

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou  
Faculté du génie de la construction  
Département de Génie Civil



Laboratoire Géomatériaux Environnement Et Aménagement  
(L.G.E.A)

**MEMOIRE DE MAGISTERE**  
**En Génie Civil**  
**Option : Géotechnique et Environnement**  
Présenté par :  
**SADOUN. Souhila**

**THÈME**  
***ETUDE DU RENFORCEMENT DU BETON  
BITUMINEUX RECYCLE PAR DES  
GRANULATS PLASTIQUES***

Devant le jury d'examen composé de :

- |                                   |                                 |             |
|-----------------------------------|---------------------------------|-------------|
| • M <sup>r</sup> BAHAR Ramdane    | Professeur à l'UMMTO            | Président   |
| • M <sup>r</sup> MELBOUCI Bachir  | Professeur à l'UMMTO            | Rapporteur  |
| • M <sup>r</sup> AIT AIDER Ahcène | Maître de conférences à l'UMMTO | Examinateur |
| • M <sup>r</sup> GABI Smail       | Maître de conférences à l'UMMTO | Examinateur |

Soutenue le : 02 / 03 / 2011

## REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à MELBOUCI Bachir, professeur à la faculté de génie civil de l'UMMTO, pour avoir dirigé ce travail. Ses encouragements, sa confiance et sa rigueur scientifique.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude au professeur BAHAR Ramdane pour avoir accepté de présider mon jury.

Je remercie très chaleureusement AIT AIDER Hcene, maître de Conférences à la faculté de génie civil de l'UMMTO, ainsi que GABI Smail, maître de Conférences à la faculté de génie civil de l'UMMTO, pour tout l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail en acceptant d'être membres du jury ainsi que pour conseils.

Aussi Je remercie beaucoup le PDG de COSIDER Ouvrages d'art Mr KHEMLICHE ainsi que le Directeur des Travaux Mr BOUDEBOUDA pour avoir accepté de me donner le temps nécessaires pour la réalisation de la partie expérimentale aussi pour leurs soutient morale.

J'adresse un grand remerciement à l'ensemble du personnel du labo produit noir du Laboratoire national CTTP qui ont contribué à la réalisation de la partie expérimentale et qui m'ont accueillie parmi eux, je citerai en particulier :

- M<sup>r</sup> FAHEM Directeur du labo produit noir
- M<sup>r</sup> GUELLATI , M<sup>r</sup> BAL , M<sup>r</sup> MAGHRAMAN, M<sup>r</sup> AGSOUS et M<sup>r</sup> MEZIANE du CTTP

Tous mes remerciements aux personnes qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce mémoire particulièrement :

- M<sup>r</sup> AZOUZ , M<sup>r</sup> LARACHI , M<sup>r</sup> KENNANE de Cosider TP et OA
- M<sup>r</sup> Hakim CHIKH-BELHADJ (CHIMIBAT) représentant de PR Industrie en Algérie
- M<sup>elle</sup> SAOULA Maitre de conférence et enseignante à l'université de BOUMERDES
- M<sup>me</sup> CHABOUR Bachira doctorante au département de GC de UMMTO
- M<sup>elle</sup> BOUSLAH et M<sup>r</sup> MALKI du CRD.
- M<sup>elle</sup> Rezzik, M<sup>r</sup> Chelagha, M<sup>r</sup> Chorfi , M<sup>me</sup> Lhocine et M<sup>me</sup> Harmoune de COSIDER O.A

Enfin, je ne remercierai jamais assez mes parents surtout ma maman qui ma toujours soutenue et mon père pour ses encouragements, mes sœurs, mes frères et mes amis(es) pour leurs encouragements, leurs soutient, leurs patience et leurs compréhension

## RESUME

Dans ce mémoire, nous présentons le recyclage des chaussées et la réutilisation du matériau fraisât d'enrobé bitumineux dans des chaussées nouvelles, en formulant un béton bitumineux neuf avec différents pourcentage d'ajout de fraisât jusqu'à obtention d'un mélange ayant des qualités comparables à celles d'un enrobé neuf, en renforçant le mélange par ajout de granulats en plastiques ;

Dans notre cas, le granulats en plastique qui est utilisé comme additif dans les mélanges (Béton Bitumineux+ Fraisât) est le PRPLAST S qui est lui-même un produit issu de recyclage de déchets plastiques ;

Après que les différents matériaux de mélange soient préparés, les échantillons avec différents pourcentage d'ajout de fraisât, en premier lieux, sont soumis aux essais MARSHALL et DURIEZ à sec et en présence d'eau.

Les résultats obtenus par cette étude sur les différents mélanges son ensuite comparés aux résultats obtenus sur les mélanges avec ajout du PRPLAST S soumis aux même essais et réalisés dans les même conditions de laboratoire.

