élevées (30-70).

L'émulsion est un mélange de bitume et d'eau contenant une petite quantité d'un agent émulsifiant. Elle forme un système hétérogène contenant deux phases normalement non miscibles (le bitume et l'eau), système dans lequel l'eau constitue la phase continue de l'émulsion, et les minuscules globules de bitume forment la phase discontinue.

L'agent émulsifiant ou l'additif permet d'assurer en entourant les globules ou gouttes de bitume, la stabilité de l'émulsion.

Les émulsions bitumineuses peuvent être soit basiques ou anioniques, c'est à dire constituées de globules de bitume chargés d'électricité négative, soit acides ou cationiques, globules de bitume chargés d'électricité positive ; tout dépend de l'agent émulsifiant utilisé.

Il existe de nombreuses émulsions en fonction de la rapidité de la rupture, de la grosseur des gouttes, du dosage en additif, etc....

Grâce à leur facilité d'emploi, elles sont très utilisées en entretien courant, notamment en imperméabilisation de surface.

#### I-3-3- Les bitumes pour couche d'impression

C'est un produit bitumineux liquide de faible viscosité qui, lors de son application, pénètre une surface non bitumineuse.

### **I-3-4- Les bitumes fillérisés**

Il contient des matières minérales finement fractionnées et passant au tamis 0,075 mm.

## **I-4- LES MELANGES BITUMINEUX**

### **I-4-1- Le mélange en centrale**

Il est produit dans une centrale de malaxage de bitume. Il est obtenu avec un agrégat minéral enrobé uniformément avec du liant bitumineux, d'un cut-back ou d'une émulsion de bitume.

### **I-4-2- Le béton bitumineux**

C'est un mélange chaud parfaitement contrôlé et de haute qualité constitué de liant bitumineux et d'agrégats de qualité, et bien calibré.

Le mélange doit être bien compacté et en une masse bien uniforme et dense.

La mise en place est assurée par un finisseur d'une grande précision de pose. L'épaisseur d'une couche de béton bitumineux fait en général 2 à 3 fois le diamètre du plus gros granulat.

Le pourcentage des vides est d'environ 5%.

### **I-4-3- Le micro béton bitumeux**

C'est un mélange chaud de ciment bitumineux avec du sable calibré, propre, angulaire et du filler minéral. Son utilisation est normalement limitée à la couche de roulement qui est ordinairement répandue sur une couche intermédiaire ou de nivellement.

### **I-4-4- Les enrobés denses**

Il s'agit d'un mélange en centrale posé à chaud et qui doit être répandu et compacté pendant qu'il est à une température élevée.

Pour faire sécher l'agrégat et pour obtenir une fluidité suffisante du bitume, les deux matériaux doivent être chauffés avant leur malaxage.

L'engin de pose des enrobés est un finisseur de précision de 2 cm sur 4 m.

L'épaisseur des enrobés est comprise entre 2 et 3 fois le diamètre du plus gros granulat, et le pourcentage des vides est de 10%.

### **I-4-5- Mélange préparé en centrale et posé à froid**

Le mélange est préparé en centrale et est répandu et compacté à la température ambiante.

### **I-4-6- Mélange préparé en chantier**

C'est un mélange d'agrégat minéral et de cut-back ou d'une émulsion de bitume. Ce mélange est préparé sur la route avec un équipement spécial.

## CHAPITRE 2 : CARACTERISTIQUES D'UTILISATION DES BITUMES

## **Chapitre II : CARACTERISTIQUES D'UTILISATION DES BITUMES [ 2 ]**

La viscosité, la cohésion interne, l'adhésivité et la résistance au vieillissement sont les 4 caractéristiques essentielles des bitumes.

Nous étudierons successivement ces propriétés avec quelques autres qui s'y rattachent.

### **II-1- VISCOSITE DES BITUMES**

La viscosité des bitumes peut être étudiée dans le cadre général de la viscosité des liquides ; toutefois, cette étude se complique ici du fait qu'on n'a pas affaire à un liquide simple, mais à une solution vraisemblablement colloïdale, susceptible par conséquent de prendre, avec le temps, sous l'effet du repos, de l'abaissement de température et de la concentration en résines, une certaine structure rigide, variable avec les conditions d'ambiance et de milieu.

Les bitumes, selon la température et selon la nature des composants résineux, sont susceptibles de voir leur viscosité varier dans des limites extrêmement étendues, allant de la consistance de liquides s'écoulant facilement, jusqu'à celle de corps vitreux présentant les caractéristiques et la fragilité des verres.

Par conséquent, les viscosités se mesurent de manières très différentes.

Ainsi, la viscosité des bitumes à l'état de liquide visqueux est mesurée par un viscosimètre à écoulement, muni d'un ajutage.

Par contre, pour les bitumes qui se présentent sous forme de solides mous, semi-durs, on mesure la viscosité au moyen d'un appareil cylindrique à tige centrale chargée et comprenant dans l'espace annulaire le liant que l'on veut étudier.

La mesure de la viscosité des bitumes par la durée d'écoulement à travers un orifice ne peut s'appliquer donc aux bitumes non fluidifiés qu'on utilise dans les enrobés.

Ainsi, pour caractériser l'état de viscosité ou de dureté des bitumes de cette nature, différents essais ont été standardisés ; à savoir :

- la mesure de la pénétration ;
- la mesure du point de ramollissement.

### **II-1-1- Pénétration standard des bitumes**

La pénétration standard d'un bitume se définit comme étant la pénétration à 25 °C d'une aiguille normalisée, chargée de 100 g et abandonnée durant 5 s. Elle s'évalue en dixièmes de mm, que l'on appelle points.

La mesure se fait avec un appareil appelé pénétromètre Dow. La pénétration standard d'un bitume caractérise son état de viscosité à une température standard (25 °C).

La pénétration standard est en fait la mesure de dureté qui sert de base à la classification des bitumes routiers. Ces bitumes sont caractérisés par deux nombres qui représentent les limites inférieures de la pénétrabilité à 25 °C.

La température ayant une grande influence sur la dureté des bitumes, il est très important de préciser la température à laquelle l'essai est réalisé.

Pour mieux définir un bitume, on est d'ailleurs amené à effectuer quelques fois des essais à plusieurs températures ; ce qui permet de tracer une courbe de pénétrabilité en fonction de la température, très utile pour définir la susceptibilité thermique.

### **II-1-2- Point de ramollissement**

Les bitumes, selon qu'ils soient plus ou moins susceptibles, se ramollissent plus ou moins vite. Il est donc utile de mesurer le point de ramollissement des bitumes.

Le point de ramollissement le plus utilisé est le point de ramollissement bille anneau. Le point de ramollissement est en effet la température à laquelle une bille d'acier de diamètre standard, après avoir traversé la matière à essayer (collée dans un anneau), atteint le fond d'un vase standardisé rempli d'un liquide que l'on chauffe progressivement, et dans lequel on a plongé l'appareil.

Comme pour la pénétrabilité, on donne pour chaque classe de bitume des limites inférieure et supérieure entre lesquelles doivent se trouver les valeurs de température bille anneau des bitumes routiers.

Il faut noter que les bitumes ne sont pas des corps purs ; par conséquent, ils n'ont pas de points de fusion francs. Leur consistance décroît quand la température s'élève.

C'est ainsi qu'on a fixé arbitrairement un repère de changement de consistance : le point de ramollissement.

La connaissance simultanée de la pénétration d'un bitume et de son point de ramollissement bille anneau permet de juger sommairement l'état de dureté de ce bitume aux différentes températures utiles.

## **II-2- SUSCEPTIBILITE DES BITUMES**

La susceptibilité d'un bitume, c'est la caractéristique marquant son aptitude à varier plus ou moins de consistance pour une variation déterminée de la température. C'est une caractéristique qui change avec la température, il faut donc préciser cette dernière.

Par exemple, dans les pays froids, si l'on examine un liant dur et fragile, comme un liant qui a vieilli durant l'hiver, il est certain que sa caractéristique à examiner, c'est la viscosité et non la pénétration. En effet, la pénétration sera déjà très faible, lorsque le bitume, quoique très dur, ne se montrera pas encore d'une fragilité excessive, tandis que pour un nouvel et très fort accroissement de viscosité, ce liant pourra devenir friable et sans valeur ; la pénétration, très faible primitivement, aura à peine changé et la susceptibilité du bitume à la pénétration apparaîtra comme très faible.

Par contre, dans les pays chauds comme le Sénégal, où il s'agit d'examiner le comportement du bitume durant les périodes de hautes températures, c'est indubitablement la susceptibilité à la pénétration qu'il faut considérer.

En effet, à ce degré de consistance, la viscosité varie très faiblement quand la température se modifie, alors que la température varie dans les limites extrêmement grandes ; d'autre

part, ce n'est plus la fragilité qui est une conséquence de la viscosité élevée que l'on craint, mais la déformation plastique, les empreintes, les ondulations et les poinçonnements.

Comme tous les liants hydrocarbonés, les bitumes sont très visqueux à la température ambiante mais leur consistance varie avec la température. Ce qui fait que par temps froid ils deviennent plus rigides, par temps chaud ils se ramollissent et à haute température ils sont fluides et s'écoulent facilement.

Cependant, il faut non seulement préciser la température, mais préciser aussi la nature exacte de la caractéristique que l'on envisage pour repérer la consistance. Cette caractéristique peut être, soit la viscosité, soit la pénétration.

Suivant que sa consistance varie considérablement ou faiblement en fonction de la température, on dit que le bitume est très ou peu susceptible à la température.

Ainsi, en construction routière, on évitera d'utiliser des bitumes de haute susceptibilité pour que les propriétés mécaniques restent constantes le plus longtemps possible dans la gamme de variation habituellement admise à la surface des chaussées.

Cependant, il faut noter que du fait que les corps noirs absorbent de la chaleur, la température d'un revêtement peut être nettement plus élevée que celle de l'air ambiant.

On caractérise la susceptibilité analytique par la valeur absolue de la tangente angulaire, à la température considérée, de l'angle que fait la courbe de consistance du bitume avec l'axe des températures.

Autrement dit, la susceptibilité est la valeur absolue de la dérivée de la fonction considérée, par rapport à la température.

Nous désignerons la susceptibilité par le symbole  $\sigma$ .

La susceptibilité par rapport à la viscosité sera donc :

$$\sigma_v = \left| \frac{dZ}{dt} \right|$$

La susceptibilité par rapport à la pénétration sera :

$$\sigma_p = \left| \frac{dP}{dt} \right|$$

Si on représente la viscosité ou la pénétration par des fonctions exponentielles, les susceptibilités seront elles – même des fonctions exponentielles.

Pour obtenir une constante du bitume, on peut considérer ce que l'on appelle la susceptibilité logarithmique que l'on note  $\Sigma$ .

La susceptibilité logarithmique est en effet la valeur absolue de la dérivée, par rapport au temps, du logarithme népérien de la fonction représentant la consistance du bitume.

Prenons la fonction représentant la viscosité :

$$\eta = \eta_0 e^{-k \cdot t}$$

On a :

$$\log \eta = \log \eta_0 - k \cdot t$$

Par suite :

$$\Sigma_v = \left| \frac{d(\log \eta)}{dt} \right| = k$$

S'il s'agit de la viscosité logarithmique qui nous intéresse le plus, c'est à dire celle due à la pénétration, nous pouvons prendre la fonction suivante :

$$P = P_0 e^{h \cdot t}$$

On a :

$$\log P = \log P_0 + h \cdot t$$

D'où :

$$\Sigma_p = \left| \frac{d(\log P)}{dt} \right| = h$$

On peut démontrer que, pour un même bitume, la susceptibilité logarithmique due à la viscosité est approximativement le double (plus exactement 1,93 fois), de la susceptibilité logarithmique due à la pénétration.

On a en effet sensiblement :

$$\eta \cdot p^2 = \lambda$$

$\lambda$  étant une constante ; et la température étant la même pour  $\eta$  et pour  $p$ .

Donc :

$$\log \eta = 2 \log P = \log \lambda$$

Par suite, on a :

$$\log \eta_o = 2 \log P_o = \log \lambda$$

On tire des équations données plus haut :  $2h = k$

Ou encore :  $\Sigma_v = 2 \Sigma_p$

### II-3- COHESION INTERNE

La cohésion interne d'un bitume est caractérisée par sa résistance à la rupture à une température déterminée, et dans des conditions de vitesse de déformation ou de vitesse de mise en charge également fixées.

Ce que l'on entend par cohésion interne n'a donc pas un sens aussi précis que celui envisagé en mécanique des sols où l'on désigne sous le nom de cohésion, la résistance à la rupture par cisaillement.

La cohésion interne d'un bitume, c'est la résistance à la rupture du bitume dans sa masse, sous l'action des efforts appliqués dans des conditions d'ambiance et de chargement déterminées.

On entend plus souvent par le mot cohésion, une résistance à la rupture par traction et par unité de surface de collage exécutée par le bitume donné et sous une épaisseur déterminée. C'est ainsi que le cohésimètre Léauté opère par traction d'un ressort sur des poids collés sur un socle avec une épaisseur de bitume bien fixée.

La cohésion interne des bitumes est une fonction de leur viscosité. Jusqu'à un certain stade de dureté ou de viscosité, la cohésion interne croît en même temps que la viscosité ; à partir d'une viscosité ou d'une dureté suffisamment grande, ou à partir d'une vitesse de mise en charge ou d'une vitesse d'élongation suffisamment élevée, un autre phénomène apparaît : c'est la rupture par fragilité. A partir de ce moment, la cohésion interne diminue si la viscosité ou la dureté augmente. Il se produit en effet un déchirement ; c'est dire une rupture dont la propagation n'est pas instantanée dans la surface de cohésion ; cette dernière se produit de manière progressive. C'est une rupture par fragilité similaire à celle des verres et des matériaux fragiles, qui provoque la dégradation des bitumes vieilliss ; à savoir : les fissurations, les émiettements des revêtements, etc....

## II-4- DUCTILITE DES BITUMES

La ductilité d'un bitume est une caractéristique complexe qui tient à la fois compte de la viscosité et de la cohésion, que nous venons d'étudier.

Un bitume est ductile, à une certaine vitesse, lorsqu'il peut être étiré à cette vitesse, et à une certaine température, sans se rompre :

On mesure la ductilité des bitumes au moyen d'un ductilimètre standard à la température de 25°C et à la vitesse d'allongement de 5 cm par minute.

L'essai se fait dans de l'eau pour éliminer en majeure partie l'effet de pesanteur. On effectue les mesures sur des éprouvettes en forme de 8.

En effet, une éprouvette est moulée dans des conditions et dimensions normalisées. L'éprouvette est ensuite amenée à la température normalisée de l'essai, et étirée selon un taux de vitesse déterminé jusqu'à ce que le fil reliant les deux bouts se coupe. L'allongement en centimètres, au moment où le fil du matériau se coupe, est désigné comme étant la ductilité.

Pour un même bitume, la ductilité croît quand la température s'élève. Pour des bitumes de même nature, la ductilité croît quand la pénétration croît ; c'est-à-dire quand la viscosité diminue.

Pour des bitumes de natures différentes, la ductilité croît quand la susceptibilité croît. Par exemple, les bitumes oxydés sont à pénétration égale, moins ductiles que les bitumes de distillation directe ; ils sont en effet moins susceptibles.

