

## II.1.Introduction :

Les enrobés bitumineux sont constitués d'un mélange de granulats (cailloux , sable et fines ) et d'un liant hydrocarboné (généralement bitume) et les additifs .

## II.2. Constituants d'un enrobé bitumineux :

### II.2.1.Granulats :

Les granulats représentent près de 95 % d'un enrobé bitumineux. Il est donc important de bien les caractériser afin de faire un choix optimal lors de la formulation et de la fabrication d'un enrobé performant. Granulat est un matériau granulaire utilisé en construction ou bien est un ensemble des grains de dimensions comprises entre 0 mm et 125 mm, qui participe intimement aux performances et à la durabilité des ouvrages.

#### II.2.1.1.Caractéristiques physiques et propriétés des granulats

Nous citons quelques essais de laboratoire permettant de déterminer certaines caractéristiques mécaniques des granulats :

- Résistance à la fragmentation (chocs) :

Elle est mesurée par le coefficient "Los Angeles". Cette mesure est destinée à évaluer la résistance des granulats à la fragmentation sous l'action du trafic. [37]

- Résistance à l'attrition et à l'usure:

L'essai utilisé est le Micro Deval à sec ou en présence d'eau. Cette mesure ayant pour but de chiffrer l'usure qui se produit d'une part entre les gravillons dans une assise et d'autre part entre le pneumatique et le granulat à la surface des revêtements. Comme l'usure est très influencée par la présence d'eau, l'essai le plus représentatif est le Macro Deval en présence d'eau. [34]

- Résistance au polissage:

Cet essai permet de chiffrer la résistance au polissage des gravillons utilisés pour les couches de surface. On utilise une machine à tambour sur lequel sont disposées des plaques support de granulat. [38]

#### II.2.1.2.Classification des granulats

Les granulats sont classés selon la plus grande dimension « D » et la plus petite « d » comme le tableau II-1:

Tableau II-1 Classification des granulats [ 21]

Classe de produit	Dimension en millimètre
Fine	0/D ou $D \leq 0,0063$
Sable	0/D ou $D \leq 6,30$
Gravillons	$d/D$ ou $d \geq 2$ et $D \leq 31,50$
Cailloux	$d/D$ ou $d \geq 2$ et $D \leq 820,00$
Graves	0/D ou $6,3 < D \leq 31,50$

Le tableau II.2 donne les *Caractéristiques exigées pour les granulats routiers* Trafic

Tableau II.2 : *Caractéristiques exigées pour les granulats routiers* [19]

PL/j V/J dans les 2 sens à titre indicatif	Caractéristiques	Couche de liaison	Couche de roulement
T <sub>4</sub> <25 [<500 V/j]	A IC LA MDE CPA P ES	$\leq 30$ - $\leq 30$ $\leq 25$ - $\leq 2 \%$ $\geq 50$	$\leq 30$ $\geq 60 \%$ $\leq 25$ $\leq 20$ $\geq 0,45$ (1) $\leq 2 \%$ $\geq 50$
T <sub>3</sub> 25 à 150 [500 à 3000 V/j]	A IC ou RC LA MDE CPA P ES	$\leq 30$ IC=100 % $\leq 25$ $\leq 20$ - $\leq 2 \%$ $\geq 50$	$\leq 25$ $\geq 2$ $\leq 20$ $\leq 15$ $\geq 0,50$ $\leq 2 \%$ $\geq 50$
T <sub>2</sub> 25 à 150 [500 à 3000 V/j]	A RC LA MDE CPA P ES	$\leq 25$ $\geq 2$ $\leq 25$ $\leq 20$ - $\leq 2 \%$ $\geq 50$	$\leq 20$ $\geq 2$ $\leq 20$ $\leq 15$ $\geq 0,50$ $\leq 2 \%$ $\geq 50$
T <sub>1</sub> 300 à 750 [6000 à 15000 V/j]	A RC LA MDE CPA P ES	$\leq 20$ $\geq 2$ $\leq 25$ $\leq 20$ - $\leq 2 \%$ $\geq 50$	$\leq 20$ $\geq 4$ $\leq 20$ $\leq 15$ $\geq 0,50$ $\leq 2 \%$ $\geq 50$
T <sub>0</sub> >750 [>15000 V/j]	A RC LA MDE CPA P ES	$\leq 20$ $\geq 4$ $\leq 25$ $\leq 20$ - $\leq 2 \%$ $\geq 50$	$\leq 20$ $\geq 4$ $\leq 15$ $\leq 15$ $\geq 0,50$ $\leq 2 \%$ $\geq 50$

(1) : On pourra admettre 0,40 comme minimum absolu lorsque la vitesse est limitée à 60 km/h.

PL/j: Poids lourds par jour

V/j: Véhicules légers par jour

A: Aplatissement

IC: Indice de concassage

RC: Rapport de concassage

LA: Los Angeles

MDE: Micro Deval en présence d'eau

CPA: Coefficient de Polissage Accéléré

P: Propreté superficielle des granulats

ES: Équivalent de Sable

### II.2.2. Les fines d'apport

Lorsque la teneur en fines (éléments inférieurs à 0,08 mm) apportées par le sable de concassage ou de broyage entrant dans la composition des enrobés bitumineux s'avère insuffisante, il faut prévoir l'addition de fines d'apport.