Cette présente étude nous a permis de mettre en évidence que les fraisât peuvent être réutilisé et recyclé jusqu'à 30% et ne peuvent pas être considéré comme résidu dans les décharge, notamment après le traitement effectuée avec l'ajout du PRPLAST S qui est aussi un produit recyclé de déchets plastiques

**Mots clés :** Recyclage, Béton Bitumineux, Enrobés, Fraisât, Normes de recyclage, Guide recyclage, Chaussées souples, Retraitement des chaussées, Essais mécaniques

## ABSTRACT

In this memory, we present the recycling of the roadways and the re-use of material milled of bitumen binder in new roadways, by formulating a new asphaltic concrete with different percentage from addition from milled until obtaining a mixture having qualities comparable with those of a new bituminous mix, by reinforcing the mixture by plastic aggregate addition;

In our case, plastic aggregate which is used as additive in the mixtures (Bituminous+ Concrete Milled) is the PRPLAST S which is itself a product resulting from recycling of plastic waste;

After the various materials of mixture are prepared, the samples with various percentage of addition of milled, in first places, are subjected to the Marshall Tests and DURIEZ dry and in the presence of water.

Results obtained by this study on the various mixtures it's then compared with the results obtained on the mixtures with addition of the PRPLAST S submitted for very testing and carried out under same the conditions of laboratory.

This present study enabled us to highlight that milled them can be re-used and recycled and cannot be regarded as residues in the discharge, in particular after the treatment carries out with the addition of the PRPLAST S which is also a recycled product of plastic waste

**Key words:** Recycling, Asphaltic Concrete, Coated, Milled, Norms of recycling, Guide recycling, flexible Pavements, Retreatment of the roadways, Essays mechanical.

## NOMONCLATURE

H	Epaisseur de chaussée
E	Module de Young
	Coefficient de Poisson
T	Contraintes tangentielles
Z	Déformations verticales
T	Déformations tangentielles
Z	Déformation verticale relative
d	La plus petite des dimensions des grains
D	La plus grande des dimensions des grains
M	Masse
M'	Masse minimale
v	Masse volumique
R	Résistance à l'air (compression)
r	Résistance à l'eau (immersion)
PMT	Profondeur Moyenne de Texture
	Surface Spécifique des granulats
G	Pourcentage de gros gravillons
g	Pourcentage de petits gravillons
S	Pourcentage de gros sable
s	Pourcentage de sable fin
f	Pourcentage de filler
	Facteur dépendant du type de granulats
K	Module de richesse
FS	Friabilité
E.S	Equivalent de Sable
V.B	Valeur au Bleu de méthylène
s	Poids spécifique
LA	Los Angeles
M.D.E	Micro Deval Humide
C.P.S	Cahier des Prescriptions Spéciale
TBA	Température de ramollissement
L	Teneur en liant
P	Propreté des grains
MVA	Masse Volumique Apparente
MVR	Masse Volumique Réelle
t <sub>ad</sub>	Déformation Admissible de Traction
6	Déformation limite détenue au bout de 10 <sup>6</sup> cycles
Kne	Facteur lié au nombre cumulé d'essieux
K	Facteur lié à la température.
Kr	Facteur lié au risque et aux dispersions.
Kc	Facteur lié au calage des résultats du modèle de calcul avec le comportement observé sur chaussées.
TCEi	Trafic en nombre cumulé d'essieux équivalents de 13 tonnes sur la durée de vie considérée.
b	Pente de la droite de fatigue (b<0).
E(10°C)	Module complexe du matériaux bitumineux à 10°C.

E( eq)	Module complexe du matériau bitumineux à la température équivalente
SN	Dispersion sur la loi de fatigue
Sh	Dispersion sur les épaisseurs
C	Coefficient égal à 0.02
T	Fractile de la loi normale
Kd	Facteur lié aux effets des discontinuités
F/S	Fraction Sableuse
a et b	Proportions de liants recyclés
P1	Pénétrabilité du liant recyclé
P2	Pénétrabilité du liant de régénération
L4	Teneur en liant d'apport
L3	Teneur en liant recyclé
T	Taux de recyclage
L1	Teneur en liant du fraisât

## NOTATIONS

### Symboles

$a_T$	coefficient de translation
*	déformation complexe
$\sigma_0$	amplitude de $\sigma^*$
$F(t)$	fonctions fluages
F	fluage Marshall
$G^*$	module complexe
$ G^* $	norme de $G^*$
G	composante élastique de $G^*$
G	composante visqueuse de $G^*$
G	module vitreux
i	nombre complexe
$I_c$	indice d'instabilité colloïdale
IP	Indice de Pénétrabilité
ITS	résistance à la traction indirecte
$J^*$	complaisance complexe
QM	quotient Marshall
$R(t)$	fonctions de relaxation
S	stabilité Marshall
t	temps de sollicitation
T	température
	temps de relaxation
	angle de phase
*	contrainte complexe
$\sigma_0$	amplitude de $\sigma^*$