Cependant, la ductilité n'est pas autre chose qu'une aptitude à la déformation par fluage. En réalité, quand on étudie la correspondance entre la pénétration et la viscosité de divers bitumes dont les caractéristiques sont étudiées à la même température, on s'aperçoit que, pour une même pénétration, la viscosité n'est pas la même suivant les divers types de bitumes. En effet, la viscosité est d'autant plus élevée que le bitume a une structure

prononcée. C'est ainsi que les bitumes soufflés ont des viscosités plus élevées que les bitumes de distillation directe ; ceci veut dire que pour une même faculté à se laisser pénétrer par l'aiguille standard, le bitume soufflé se laisse moins bien déformer par cisaillement ; il s'adapte moins bien ; il est donc moins ductile.

D'autre part, il est moins susceptible parce que sa texture plus rigide lui permet d'être moins influencé par les variations de températures.

## II-5- L'ADHESIVITE

L'adhésivité des bitumes est une question d'importance capitale au point de vue de la technique routière ; mais c'est également l'une des questions les plus difficiles à étudier scientifiquement en raison de sa complexité. D'autre part, beaucoup de revêtements risquent d'être défaillants par manque d'adhésivité du bitume en présence d'eau.

En raison de sa complexité, l'adhésivité ne peut pas se définir d'une manière simple et unique. On peut dire que l'adhésivité d'un bitume pour un minéral (agrégat ou granulat) est marquée par la résistance au décollement du bitume quand il a été appliqué sur ce granulat.

Mais, une telle définition qui paraît très simple a priori, est en réalité incomplète. Cette définition est en effet inutilisable ; car on pourrait s'imaginer qu'il suffit, pour mesurer cette adhésivité, d'opérer par collage dans des conditions déterminées, du bitume sur le granulat, et de voir quel est l'effort qu'il faut appliquer pour rompre l'adhérence ; c'est-à-dire pour décoller le bitume et mettre à nu la surface du granulat.

La question n'est pas aussi simple en réalité. En effet, pour qu'une définition soit convenable, il faut d'abord qu'elle soit basée sur une méthode de mesure fiable.

Or il est impossible, par une méthode mécanique de traction, de cisaillement ou de torsion, de provoquer le décollement ; sauf dans les cas particuliers où il n'y a pas eu effectivement de collage, soit à cause de l'eau ou de la poussière interposée, soit à cause du fait que le

bitume, au moment où il a été appliqué, n'était pas dans un état de viscosité suffisamment faible pour pouvoir mouiller le granulat.

En effet, si l'on tente un décollement par action mécanique après un collage bien réussi avec un bitume, on s'aperçoit qu'on obtient en réalité une rupture dans la masse du bitume, due à un fléchissement de la cohésion interne. Cette rupture sera facile par exemple lorsque le bitume est peu visqueux, car la cohésion est fonction dans ce cas, surtout de la viscosité et aussi de certaines liaisons dans la masse, donnant à cette dernière de la rigidité.

Dans d'autre cas, si le bitume est extrêmement visqueux, la rupture dans la masse sera due à la fragilité et se réalisera par un phénomène de déchirement.

## II-6- LA RESISTANCE AU VIEILLISSEMENT [ 4 ]

Sous l'influence de l'oxygène de l'air, en particulier, les caractéristiques d'origine des bitumes se modifient plus ou moins au cours du temps. D'une façon générale, ceci se traduit par un durcissement et une diminution de la susceptibilité thermique.

Cependant, il existe deux types de vieillissement : le vieillissement à court terme ou vieillissement de construction et le vieillissement à long terme ou vieillissement en service. La simulation en laboratoire de ces deux vieillissements fait appel à des tests accélérés (augmentation de la température, flux d'air ou d'oxygène, pression, mélange, film mince)

### II-6-1- Le vieillissement à court terme

Au cours de l'enrobage, l'élévation de température que subit le bitume, provoque un premier vieillissement appelé vieillissement de construction ou vieillissement à court terme.

L'essai RTFOT (Rolling Thin-Film Oven) à 163°C simule d'une manière adéquate le vieillissement de construction. Il consiste à soumettre un échantillon de bitume à la température de 163°C en étuve ventilée pendant 75 min. On mesure ensuite la température bille et anneau et la pénétration du bitume.

Une évolution importante de ces deux grandeurs après RTFOT traduit une sensibilité excessive au vieillissement.

## II-6-2- Le vieillissement à long terme

Après un vieillissement de construction, les liants bitumineux subissent in situ un vieillissement en service ou à long terme dans les conditions climatiques régnant sur la

route. Ce deuxième vieillissement est un facteur très important dans le comportement à long terme des enrobés bitumineux..

Pour le vieillissement à long terme, deux techniques sont principalement en lice : le PAV (Pressure Ageing Vessel) proposé par le SHRP, mais pour lequel il existe une certaine réticence au niveau européen, et le RCAT (Rotating Cylinder Ageing Test) développé par le Centre de Recherches Routières (C.R.R). Le PAV est un essai statique tandis que le RCAT est un essai dynamique.

Une comparaison des résultats obtenus via ces deux techniques montre que les réactions en cause sont similaires. Des équivalences de temps de vieillissement RCAT-PAV ont été établies. Des interférences dues à la dégradation et/ou la ségrégation du polymère ont été mises en évidence dans le cas des bitumes modifiés aux polymères. Les avantages de la technique de vieillissement RCAT pour simuler le vieillissement à long terme des liants bitumineux sont mis en lumière.

### II-6-2-1- Présentation de la technique PAV

L'essai PAV a été développé et mis au point dans le cadre du programme SHRP.

Les conditions d'essais sont les suivantes :

- coupelles (contenance  $\pm 50$  g de liant) placées dans une enceinte à haute pression,
- température d'essai : généralement  $100^{\circ}\text{C}$ ,
- pression d'air :  $2,1$  MPa,
- durée :  $20$  h.

Au niveau européen, il y a assez bien de réticences à adopter cet essai. Les inconvénients en sont : une température un peu trop élevée, film trop épais ( $\pm 5$  mm), essai statique et enceinte sous haute pression à  $100^{\circ}\text{C}$ . La durée de  $20$ h constitue par contre un avantage important.

### II-6-2-2- Présentation de la technique RCAT

L'essai RCAT a été élaboré par le CRR dans le cadre de la mise au point d'un essai accéléré simulant d'une manière adéquate le vieillissement des liants in situ.

Les conditions d'essais sont les suivantes :

- $500$ - $550$  g de liant sont placés dans le cylindre en inox qui tourne à la vitesse de  $1$  tour/min,
- à l'intérieur, un cylindre plein en inox assure la formation d'un film sur la paroi interne ( $\pm 3$  mm), le renouvellement de la surface exposée et l'homogénéisation de l'échantillon,
- un flux de  $4,5$  L/h d'oxygène assure une atmosphère enrichie en oxygène et son renouvellement,
- la température préconisée est généralement de  $85^{\circ}\text{C}$ ,
- la durée de l'essai est de  $240$  h.

La durée de l'essai constitue évidemment son désavantage majeur. Par contre, l'essai est dynamique, le vieillissement homogène, la quantité de liant vieilli suffisante pour des essais complémentaires, et il permet des prélèvements (25-30 g) à différentes échéances afin de suivre l'évolution des caractéristiques et propriétés en fonction du temps de réaction. Une approche cinétique des phénomènes de vieillissement est donc rendue possible.

#### II-6-2-3- Temps de vieillissement équivalent RCAT-PAV avec ou sans RTFOT préalable.

Le Centre de Recherches Routières (CRR) a étudié ce temps de vieillissement équivalent sur sept liants bitumineux (2 bitumes et 5 bitumes modifiés aux polymères (asphaltites)) ayant subi ou non un vieillissement RTFOT préalable de 75 min.

La conclusion générale concernant l'équivalence RCAT-PAV est que :

a) 20 h de vieillissement PAV correspondent :

- en moyenne, à 168 h de vieillissement RCAT à 85°C pour la plupart des liants examinés,
- à 126 h de vieillissement RCAT à 85°C pour le PmB PHC43 à forte teneur en SBS,
- et à 200 h de vieillissement RCAT à 85 °C pour le PmB PHC44 (polymère : EVA),

b) ou, inversement, que 240 h de vieillissement RCAT à 85 °C correspondent :

- en moyenne, à 28,5 h de vieillissement PAV à 100 °C pour la plupart des liants examinés,

- à 38 h de vieillissement PAV pour le PmB PHC43 à forte teneur en SBS,
- et à 24 h de vieillissement PAV pour le PmB PHC44 (polymère : EVA).

#### **II-6-4- Temps de vieillissement équivalent PAV-RTFOT et RCAT-RTFOT**

L'approche est similaire à celle utilisée dans le paragraphe précédent. L'analyse, les observations et les constatations faites par le CRR sont très similaires pour l'équivalence RCAT-RTFOT et PAV-RTFOT au facteur équivalence RCAT-PAV près.

En valeur moyenne, l'équivalence RCAT-RTFOT peut donc aller d'environ 10 à 45 h selon le liant considéré (et, même jusqu'à 54 h pour certaines caractéristiques). La valeur moyenne générale, pour autant que cela ait un sens, se situe vers les 28 h de vieillissement

RCAT à 85°C pour obtenir un vieillissement équivalent aux 75 min de l'essai RTFOT à 163°C.

En valeur moyenne, l'équivalence PAV-RTFOT peut donc aller d'environ 1 à 5 h selon le liant (et, même jusqu'à 6, pour certaines caractéristiques).

Ceci confirme donc aussi que les mécanismes réactionnels sont différents lors du test RTFOT à 163°C et du test RCAT ou PAV et que deux types d'essais sont indispensables pour appréhender le comportement des liants bitumineux vis-à-vis de ces deux vieillissements.

## II-7- AUTRES CARACTERISTIQUES DES BITUMES

En dehors des essais classiques tels que la pénétrabilité et la température bille anneau, les caractéristiques des bitumes peuvent être mesurées par des essais moins conventionnels de traction directe et de rhéologie.

Les essais rhéologiques donnent accès à deux grandeurs :

- la norme du module complexe  $|G^*|$  couramment appelé « module ». Elle exprime la rigidité du produit et décroît donc en fonction de la température.
- l'angle de phase  $\Psi$ , ou déphasage, est quant à lui en relation avec l'aptitude du produit à se déformer.

Le module et l'angle de phase sont déterminés avec un viscoanalyseur Metravib à différentes fréquences allant de 5 à 250 Hz et à différentes températures comprises entre -20 et +60 °C.

Pour évaluer le comportement des bitumes vis à vis du fluage à hautes températures, et de la fragilité à basses températures, on exploite les valeurs de  $|G^*|$  et de  $\Psi$ , respectivement à 60 °C et -10 °C.

En ce qui nous concerne, on peut exploiter donc ces valeurs de  $|G^*|$  et de  $\Psi$  à 60 °C pour apprécier le comportement de nos bitumes face au fluage à hautes températures.

Le critère  $|G^*| / \sin\Psi$  a aussi été retenu pour apprécier le pouvoir anti-orniérant des bitumes.

La résistance à l'orniérage est d'autant plus forte que le rapport est élevé.

L'essai de traction directe, emprunté à l'industrie du caoutchouc consiste à étirer une éprouvette de bitume normalisée (dite H2), dans un caisson isotherme.

L'allongement est déterminé à la température de 5°C et pour une vitesse d'étirement de 100 mm / mn.

# CHAPITRE 3 : CARACTERISTIQUES DES ENROBES

### **Chapitre III : CARACTERISTIQUES DES ENROBES**

Pour la caractérisation des enrobés, on procède à deux essais essentiels que sont l'essai de stabilité de Marshall (estimation des caractéristiques mécaniques) et l'essai LCPC Duriez (mesure de la tenue à l'eau).

#### **III-1- CARACTERISTIQUES MARSHALL [ 3 ]**

L'essai est réalisé au moyen de l'appareil de Marshall ; méthode normalisée ASTM-D1551-76.

Cette détermine deux propriétés physiques des enrobés :

- *la stabilité* due à la résistance à la rupture en N ;
- *le fluage* due à la déformation à la rupture en unité de 0,25 mm.

Il faut noter qu'ici on applique la charge sur la surface latérale de l'éprouvette en utilisant l'appareil de Marshall.

Cet essai exige :

- que les matériaux utilisés soient conformes aux spécifications ;
- que les agrégats utilisés aient la bonne granulométrie ;
- que la densité relative brute moyenne des agrégats soit connue ;
- que la grosseur maximale des particules d'agrégats ne dépasse pas 25,4 mm.

L'essai permet de doser l'enrobé en observant l'ordre suivant :

- on prépare les éprouvettes selon différentes teneurs en bitume ;
- on détermine la densité relative brute de ces éprouvettes ;
- on détermine la stabilité et le fluage de ces éprouvettes ;
- on détermine la densité relative maximale théorique de ces mêmes éprouvettes après leur rupture au moyen de l'appareil de Marshall

Une fois ces travaux terminés, on pourra calculer et tracer les courbes des propriétés qui serviront à trouver la teneur en bitume optimale et à faire le dosage des enrobés conformément aux normes exigées.

### **III-1-1- Préparation du mélange et confection des éprouvettes**

Dans un récipient métallique pouvant contenir environ  $2000 \text{ cm}^3$ , on verse 1200 g de mélange de granulats reconstituée à partir de 2, 3 ou 4 classes granulaires dont les pourcentages varient en fonction de l'enrobé désiré.

Dans le même récipient, on rajoute une certaine quantité de bitume et on malaxe le tout. Le mélange est porté à  $140^\circ\text{C}$  avant d'être versé dans le moule Marshall.

On place un disque de papier filtre sur le mélange et on procède au compactage à raison de 50 coups sur chacune des deux faces de l'éprouvette.

Le compactage doit se faire en maintenant verticale la tige de la dame et on laisse tomber le marteau 50 fois. On démonte et on remonte ensuite le moule en intervertissant la base et la hausse. On répète à nouveau le compactage. Ensuite on enlève la base, puis on place l'éprouvette toujours dans le moule, sous un robinet d'eau pendant 5 minutes environ pour accélérer le refroidissement. Enfin, on démoule et on passe à la confection de l'éprouvette suivante. Le nombre d'éprouvettes à confectionner pour chaque dosage en liant est de cinq (5) dont les deux (2) seront à utiliser pour la détermination de la densité apparente de l'enrobé par pesée hydrostatique. Les trois autres sont conservées à l'air libre pendant 5 heures avant d'être immergées dans un bain hydrostatique réglé à  $60^\circ\text{C}$  pendant 30 min.

### **III-1-2- Ecrasement des éprouvettes Marshall**

L'éprouvette sortie du bain hydrostatique est placée dans l'appareil Marshall constitué par deux mâchoires s'appuyant sur deux génératrices opposées d'une presse pouvant développer 2 tonnes pendant l'écrasement qui est diamétral ; la vitesse de presse devant être constante et égale à  $0,845 \text{ mm / seconde}$ .

On note l'effort maximum développé par la presse et la déformation latérale de l'éprouvette au moment de la rupture qui sont respectivement la stabilité et le fluage.

### **III-2- CARACTERISTIQUES DURIEZ [ 7 ]**

C'est un essai essentiellement français dont le mode opératoire, de même que l'appareillage sont contenus dans le protocole opératoire du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (L.C.P.C), il s'applique aux mélanges bitumineux dans lesquels tous les agrégats passent au tamis à mailles carrées de 20 mm.