Pour caractériser la qualité de ces fines ainsi que celles issues du sable, il convient d'utiliser les essais définis par les règlements en vigueur et de respecter les valeurs minimales imposées. [15]

### II.2.3. Les liants hydrocarbonés

Les liants hydrocarbonés utilisés pour des chaussées font appel à des ressources diversifiées : bitume, goudron et émulsions de bitume. Un liant hydrocarboné est un liant organique constitué d'hydrocarbures, c'est-à-dire essentiellement à base de carbone et d'hydrogène, auxquels s'ajoutent l'oxygène, et le soufre. [8]

#### II.2.3.1. Classification des liants hydrocarbonés :

L'ensemble des liants hydrocarbonés comprend trois groupes principaux :

- Les bitumes et leurs dérivés anhydres
- Les émulsions de bitumes
- Les goudrons

##### 1) Bitume [21]

Ce sont des produits solides, semi-solides ou liquides comprenant le :

- **Bitume pur**

Obtenu par raffinage de butes pétroliers et ne comportant aucun ajout

- **Bitume fluidifié**

Bitume mélangé avec un diluant plus ou moins volatil, provenant de la distillation du pétrole

- **Bitume fluxé**

Bitume ramolli par l'addition d'une huile de fluxage de faible volatilité provenant de la distillation du goudron de houille.

- **Bitume fluxé mixte**

Bitume pur dont on a diminué la consistance par incorporation de produits provenant de la distillation du pétrole pour au moins 50% des ajouts, et de la distillation du goudron de houille.

- **Bitume composé**

Comportant au moins 50% de bitume et se subdivisant en :

*Bitume-goudron* : mélange de bitume pur et de goudron de houille.

*Bitume -brais* : mélange de bitume pur et de brais de houille. Les goudrons ont une température d'équiviscosité (TEV) < 60 °C ou un point de ramollissement (BA) < 40°C .

- **Bitume modifié**

Bitumes précédents avec ajout de substances le plus souvent macromoléculaires autres que les fines minérales ou les additifs d'adhésivité.

## 2) Emulsions de bitume

L'émulsion de bitume est une dispersion de bitume dans l'eau formée par emploi d'une énergie mécanique de cisaillement de liant et d'un agent tensio-actif mécanique .les liant de base peuvent être des bitumes purs ou modifiés, éventuellement fluidifiés fluxés.

## 3) Goudrons

Ils ont pour origine la cokéfaction à haute température du charbon, et sont obtenus par reconstitution à partir de brai et de coupes d'huiles provenant du traitement du goudron de houille. On distingue :

- **Goudron pur** : sans ajout.
- **Goudron modifié** : comportant des substances le plus souvent macromoléculaires autres que fines minérales ou les additifs d'adhésivité.ils comprennent les goudrons-vinyles et goudron-styrène, les premiers ne faisant pas l'objet de spécifications .
- **Goudron composé** : comportant plus de 50% de Goudron et du bitume pur , et ne faisant l'objet ni de classification ni spécification .

### II.2.3.2.Origine des bitumes

#### 1)bitumes naturels

Les bitumes naturels sont extraits des pétroles bruts, complètement dépourvus de fractions légères et contenant un certain pourcentage de matière minérale.

Le plus connu est certainement le « bitume de Trinidad » provenant d'un lac de bitume situé dans l'île de Trinidad (Antilles britanniques).

On peut citer également la Gilsonite (Utah, Colorado) qui est un bitume pur, très dur, utilisé non pas pour la route mais pour les peintures, les accumulateurs, et les carreaux d'asphalte ; il y'a également l'Elaterite, l'Albertite (Canada), infusibles et extrêmement durs.

## 2) Bitumes artificiels

Le bitume est la fraction la plus lourde du pétrole brut, constituée de molécules hydrocarbonées les plus longues. La composition schématique d'un pétrole brut peut être ainsi représentée :

Tableau II.3: Composition schématique d'un pétrole brut

Gaz
Carburant
Gas-Oil
Fuels: - domestique - fluide - lourde
Bitume

Dans cette composition, le pourcentage d'un bitume peut varier dans de très grandes proportions, il peut être :

- Faible voire nul, ce qui rend son extraction non rentable sur le plan industriel (cas des pétrole algériens et ceux du moyen orient).
- Très élevé, il peut atteindre les 70 à 80 % dans certains pétroles de l'Amérique latine (Venezuela), il peut atteindre pratiquement 100 % dans les bitumes naturels.

### II.2.3.3. Fabrication du bitume

Pour fabriquer des bitumes de spécifications données, la première condition consiste à choisir un pétrole brut suffisamment lourd, autrement dit, celui qui présente après distillation atmosphérique une quantité de résidu (brut réduit) la plus importante. Il est à signaler que sur les 1300 pétroles bruts référencés dans le monde, 10% sont aptes à donner des bitumes respectant les spécifications d'usage. [18]

Selon les diverses origines de ces pétroles, il a été adopté des méthodes particulières de fabrication pour obtenir des produits bitumineux de qualité. Il existe quatre méthodes de fabrication des bitumes:

#### II.2.3.3.1. La distillation

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

### **1) Distillation à la pression atmosphérique**

C'est une méthode simple mais qui peut nécessiter en fonction de la base à traiter de hautes températures pouvant engendrer des dégradations des produits par surchauffe. Ce procédé n'est utilisé que pour retirer les produits légers (essence, kérosène).

### **2) Distillation sous vide**

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

La pression réduite qui règne à l'intérieur de la tour est destinée à poursuivre la séparation physique des constituants sans les dégrader thermiquement.

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

#### **II.2.3.3.2.L'extraction (Désasphaltage)**

Ce procédé consiste à fabriquer un bitume par solubilité du fond de la distillation sous vide dans un solvant (le propane et le butane), donc ce procédé est utilisé comme complément de la distillation. Après Extraction du résidu sous vide, on obtient :

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

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

#### **II.2.3.3.3.Le Soufflage**

Cette opération consiste à injecter de l'air dans le résidu de la distillation sous vide sous des températures comprises entre 250 et 300°C. Le but de ce procédé est d'obtenir des bitumes plus durs accompagnés d'une diminution de la susceptibilité à la température

Dans la pratique, on distingue :

- Le semi – soufflage qui consiste à traiter un fond de colonne sous vide, trop mou pour en faire un bitume routier,
- Le soufflage d'une base plus complexe pour obtenir des bitumes industriels très peu susceptibles à la température (utilisés par exemple dans les revêtements de toiture),

#### **II.2.3.3.4.Le Craquage**

Le craquage est un traitement des fonds de colonne sous vide à des hautes températures comprises entre 450 et 500°C et à des pressions allant de 2 à 25 bar. Dans ces conditions, certaines grosses molécules des fractions lourdes se craquent pour former des molécules plus

petites, tandis que les plus stables résistent au traitement. Ces bitumes n'ont pas d'application routière.