## ACRONYMS

CTTP	Organisme de Control Technique des Travaux Publics
PELD	PolyEthylène Basse Densité
PETT	Principe d'Equivalence Temps/Température
PEPTT	Principe d'Equivalence Partielle Temps-Température
TBA	Température de ramollissement Bille et Anneau
BB	Bétons Bitumineux
BBSG	Bétons Bitumineux Semi-Grenus
BBM	Bétons Bitumineux Minces
BBTM	Bétons Bitumineux Très Minces
BBUM	Bétons Bitumineux Ultra Minces
ECF	Enrobés Coulés à Froid
RN	Routes Nationales
MTB	Matériaux Traités au Bitume
MTLH	Matériaux Traités aux Liants Hydrauliques
MNT	Matériaux Non Traités
GB	Grave Bitume
GL	Grave-Laitier
GC	Grave Ciment
GNT	Grave Non Traitée
RTFOT	Rolling Thin Film Oven Test
PAV	Pressure Aging Vessel
NF	Norme Française
NA	Norme Algérienne
EN	Européen Norme
P.C.G	Presse à Cisaillement Giratoire
L.C.P.C	Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées
SETRA	Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes

NAT : Nottingham Asphalt Tester

TSE : Centrale de type tambour Sécheur Enrobeur

PR PLAST S: Additif anti orniérant

HS<sub>v</sub> : Hauteur au sable vraie

CAR : chaussée asphaltique récupérée

ECR : Enrobé à chaud recyclé

RFP : Recyclage à froid en place

RFPE : Recyclage à froid en poste d'enrobage

## LISTE DES TABLEAUX

### Chapitre I

Tableau 1.1 : Caractéristique intrinsèques et de fabrication des granulats pour BBTM	10
Tableau 1.2 : Caractéristique de liant pour BBTM	10
Tableau 1.3 : Caractéristique intrinsèques et de fabrication des granulats pour BBM	12
Tableau 1.4 : Caractéristique de liant pour BBM	12
Tableau 1.5 : Caractéristique intrinsèques et de fabrication des granulats pour EME	14
Tableau 1.6: Caractéristique intrinsèques et de fabrication des granulats pour GB	16
Tableau 1.7: Caractéristique intrinsèques et de fabrication des granulats pour recycle	19

### Chapitre II

Tableau 2.1. Composition élémentaire chimique des bitumes	26
Tableau 2.2. Caractéristiques des bitumes selon les spécifications du CTTT.	35
Tableau 2.3. Choix de la classe du bitume	36
Tableau 2.4. Caractéristiques des zones climatiques	37

### Chapitre IV

Tableau 4.1. Provenance des granulats utilisés.	83
Tableau 4.2. Caractéristiques intrinsèques des granulats.	84
Tableau 4.3. Caractéristiques de fabrication des agrégats	85
Tableau 4.4. Caractéristiques du bitume	87
Tableau 4.5. Composition du mélange granulométrique,	88
Tableau 4.6. Teneurs en bitume retenues.	90
Tableau 4.7. Résultats des essais MARSHALL	90
Tableau 4.8. Résultats des essais Duriez	91
Tableau 4.9 Résultat des essais sur granulats de fractions 8/15 et 3/8	93
Tableau 4.10 Résultat des essais sur granulats de fractions 0/3	93
Tableau 4.11 Résultat des essais sur le bitume	93
Tableau 4.12 La granulométrie de l'ancienne formulation de l'enrobé	94
Tableau 4.13 Composition du mélange granulométrique	95
Tableau 4.14 Résultats de l'essai MARSHALL	96
Tableau 4.15 Résultats de l'essai DURIEZ	96
Tableau 4.16 Granulométrie des fraisât avant extraction du liant	97
Tableau 4.17. Caractéristiques intrinsèques des fraisât	98
Tableau 4.18 Granulométrie des fraisât après extraction du liant	98
Tableau 4.19 Teneur en liant des fraisât	99
Tableau 4.20 : Caractéristique du liant vieilli	99
Tableau 4.21 : Résultats des essais Duriez et Marshall de fraisât brut	100
Tableau 4.22 : Caractéristiques principales du PRPLAST S	102

### Chapitre V

Tableau 5-1 : Résultats des essais MARSHALL en fonction des pourcentages d'ajout de fraisât sans PR PLAST S	109
Tableau 5-2 : Résultats des essais MARSHALL en fonction des pourcentages d'ajout de fraisât avec 2% de PRPLAST S	110