#### **III-2-1- Préparation du mélange et confection des éprouvettes**

Dans le cas de l'essai L.C.P.C. Duriez, le poids de granulats considéré est de 1000 g, le pourcentage de bitume est le pourcentage optimal de bitume trouvé à partir de l'essai Marshall.

Les granulats et le bitume sont mis dans un récipient métallique puis le mélange est porté par chauffage à 140°C.

Le moulage des éprouvette Duriez se fait à l'aide de moules cylindriques de 80 mm de diamètre inférieur et de 150 mm de hauteur.

Le compactage se fait à la presse CBR avec une pression de 120 kg / cm<sup>2</sup>, cette pression est appliquée en une minute et maintenue pendant cinq minutes.

On réalise généralement sept (7) éprouvettes pour une même teneur en liant dont :

- une (1) est réservée à la détermination de la densité apparente par pesée hydrostatique ;
- trois (3) éprouvettes à écraser après sept (7) jours de conservation à 18°C à l'air libre ;
- trois (3) éprouvettes à écraser après sept (7) jours de conservation à 18°C dans l'eau.

### III-2-2- Ecrasement des éprouvettes

L'écrasement se fait à l'aide d'une presse à la vitesse de 1 mm / seconde avec un avancement contrôlé. On note l'effort maximum, converti en résistance exprimée en  $\text{kg/cm}^2$ . On note également l'écrasement au moment de la rupture et on détermine l'indice d'affaissement qui est le rapport de l'écrasement sur la hauteur initiale de l'éprouvette.

Pour les éprouvettes immergées, on détermine le pourcentage d'absorption ou d'imbibition qui est le rapport de l'augmentation de poids sur le poids initial. Le gonflement volumétrique est le rapport entre l'augmentation de volume et le volume initial.

# CHAPITRE 4 : TYPES DE BITUMES UTILISES EN ENROBES DENSES AU SENEGAL

#### **Chapitre IV : LES DIFFERENTES SORTES DE BITUMES UTILISES EN ENROBES DENSES AU SENEGAL**

Pour les enrobés denses, on utilise les bitumes semi - durs. D'après leur mode de fabrication, on peut obtenir des bitumes dont la consistance est variable.

Il existe cinq (5) principaux types de bitumes semi – durs, identifiés par les numéros : 40 / 50, 60 / 70, 85 / 100, 120 / 150 et 200 / 300. Pour chaque type, la pénétration devra être comprise entre les deux valeurs qui le composent.

Il faut noter que, c'est l'effet de pénétrabilité qui permet de classer les bitumes semi – durs.

Le type 40 / 50 est le plus dur et le type 200 / 300 est le plus mou. Le genre de projet et les conditions climatiques nous aident à choisir le type approprié.

Ainsi, pour les régions chaudes comme le cas du Sénégal, on utilise partout des bitumes durs ; contrairement aux régions froides où on utilise des bitumes mous.

En effet, les types de bitumes à faible pénétration seront utilisés dans les zones à climat chaud comme dans notre pays, pour éviter le ramollissement aux températures élevées en été.

Les bitumes routiers les plus couramment utilisés au Sénégal sont le 40 / 50 et le 60 / 70. En effet, depuis toujours on utilisait au Sénégal le bitume 40 / 50 pour les enrobés denses ; mais, vu la mauvaise résistance au vieillissement de ce type de bitume ; il commence à être remplacé depuis environ trois ans par le type 60 / 70 qui vieillit moins vite.

# CHAPITRE 5 : SPECIFICATIONS DES BITUMES UTILISES EN ENROBES DENSES

**Chapitre V : SPECIFICATION DES BITUMES UTILISES EN ENROBES DENSES AU SENEGAL**

Dans notre pays, on utilise les bitumes 40 / 50 et 60 / 70 pour la fabrication d'enrobés denses. Les deux sections suivantes donnent leurs spécifications.

**V-1- SPECIFICATIONS DU BITUME 40 / 50**

<b>CARACTERISTIQUES</b>	<b>LIMITES A RESPECTER</b>	<b>METHODES NORMALISEES DE REFERENCES</b>
- Densité relative à 25°C	1,00 – 1,10	NFT 66-007
- Ramollissement (°C)	47 – 60	NFT 66-008
- la pénétrabilité à 25°C, 100g, 5s	40 – 50	NFT 66-066
- Ductilité à 25°C (cm)	> 60	NFT 66-066
- Point éclair (°C)	> 250	NFT 66-118
- Solubilité (%)	> 99,5	NFT 66-012
- Perte de masse au chauffage (%)	< 1	NFT 66-011
- Pourcentage de pénétrabilité (%)	>70	NFT 66-004
<b>UTILISATIONS</b>	Fabrication d'enrobés à chaud pour : - Construction routes neuves en béton bitumineux pour les trafics très denses et poids lourds. - Les renforcements de chaussées. - Pistes aéroportuaires. - Routes et autoroutes à grande circulation.	

**Tableau 1 : Spécifications des bitumes 40-50**

### V-1- SPECIFICATIONS DU BITUME 60 / 70

CARACTERISTIQUES	LIMITES A RESPECTER	METHODES NORMALISEES DE REFERENCES
- Densité relative à 25°C	1,00 – 1,10	NFT 66-007
- Ramollissement (°C)	43 – 56	NFT 66-008
- la pénétrabilité à 25°C, 100g, 5s	60 – 70	NFT 66-066
- Ductilité à 25°C (cm)	> 80	NFT 66-066
- Point éclair (°C)	> 230	NFT 66-118
- Solubilité (%)	> 99,5	NFT 66-012
- Perte de masse au chauffage (%)	< 1	NFT 66-011
- Pourcentage de pénétrabilité (%)	>70	NFT 66-004
<b>UTILISATIONS</b>	Fabrication d'enrobés à chaud pour : - Construction routes neuves en micro-béton, en béton bitumineux et en Sand-asphalt. - Routes à grande circulation et autoroutes - Les renforcements de chaussées. - Routes à lourds trafics. - fabrication d'émulsions de bitumes.	

**Tableau 2 : Spécifications des bitumes 60-70**

# CHAPITRE 6 : PROBLEMATIQUE DES BITUMES UTILISES EN ENROBES DENSES

## **Chapitre VI : PROBLEMATIQUE DES BITUMES UTILISES EN ENROBES DENSES AU SENEGAL**

La qualité des bitumes est très variable sur le marché alors que le contrôle est rendu problématique par la complexité physico – chimique de ces produits organiques.

Pour le cas du Sénégal, les moyens de contrôle de la qualité des bitumes sont insuffisants au moment où le marché mondial est totalement inondé de bitumes de mauvaise qualité ; ce qui constitue un handicap de taille pour la recherche de la qualité des revêtements bitumineux.

Dans cette partie, nous allons étudier les principaux problèmes des bitumes qui causent en général la dégradation des couches de roulement faites en enrobés denses dans le cas du Sénégal.

Les problèmes sont en général différés et se signalent pendant la période de service des tapis d'enrobés.

Les faibles performances résultent en général du choix des constituants, de la mauvaise formulation des mélanges et des conditions de fabrication qui ne respectent pas toujours les limites d'utilisation des produits.

Un autre problème vient du fait que le bitume utilisé n'est pas toujours suffisamment connu ; la courbe rhéologique permettant d'en apprécier le comportement sur un large spectre de températures n'est jamais presque établie. La courbe rhéologique permet aussi de tenir compte de façon judicieuse de la vitesse de refroidissement des enrobés pour organiser l'agencement des ateliers de compactage.

L'origine des bitumes est loin d'être maîtrisée, alors qu'on sait qu'un bitume peut, en fonction de son origine, présenter des caractéristiques particulières.

Sans cette formalité, il est hasardeux d'appliquer à la lettre les températures de mélange et de mise en œuvre qui sont prescrites dans les documents de marchés.

Les spécifications imposées dans les CPT aux enrobés et à leurs composants, ne sont pas toujours exhaustives. D'ailleurs, même si elles le sont, les conditions ne sont pas réunies pour leur vérification et leur contrôle effectifs au moment de l'exécution des travaux.

A titre d'exemple, l'essai relatif à la mesure du degré de vieillissement des bitumes ne peut être effectué dans aucun laboratoire au Sénégal.

Un autre problème qui limite l'amélioration de la qualité des revêtements en enrobés denses réside dans le fait que la plupart des grandes entreprises spécialisées du secteur routier, ont leurs centrales à enrobés installées à Dakar ou dans ses environs. Il découle de cette situation que le recours à la technique du tapis roulant d'enrobés ne peut être envisagé qu'à des coûts prohibitifs, du moins pour les projets de taille moyenne localisés en dehors du rayon d'influence de ces centrales.

En outre, un problème essentiel des enrobés vient du fait qu'on ne se soucie pas trop de la température de fabrication des enrobés qui se trouve être entre 150 et 175°C.

« Au delà de 180°C, le liant perd une partie de ses huiles et est ainsi dégradé. On fabrique alors un enrobé surchauffé qui sera difficile à mettre en œuvre mécaniquement ou manuellement et délicat à compacter.

Les enrobés brûlés vieillissent prématurément et présentent assez rapidement une très fâcheuse tendance au désenrobage.

Ainsi, les plaques des gâchés brûlées correspondent en général aux zones dégradées dont il est difficile d'expliquer les causes.

Les enrobés brûlés sont marrons et ternes, au lieu d'être noirs et brillants, dégagent une fumée bleutée et laissant échapper une odeur caractéristique qui n'est pas celle du bitume chaud ». [ 6 ]

# CHAPITRE 7 : ETUDES EXPERIMENTALES

**Chapitre VII : ETUDES EXPERIMENTALES**

**VII-1- CARACTERISTIQUES D'IDENTIFICATION DES BITUMES 40 / 50 ET 60 / 70**

**VII-1- 1- Les essais de laboratoire utilisés**

Les caractéristiques des bitumes 40 / 50 et 60 / 70 ont été mesurées par des essais classiques tels que la pénétrabilité, la température Bille Anneau (point de ramollissement) et la densité. Voir annexe 1.

**VII-1-2 Les résultats**

Dans le tableau ci dessous est représenté, les valeurs mesurées au laboratoire, sur un échantillon de bitume de type 40 / 50 provenant de ERES et un autre de type 60 / 70 provenant du chantier de route Fatick-Kaolack qui est entrain d'être réalisé par Jean LEFEBVRE SENEGAL.

CARACTERISTIQUES	NORMES OU MODES OPERATOIRES	UNITES	BITUMES TESTES	
			40 / 50	60 / 70
DENSITE	NF EN ISO 3838	--	1,063	1,021
PENETRABILITE STANDARD à 25° C	NF EN 1426	1 / 10	46	61
POINT DE RAMOLLISSEMENT Bille Anneau	NF EN 1427	° C	54	50

**Tableau 3 : Caractéristiques des bitumes 40-50 et 60-70**

L'ensemble des résultats obtenus sur le 40 / 50 et le 60 / 70 à tester est comparé aux spécifications données pour ces deux types de bitumes.

Dans cette partie, il s'agit de contrôler sommairement la qualité des bitumes utilisés pour la fabrication des enrobés ; contrôles qui ont pour but principal de vérifier la concordance de leurs caractéristiques avec celles données par leurs spécifications.

Les valeurs numériques sont présentées dans le tableau suivant :

CARACTERISTIQUES		VALEURS MESUREES AU LABORATOIRE		VALEURS DONNEES PAR LES SPECIFICATIONS	
		40 / 50	60 / 70	40 / 50	60 / 70
PENETRATION	Min			40	60
	Mes	46	61		
	Max			50	70
RAMOLLISSEMENT Bille et Anneau	Min			47	43
	Mes	54	50		
	Max			60	56
DENSITE	Min			1,00	1,00
	Mes	1,063	1,021		
	Max			1,10	1,10

**Tableau 4 : Conformité des caractéristiques des bitumes aux spécifications**

## VII-2- ETUDE DE LA VARIATION DE LA PENETRABILITE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE

### VII-2-1- Essais à effectuer

Pour définir la susceptibilité thermique des bitumes, on est amené à effectuer des essais de pénétrabilité à différentes températures. Ces essais permettent en effet de tracer une courbe de pénétrabilité en fonction de la température ; courbe très utile pour avoir une idée de la susceptibilité thermique.

En ce qui nous concerne, nous allons étudier cette variation de pénétrabilité sur une large plage de températures adéquate à notre climat ; c'est à dire entre 20 et 60°C.

Voir annexe 2.

### VII-2-2- Résultats de l'étude

Pour les deux types de bitumes qu'on a eu à étudier la variation de leur pénétrabilité en fonction de la température, les résultats sont donnés sous forme de tableaux et de courbes donnés ci-dessous :

TEMPERATURES T (°C)	PENETRABILITE EN FONCTION DE T	
	Bitume 40 / 50	Bitume 60 / 70
20	37	38
30	68	86
40	184	197
50	233	244
60	248	256

*Tableau 5 : Variation de la pénétration en fonction de la température*

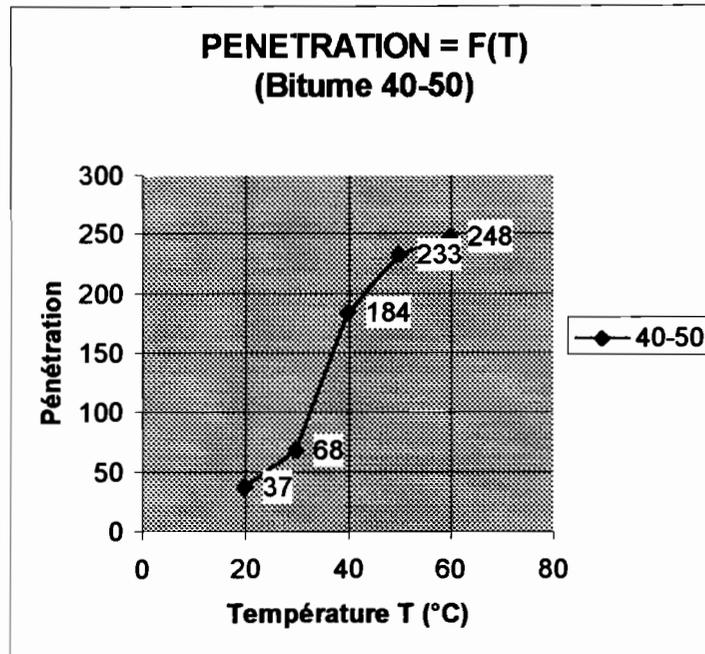


Figure 1 : Variation de la pénétration en fonction de la température pour le bitume 40 / 50

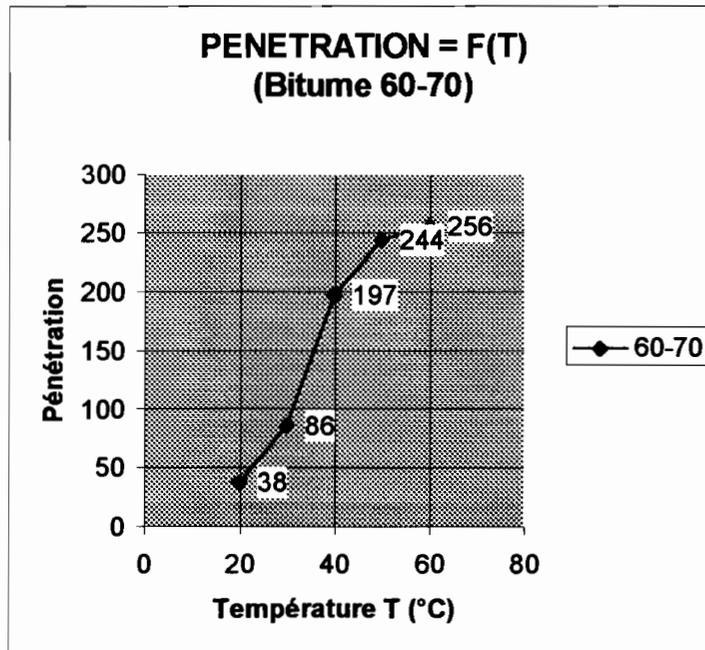


Figure 2 : Variation de la pénétration en fonction de la température pour le bitume 60 / 70

## VII-3- ETUDE DE LA SUSCEPTIBILITE THERMIQUE DES DEUX TYPES DE BITUMES

### VII-3-1- Procédure

Cette caractéristique marquant l'aptitude d'un bitume à varier plus ou moins de consistance pour une variation déterminée de la température ne peut être déterminée sans les essais de pénétrabilité qu'on vient de faire sur un large spectre de température.