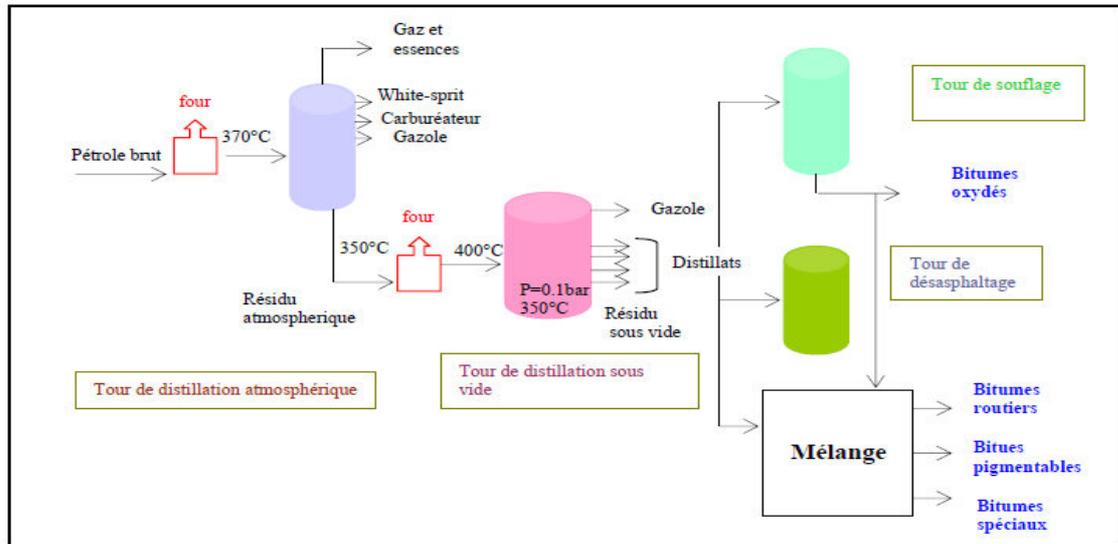


Figure II.1: - Fabrication du bitume

#### II.2.3.4. Les essais de caractérisation des bitumes[2].

Pour caractériser un bitume plusieurs essais sont utilisés.

##### a) Les essais classiques

Parmi lesquels on peut citer:

##### -1 *Essai de pénétrabilité à l'aiguille (NF T 66-004) [40]*

C'est la mesure de la pénétration (exprimée en dixièmes de millimètres) dans un échantillon de bitume, au bout d'un temps de 5 secondes, d'une aiguille dont le poids avec son support est de 100g, et à 25°C. Dans ces conditions, plus un bitume est dur, plus sa pénétration est faible.

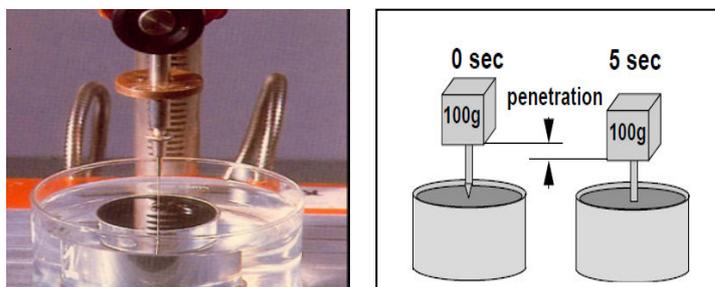


Figure II.2: Essai de pénétrabilité pour le bitume

### 2- Le point de ramollissement bille et anneau (NF T 66-008)

L'essai consiste à déterminer la température (notée **TBA**) pour laquelle une bille d'acier normalisée traverse un échantillon de bitume maintenu dans un anneau métallique. Il caractérise la consistance du matériau : plus la température bille et anneau est faible, plus le bitume est susceptible . [28]

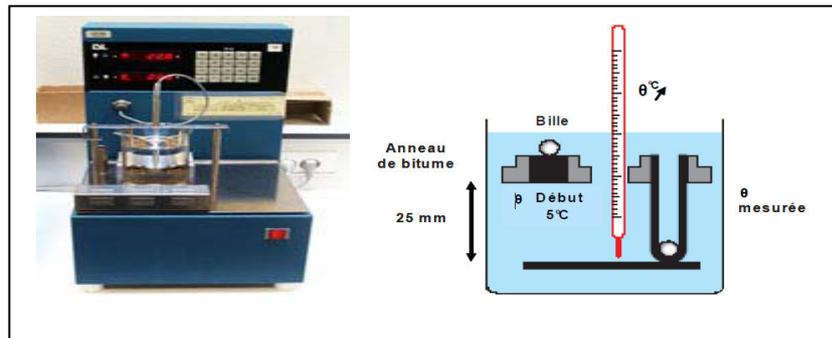


Figure II.3 Détermination du point de ramollissement

### 3- L'essai RTFOT "Rolling Thin Film Oven Test" (NF T 66-032)

Cet essai est employé pour caractériser le vieillissement des bitumes à l'enrobage. En effet, lors de la fabrication d'un enrobé, les granulats chauffés aux environs de 160°C sont mis en contact avec le bitume chaud qui répartit en film mince autour du granulat, ce contact induisant un vieillissement du liant. Pour l'essai **RTFOT**, dans des conditions d'essai précises, le bitume placé en film mince, est régulièrement exposé à un flux d'air chaud dont le débit est contrôlé. On mesure ensuite les propriétés habituelles du liant : pénétrabilité et température de ramollissement bille et anneau. Ces valeurs, dites après **RTFOT**, sont alors comparées aux valeurs initiales. Elles sont plus proches de celles du liant extrait de l'enrobé, que celles obtenues sur le bitume d'origine.