Tableau 5-3 : Résultats des essais MARSHALL en fonction des pourcentages d'ajout de fraisât avec 4% de PRPLAST S	111
Tableau 5-4 : Résultats des essais MARSHALL en fonction des pourcentages d'ajout de fraisât avec 6% de PRPLAST S	112
Tableau 5-5 : Résultats des essais MARSHALL en fonction des pourcentages d'ajout de fraisât avec 8% de PRPLAST S	113
Tableau 5-6 : Résultats des essais DURIEZ en fonction des pourcentages d'ajout de fraisât	117
Tableau 5-7 : Résultats des essais DURIEZ en fonction des pourcentages d'ajout de fraisât avec 2% de PRPLAST S	118
Tableau 5-8 : Résultats des essais DURIEZ en fonction des pourcentages d'ajout de fraisât avec 4% de PRPLAST S	119
Tableau 5-9 : Résultats des essais DURIEZ en fonction des pourcentages d'ajout de fraisât avec 6% de PRPLAST S	120
Tableau 5-10: Résultats des essais DURIEZ en fonction des pourcentages d'ajout de fraisât avec 8% de PRPLAST S	121
<b><u>Chapitre VI</u></b>	
Tableau 6.1 : Résultats de stabilité Marshall en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât	125
Tableau 6.2 : Résultats de stabilité Marshall en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât avec ajout de PRPLAST	125
Tableau 6.3 : Variation de la densité apparente en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât	127
Tableau 6.4 :Variation de la densité apparente en fonction du pourcentage d'ajout de fraisât avec PRPLAST	127
Tableau 6.5 : Variation du fluage en fonction de pourcentage d'ajout	129
Tableau 6.6 : Variation du fluage en fonction de pourcentage d'ajout fraisât avec PRPLAST	129
Tableau 6.7 :Les résultats des essais Marshall avec ajout de fraisât sans PRPLAST	131
Tableau 6.8 :Les résultats des essais Marshall avec ajout de fraisât avec 2% de PRPLAST	131
Tableau 6.9 :Les résultats des essais Marshall avec ajout de fraisât avec 4% de PRPLAST	132
Tableau 6.10 :Les résultats des essais Marshall avec ajout de fraisât avec 6% de PRPLAST	132
Tableau 6.11 :Les résultats des essais Marshall avec ajout de fraisât avec 8% de PRPLAST	133
Tableau 6.12 :Variation de la densité apparente en fonction du pourcentage d'ajout de fraisât	134
Tableau 6.13 : Variation de la densité apparente en fonction du pourcentage d'ajout de fraisât avec PRPLAST	134
Tableau 6.14 : Variation de la résistance à la compression à l'air à 18°C, en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât	136
Tableau 6.15 : Variation de la résistance à la compression à l'air à 18°C, en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât avec PRPLAST	136
Tableau 6.16 : Variation de la résistance à la compression en immersion, en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât	138

Tableau 6.17 : Variation de la résistance à la compression en immersion, en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât	138
Tableau 6.18 : Les résultats des essais DURIEZ avec ajout de fraisât sans PRPLAST S	140
Tableau 6.19 : Les résultats des essais DURIEZ avec ajout de fraisât avec 2% de PRPLAST	140
Tableau 6.20 : Les résultats des essais DURIEZ avec ajout de fraisât avec 4% de PRPLAST	141
Tableau 6.21 : Les résultats des essais DURIEZ avec ajout de fraisât avec 6% de PRPLAST	141
Tableau 6.22 : Les résultats des essais DURIEZ avec ajout de fraisât avec 8% de PRPLAST	142

## LISTE DES FIGURES

### **CHAPITRE I**

Figure 1.1 : Coupe transversale schématique de la chaussée, [45]	5
Figure 1.2. Schématisation des sollicitations induites par le trafic (Di Benedetto, 1998) [ 8].	21
Figure 1-3. Schématisation des sollicitations induites par la température [8].	23
Figure 1-4 Exemple d'essai : a) essai de traction-compression (homogène),b) essai de flexion de poutre (non homogène).[7]	26

### **CHAPITRE II**

Figure 2-1 : PRINCIPE DE FABRICATION DU BITUME	28
Figure 2.2. Schéma de distillation	29
Fig. 2.3 – Diagramme Cole Cole pour un bitume de distillation directe	41
Fig. 2.4 – Courbe de Black pour un bitume de distillation directe	42
Fig. 2.5 – Modélisation de la courbe maitresse de module de perte par un modèle de Jongepier et Kuilman	44
Figure 2.6. Classes de comportement des bitumes en fonction de (I l) et T	48
Figure 2.7.Essai de pénétrabilité pour le bitume.(18)	49
Figure 2.8 : Essai bille et anneau[18, 20]	49
Figure 2.9. ESSAI RTFOT.[18, 1]	51
Figure 2.10. Essai PAV[1,18]	51
Figure 2.11. Expérience d'effacement et réponse du matériau en contrainte	52
Figure 2.12. Essai de fluage - comportement à contrainte constante.	53
Figure 2.13. Sollicitation à contrainte variable dans le temps.	53
Figure 2.14. Essai de relaxation - comportement à déformation constante	55