Comme indiqué plus haut, la susceptibilité thermique d'un bitume est la valeur de la dérivée de la fonction considérée par rapport à la température. C'est en effet, la valeur absolue de la tangente angulaire, à la température considérée, de l'angle que fait la courbe de pénétrabilité avec l'axe des températures.

Cependant, comme nous l'avons vu précédemment, les courbes de pénétrabilité en fonction de la température ne sont pas en réalité des droites.

Ainsi, pour étudier la susceptibilité thermique des bitumes, il est nécessaire de faire la régression linéaire de ces courbes jusqu'à ce que l'on ait réellement des droites. Pour une bonne régression, il faut que le coefficient de régression  $R^2$  soit proche de 1

A partir de ce moment, il ne restera qu'à déterminer la valeur absolue de la dérivée de la fonction considérée, ou autrement déterminer la tangente angulaire à la température considérée, de l'angle que fait la courbe de pénétrabilité avec l'axe des températures ; pour ainsi connaître la susceptibilité thermique.

### VII-3-2- Résultats

Après régression linéaire des courbes de pénétrabilité en fonction de la température, nous avons obtenu pour chaque type de bitume les droites ci-dessous ; droites très utiles pour avoir une idée de la susceptibilité des bitumes.

➤ Pour le bitume 40 / 50

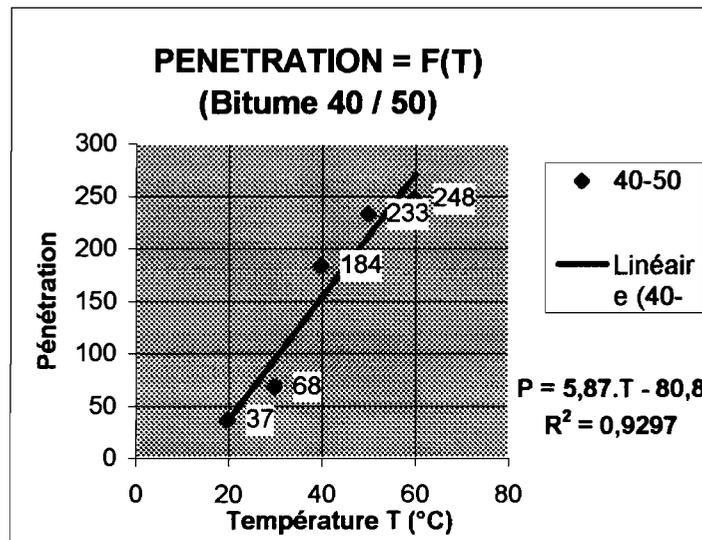


Figure 3 : Courbe de tendance de la pénétration en fonction de la température du bitume 40 / 50.

D'après la courbe ci-dessus, la fonction représentant la variation de la pénétration du bitume 40/50 en fonction de la température est la suivante :

$$P = 5,87 \cdot T - 80,8$$

La susceptibilité  $\sigma_P$  du bitume 40 / 50 sera donc :

$$\sigma_P = \left| \frac{dP}{dT} \right| = \frac{d(5,87 \cdot T - 80,8)}{dT}$$

$$\sigma_P = 5,87$$

➤ Pour le bitume 60 / 70

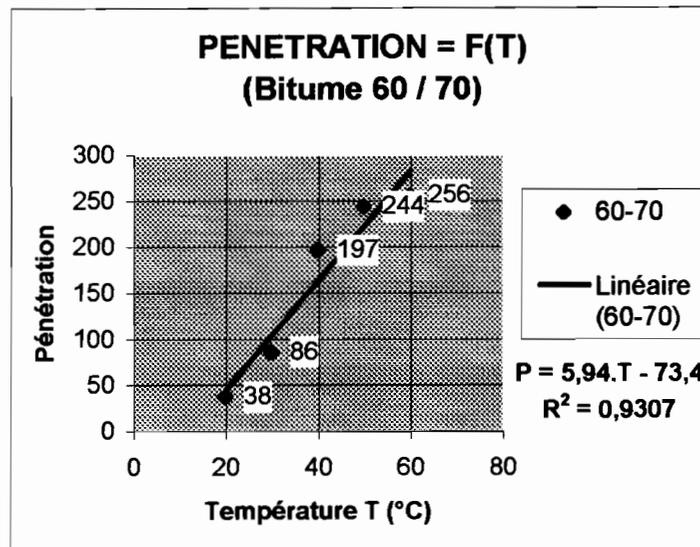


Figure 4 : Courbe de tendance de la pénétration en fonction de la température du bitume 60 / 70

D'après la courbe ci-dessus, la fonction représentant la variation de la pénétration du bitume 60/70 en fonction de la température est la suivante :

$$P = 5,94 \cdot T - 73,4$$

La susceptibilité  $\sigma_p$  du bitume 60 / 70 sera donc :

$$\sigma_p = \left| \frac{dP}{dT} \right| = \frac{d(5,94 \cdot T - 73,4)}{dT}$$

$$\sigma_p = 5,94$$

## VII-4- STABILITE ET FLUAGE DES ENROBES DENSES REALISES AVEC LES BITUMES 40 / 50 ET 60 / 70

### VII-4-1- Conformité des matériaux aux spécifications

On a déjà vu au tableau 4 de la section VI-1-2 que les deux bitumes à utiliser sont conformes aux spécifications ; ceci par rapport seulement aux essais qu'on a pu faire.

Par contre pour les granulats, leur conformité aux spécifications et leur bonne qualité seront vérifiées aux sections suivantes :

#### VII-4-1-1- Granulométrie

On a utilisé comme granulat un mélange de 0/3, de 3/8 et de 8/16 à des proportions bien déterminées.

Pour le choix du pourcentage de chaque classe granulaire, on s'est basé essentiellement sur le rendement des anciennes routes similaires.

C'est ainsi qu'on a choisi la formulation de la route Guéoul-Baralé dont les pourcentages sont les suivants :

- 45 % de 0/3 ;
- 30 % de 3/8 ;
- 25 % de 8/16.

Les résultats de la granulométrie partielle de chaque classe granulaire, et ceux de la granulométrie pratique du mélange sont donnés en annexe 3.

La granulométrie partielle nous a permis de voir que les granulats utilisés sont réellement du 0/3, du 3/8 et du 8/16.

Pour que le pourcentage de chaque classe granulaire soit acceptable, il faut que la courbe granulométrique du mélange rentre bien dans le fuseau granulaire

Dans notre cas, la courbe granulométrique du mélange de ces trois classes granulaires aux pourcentages définis précédemment rentre bien dans le fuseau ( voir annexes 3 ).

Notre mélange d'agrégats a donc une bonne granularité ; aussi, la grosseur maximale des particules d'agrégats ne dépasse pas 25,4 mm ; elle est de 16 mm.

#### VII-4-1-2- Densité relative

La densité relative des agrégats est ordinairement déterminée pour deux raisons :

- 1- pour permettre le calcul des vides dans les enrobés à l'état compacté ;
- 2- pour ajuster les quantités des fractions constituantes de l'agrégat dans l'enrobé, lorsque la densité relative de ces fractions constituantes varie sensiblement.

Le tableau 6 suivant donne les densités relatives de chacune des trois classes granulaires.

<b>CLASSE GRANULAIRE</b>	0 / 3	3 / 8	8 / 16
<b>DENSITE RELATIVE</b>	2,956	2,94	2,94

**Tableau 6 : Densité relative**

D'après le tableau, on voit que la densité ne varie presque pas en fonction de la classe granulaire. On prendra donc pour les agrégats, une densité relative brute moyenne de **2,94**.

#### VII-4-1-3- Coefficient de forme ou d'aplatissement

Il caractérise la forme du granulat. Un coefficient de forme faible correspond à un granulat présentant un certain nombre de plats, éclats et aiguilles. D'après les spécifications des granulats pour enrobés, ce coefficient doit être inférieur ou égal à 25.

Dans notre cas, les coefficients d'aplatissement A des granulats utilisés sont donnés au tableau 7 ci-dessous.

<b>Type de granulats</b>	3 / 8	8 / 16
<b>Coefficient de Forme</b>	25	16

**Tableau 7 : Coefficient de forme des granulats**

Le coefficient d'aplatissement est donc conforme aux spécifications.

#### VII-4-1-4- Essai Los Angeles

Il permet de caractériser la résistance des granulats aux chocs. Plus un matériau est dur, plus son coefficient Los Angeles est faible. D'après les spécifications des granulats pour enrobés, ce coefficient doit être inférieur ou égal à 15.

Les résultats de cet essai sur le granulat 8 / 16 sont donnés au tableau 8 ci-dessous.

<b>Essai N°</b>	1	2
<b>Coefficient Los Angeles</b>	12,32	12,10
<b>Moyenne</b>	<b>12,21</b>	

**Tableau 8 : Coefficient Los Angeles des granulats**

Le coefficient Los Angeles est donc conforme aux spécifications.

#### VII-4-1-5- Essai Micro Deval

Il permet de mesurer la résistance à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat à une charge abrasive. Plus un matériau est dur, plus son coefficient micro Deval est faible. D'après les spécifications, ce coefficient doit être inférieur ou égal à 15.

Les résultats de cet essai sont consignés dans le tableau 9 ci-dessous.

<b>Essai N°</b>	1	2
<b>Coefficient Micro Deval</b>	11,59	11,57
<b>Moyenne</b>	<b>11,58</b>	

**Tableau 9 : Coefficient Micro Deval**

Le coefficient Micro Deval est donc conforme aux spécifications.

### VII-4-2- Résultats essais de fluage et de stabilité (MARSHALL)

Les essais ont été faits sur les deux types de bitumes ( 40 / 50 et 60 / 70 ) avec la même formulation d'agrégats :

- 45 % de 0/3 ;
- 30 % de 3/8 ;
- 25 % de 8/16.

Feuilles d'essais Marshall ( voir annexe 4 ).

#### VII-4-2-1- Avec le bitume 40 / 50

Les essais de Marshall sur le bitume 40 / 50 ont donné les résultats suivants présentés sous forme de tableaux et de courbes :

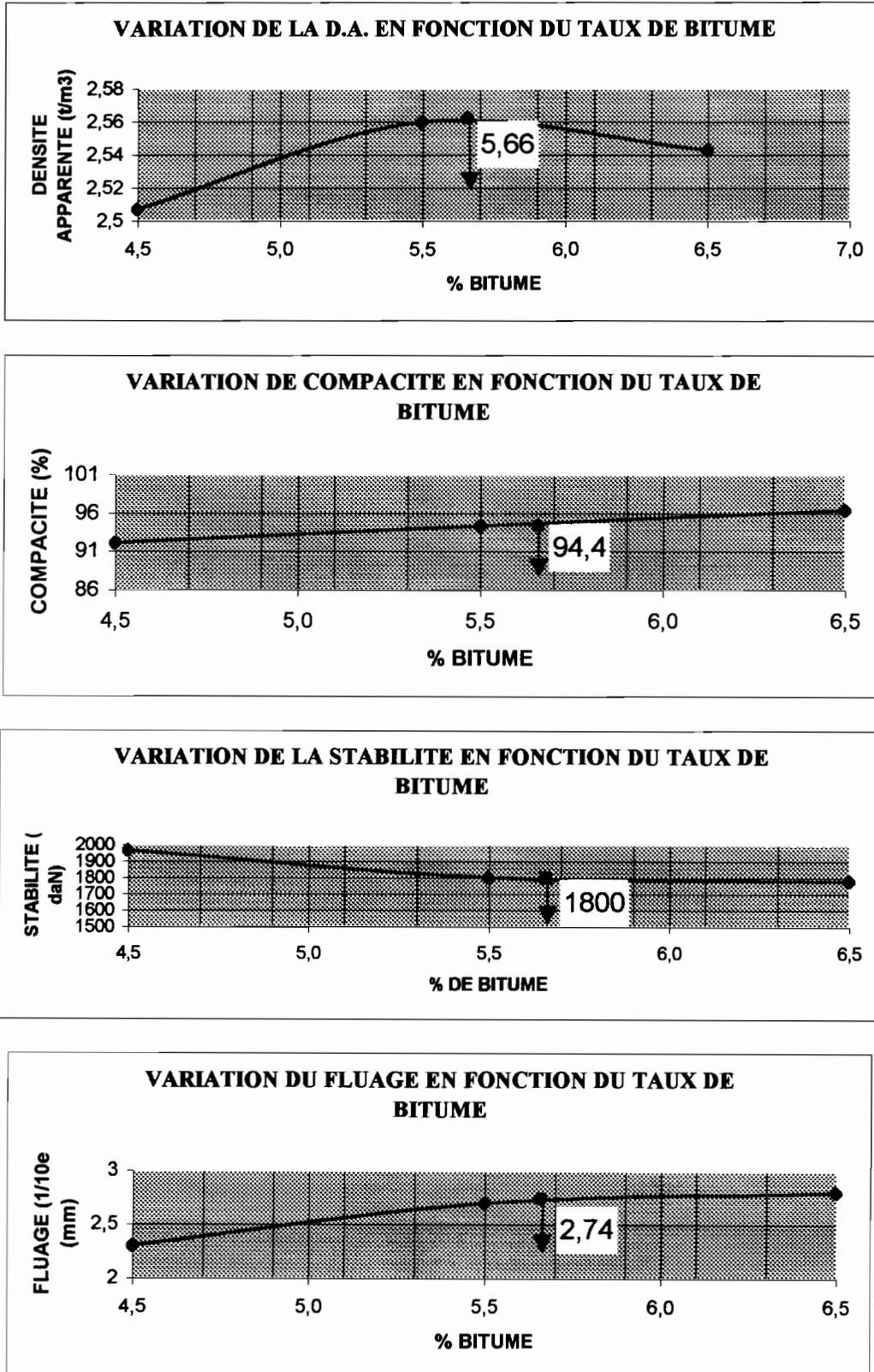
% bitume	Stabilité
4,5	1967
5,5	1803
6,5	1780