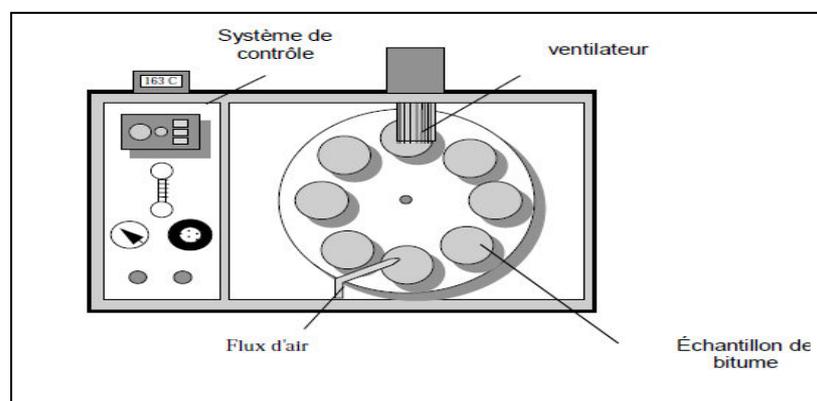


Figure II.4: L'essai RTFOT

#### 4- L'essai de PAV "Pressure Aging Vessel" (AASHTO PPI)

Cet essai est employé pour caractériser le vieillissement des bitumes in-situ. Le résidu de l'essai **RTFOT** est chauffé et versé dans des plateaux métalliques qui constituent les éprouvettes de l'essai **PAV**. Ces plateaux sont rangés dans un rack qui sera placé dans un récipient dans l'enceinte thermique. A la température de l'essai, une pression d'air est appliquée dans le récipient. Après une durée de vingt heures, la pression est diminuée lentement (8 à 10 minutes). Les plateaux d'éprouvettes sont placés ensuite dans un four à 163°C pendant 30 minutes. On mesure ensuite les propriétés habituelles du liant : pénétrabilité et température de ramollissement bille et anneau. Ces valeurs, dites après **PAV**, sont alors comparées aux valeurs initiales et aux valeurs obtenues après **RTFOT**.

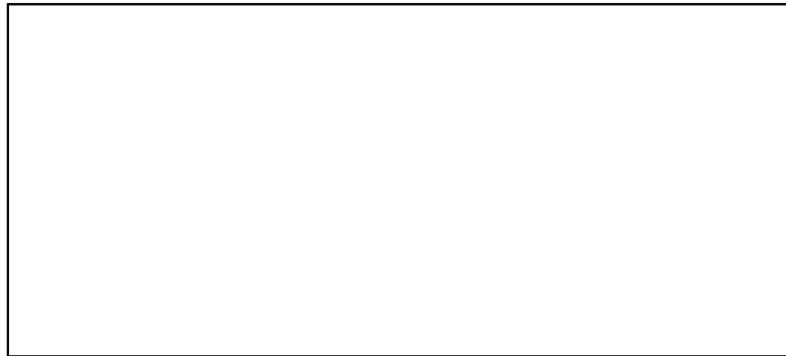


Figure II.5 : L'essai PAV

#### 5-Le point de fragilité **FRAAS** (NF T 66-026)

Il correspond à la température à laquelle un film de bitume déposé sur une lamelle d'acier se fissure lorsque l'on plie cette lamelle à basse température. Il caractérise la fragilité du liant à basse température. Les valeurs obtenues lors de ces différents essais sont à la base des spécifications sur les bitumes. Ceux-ci sont repartis en "classes" correspondant à une gamme donnée de valeurs de pénétrabilité à 25°C :

- 10/20 bitume dur (non normalisé),
- 20/30 bitume dur (normalisé),
- 35/50 et 50/70 bitumes semi-durs,
- 70/100 et 180/220 bitumes mous.

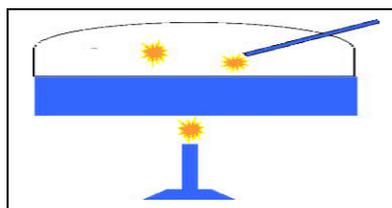


Figure II.6 : Essai du point d'éclair

6- Essai de ductilité (NF T 66-006) : [39]

La ductilité d'un matériau bitumineux est l'allongement qui le caractérise avant qu'il se rompe, lorsqu'on l'étire, à une vitesse spécifiée et à une température donnée. La vitesse de l'essai est de 5 cm/min  $\pm$  5%.

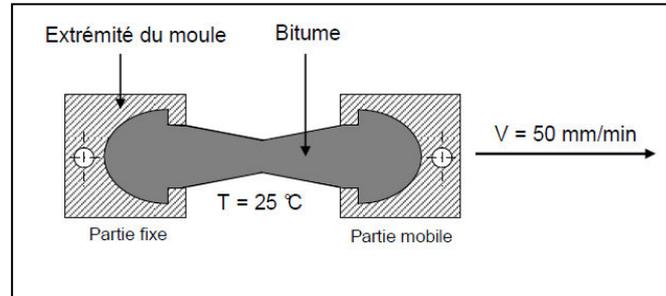


Figure II.7 : Principe de l'essai de Ductilité

**b) Essais mécaniques**

L'objectif poursuivi était de pouvoir relier les caractéristiques des liants mesurés en laboratoire aux performances des liants dans l'enrobé sur chaussées .