### **CHAPITRE III**

Figure 3.1 : Poste d'enrobage type à fournée, à débits parallèles. .[39]	61
Figure 3.2 : Poste d'enrobage type à fournée et à four tournant, à écoulement à contre-courant. .[39]	62
Figure 3.3 TSE de grande longueur	70
Figure 3. 4 : TSE équicourant avec malaxeur additionne	70
Figure 3 .5 Atelier de retraitement en place à froid [25]	74
Figure 3 .6 Recyclage d'une rue à faible circulation [25]	76
Figure 3.7 : vue schématique de l'équipement de recyclage compact utilisé pour les travaux urbains	77
Figure 3.8 : Nomenclature de retraitement à froid	82

### **CHAPITRE IV**

Figure 4.1 Courbes granulométriques des fractions granulaires	86
Figure 4.2. Courbe granulométrique du mélange granulaire	88
Figure 4.3 Courbes granulométriques des fractions granulaires	94
Figure 4.4 : Courbes granulométriques du mélange 0/14	95

Figure 4.5. PRPLAST S	101
-----------------------	-----

## **CHAPITRE V**

Figure 5.1 Moule Marshall	105
Figure 5.2 Dame de Marshall	106
Figure 5.3 Presse Marshall	107
Figure 5.4 Moule Duriez et Accessoires	115

## **CHAPITRE VI**

Figure 6.1 : Courbe granulométrique du mélange 0/14 avec 10% des fraisât	123
Figure 6.2 : Courbe granulométrique du mélange 0/14 avec 20% des fraisât	124
Figure 6.3 : Courbe granulométrique du mélange 0/14 avec 30% des fraisât	124
Figure 6.4 : Courbe Résultats d'essai Marshall en fonction du pourcentage d'ajout de fraisât	125
Figure 6.5 : Courbe Résultats d'essai Marshall en fonction du pourcentage d'ajout de fraisât avec ajout de PRPLAST S	125
Figure 6.6 : Courbe Variation de la densité apparente en fonction du pourcentage d'ajout de fraisât	127
Figure 6.7 : Courbe Variation de la densité apparente en fonction du pourcentage d'ajout de fraisât avec PRPLAST	127
Figure 6.8 : Courbe Variation du fluage en fonction du pourcentage d'ajout de fraisât	129
Figure 6.9 : Courbe Variation du fluage en fonction du pourcentage d'ajout de fraisât avec PRPLAST S	129
Figure 6.10 : Courbe Variation de la densité apparente en fonction du pourcentage d'ajout de fraisât	134
Figure 6.11 : Courbe Variation de la densité apparente en fonction du pourcentage d'ajout de fraisât + PRPLAST	134
Figure 6.12 : Courbe Variation de la résistance à la compression à l'air à 18°C, en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât	136
Figure 6.13 : Courbe Variation de la résistance à la compression à l'air à 18°C, en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât avec PRPLAST	136
Figure 6.14 : Courbe Variation de la résistance à la compression en immersion, en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât	138
Figure 6.15 : Courbe Variation de la résistance à la compression en immersion, en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât avec PRPLAST	138