% bitume	D.A.
4,5	2,507
5,5	2,56
6,5	2,543

% bitume	Compacité
4,5	92,1
5,5	94,3
6,5	96,4

% bitume	Fluage
4,5	2,3
5,5	2,7
6,5	2,8

**Tableau 10:** Résultats essais Marshall sur le bitume 40 / 50



**Figure 5 :** Variation des caractéristiques Marshall des enrobés denses réalisés avec le 40/50

Le tableau récapitulatif des résultats des essais Marshall sur le bitume 40 / 50 sont donnés au tableau 11 suivant :

		<b>Optimum</b>	
<b>Module de richesse</b>	3,12	<b>3,95</b>	4,5
<b>Bitume %</b>	4.5	<b>5.7</b>	6.5
<b>Densité apparente</b>	2.507	<b>2.560</b>	2.543
<b>Densité réelle</b>	2.723	<b>2.715</b>	2.639
<b>Compacité (%)</b>	92.1	<b>94.3</b>	96.4
<b>Stabilité (daN)</b>	1780	<b>1800</b>	1780
<b>Fluage (mm)</b>	2.3	<b>2.7</b>	2.8

**Tableau 11: Récapitulatif des résultats des essais Marshall sur le bitume 40 / 50**

VII-4-2-2- Avec le bitume 60 / 70

Les essais de Marshall sur le bitume 60 / 70 ont donné les résultats suivants présentés sous forme de tableaux et de courbes

% bitume	Stabilité
3,5	1716
4,5	1740
5,5	1833

% bitume	D.A.
3,5	2,446
4,5	2,483
5,5	2,468

% bitume	Compacité
3,5	88,33
4,5	91,15
5,5	92,05

% bitume	Fluage
3,5	2,17
4,5	2,7
5,5	3

**Tableau 12:** Résultats essais Marshall sur le bitume 60 / 70

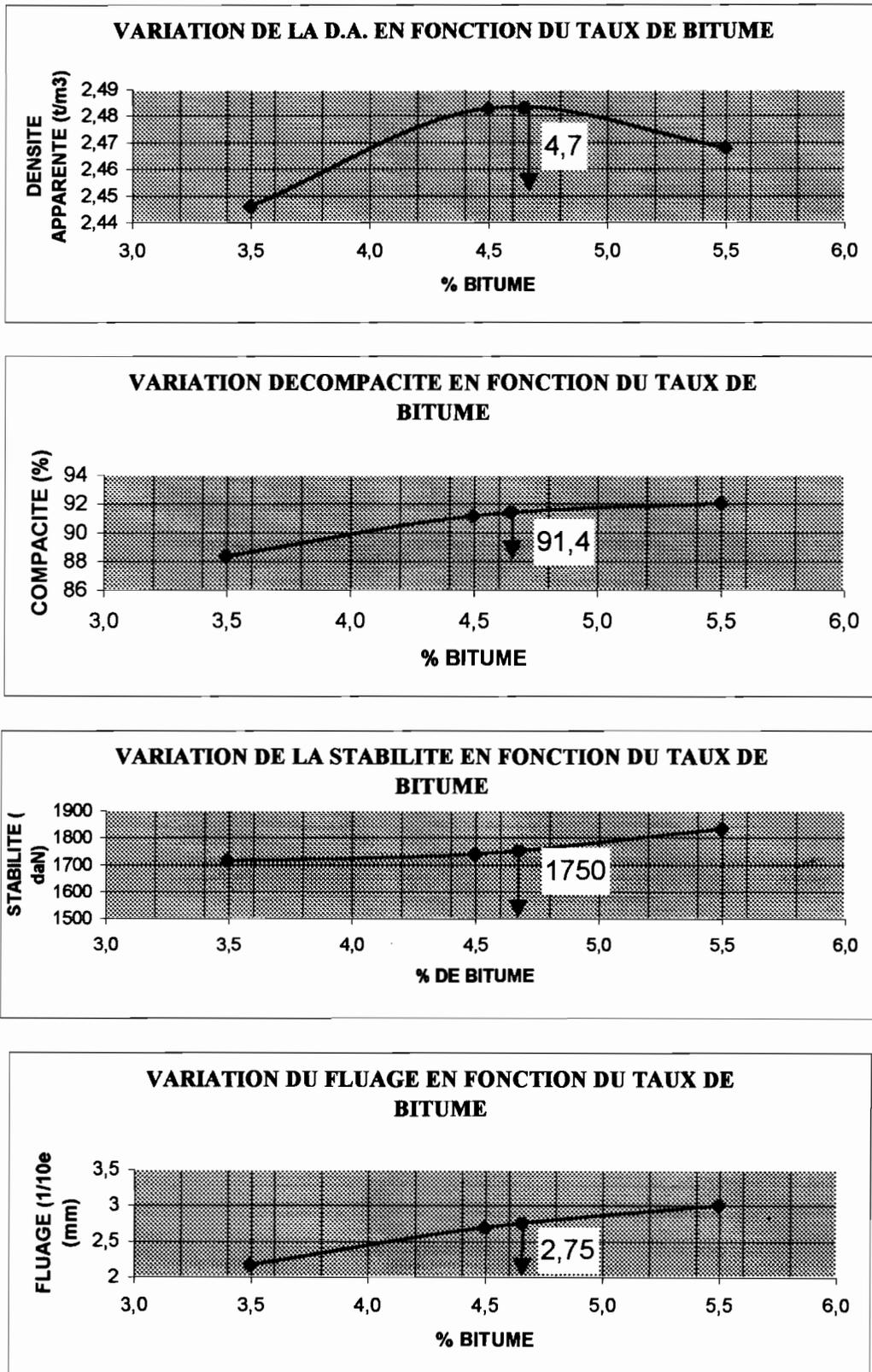


Figure 6 : Variation des caractéristiques Marshall des enrobés denses réalisés avec le 60/70

Le tableau récapitulatif des résultats des essais marshall sur le bitume 60 / 70 sont donnés au tableau 13 suivant :

		<b>Optimum</b>	
<b>Module de richesse</b>	2,42	3,26	3,81
<b>Bitume %</b>	3.5	4.7	5.5
<b>Densité apparente</b>	2.447	2.484	2.468
<b>Densité réelle</b>	2.769	2.724	2.681
<b>Compacité (%)</b>	88.4	91.2	92.1
<b>Stabilité (daN)</b>	1717	1750	1833
<b>Fluage (mm)</b>	2.2	2.7	3.0

**Tableau 13:** Récapitulatif des résultats des essais Marshall sur le bitume 60 / 70

## VII-5- RESISTANCE MECANIQUE ET RESISTANCE AU DESENROBAGE PAR L'EAU DES ENROBES

Ces caractéristiques se déterminent avec les essais Duriez. (voir annexe 4).

Les résultats des essais duriez qu'on a fait sur les enrobés réalisés avec les deux types de bitumes sont donnés au tableau 14 ci-dessous.

TYPE DE BITUME	40 / 50	60 / 70
MODULE DE RICHESSE	3,95	3,26
% BUTIME	5,7	4,7
DENSITE APPARENTE	2,434	2,441
DENSITE REELLE	2,676	2,769
COMPACITE	91	88,5
RAPPORT imm./comp	0,71	0,73
TAUX MOY D'ABS	2	2,2

*Tableau 14 : Résultats des essais Duriez*

# CHAPITRE 8 : ETUDES COMPARATIVES

## Chapitre VIII : ETUDES COMPARATIVES

Cette étude est essentiellement basée sur l'ensemble des résultats d'essais qu'on a eu à faire sur les deux types de bitumes et les enrobés réalisés avec ces derniers.

### VIII-1- SUR LE PLAN DE LA QUALITE TECHNIQUE

#### VIII-1-1- Conformité aux spécifications

D'après les résultats des quelques essais d'identification qu'on a eu à faire sur les deux bitumes, on peut dire que ces derniers sont conformes aux spécifications.

Cependant, nous ne pouvons pas dire que cette conformité est totale, car par manque d'outil expérimental, nous n'avons pas pu vérifier la conformité par rapport à toutes les spécifications données pour les bitumes 40 / 50 et 60 / 70.

Tous les essais comme la résistance au vieillissement, la ductilité, l'adhérence, que nous n'avons pas fait, sont de nos jours indispensables pour vérifier la conformité des bitumes aux spécifications.

#### VIII-1-2- Sensibilité à la variation de température

A la section VII-3- nous avons étudié la susceptibilité thermique pour les deux types de bitumes. Cette étude s'est faite sur la base de la susceptibilité analytique à l'aide de courbes de tendance linéaire avec des coefficients de régression proches de 1 (respectivement 0,92 et 0,93 pour le 40 / 50 et le 60 / 70).

La susceptibilité pour les deux bitumes est donnée au tableau suivant :

BITUMES	40 / 50	60 / 70
SUSCEPTIBILITE	5,87	5,94

**Tableau 15 : Susceptibilité des deux types de bitumes**

D'après ces valeurs, on peut dire que le bitume 60 / 70, par rapport au 40 / 50, est un peu plus susceptible de changer de consistance avec la variation de température.

Cependant la différence entre les susceptibilités des deux bitumes n'est pas trop nette. Ils ont presque la même valeur de susceptibilité.

D'ailleurs, à la figure ci-dessous, on voit nettement que les deux droites représentant la variation de la pénétration en fonction de la température des deux types de bitumes, sont sensiblement parallèles et rapprochées. Ceci veut dire que les deux types de bitumes changent de manière presque identique de consistance avec la variation de la température.

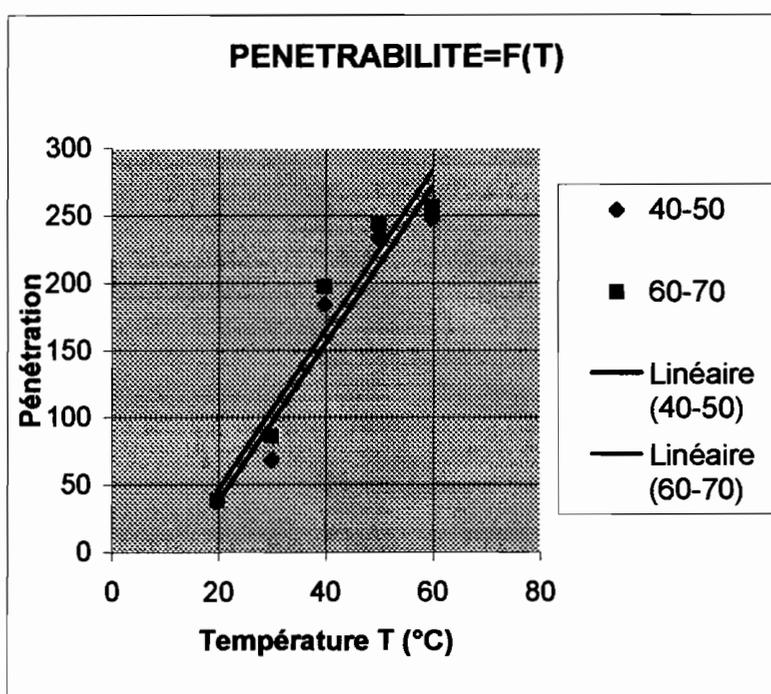


Figure 7 : Courbe de tendance de la pénétration en fonction de la température des bitumes  
( 40 / 50 et 60 / 70 )

### VIII-1-3- Résistance au vieillissement

Par simple constatation, les entreprises ont remarqué que le bitume 40 / 50 vieillit plus rapidement que le bitume 60 / 70.

En effet, puisque le bitume 40 / 50 est plus dur et présente naturellement moins d'huiles que le 60 / 70, ses caractéristiques d'origine se modifient plus vite sous l'influence de la chaleur et de l'oxygène de l'air.

Le vieillissement rapide du 40 / 50 se traduit par un durcissement élevé qui est à l'origine de certaines dégradations au niveau des couches de roulement des routes.

En effet, après un vieillissement très avancé, la couche d'enrobé devenue très dur voire même rigide, aura tendance à subir l'effet de dalle sous l'action des charges pneumatiques.

#### VIII-1-4- Caractéristiques Marshall et Duriez

Le tableau 16 ci-dessous nous permettra de faire la comparaison des deux types de bitumes par rapport à leurs caractéristiques Marshall et Duriez.

DONNEES	EXPERIMENTALES		CPTP
	40 / 50	60 / 70	
Module de richesse	3,95	3,26	$3,5 < K < 4,25$
% Bitume	5,7	4,7	Voisin de 3,8
Compacité Marshall	94,3	91,2	$88 < C < 92$
Stabilité	1800	1750	$S > 1000$
Fluage	2,67	2,7	$F < 4$
Résistance Duriez	60	61	$R > 45$
Rapport imm./comp	0,71	0,73	$0,75 < r / R < 1$
Taux moy d'abs	2,0	2,2	$Ta < 3$

**Tableau 16 :** Valeurs expérimentales et valeurs CPTP des caractéristiques Marshall et Duriez.

Les valeurs expérimentales des essais Marshall données au tableau 16 ci-dessus montre que :

- la stabilité avec le 40 / 50 est supérieure à la stabilité avec le 60 / 70 ;
- le fluage avec le 40 / 50 est légèrement inférieur au fluage avec le 60 / 70 ;

Ainsi, par rapport au 60 / 70, le bitume 40 / 50 confère aux enrobés une résistance plus élevée, et une déformation plus petite.

Par ailleurs, les valeurs expérimentales des essais Duriez montre que :

- le 60 / 70 a une meilleure résistance au désenrobage par l'eau car son rapport  $r / R$  est supérieur à celui du 40 / 50 ;
- l'augmentation de poids de l'éprouvette réalisée avec le 60 / 70 après immersion est plus importante que celle avec le 40 / 50 car le  $T_a$  du 60 / 70 est supérieur à celui du 40 / 50.

Cependant, les enrobés réalisés avec le 40 / 50 et ceux réalisés avec le 60 / 70 répondent presque à toutes les exigences des CPTP.

## VIII-2- SUR LE PLAN ECONOMIQUE

Sur le marché, il n'y a presque pas de différence de prix unitaire entre le bitume 40 / 50 et le bitume 60 / 70.

Cependant, il existe une différence entre les coûts des enrobés réalisés avec des bitumes de classes différentes. Cette différence de coût vient du fait que le type de bitume influe sur la teneur en bitume optimale dans les enrobés ; et aussi les coûts de mise en œuvre des enrobés sont directement influencés par le type de bitume utilisé.

Les résultats des essais Marshall ont montré que, pour une formulation d'enrobés donnée, la teneur en bitume optimale requise pour le 40 / 50 est supérieure à celle pour le 60 / 70. Ceci montre que : pour la fabrication d'enrobés, la quantité de bitume 40 / 50 à utiliser est en général supérieure à celle qu'on a à utiliser pour le 60 / 70.

Ensuite, il a été constaté qu'il est plus facile de chauffer le 60/70 que de chauffer le 40/50. Ainsi, au chantier on utilise en général 15 litres de gasoil pour chauffer le 40 / 50 alors que pour le 60 / 70 on en utilise que 10 litres.

En outre, il faut dire qu'il est plus facile de compacter le 60/70 que de compacter le 40/50. Lorsque les enrobés sont transportés, le durcissement rapide de la couche enveloppante, surtout pour le cas des enrobés réalisés avec le 40 / 50, rend le compactage difficile à réaliser.