Quatre essais ont été choisis dans ce programme, ces essais sont présentés dans le tableau II.4

Tableau II.4: les essais mécaniques sur les liants

Type de l'essai	But de l'essai
Dynamic Shear Rheometre (DSR)	Mesurer les propriétés du liant à hautes et moyennes températures
Rotational Viscometre (RV)	Mesurer les propriétés du liant à hautes températures
Bending Beam Rheometer (BBR) (Essai de flexion de poutre)	Mesurer les propriétés à Basse températures
Essai de traction directe (DTT)	Mesurer les propriétés à Basse températures

**SHRP** classe ces essais selon la température de l'enrobé et selon le phénomène à étudier. Ce classement est présenté dans la figure 4.

**DTT - BBR** : fissuration à basse Température.

**DSR** ( petits échantillons) : Fissuration par fatigue.

**DSR** (grands échantillons) : Phénomène d'orniérage.

**RV** : Construction.

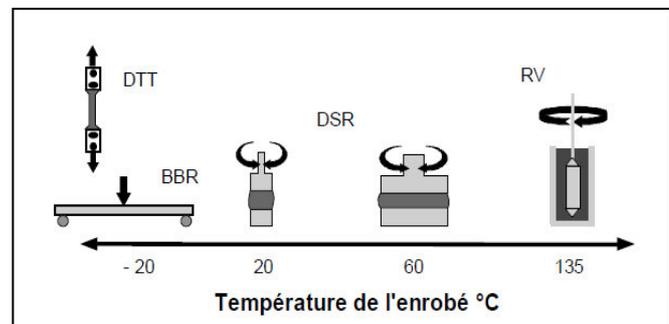


Figure II.8: classement des essais mécaniques sur le liant .

### II.3. Classification des enrobés hydrocarbonés [5]

Dans le domaine très vaste des enrobés hydrocarbonés et vues leur composition et destination possibles, on a introduit une classification basée essentiellement sur le mode de fabrication et la compacité.

#### II.3.1. D'après le mode de fabrication.

On distingue :

- **Les enrobés à chaud** : caractérisés par un passage des granulats dans un tambour sécheur pour les chauffer et les sécher. Le liant utilisé peut être un bitume pur, fluxé ou fluidifié, un goudron ou un liant composé, mais le plus souvent un bitume pur.
- **Les enrobés à froid** : préparés à partir de granulats qui ne sont pas passés dans un tambour sécheur. Le liant utilisé peut être un bitume fluxé ou fluidifié, un goudron ou une émulsion.

#### II.3.2. D'après la compacité.

On distingue :

- **Les enrobés denses** : Dans lesquels le pourcentage des vides est inférieur à 10%. Les enrobés denses de haute qualité sont caractérisés par des spécifications plus sévères en ce qui concerne la qualité des granulats, la viscosité du liant, la courbe granulométrique, les performances mécaniques et le soin apporté à la fabrication.
- **Les enrobés semi-denses**: dans lesquels le pourcentage des vides est compris entre 10 et 15%.
- **Les enrobés ouverts** : dans lesquels le pourcentage des vides est supérieur à 15 %.

### II.4. Influence des actions appliquées à la chaussée

#### II.4.1. Effet du trafic :

Le passage d'un véhicule engendre des contraintes de traction et de compression dans les différentes directions des couches de la chaussée. Chaque couche de la chaussée est assimilée à une poutre qui subit des flexions sous l'effet du trafic. Le calcul des efforts et déformations qui apparaissent nécessite, en premier lieu, la connaissance du module complexe et éventuellement du coefficient de Poisson.

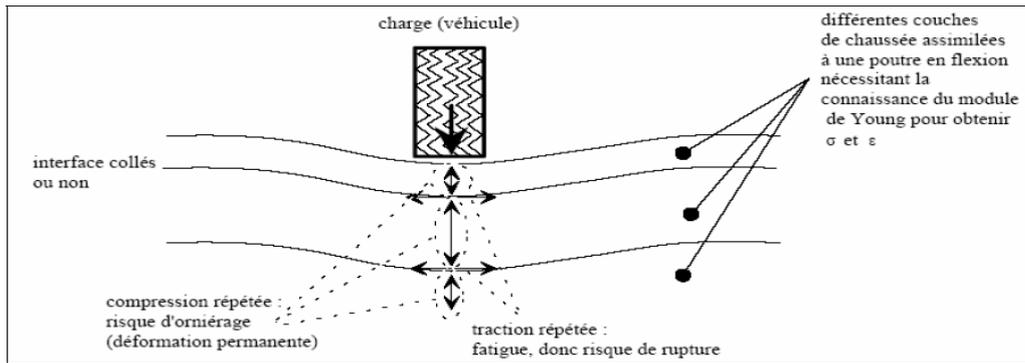


Figure II.9 : Schématisation des sollicitations induites par le trafic

Les tractions répétées à la base des couches, sous l'effet du passage des véhicules, créent des micro-dégradations qui s'accumulent et peuvent entraîner la ruine du matériau. Il s'agit du phénomène de fatigue qui s'observe pour de nombreux matériaux. Une fissure peut également apparaître et se propager dans la chaussée.

Les compressions répétées sous le passage de la charge peuvent créer des déformations permanentes qui induisent parfois un orniérage à la surface de la chaussée. Cet orniérage peut être dû au tassement des couches de béton bitumineux mais aussi éventuellement aux déformations de couches inférieures non traitées.

Nous pouvons également souligner qu'en raison des propriétés particulières apportées par le liant bitumineux, les enrobés possèdent un comportement (donc un module) fortement dépendant de la température et de la vitesse de chargement.

#### II.4.2. Effet de la température [18].

Les chaussées subissent des chargements consécutifs aux variations de la température. Ces variations thermiques entraînent des changements de la rigidité du mélange : à température basse le mélange bitumineux est rigide et fragile tandis qu'à haute température la rigidité du mélange chute et sa ductilité augmente.