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	1
<b>CHAPITRE I : LES BETONS BITUMINEUX</b>	4
1. GENERALITES	4
1. 1. GENERALITE SUR LES CHAUSSEES	4
1. 1 .1 .LA STRUCTURE DE CHAUSSEE	4
1. 1 .2 . TYPES DE CHAUSSEES	5
1. 1 .2 .1.LES CHAUSSEES SOUPLES	5
1. 1 .2 .2. LES CHAUSSEES BITUMINEUSES EPAISSES	5
1. 1.2 .3. LES CHAUSSEES A ASSISE TRAITEE AUX LIANTS HYDRAULIQUES OU CHAUSSEES SEMI RIGIDES	6
1. 1 .2 .4. LES CHAUSSEES A STRUCTURE MIXTE	6
1. 1 .2 . 5. LES CHAUSSEES A STRUCTURE INVERSE	6
1. 1 .2 .6.LES CHAUSSEES EN BETON	6
1.1.3 .MODES D'ENDOMAGEMENT DES CHAUSSEES	7
1.1.4. PARAMETRES PRIS EN COMPTE POUR LE DIMENSIONNEMENT	7
1.1.4.1. LES ETAPES DE DIMENSIONNEMENT D'UNE CHAUSSEE	8
1.1.5. DUREE DE VIE DES ROUTES :	8
1.1.5.1 LA DUREE DE VIE RESIDUELLE	8
1.2- GÉNÉRALITÉS SUR LES ENROBÉS	9
1.2-1 DEFINITION	9
1.2-2 LES DIFFERENTS TYPES D'ENROBE	9
1.2-2-1 BÉTON BITUMINEUX TRÈS MINCE BBTM1 ET BBTM2	9
1.2-2-2 BÉTON BITUMINEUX MINCE BBM1 ET BBM2	11
1.2-2-3 EME : ENROBÉ À MODULE ÉLEVÉ	13
1.2-2-4 GB3 : GRAVE BITUME	15
1.2-2-5 GTLH-G3 : GRAVE TRAITÉE AUX LIANTS HYDRAULIQUES	17
1.2.3. TENEUR EN LIANT	19
1.2-4 INFLUENCE DES ACTIONS APPLIQUEES A LA CHAUSSEE	20
1.2-4-1 EFFET DU TRAFIC	20
1.2-4-2 EFFET DE LA TEMPERATURE	21
1.3. MÉTHODES DE DÉTERMINATION DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES MATERIAUX BITUMINEUX	23
1.3-1 CLASSIFICATION SELON LE TYPE D'INTERPRÉTATION CONSIDÉRÉ	23
1.3-2 CLASSIFICATION SELON L'ÉTAT DE CONTRAINTE ET DE DÉFORMATION	25
CONCLUSION	26
<b>CHAPITRE II : LE BITUME</b>	27
2- GENERALITES SUR LES BITUME	27
2-1- ORIGINE ET APPLICATION DU BITUME	27
2.1.1. FABRICATION DU BITUME	28
2.1.1.1. LE PETROLE	28
2.1.1.2. LE RAFFINAGE	29
2.2. PROPRIETES PHYSICO CHIMIQUE DE BITUME	31

2.2.1 COMPOSITION CHIMIQUE DE BITUME	32
2.2.2. CLASSIFICATIONS DES BITUMES	34
2.2.2.1. LA TEMPERATURE DE RAMOLLISSEMENT BILLE ET ANNEAU (TBA)	34
2.2.2.2 LA PENETRABILITE	34
2.2.3. LES LIANTS BITUMINEUX	35
2.2.3.1. LES BITUMES LIQUIDES	36
2.2.3.2. LES BITUMES SOLIDES	36
2.2.3.3. LES EMULSIONS	36
2.2.4. SPECIFICATIONS ALGERIENNES DES BITUMES	36
2.2.5. CHOIX DE L'UTILISATION D'UNE CLASSE DE BITUME	37
2.2.5.1. CHOIX SELON LE TRAFIC ET L'ALTITUDE	38
2.2.5.2. CHOIX SELON LE CLIMAT	38
CONCLUSION	39
2.3 DESCRIPTION DE COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DES BITUMES	40
2.3 .1 RAPPEL MECANIQUE DES MILIEUX CONTINUS	40
2.3.2 .COMPORTEMENT SOUS SOLLICITATION ALTERNEE	41
2.3.3 EXPLOITATION DES MESURES EN ANALYSE VISCOELASTIQUE	42
2.4. MODELISATION DE COMPORTEMENT VISCOELASTIQUE LINEAIRE	44
2.4.1. MODELISATION STRUCTURELLE DES BITUMES	46
2.5- PROPRIÉTÉS RHÉOLOGIQUES DES LIANTS BITUMINEUX	48
2.5.1 CLASSES DE COMPORTEMENT DES BITUMES PURS EN FONCTION DE $\dot{\epsilon}$ ET 'T'	49
2.5-2 LES CARACTÉRISTIQUES CLASSIQUES DES BITUMES	50
2.5-2-1 PENETRABILITE	50
2.5.2.2 : POINT DE RAMOLLISSEMENT BILLE ANNEAU	50
2.5-2-3 TEMPERATURE DE FRAGILITE FRAASS	51
2.5.2.4 ESSAI RTFOT "Rolling Thin Film Oven Test"	51
2.5.2.5 ESSAI PAV "Pressure Aging Vessel" (AASHTO PP1)	52
2.6. CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS RHÉOLOGIQUES DU LIANT DANS LE DOMAINE LINÉAIRE (VEL)	53
2.6.1. DEFINITION D'UN CORPS VISCOELASTIQUE	53
2.6.2 .DEFINITION D'UN CORPS VISCOELASTIQUE LINEAIRE	53
2.6-3.FONCTION DE RETARD (ou de fluage) ET FONCTION DE RELATION	54
2.6-3 .1. FONCTION DE RETARD (ou de fluage)	54
2.6-3 -2- FONCTION DE RELAXATION	55
2.6.3 .3 CALCUL OPERATIONNEL	56
2.6-3 -4 MODULE COMPLEXE $E^*$ (Mode Fréquentiel)	57
2.6-3-5- PRINCIPE D'EQUIVALENCE TEMPS-TEMPERATURE (PETT)	58
CONCLUSION	58
<b>CHAPITRE III : RECYCLAGE DU BETON ASPHALTIQUE</b>	<b>59</b>
3. TECHNIQUES DE RECYCLAGE DU BETON ASPHALTIQUE	59
3.1. INTRODUCTION	59
3.2. TECHNIQUE DE RECYCLAGE DE BETON ASPHALTIQUE	61
3.2.1. RETRAITEMENT A CHAUD DES FRAISAT RECYCLE EN CENTRALE	61
3.2.1. 1 OBJECTIF DE LA TECHNIQUE	61
3.2.1.2. LE RECYCLAGE A FAIBLE TAUX	62
3.2.1.2.1. CARACTERISTIQUES DES CHANTIERS	62
3. 2.1 .2.2 . APTITUDE DES CENTRALES DISCONTINUES	63