En gros, la mise en œuvre des enrobés réalisés avec le 60 / 70 est moins coûteuse que celle des enrobés avec le 40 / 50.

La différence au niveau des coûts de fabrication et de mise en œuvre des enrobés réalisés avec les deux types de bitume qu'on a eu à étudier nous permet de conclure que le bitume 60 / 70 est plus économique que le 40 / 50 pour les enrobés

Par ailleurs ses avantages économiques semblent être les raisons de la préférence du 60/70. L'argument de vieillissement plus précoce du 40/50 n'est pas encore justifié.

# CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

## CONCLUSION GENERALE

La variation et la mauvaise qualité des bitumes sur le marché constitue un handicap de taille pour la recherche de la qualité des revêtements bitumineux au Sénégal où les moyens de contrôle de la qualité sont insuffisants.

Aujourd'hui, pour avoir des revêtements de bonne qualité, il est indispensable d'étudier toutes les caractéristiques des bitumes et celles des enrobés.

Ainsi, l'étude qui a été faite sur le comportement des bitumes utilisés en enrobés denses nous a permis d'apporter des éclaircissements sur les points suivants :

- Les résultats d'études de la caractérisation des bitumes à l'aide des essais classiques ont montré que les deux bitumes sont conformes aux spécifications. Cependant, il reste à étudier le vieillissement surtout à long terme et la rhéologie des bitumes, afin de prédire le comportement dans le temps des couches de roulement même après plusieurs années de circulation et sous climat chaud ; l'étude de ces caractéristiques permettra de maîtriser les problèmes de fluage et de déformation au cours du temps.

- Le type de bitume et le dosage en bitume sont des paramètres qui influent directement sur les caractéristiques Marshall et Duriez.

- Le traitement des données Marshall et Duriez au laboratoire montre que les enrobés réalisés avec les deux types de bitumes répondent dans l'ensemble aux exigences des cahiers des prescriptions techniques.

Les résultats nous permettent enfin de dire que tous les deux bitumes peuvent être utilisés pour la fabrication d'enrobés denses au Sénégal.

Cependant, pour éviter le vieillissement précoce, faciliter la mise en oeuvre et réduire le coût des enrobés, il serait préférable d'utiliser le bitume 60 / 70.

Nous ne saurions terminer de rédiger ce mémoire, sans souhaiter la poursuite de ce travail après un renfort du niveau d'équipement de nos laboratoires.

## RECOMMANDATIONS

En terme de recommandations, nous formulons ceci :

- un renforcement du niveau d'équipement de nos laboratoires d'essais qui a toujours constitué un obstacle aux tentatives de mettre nos spécifications techniques en convergence avec les normes internationales.
- une maîtrise parfaite des caractéristiques suivantes :
  - le vieillissement de construction et le vieillissement de service pour le comportement à court et à long terme des enrobés ;
  - les tests rhéologiques sur les bitumes pour la bonne maîtrise des problèmes de fluage et de déformation au cours du temps.
- une adéquation entre les spécifications et les moyens de mesure pour avoir une bonne corrélation entre la qualité de l'ouvrage fini et le projet d'exécution.
- une amélioration des CPT en mettant en place un réseau de laboratoires d'essais en mesure d'apporter des réponses pertinentes à certaines interrogations.
- une mise en place d'un outil de caractérisation des bitumes qui intègre également les spécifications d'usage des entreprises et laboratoires européens.
- un respect de la température de fabrication des enrobés qui dépend du type d'enrobé, pour éviter la brûlure des enrobés correspondant à des zones dégradées difficiles à expliquer.
- Une vérification du temps de stockage des bitumes pour éviter d'utiliser des bitumes qui ont déjà atteint un pourcentage élevé de leur durée de vieillissement.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [ 1 ] Jean George MALLOUK, ing – les enrobés bitumineux. Tome 1 : Théorie.
- [ 2 ] Cours de Route 2 ( extrait : Traité des matériaux de construction ). 1992.
- [ 3 ] Jean-George MALLOUK, ing – les enrobés bitumineux. Tome 2 : Laboratoires.
- [ 4 ] Dr. André VERHASSELT, Centre de Recherches Routières – Simulation du vieillissement au moyen du RCAT (Rotating Cylinder Ageing Test).
- [ 5 ] EUROVIA S.A. – Avis techniques. Chaussées 127, mars 2002.
- [ 6 ] EUROVIA MANAGEMENT – TechnoDEROUTE. Numéro 137, novembre 2002.
- [ 7 ] Mamadou FAYE – Enrobés denses et bétons bitumineux au Sénégal : Analyse de données et expérimentations sur de nouveaux matériaux de substitution. 1998.

## ANNEXES

ANNEXE 1 : Caractéristiques d'identification des bitumes

ANNEXE 2 : Pénétrabilité en fonction de la température

ANNEXE 3 : Essais sur les granulats

ANNEXE 4 : Essais Marshall et Duriez

## **ANNEXE 1 : Caractéristiques d'identification des Bitumes**

### La pénétrabilité du bitume selon la norme de l'ASTM-D5

1. Type de bitume utilisé	40 / 50	
2. Durée du chauffage du bitume pour le liquéfier (maximum 30 min)	60 min	
3. Température atteinte par le bitume pour qu'il devienne liquide	130°C	
4. Profondeur du bitume dans le récipient en mm (minimum = pénétration anticipée + 10 mm)	35	32
5. Durée de refroidissement de l'échantillon à l'air à une température de 15 à 30°C : a) Pour les pénétrations inférieures à 200, on utilise un récipient un diamètre de 55 mm et une profondeur de 35 mm. Dans ce cas, cette varie de 60 à 90 min. b) Pour les pénétrations entre 200 et 250, on utilise un récipient un diamètre de 70 mm et une profondeur de 45 mm. Dans ce cas, cette varie de 90 à 120 min.	120	125
6. Durée de refroidissement de l'échantillon dans le bain maintenu à la température de l'essai. Il faut respecter les mêmes exigences que celle indiquées à la ligne 5.	60	65
7. Conditions de l'essai : Température en °C	25	
Masse en g	100	
Durée en secondes	5	
8. Pénétrations obtenues exprimées en 0,1 mm pour les deux récipients utilisés	45 47 46	46 45 48
9. Différence maximale permise entre la plus petite et la plus grande valeur de pénétration obtenue	0 à 49 : 2 50 à 149 : 4 150 à 249 : 6 250 et plus : 8 3	
10. Pénétration moyenne à 1 près. Il ne faut oublier de rejeter les résultats qui ne sont pas conformes aux exigences indiquées à la ligne 9.	46	
11. Spécifications selon la norme de l'ASTM-D948 (voir paragraphe 10)	40 / 50	
12. Conformité aux spécifications	Conforme	

### La pénétrabilité du bitume selon la norme de l'ASTM-D5

1. Type de bitume utilisé	60 / 70	
2. Durée du chauffage du bitume pour le liquéfier (maximum 30 min)	60 min	
3. Température atteinte par le bitume pour qu'il devienne liquide	125°C	
4. Profondeur du bitume dans le récipient en mm (minimum = pénétration anticipée + 10 mm)	30	32
5. Durée de refroidissement de l'échantillon à l'air à une température de 15 à 30°C : b) Pour les pénétrations inférieures à 200, on utilise un récipient un diamètre de 55 mm et une profondeur de 35 mm. Dans ce cas, cette varie de 60 à 90 min. b) Pour les pénétrations entre 200 et 250, on utilise un récipient un diamètre de 70 mm et une profondeur de 45 mm. Dans ce cas, cette varie de 90 à 120 min.	180	183
6. Durée de refroidissement de l'échantillon dans le bain maintenu à la température de l'essai. Il faut respecter les mêmes exigences que celle indiquées à la ligne 5.	60	62
7. Conditions de l'essai : Température en °C	25	
Masse en g	100	
Durée en secondes	5	
8. Pénétrations obtenues exprimées en 0,1 mm pour les deux récipients utilisés	60 61 61	61 61 62
9. Différence maximale permise entre la plus petite et la plus grande valeur de pénétration obtenue	0 à 49 : 2 50 à 149 : 4 150 à 249 : 6 250 et plus : 8 2	
10. Pénétration moyenne à 1 près. Il ne faut oublier de rejeter les résultats qui ne sont pas conformes aux exigences indiquées à la ligne 9.	61	
11. Spécifications selon la norme de l'ASTM-D948 (voir paragraphe 10)	60 / 70	
12. Conformité aux spécifications	Conforme	

**Densité relative  
du bitume semi-dur  
Méthode normalisée ASTM-D70-76**

Bitume 40 / 50

Température de l'essai ; il faut mentionner si l'essai a été effectué à une température de 25°C ou 15,6°C	25°C	
Echantillon n°	1	2
1. Masse du pycnomètre propre et sec avec le bouchon (à 0,001 g près).	31,53	31,57
2. Masse du pycnomètre complètement rempli d'eau distillée avec le bouchon, après au moins 30 min dans le bain à la température de l'essai (à 0,001 g près).	62,06	62,3
3. Masse du pycnomètre rempli aux $\frac{3}{4}$ de bitume qu'on a chauffé à une température de 146 à 168°C pour un maximum de 30 min et qu'on a refroidi à la température de la pièce pour un minimum de 40 min (à 0,001 g près).	51,35	51,50
4. Masse du pycnomètre décrit au numéro 3 rempli d'eau distillée, le tout placé dans le bain à la température de l'essai pendant au moins 30 min (à 0,001 g près).	63,18	63,49
5. Masse du bitume (à 0,001 g près) : 3 – 1	19,82	19,93
6. Masse de l'eau qui remplit complètement le pycnomètre (à 0,001 g près) : 2 – 1	30,53	30,73
7. Masse de l'eau qui remplit la partie du pycnomètre qui n'est pas occupée par le bitume (à 0,001 g près) : 4 – 3	11,83	11,99
8. Masse de l'eau dont le volume est égal à celui du bitume qui remplit à peu près les $\frac{3}{4}$ du pycnomètre (à 0,001 g près) : 6 – 7	18,7	18,74
9. Densité relative du bitume exprimée à 3 décimales : 5 ÷ 8	1,059	1,063
10. Densité relative moyenne : la moyenne des deux valeurs obtenues au n° 9.	<b>1,061</b>	

**Densité relative  
du bitume semi-dur  
Méthode normalisée ASTM-D70-76**

Bitume 60 / 70

Température de l'essai ; il faut mentionner si l'essai à été effectué à une température de 25°C ou 15,6°C	25°C	
Echantillon n°	1	2
1. Masse du pycnomètre propre et sec avec le bouchon (à 0,001 g près).	31,56	31,66
2. Masse du pycnomètre complètement rempli d'eau distillée avec le bouchon, après au moins 30 min dans le bain à la température de l'essai (à 0,001 g près).	62,30	62,35
3. Masse du pycnomètre rempli aux $\frac{3}{4}$ de bitume qu'on a chauffé à une température de 146 à 168°C pour un maximum de 30 min et qu'on a refroidi à la température de la pièce pour un minimum de 40 min (à 0,001 g près).	50,79	51,22
4. Masse du pycnomètre décrit au numéro 3 rempli d'eau distillée, le tout placé dans le bain à la température de l'essai pendant au moins 30 min (à 0,001 g près).	62,71	62,75
5. Masse du bitume (à 0,001 g près) : 3 – 1	19,23	19,62
6. Masse de l'eau qui remplit complètement le pycnomètre (à 0,001 g près) : 2 – 1	30,74	30,75
7. Masse de l'eau qui remplit la partie du pycnomètre qui n'est pas occupée par le bitume (à 0,001 g près) : 4 – 3	11,92	11,53
8. Masse de l'eau dont le volume est égal à celui du bitume qui remplit à peu près les $\frac{3}{4}$ du pycnomètre (à 0,001 g près) : 6 – 7	18,88	19,22
9. Densité relative du bitume exprimée à 3 décimales : 5 ÷ 8	1,018	1,021
10. Densité relative moyenne : la moyenne des deux valeurs obtenues au n° 9.	<b>1,019</b>	

## **ANNEXE 2 : Pénétrabilité en fonction de la température**

Type de bitume utilisé	40 / 50	
Conditions de l'essai : Température en °C	20	
Masse en g	100	
Durée en secondes	5	
Pénétrations obtenues exprimées en 0,1 mm pour les deux récipients utilisés	36	36
	38	36
	36	38
Pénétration moyenne à 1 prés.	37	

Type de bitume utilisé	40 / 50	
Conditions de l'essai : Température en °C	30	
Masse en g	100	
Durée en secondes	5	
Pénétrations obtenues exprimées en 0,1 mm pour les deux récipients utilisés	68	67
	69	68
	67	68
Pénétration moyenne à 1 prés.	68	

Type de bitume utilisé	40 / 50	
Conditions de l'essai : Température en °C	40	
Masse en g	100	
Durée en secondes	5	
Pénétrations obtenues exprimées en 0,1 mm pour les deux récipients utilisés	184	189
	183	184
	185	184
Pénétration moyenne à 1 prés.	184	

Type de bitume utilisé	40 / 50	
Conditions de l'essai : Température en °C	50	
Masse en g	100	
Durée en secondes	5	
Pénétrations obtenues exprimées en 0,1 mm pour les deux récipients utilisés	234	236
	232	233
	232	234
Pénétration moyenne à 1 prés.	233	

Type de bitume utilisé	40 / 50	
Conditions de l'essai : Température en °C	60	
Masse en g	100	
Durée en secondes	5	
Pénétrations obtenues exprimées en 0,1 mm pour les deux récipients utilisés	248	248
	246	249
	248	248
Pénétration moyenne à 1 prés.	248	

Type de bitume utilisé	60 / 70	
Conditions de l'essai : Température en °C Masse en g Durée en secondes	<b>20</b>	
	100	
	5	
Pénétrations obtenues exprimées en 0,1 mm pour les deux récipients utilisés	37	36
	38	38
	38	39
Pénétration moyenne à 1 prés.	<b>38</b>	

Type de bitume utilisé	60 / 70	
Conditions de l'essai : Température en °C Masse en g Durée en secondes	<b>30</b>	
	100	
	5	
Pénétrations obtenues exprimées en 0,1 mm pour les deux récipients utilisés	87	85
	86	86
	87	86
Pénétration moyenne à 1 prés.	<b>86</b>	

Type de bitume utilisé	60 / 70	
Conditions de l'essai : Température en °C Masse en g Durée en secondes	<b>40</b>	
	100	
	5	
Pénétrations obtenues exprimées en 0,1 mm pour les deux récipients utilisés	197	198
	198	196
	195	197
Pénétration moyenne à 1 prés.	<b>197</b>	

Type de bitume utilisé	60 / 70	
Conditions de l'essai : Température en °C Masse en g Durée en secondes	<b>50</b>	
	100	
	5	
Pénétrations obtenues exprimées en 0,1 mm pour les deux récipients utilisés	243	244
	246	245
	245	243
Pénétration moyenne à 1 prés.	<b>244</b>	

Type de bitume utilisé	60 / 70	
Conditions de l'essai : Température en °C Masse en g Durée en secondes	<b>60</b>	
	100	
	5	
Pénétrations obtenues exprimées en 0,1 mm pour les deux récipients utilisés	256	258
	258	255
	255	257
Pénétration moyenne à 1 prés.	<b>256</b>	

## **ANNEXE 3 : Essais sur les granulats**

## ANALYSE GRANULOMETRIQUE

Lieu de prélèvement : DIACK.....