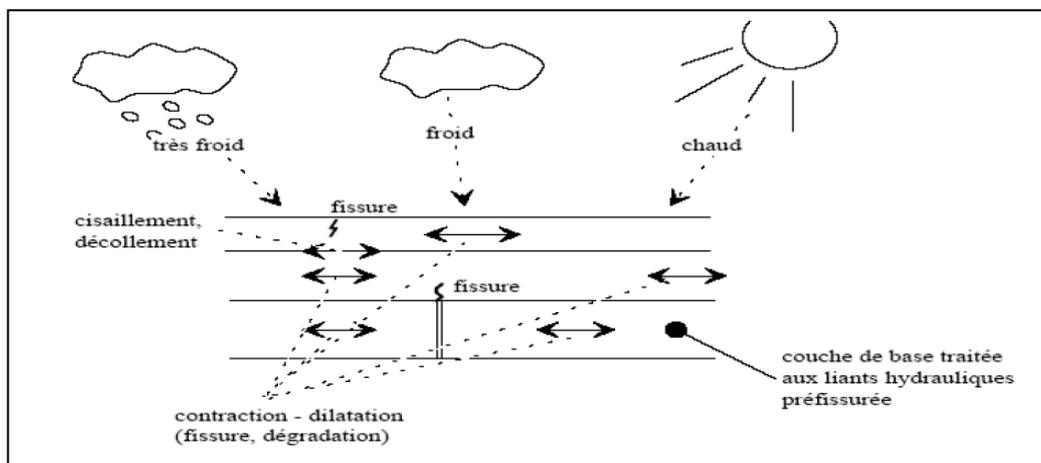


Figure II.10 : Schématisation des sollicitations induites par la température .

Pour résumer outre le vieillissement du matériau, la température a deux effets mécaniques principaux :

- Variation du module de l'enrobé bitumineux ,
- Création de contraintes et déformations au sein du matériau en raison des dilatations-contractions thermiques lors des changements de température (couplage thermomécanique).

### **II.5. Qualités exigées d'un enrobé**

Les qualités essentielles qu'un enrobé doit avoir sont :

#### **II.5.1. La stabilité**

La stabilité d'une couche d'enrobé est la résistance à la déformation permanente de la couche sous l'effet des charges statiques et dynamiques. Une stabilité insuffisante de la couche face à un trafic important conduit à un fluage avec dépressions, à des ornières et à des ondulations. La stabilité augmente avec l'angle de frottement interne des granulats et la dureté du liant ; ce qui explique la tendance actuelle pour l'emploi des bitumes durs (20/50) et des granulats durs et anguleux pour la formulation des enrobés bitumineux pour chaussées à trafic lourd.

#### **II.5.2. La flexibilité**

C'est l'aptitude à admettre sans fissuration, les déformations d'ensemble qui peuvent être imposées à la couche d'enrobé par la déflexion des couches inférieures.

L'insuffisance de la flexibilité se traduit par des fissures sur le tapis. La flexibilité dépend en premier lieu de la ductilité du liant qui doit demeurer acceptable aux basses températures et pendant toute la durée de vie de l'enrobé.

La viscoélasticité du liant conduit à un enrobé stable et flexible en restant visqueux en été et pas fragile (cassant) en hiver.

#### **II.1.5.3. L'insensibilité à l'eau**

L'insensibilité à l'eau et l'imperméabilité sont des caractéristiques que doit avoir l'enrobé bitumineux. Pour cela, on utilise souvent des dopes pour améliorer l'affinité entre le liant et les granulats et permettre à l'enrobé de mieux résister au désenrobage sous l'action de l'eau.

L'enrobé employé en couches de surface doit posséder des propriétés particulières telles que la résistance aux efforts tangentiels et aux efforts de poinçonnement, ainsi que la rugosité. Ceci exige donc des granulats qui ne se polissent pas facilement sous l'action de la circulation et qui gardent des arêtes au contact des pneumatiques.

## II.6. Formulation des enrobés bitumineux

Nous nous intéressons ici aux matériaux traités aux liants hydrocarbonés à chaud, enrobés bitumineux, graves et sables bitume, qui résultent du mélange de granulats et de liant hydrocarboné avec éventuellement des additifs, dosés, chauffés et malaxés en centrale.

Pour étudier une formulation pour une couche de chaussée, trois étapes s'avèrent essentielles : La composition granulométrique, la teneur en liant et les caractéristiques de l'enrobé.

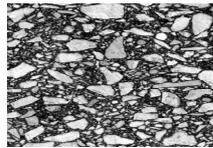


Figure II.11. Matériaux bitumineux

### II.6.1. Composition granulométrique:

La composition granulométrique est définie pour chaque catégorie d'enrobé hydrocarboné, par les pourcentages de passant aux tamis, indiqués dans le tableau ci-après

Tableau II.5 : Composition granulométrique courbe de départ[15]

Nom	GB, EME			EME			BBSG, BBME, BBS					
type ou classe (Cl)												
0/D	0/14 ou 0/20			0/10			0/10			0/14		
discontinuité												
Roul./Litson	mini	visée	maxi	mini	visée	maxi	mini	visée	maxi	mini	visée	maxi
14 mm												
10 mm								97			78	
6,3 mm	45	53	70	45	55	65	45	57	68	47	52	58
4 mm	40	47	60		52			52			47	
2 mm	25	33	38	28	33	38	27	34	39	25	31	35
0,063mm	5,4	6,7	7,7	6,3	6,7	7,2	6,3	6,7	7,2	6,3	6,7	7,2

BBDr				BBTM						BBM A				
classe 1		classe 2		classe 1		classe2		classe 1		classe2		(2)		
0/10	0/6	0/10	0/6	0/10D	0/6D	0/10D	0/6D	0/10C	0/6 C	0/10C	0/6 C	0/10D	0/14D	0/14D
				2/6	2/4	2/6	2/4					2/6	2/10	4/10
													97	97
												97	35	35
13		8		30		25		30		30		35		
					30				34		34			35
13	10 à 13	8	5	30	31	23	25	25	30	23	25	31	35	
3,5	3,5	3,5	3,5	7	7	5,5	7	7	7	7	7	7	7,2	7,2