3.2.1.2.3 BILAN TECHNIQUE	63
3.2.1. 3 LE RECYCLAGE A FORT TAUX	64
3.2.1. 3. 1 CARACTERISTIQUES DES CHANTIERS	64
3.2.1. 3. 2. CARACTERISATION DE L'ENROBE A RECYCLE	65
3.2.1. 3. 3 APTITUDE DES CENTRALES DE FABRICATION	66
3.2.1. 3. 4 ASPECT ENVIRONNEMENT	70
3.2.1. 3. 5 – BILAN TECHNIQUE	71
CONCLUSION	72
3.2.2. RETRAITEMENT DES FRAISAT RECYCLE A FROID	73
3.2.2.1. –INTRODUCTION...	73
3.2.2.2. LIANTS DE RECYCLAGE	75
3.2.2.3. EFFICACITÉ DE LA TECHNIQUE	76
3.2.2.4. ÉQUIPEMENT	77
3.2.2.5. CHANTIERS DE RECYCLAGE EN PLACE EN MILIEU URBAIN	77
3.2.2.5.1. PROFONDEUR D'INTERVENTION	78
3.2.2.5.2. TRAVAIL AUTOUR DES ACCESSOIRES	78
3.2.2.6 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU RECYCLAGE A FROID	79
3.2.2.6.1 AVANTAGES	80
3.2.2.6.2 INCONVENIENTS	80
CONCLUSION	80
<b>CHAPITRE IV : IDENTIFICATION DES MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES</b>	<b>82</b>
4 . IDENTIFICATION DES MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES	82
4.1 FORMULATION DU BETON BITUMINEUX 0/14	82
4 .1.1 PROVENANCE DES MATERIAUX	82
4.1.2 ETUDE DE LABORATOIRE	83
4.1.2.1 IDENTIFICATION DES CONSTITUANTS	83
4.1.2.1.1 LES GRANULATS	83
4.1.2.1.2 – LE BITUME	85
4.1.2.2 FORMULATION DES MELANGES BITUMINEUX	86
4.1.2.2.1 CHOIX DE LA FORMULATION GRANULAIRE	86
4.1.2.2.2 DETERMINATION DES TENEURES EN BITUME	88
4.1.2.2.3 COMPOSITION DES MELANGES	89
4.1.2.3 ESSAIS DE PERFORMANCES MECANIQUE	89
4.2. IDENTIFICATION DE L'ENROBE A RECYCLER	91
4.2.1 FORMULATION DE L'ENROBE DE BASE	91
4.2.1. 1 ESSAIS REALISES	91
4.2.1.2 RESULTATS OBTENUS	91
4.2.1.2 .1.IDENTIFICATION DES GRANULATS	91
4.2.1.2.2 IDENTIFICATION DU LIANT (BITUME)	92
4.2.1.2.3 ANALYE GRANULOMETRIQUE	92
4.2.1.2.4 FORMULATION DE L'ENROBE BB 0/14	94
4.2.2. IDENTIFICATION DES CARACTERISTIQUES DES FRAISAT :	96
4.2.2.1. : GRANULOMETRIE DES FRAISATS	96
4.2.2.2 ETUDE DE LABORATOIRE	96
4 .3- IDENTIFICATION DE L'ADDITIF	99
4. 3.1 ADDITIF POUR ENROBE BITUMINEUX	99
4. 3.2 CARACTERISTIQUES PRINCIPALES	101