Date de prélèvement : 10/06/03.....

Date de l'essai : 11/06/03.....

Nature des matériaux : Basalte 8/16.....

Poids initial de l'échantillon:..... 4004 grs

Module AFNOR	Dimension Maille carré	Poids des refus		Pourcentage	
		Séparément	Total	Refus	Passant
50	80.000				
49	63.000				
48	50.000				
47	40.000				
46	31.500				
45	25.000				
44	20.000				
43	16.000	392.4	392.4	9.8	90.2
42	12.500	648.6	1041	26.0	74.0
41	10.000	1769.8	2810.8	70.2	29.8
40	8.000	748.7	3559.5	88.9	11.1
39	6.300	380.4	3939.9	98.4	1.6
38	5.000	52.1	3992	99.7	0.3
37	4.000				
36	3.150				
35	2.500				
34	2.000				
33	1.600				
32	1.250				
31	1.000				
30	0.800				
29	0.630				
28	0.500				
27	0.400				
26	0.315				
25	0.250				
24	0.200				
23	0.160				
22	0.125				
21	0.100				
20	0.080				

## ANALYSE GRANULOMETRIQUE

Lieu de prélèvement : DIACK.....

Date de prélèvement : 10/06/03.....

Date de l'essai : 11/06/03.....

Nature des matériaux : Basalte 3/8.....

Poids initial de l'échantillon:..... 3000 grs

Module AFNOR	Dimension Maille carré	Poids des refus		Pourcentage	
		Séparément	Total	Refus	Passant
50	80.000				
49	63.000				
48	50.000				
47	40.000				
46	31.500				
45	25.000				
44	20.000				
43	16.000				
42	12.500				
41	10.000				
40	8.000	10	10	0.3	99.7
39	6.300	470	480	16.0	84.0
38	5.000	642	1122	37.4	62.6
37	4.000	603	1725	57.5	42.5
36	3.150	670	2395	79.8	20.2
35	2.500	555	2950	98.3	1.7
34	2.000				
33	1.600				
32	1.250				
31	1.000				
30	0.800				
29	0.630				
28	0.500				
27	0.400				
26	0.315				
25	0.250				
24	0.200				
23	0.160				
22	0.125				
21	0.100				
20	0.080				

## ANALYSE GRANULOMETRIQUE

Lieu de prélèvement : DIACK.....

Date de prélèvement : 10/06/03.....

Date de l'essai : 11/06/03.....

Nature des matériaux : Basalte 0/3.....

Poids initial de 2000 grs  
l'échantillon:.....

Module AFNOR	Dimension Maille carré	Poids des refus		Pourcentage	
		Séparément	Total	Refus	Passant
50	80.000				
49	63.000				
48	50.000				
47	40.000				
46	31.500				
45	25.000				
44	20.000				
43	16.000				
42	12.500				
41	10.000				
40	8.000				
39	6.300				
38	5.000				
37	4.000				
36	3.150	7	7	0.4	99.7
35	2.500				
34	2.000	288	295	14.8	85.3
33	1.600				
32	1.250				
31	1.000	565	860	43.0	57.0
30	0.800				
29	0.630				
28	0.500	317	1177	58.9	41.2
27	0.400				
26	0.315	167	1344	67.2	32.8
25	0.250				
24	0.200	133	1477	73.9	26.2
23	0.160				
22	0.125	123	1600	80.0	20.0
21	0.100				
20	0.080	133	1733	86.7	13.4

## ANALYSE GRANULOMETRIQUE

Lieu de prélèvement : DIACK.....

Date de prélèvement : 10/06/03.....

Date de l'essai : 11/06/03.....

Nature des matériaux : mélange de basalte ( 25% de 8/16, 30% de 3/8 et 45% de 0/3)

Poids initial de l'échantillon:..... 5000 grs

Module AFNOR	Dimension Maille carré	Poids des refus		Pourcentage	
		Séparément	Total	Refus	Passant
50	80.000				
49	63.000				
48	50.000				
47	40.000				
46	31.500				
45	25.000				
44	20.000				
43	16.000				
42	12.500				
41	10.000	87	87	1.7	98.3
40	8.000	87	250	5.0	95.0
39	6.300	488	575	11.5	88.5
38	5.000	200	775	15.5	84.5
37	4.000	225	1000	20.0	80.0
36	3.150	225	1225	24.5	75.5
35	2.500				
34	2.000	275	1500	30.0	70.0
33	1.600				
32	1.250				
31	1.000	550	2050	41.0	59.0
30	0.800				
29	0.630				
28	0.500	675	2725	54.5	45.5
27	0.400				
26	0.315	498	3223	64.5	35.5
25	0.250				
24	0.200	452	3675	73.5	26.5
23	0.160				
22	0.125	450	4125	82.5	17.5
21	0.100				
20	0.080	375	4500	90.0	10.0

<b>POIDS SPECIFIQUE PAR PESEE HYDROSTATIQUE</b>						
PFE						
Nature : Concassé de basalte.....						
Date de prélèvement : 10/06/03.....						
Lieu de prélèvement : Diack.....						
Date de l'essai : 11/06/03.....						
			Bassalte 8/16		Bassalte 3/8	
Essai N°			E1	E2	E1	E2
Poids matériau dans l'air P1			1239.7	1396.1	1001.8	1010.9
Poids matériau dans l'eau P2			814.4	921.4	660.5	667.1
Volume matériau	V=P1-P2		421.3	474.7	341.3	343.8
Poids spécifique matériau	Ps=P1/ V		2.94	2.94	2.94	2.94
Poids spécifique moyen	Ps=P1/ V		2.94		2.94	

<b>MESURE DE POIDS SPECIFIQUE PAR PYCNOMETRE</b>					
PFE					
Nature : Concassé de basalte 0/3.....					
Date de prélèvement : 10/06/03.....					
Lieu de prélèvement : Diack.....					
Date de l'essai : 11/06/03.....					
Essai N°					
E1					
Poids pycnomètre vide					
P0					
49.2					
Poids pycnomètre plein d'eau					
P1					
148.9					
Volume pycnomètre					
$\epsilon = 1,0032 \text{ à } 26 \text{ }^\circ\text{C}$					
$V_p = \epsilon(P1 - P0)$					
100.019					
Poids pycnomètre+matériau					
P2					
99.1					
Poids matériau sec					
$P_m = P2 - P0$					
49.9					
Poids pycnomètre+sol sec+eau					
$\epsilon = 1,0029 \text{ à } 25 \text{ }^\circ\text{C}$					
P3					
182					
Volume de l'eau					
$V_e = \epsilon(P3 - P2)$					
83.14					
Volume absolu des grains					
$V_g = V_p - V_e$					
16.88					
Poids spécifique du matériau					
$P_s = P_m / V_g$					
2.956					
Température de l'eau					
25-26°C					
Valeurs de $\epsilon$ en fonction de la température de l'eau					
Temp. en °C	$\epsilon$	Temp. en °C	$\epsilon$	Temp. en °C	$\epsilon$
10	1.0003	20.5	1.0019	26	1.0032
11	1.0004	21	1.0020	26.5	1.0033
12	1.0005	21.5	1.0021	27	1.0035
13	1.0006	22	1.0022	27.5	1.0036
14	1.0007	22.5	1.0023	28	1.0038
15	1.0009	23	1.0024	28.5	1.0039
16	1.0010	23.5	1.0025	29	1.0040
17	1.0012	24	1.0027	29.5	1.0042

**DETERMINATION DU COEFFICIENT D'APLATISSEMENT****Nature** : Concassé de basalte 8/16.....**Date de prélèvement** : 10/06/03.....**Lieu de prélèvement** : Diack.....**Date de l'essai** : 11/06/03.....

Pi = 4000 g

Mo = 4000g

Tamisage sur tamis de maille carrée		Tamisage sur grilles à fentes		
Classes granulaires	Refus Mci	Ecartement grilles	Passants Mpi	Coef. partiel Ai (%)
31,5/40		20		
25/31,5		16		
20/25		12.5		
16/20	801.2	10	122.1	15.2
12,5/16	563.6	8	93	17.33
10/12,5	1365.6	6.3	198.7	14.6
"8/10	813.9	5	145.1	17.9
6,3/8	414.6	4	73.7	17.8
5/6,3	32.2	3.15	6	18.6
"4/5	3	2.5	1	33
Mc= somme (Mci)=3967,1		Mp= somme (Mpi)=639,6		
A = somme (Mpi)/somme (Mci) = 16 %				

**Nature** : Concassé de basalte 3/8.....**Date de prélèvement** : 10/06/03.....**Lieu de prélèvement** : Diack.....**Date de l'essai** : 11/06/03.....

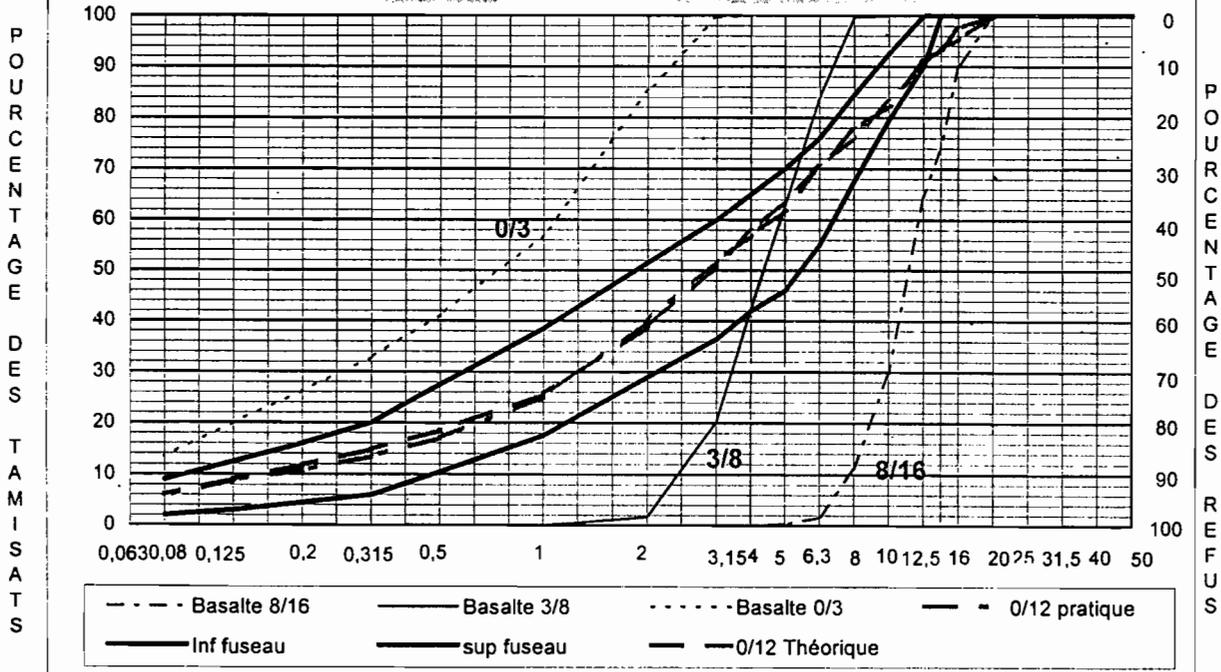
Pi = 3000 g

Mo = 1636,8g

Tamisage sur tamis de maille carrée		Tamisage sur grilles à fentes		
Classes granulaires	Refus Mci	Ecartement grilles	Passants Mpi	Coef. partiel Ai (%)
31,5/40		20		
25/31,5		16		
20/25		12.5		
16/20		10		
12,5/16		8		
10/12,5		6.3		
"8/10	9.1	5	2.4	26.4
6,3/8	384.3	4	117.5	30.6
5/6,3	517.6	3.15	123.4	23.8
"4/5	721.7	2.5	166	23
Mc= somme (Mci) = 1632,7		Mp= somme (Mpi) = 409,3		
A = somme (Mpi)/somme (Mci) = 25,07 %				

TAMIS mm	8/16	3/8	0/3		courbe mélange	fuseau	fuseau		courbe mélange
50									100,0
40									100,0
31,5									100,0
25									100,0
20	100,0								100,0
16	90,2				95,4				97,6
14	74,0				93,5				93,5
12,5	64,7				90,5	90,0	100,0		91,2
10	29,8				83,1	79,5	92,5		82,5
8	11,1	99,7			76,3	67,5	84,5		77,7
6,3	1,6	84,0			70,4	55,0	76,0		70,6
5	0,3	62,6			61,9	46,0	70,0		63,9
4	0,0	42,5			57,0	42,0	65,0		57,8
3,15	0,0	20,2	99,7		52,0	36,5	60,0		50,9
2	0,0	1,7	85,3		40,1	29,0	51,5		38,9
1	0,0	0,0	57,0		25,0	17,5	38,5		25,7
0,500	0,0	0,0	41,2		17,0	10,5	27,5		18,5
0,315	0,0	0,0	32,8		13,4	6,0	20,0		14,8
0,200	0,0	0,0	26,2		10,7	4,5	16,0		11,8
0,125	0,0	0,0	20,0		8,8	3,0	12,5		9,0
0,080	0,0	0,0	13,4		5,7	2,0	9,0		6,0
%	25	30	45						100
MVR	2,940	2,940	2,940	60170	40150				2,940
Bitume				4,70	5,70	Coefficient alpha			0,901
Module de richesse K				3,26	3,35	Surface spécifique			10,546
MVR agrégats				2,940	2,940	Racine 5ème			1,6018
MVR enrobés				2,714	2,724	Filler total			6,0

ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE



**ANNEXE 4 : Essais Marshall et Duriez**

## ESSAI MARSHALL SUR LE 40 / 50

Date de prélèvement.....10/06/03.....

Lieu de prélèvement...Diack .....

Nature.....BB 0/16.....

Date de l'essai.....11/06/03.....

N° éprouvette	3	4	5
Composition %	Basalte 8/16 : 25	Basalte 8/16 : 25	Basalte 8/16 : 25
	Basalte 3/8 : 30	Basalte 3/8 : 30	Basalte 3/8 : 30
	Basalte 0/3 : 45	Basalte 0/3 : 45	Basalte 0/3 : 45
	Bitume 40/50 : 4,5	Bitume 40/50 : 4,5	Bitume 40/50 : 4,5
% Liant	4,5	4,5	4,5
Hauteur	6,10	6,12	6,12
Diamètre	10,20	10,20	10,20
Surface	81,67	81,67	81,67
Volume	498,2	499,8	499,8
Poids	1243,1	1246,2	1239,2
D.A. par MG	2,495	2,493	2,479
D.A. Par PH	2,507	2,507	2,507
D.R. enrobé	2,723	2,723	2,723
Compacité	92,1	92,1	92,1
% Vides	7,9	7,9	7,9
Stabilité	1780	1800	1760
Stabilité moyenne		1780	
Fluage	1,5	3,0	2,5
Fluage moyen	2,3		

### Densité apparente par pesée hydrostatique

N° éprouvette	1	2
Poids dans l'air av. paraf.	1239,6	1244
Poids dans l'air ap. paraf.	1250,2	1253,5
Poids paraffine	10,6	9,5
Volume paraffine	11,78	10,56
Poids dans l'eau de l'épr. paraf.	742,5	748,1
Volume épr. paraffine	507,7	505,4
Volume net éprouvette	495,9	494,8
Densité éprouvette	2,500	2,514
Densité moyenne enrobé	2,507	

## ESSAI MARSHALL SUR LE 40 / 50

Date de prélèvement.....10/06/03.....