GB : Grave bitume (NFP98-138) Nov 1999  
 EME : Enrobé à module élevé (NFP98-140) Nov 1999  
 BBSG : Béton bitumineux semi-grenu (NFP98-130) Nov, 1999  
 BBME : Béton bitumineux à module élevé (NFP98-141) Nov, 1999  
 BBDr : Béton bitumineux drainant(NFP98-134) Juin 2000

(NF EN 13108-1)  
 (NF EN 13108-1)  
 (NF EN 13108-1)  
 (NF EN 13108-1)  
 (NF EN 13108-7)

BBM : Béton bitumineux mince (NFP98-132) Juin 2000  
 BBTM : Béton bitumineux très mince(XP P98-137) Mai 2001  
 SMA : Stone Mastic Asphalt  
 HRA : Hot Rolled Asphalt  
 BBA : Béton bitumineux aéronautique (NFP98-131) Nov, 1999

(NF EN 13108-1)  
 (NF EN 13108-2)  
 (NF EN 13108-5)  
 (NF EN 13108-4)  
 (NF EN 13108-1)

### II.6.2. Teneur en liant

Le liant bitumineux transmet naturellement son comportement viscoélastique à l'enrobé. Il faut donc définir une teneur en liant optimale afin d'assurer la cohésion du mélange et le bon enrobage de tous les grains du mélange par un film mince de bitume, et ce, tout en évitant des problèmes de fluage et d'orniérage trop prononcés à haute température (dans le cas d'une trop forte teneur en bitume).

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

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

$$100 \Sigma = 0.17G + 0.33g + 2.3S + 2.3s + 135f \quad (II.01)$$

Avec

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

g: pourcentage de petits gravillons ( $\phi > 6/11$ )

S: pourcentage de gros sable ( $\phi > 0.3/6$ )

s: pourcentage de sable fin ( $\phi > 0.08/0.3$ )

f: pourcentage de filler ( $\phi < 0.08$ )

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

$$\Sigma = 2.5 + 1.3 f \quad (II.02)$$

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

$$P = \alpha k \sqrt[5]{\Sigma} \quad (II.03)$$

Avec

P: teneur en liant(%)

$\alpha$ : facteur dépendant du type de granulats (2.65/masse volumique des granulats)

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

K: module de richesse (K variant de 2.75 pour les enrobés donnant le maximum de résistance à la déformation, à 3.5 pour les enrobés plus souples).

### II.7. Essais sur les enrobés bitumineux

Parmi les essais de laboratoire utilisés sur les mélanges bitumineux on cite : [14]. [15]. [18]

### 1/ *essai Duriez*

Cet essai permet de connaître la tenue à l'eau d'un enrobé à chaud exprimé par un rapport des résistances à la compression avec immersion dans l'eau et à sec. Le mode de cet essai consiste à confectionner 12 petits moules cylindriques d'enrobés : 2 destinés à mesurer la masse volumique à la pesée hydrostatique, 5 conservés 7 jours à l'eau à 18°C et 5 conservés 7 jours à l'air.

Après ce temps, les éprouvettes sont écrasées dans une presse hydraulique. La résistance à la compression simple = (charge d'écrasement)/(section de l'éprouvette). La résistance de l'éprouvette stockée en immersion est : "r " La résistance de l'éprouvette stockée à l'eau est : " R" .

Le rapport r/R est le résultat du test qui donne la tenue à l'eau de l'enrobé et qui sera comparé à la norme en vigueur.

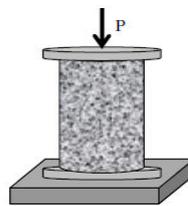


Figure II.12. Principe de l'essai Duriez

### 2/ *Essai Marshall*

Les enrobés bitumineux sont compactés dans des moules à l'aide d'une dame en vue de réaliser des éprouvettes cylindriques. Ces éprouvettes (température 60°C) sont placées entre les deux mâchoires semi - cylindriques d'une presse qui se rapprochent l'une de l'autre à une vitesse constante. Au cours de l'essai, la charge et la déformation sont enregistrées jusqu'à la rupture. Cet essai rentre dans la catégorie des essais empiriques à chargement unique qui, vue la complexité des sollicitations engendrées, ne permet pas la détermination d'une propriété intrinsèque du matériau. Il conduit à la détermination directe de deux grandeurs : le fluage (mm) et la stabilité Marshall (kN), deux grandeurs liées à la caractérisation empirique de l'orniérage.

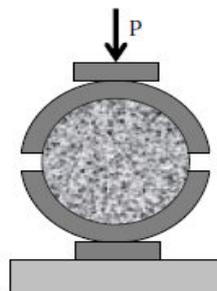


Figure II.13. Principe de l'essai Marshall

### 3/ Presse à Cisaillement Giratoire (PCG)

L'essai de compactage à la PCG est une combinaison d'un cisaillement giratoire et d'une force résultante axiale appliquée par une tête mécanique. L'essai permet de calculer le pourcentage des vides et la compacité à n rotations au moyen de la hauteur mesurée de l'éprouvette testée "hn". Il faut savoir qu'à 100 % de compacité, la hauteur minimale de l'éprouvette est de 150mm:

Pourcentage des vides =  $((h_n - 150)/h_n) \times 100$  ; Compacité C =  $100 - \%$  vides =  $(150 \times 100)/h_n$ .

L'essai PCG traduit la maniabilité de l'enrobé. En effet, plus la pente de la droite est forte, plus le matériau est maniable.

Cette caractéristique découle des normes qui exigent un certain pourcentage de vides à n rotations. La maniabilité est un facteur important puisqu'elle traduit la facilité de mise en œuvre de l'enrobé sur le chantier.

Si les valeurs du pourcentage des vides sont conformes et le coefficient de maniabilité favorable, continuer les essais DURIEZ et la plaque d'orniérage, dans le cas contraire, modifier la formule d'enrobé.



Figure II.14 Presse à cisaillement giratoire (PCG)

### 4/ L'essai de compression diamétrale

Les corps d'épreuve cylindriques sont des éprouvettes confectionnées à la Presse à Cisaillement Giratoire ou des carottes extraites de plaques. Une partie des éprouvettes est conservée sans immersion à température ambiante ; l'autre partie est conservée immergée après un dégazage poussé pendant 70 h à 40 °C. Chaque groupe d'éprouvettes est écrasé en compression diamétrale à une température de 15°C. Le rapport de la résistance après immersion à la résistance à sec donne la tenue à l'eau du mélange.

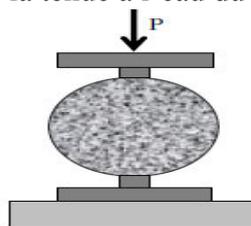


Figure II.15.Principe de l'essai de compression diamétrale

### 5/ L'essai d'orniérage

Le corps d'épreuve est une plaque parallélépipédique de 5 cm ou de 10 cm d'épaisseur, selon que l'épaisseur de mise en œuvre de l'enrobé soit inférieure ou supérieure à 5 cm. Cette plaque est soumise au trafic d'une roue équipée d'un pneumatique (fréquence : 1 Hz, charge : 5 kN, pression : 6 bars), dans des conditions sévères de température (60 °C). La profondeur de la déformation produite dans le passage de la roue, est notée en fonction du nombre de cycles. Les spécifications portent sur un pourcentage d'ornière à un nombre de cycles donné, qui dépend du type de matériau, et de sa classe.

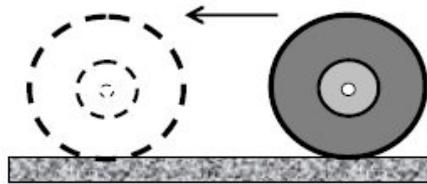


Figure II.16. Principe de l'essai d'orniérage

### 6/ L'essai de traction directe

Il s'agit d'un essai de traction à température constante et à vitesse de déformation constante. Au cours de l'essai, les paramètres mesurés sont la contrainte et la déformation. La contrainte maximale, encore appelée contrainte de rupture, et la déformation correspondante, donnent directement accès à la résistance en traction du matériau testé, pour les conditions d'essais (température, vitesse) considérées.

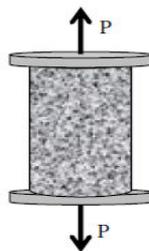


Figure II.17. Principe de l'essai de traction directe

### 7/ Essai de fluage statique uniaxial

L'essai consiste à charger axialement, avec une charge constante des éprouvettes cylindriques d'enrobés afin de déterminer la déformation résultante dans la direction de la charge (figure II.10). La déformation relative «  $\epsilon$  » égale au rapport «  $\Delta H/H$  » peut être représentée en fonction du temps (figure 1.43).

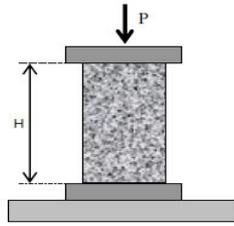


Figure II.18. Principe de l'essai de compression cyclique uniaxial sous confinement

### 8/ Essai de fluage dynamique

Cet essai consiste à déterminer la résistance à la déformation d'une éprouvette cyclique de mélanges bitumineux. L'éprouvette est préparée en laboratoire ou extraite de la chaussée.

Une éprouvette cylindrique, maintenue à une température de conditionnement élevée, est placée entre deux pistons de chargement parallèles et plans. L'éprouvette est soumise à une contrainte de confinement «  $\sigma_c$  » à laquelle une contrainte axiale cyclique «  $\sigma_a(t)$  » vient se superposer.

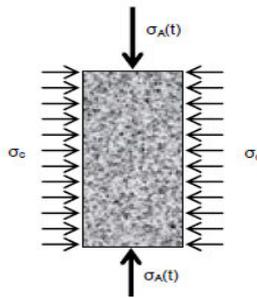


Figure II.19. Représentation des contraintes exercées sur l'éprouvette dans le cas d'un essai de fluage dynamique

### 9/ Essais de module

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

Le module (rapport de la contrainte à la déformation) est calculé pour chaque essai élémentaire (température, fréquence).

Grâce à l'équivalence temps-température, on trace la courbe maîtresse du module à une température donnée. Cette représentation permet de connaître le comportement du mélange sur un large spectre de temps de charge ou de fréquences. La spécification porte sur le module à 15 °C et une fréquence de 10 Hz ou un temps de charge de 0,02 s.

### 10/ Les essais de fatigue

Cet essai permet d'étudier le comportement des enrobés bitumineux vis-à-vis de la fissuration ; il est pratiqué sur des éprouvettes de forme trapézoïdales. L'éprouvette est encastrée à la base, sollicitée en tête en flexion sinusoïdale par déplacement imposé d'amplitude constante choisie afin de caractériser la rupture à un million de cycles.

L'essai est pratiqué à 10°C et à une fréquence de 25 Hz.

La répétitivité des cycles de flexion alternée entraîne un endommagement de l'éprouvette (des fissures sont localisées). L'essai est conduit jusqu'à réduction de moitié de l'effort mesuré en tête, c'est le critère de la rupture. Les résultats obtenus sont reportés sur un diagramme (déformation - nombre de cycles à rupture).



Figure II.20. Essai de fatigue en flexion 2 points sur éprouvettes trapézoïdales

### II.8.conclusion

Un enrobé est un mélange de graviers, de sable, de fines et de liant, il est un matériau routier, appliqué en une ou plusieurs couches, pour constituer le revêtement des chaussées. Les enrobés pour couche d'assise appartiennent soit à la famille des graves bitume (GB), soit à la famille des enrobés à module élevé (EME), ils permettent une diffusion suffisante des contraintes pour éviter une déformation permanente du sol support.