Lieu de prélèvement...Diack .....

Nature.....BB 0/16.....

Date de l'essai.....11/06/03.....

N° éprouvette	1	2	3
Composition %	Basalte 8/16 : 25	Basalte 8/16 : 25	Basalte 8/16 : 25
	Basalte 3/8 : 30	Basalte 3/8 : 30	Basalte 3/8 : 30
	Basalte 0/3 : 45	Basalte 0/3 : 45	Basalte 0/3 : 45
	Bitume 40/50 : 5,5	Bitume 40/50 : 5,5	Bitume 40/50 : 5,5
% Liant	5,5	5,5	5,5
Hauteur	6,00	6,11	6,09
Diamètre	10,20	10,20	10,20
Surface	81,67	81,67	81,67
Volume	490,0	499,0	497,4
Poids	1252,3	1254,4	1252,2
D.A. par MG	2,556	2,514	2,518
D.A. Par PH	2,560	2,560	2,560
D.R. enrobé	2,715	2,715	2,715
Compacité	94,3	94,3	94,3
% Vides	5,7	5,7	5,7
Stabilité	1750	1860	1800
Stabilité moyenne		1803	
Fluage	2,5	3,0	2,5
Fluage moyen	2,7		

### Densité apparente par pesée hydrostatique

N° éprouvette	3	5
Poids dans l'air av.paraf.	1254,9	1251,8
Poids dans l'air ap. paraf.	1264	1259,8
Poids paraffine	9,1	8
Volume paraffine	10,11	8,89
Poids dans l'eau de l'épr. paraf.	764,2	761,4
Volume épr. paraffine	499,8	498,4
Volume net éprouvette	489,7	489,5
Densité éprouvette	2,563	2,557
Densité moyenne enrobé	2,560	

## ESSAI MARSHALL SUR LE 40 / 50

Date de prélèvement.....10/06/03.....

Lieu de prélèvement...Diack .....

Nature.....BB 0/16.....

Date de l'essai.....11/06/03.....

N° éprouvette	1	2	3
Composition %	Basalte 8/16 : 25	Basalte 8/16 : 25	Basalte 8/16 : 25
	Basalte 3/8 : 30	Basalte 3/8 : 30	Basalte 3/8 : 30
	Basalte 0/3 : 45	Basalte 0/3 : 45	Basalte 0/3 : 45
	Bitume 40/50 : 6,5	Bitume 40/50 : 6,5	Bitume 40/50 : 6,5
% Liant	6,5	6,5	6,5
Hauteur	6,16	6,16	6,10
Diamètre	10,20	10,20	10,20
Surface	81,67	81,67	81,67
Volume	503,1	503,1	498,2
Poids	1245,2	1266,3	1257,3
D.A. par MG	2,475	2,517	2,524
D.A. Par PH	2,543	2,543	0,000
D.R. enrobé	2,64	2,64	2,64
Compacité	96,4	96,4	96,4
% Vides	3,6	3,6	3,6
Stabilité	1780	1800	1760
Stabilité moyenne		1780	
Fluage	2,5	3,0	3,0
Fluage moyen	2,8		

### Densité apparente par pesée hydrostatique

N° éprouvette	4	5
Poids dans l'air av. paraf.	1261,7	1264,6
Poids dans l'air ap. paraf.	1270	1273,6
Poids paraffine	8,3	9
Volume paraffine	9,22	10,00
Poids dans l'eau de l'épr. paraf.	764	767
Volume épr. paraffine	506	506,6
Volume net éprouvette	496,8	496,6
Densité éprouvette	2,540	2,547
Densité moyenne enrobé	2,543	

## ESSAI MARSHALL SUR LE 60 / 70

Date de prélèvement.....10/06/03.....

Lieu de prélèvement...Diack .....

Nature.....BB 0/12.....

Date de l'essai.....11/06/03.....

N° éprouvette	2	3	5
Composition %	Basalte 8/16 : 25	Basalte 8/16 : 25	Basalte 8/16 : 25
	Basalte 3/8 : 30	Basalte 3/8 : 30	Basalte 3/8 : 30
	Basalte 0/3 : 45	Basalte 0/3 : 45	Basalte 0/3 : 45
	Bitume 60/70 : 3,5	Bitume 60/70 : 3,5	Bitume 60/70 : 3,5
% Liant	3,5	3,5	3,5
Hauteur	6,26	6,23	6,33
Diamètre	10,20	10,20	10,20
Surface	81,67	81,67	81,67
Volume	511,3	508,8	517,0
Poids	1236,6	1238,6	1200,7
D.A. par MG	2,419	2,434	2,323
D.A. Par PH	2,447	2,447	2,447
D.R. enrobé	2,769	2,769	2,769
Compacité	88,4	88,4	88,4
% Vides	11,6	11,6	11,6
Stabilité	1850	1650	1650
Stabilité moyenne		1717	
Fluage	2,5	2,0	2,0
Fluage moyen	2,2		

### Densité apparente par pesée hydrostatique

N° éprouvette	1	4
Poids dans l'air av. paraf.	1230,6	1237,1
Poids dans l'air ap. paraf.	1239,7	1248
Poids paraffine	9,1	10,9
Volume paraffine	10,11	12,11
Poids dans l'eau de l'épr. paraf.	727,2	729,8
Volume épr. paraffine	512,5	518,2
Volume net éprouvette	502,4	506,1
Densité éprouvette	2,449	2,444
Densité moyenne enrobé	2,447	

## ESSAI MARSHALL SUR LE 60 / 70

Date de prélèvement.....10/06/03.....

Lieu de prélèvement...Diack .....

Nature.....BB 0/12.....

Date de l'essai.....11/06/03.....

N° éprouvette	1	2	5
Composition %	Basalte 8/16 : 25	Basalte 8/16 : 25	Basalte 8/16 : 25
	Basalte 3/8 : 30	Basalte 3/8 : 30	Basalte 3/8 : 30
	Basalte 0/3 : 45	Basalte 0/3 : 45	Basalte 0/3 : 45
	Bitume 60/70 : 4,5	Bitume 60/70 : 4,5	Bitume 60/70 : 4,5
% Liant	4,5	4,5	4,5
Hauteur	6,40	6,26	6,24
Diamètre	10,20	10,20	10,20
Surface	81,67	81,67	81,67
Volume	522,7	511,3	509,6
Poids	1246,7	1249,3	1249,9
D.A. par MG	2,385	2,444	2,453
D.A. Par PH	2,484	2,484	2,484
D.R. enrobé	2,724	2,724	2,724
Compacité	91,2	91,2	91,2
% Vides	8,8	8,8	8,8
Stabilité	1730	1740	1750
Stabilité moyenne		1740	
Fluage	2,5	3,0	2,5
Fluage moyen	2,7		

### Densité apparente par pesée hydrostatique

N° éprouvette	3	4
Poids dans l'air av. paraf.	1184,5	1235,3
Poids dans l'air ap. paraf.	1197,3	1248,2
Poids paraffine	12,8	12,9
Volume paraffine	14,22	14,33
Poids dans l'eau de l'épr. paraf.	706,4	736,2
Volume épr. paraffine	490,9	512
Volume net éprouvette	476,7	497,7
Densité éprouvette	2,485	2,482
Densité moyenne enrobé	2,484	

## ESSAI MARSHALL SUR LE 60 / 70

Date de prélèvement.....10/06/03.....

Lieu de prélèvement...Diack .....

Nature.....BB 0/12.....

Date de l'essai.....11/06/03.....

N° éprouvette	1	2	3
Composition %	Basalte 8/16 : 25	Basalte 8/16 : 25	Basalte 8/16 : 25
	Basalte 3/8 : 30	Basalte 3/8 : 30	Basalte 3/8 : 30
	Basalte 0/3 : 45	Basalte 0/3 : 45	Basalte 0/3 : 45
	Bitume 60/70 : 5,5	Bitume 60/70 : 5,5	Bitume 60/70 : 5,5
% Liant	5,5	5,5	5,5
Hauteur	6,16	6,16	6,25
Diamètre	10,20	10,20	10,20
Surface	81,67	81,67	81,67
Volume	503,1	503,1	510,4
Poids	1253,2	1258,0	1256,5
D.A. par MG	2,491	2,501	2,462
D.A. Par PH	2,468	2,468	0,000
D.R. enrobé	2,68	2,68	2,68
Compacité	92,1	92,1	92,1
% Vides	7,9	7,9	7,9
Stabilité	1750	1900	1850
Stabilité moyenne	1833		
Fluage	3,0	2,5	3,5
Fluage moyen	3,0		

### Densité apparente par pesée hydrostatique

N° éprouvette	4	5
Poids dans l'air av.paraf.	1256,5	1253,8
Poids dans l'air ap. paraf.	1272,6	1272,1
Poids paraffine	16,1	18,3
Volume paraffine	17,89	20,33
Poids dans l'eau de l'épr. paraf.	746,6	742,7
Volume épr. paraffine	526	529,4
Volume net éprouvette	508,1	509,1
Densité éprouvette	2,473	2,463
Densité moyenne enrobé	2,468	

## ESSAIS DURIEZ SUR LE 40 / 50

Essai d'écrasement	à l'air à 18° après 7j			à l'eau à 18° après 7j		
Composition %	Basalte 8/16 : 25			Basalte 8/16 : 25		
	Basalte 3/8 : 30			Basalte 3/8 : 30		
	Basalte 0/3 : 45			Basalte 0/3 : 45		
	0			0		
	Bitume 40/50 : 5,7			Bitume 40/50 : 5,7		
Liant %	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7
N° éprouvette	2	3	4	5	6	7
Hauteur avant écrasement	8,44	8,44	8,31	8,48	8,39	8,41
Diamètre avant écrasement	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
Surface éprouvette	50,24	50,24	50,24	50,24	50,24	50,24
Volume éprouvette	424,03	424,03	417,49	426,04	421,51	422,52
Hauteur après écrasement	8,16	8,23	8,30	8,36	8,25	8,30
Diamètre après écrasement	8,08	8,08	8,05	8,08	8,10	8,05
Poids éprouvette	1004,8	1005,8	1005,3	1004	1003,4	1005,2
D.A. par M.G.	2,370	2,372	2,408	2,357	2,380	2,379
D.A. par P.H.	2,434	2,434	2,434	2,434	2,434	2,434
Densité réelle enrobé	2,676	2,676	2,676	2,676	2,676	2,676
Indice de compacité	2,676	91,0	91,0	91,0	91,0	91,0
Pourcentage de vides	2,676	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0
Stabilité duriez	2,676	2950	3050	2050	2200	2150
Résistance duriez	2,676	59	61	41	44	43
Stabilité duriez moyenne		3000			2133	
Résistance duriez moy.		60			42	
Rapport imm./comp.		0,71				
	Poids après imm.			1023,3	1024,2	1025,1
	Taux d'absorption			1,9	2,1	2,0
	Taux moy. d'abs.				2,0	

Densité apparente par pesée hydrostatique

N° éprouvette	1
Poids dans l'air av. paraf.	1005,1
Poids dans l'air ap. paraf.	1016,8
Poids parafine	11,7
Volume parafine	13,0
Poids ds l'eau de l'épr. Paraf.	590,9
Volume épr. Parafinée	425,9
Volume net éprouvette	412,9
Densité éprouvette	2,434
Densité moyenne enrobé	2,434

## ESSAIS DURIEZ SUR LE 60 / 70

Essai d'écrasement	à l'air à 18° après 7j			à l'eau à 18° après 7j		
Composition %	Basalte 8/16 : 25			Basalte 8/16 : 25		
	Basalte 3/8 : 30			Basalte 3/8 : 30		
	Basalte 0/3 : 45			Basalte 0/3 : 45		
	Bitume 60/70 : 4,7			Bitume 60/70 : 4,7		
Liant %	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7
N° éprouvette	2	3	4	5	6	7
Hauteur avant écrasement	8,21	8,19	8,21	8,30	8,35	8,40
Diamètre avant écrasement	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
Surface éprouvette	50,24	50,24	50,24	50,24	50,24	50,24
Volume éprouvette	412,27	411,52	412,22	416,79	419,25	422,17
Hauteur après écrasement	7,86	7,84	7,81	7,96	8,19	8,06
Diamètre après écrasement	8,29	8,11	8,17	8,14	8,10	8,25
Poids éprouvette	1001,7	1007,3	1004,9	1009,6	1006,2	1001,8
D.A. par M.G.	2,430	2,448	2,438	2,422	2,400	2,373
D.A. par P.H.	2,451	2,451	2,451	2,451	2,451	2,451
Densité réelle enrobé	2,769	2,769	2,769	2,769	2,769	2,769
Indice de compacité	88,5	88,5	88,5	88,5	88,5	88,5
Pourcentage de vides	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5
Stabilité duriez	3050	3000	3100	2100	2000	2600
Résistance duriez	61	60	62	42	40	52
Stabilité duriez moyenne	3050			2233		
Résistance duriez moy.	61			44		
Rapport imm./comp.	0,73					
	Poids après imm.			1032,2	1027,8	1025,4
	Taux d'absorption			2,2	2,1	2,4
	Taux moy. d'abs.			2,2		

## Densité apparente par pesée hydrostatique

N° éprouvette	1
Poids dans l'air av. paraf.	1005,2
Poids dans l'air ap. paraf.	1023,9
Poids parafine	18,7
Volume parafine	20,8
Poids ds l'eau de l'épr. Paraf.	591,4
Volume épr. Parafinée	432,5
Volume net éprouvette	411,7
Densité éprouvette	2,441
Densité moyenne enrobé	2,441

## DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES EPROUVETTES MARSHALL ET DURIEZ

Pour la détermination de ces caractéristiques, il faut connaître :

- $d_m$  la densité apparente de l'éprouvette (Marshall et Duriez) ;
- $D_b$  la densité du bitume utilisé ;
- $D_{a1}, D_{a2}, D_{a3}, \text{etc...}$  celles des agrégats 1, 2, 3, etc...
- $P_b$  le % en poids du bitume ;
- $P_{a1}, P_{a2}, P_{a3}$  ceux des agrégats.

### a- Densité vraie de l'éprouvette

$$D_m = \frac{100}{\frac{P_b}{D_b} + \frac{P_{a1}}{D_{a1}} + \frac{P_{a2}}{D_{a2}} + \frac{P_{a3}}{D_{a3}} + \dots}$$

### b- Pourcentage volumétrique des vides résiduels

$$V_m = 100 \frac{(D_m - d_m)}{D_m}$$

**c- Compacité C ou pourcentage volumétrique des pleins**

$$C = 100 - V_m$$

**d- Poids spécifique du mélange granulaire**

$$P_{s(ag)} = \frac{100}{\frac{P_{a1}}{D_{a1}} + \frac{P_{a2}}{D_{a2}} + \frac{P_{a3}}{D_{a3}} + \dots}$$

**e- Poids spécifiques des enrobés**

$$P_{s(mélange)} = \frac{100 + P_b}{\frac{P_b}{D_b} + \frac{P_{a1}}{D_{a1}} + \frac{P_{a2}}{D_{a2}} + \frac{P_{a3}}{D_{a3}} + \dots}$$