4.3.2.1 PRINCIPAUX AVANTAGES	102
4.3.3- DOMAINES D'APPLICATIONS	102
CONCLUSION	103
<b>CHAPITRE V : LES ESSAIS MECANIQUES REALISES</b>	
5. LES ESSAIS MECANIQUES REALISES	104
5.1. INTRODUCTION	104
5.2. ESSAIS MARCHALL	104
5.2.1. PRINCIPE DE L'ESSAI	104
5.2.2. APPAREILLAGE	104
5.2.3. LE MODE OPERATOIRE	106
5.2.4. LES TEMPERATURES DE REFERENCES	107
5 - 3. ESSAIS DURIEZ	113
5-3 .1 PRINCIPE DE L'ESSAI	113
5-3 .2 APPAREILLAGE	113
5-3 .2.1 MOULE ET PISTON	113
5-3 .2.2 PRESSE	114
5-3 .2 LE MODE OPERATOIRE	115
CONCLUSION	121
<b>CHAPITRE VI : RESULTATS ET INTERPRETATIONS</b>	122
6. RESULTATS ET INTERPRETATIONS	122
6.1 .RESULTATS ET INTERPRETATION DES ESSAIS MARSHALL	124
6.1.1 : RESULTATS ET INTERPRETATION DE LA STABILITE MARSHALL AVEC AJOUT DE FRAISAT AVANT ET APRES AJOUT DU PR PLAST S	124
<b>6.1.2 RESULTATS ET INTERPRETATION DE LA DENSITE APPARENTE MARSHALL AVEC AJOUT DE FRAISAT AVANT ET APRES AJOUT DU PR PLAST S</b>	126
6.1.3 : RESULTATS ET INTERPRETATION DE FLUAGE MARSHALL AVEC AJOUT DE FRAISAT AVANT ET APRES AJOUT DU PR PLAST S	128
6.1.4 RESUME DES RESULTATS DES ESSAIS MARSHALL	130
6.2 RESULTATS ET INTERPRETATIONS DES ESSAIS DURIEZ	133
6.2.1. RESULTATS ET INTERPRETATION DE AL DENSITE APPARENTE DURIEZ AVEC AJOUT DE FRAISAT AVANT ET APRES AJOUT DU PRPLASTS	133
6.2.2. RESULTATS ET INTERPRETATION LA RESISTANCE A LA COMPRESSION A L' AIR A 18°C AVEC AJOUT DE FRAISAT AVANT ET APRES AJOUT DU PRPLASTS	135
6.2.3. RESULTATS ET INTERPRETATION LA RESISTANCE A LA COMPRESSION EN IMMERSION AVEC AJOUT DE FRAISAT AVANT ET APRES AJOUT DU PRPLASTS	137
6.2.4 RESUME DES RESULTATS DES ESSAIS DURIEZ	139
6. 3. CONCLUSION :	142
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	143
<b>ANNEXES</b>	146
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	156

## INTRODUCTION GENERALE

Dans le sillage de l'environnement, beaucoup d'entreprises dans différents pays se sont engagés, début 2009, à développer et à généraliser le recyclage des fraisât. Des engagements rendus possibles par l'arrivée à maturité des techniques de recyclage des enrobés. En centrale ou sur site, à chaud ou à froid, elles conjuguent économie de matériaux et d'énergie par rapport aux techniques traditionnelles. Parallèlement, des axes forts de recherche sont lancés, en France et en Europe, pour augmenter le taux de recyclage des agrégats d'enrobés et associer le recyclage à d'autres techniques environnementales performantes. Les agrégats sont trop souvent réutilisés en remblais, alors qu'ils pourraient l'être dans les couches supérieures des chaussées.

L'engagement à recycler des tonnes d'agrégats conduira à une bonne économie de bitume dans l'année, D'autant qu'avec la raréfaction de la ressource pétrolière, le prix du bitume « Neuf » est inexorablement voué à augmenter.

Circulaire ou convention d'engagement, ces initiatives sont rendues possibles par l'épanouissement des techniques. Normes françaises et européennes sur les agrégats, guides CFTR/SETRA, un ensemble de corpus technique détaillant les produits et les processus de mise en œuvre des techniques de recyclage encadre aujourd'hui la profession. Les techniques existantes et éprouvées sont nombreuses : recyclage in situ ou en centrale d'enrobage, à chaud ou à froid ; ce large panel permet de faire son choix en fonction des spécificités du chantier. En centrale d'enrobage, fixe ou mobile, ce sont les techniques à chaud avec des matériaux recyclés qui sont les plus utilisées.

La couche de roulement, longtemps considérée comme la couche « noble » et à ce titre exempte de recyclé, incorpore désormais classiquement 10 % de recyclé pour les chantiers importants. Dans les couches d'assise, ce taux monte couramment à 30 %. Un précepte est en tout cas maintenant établi de manière sûre : « L'incorporation de 10 % d'agrégats recyclés dans les formules d'enrobés ne pose aucun problème, quelles que soient la provenance et la qualité des agrégats », assure Christine Leroy, directrice technique de l'Usirf. Paradoxalement, les enrobés avec des matériaux recyclés peuvent avoir de meilleures performances mécaniques que des enrobés « neufs », notamment pour les couches d'assises. « Chimiquement, le bitume vieux " colle " très bien au bitume d'apport », [François Olard, de la direction R & D d'Eiffage Travaux publics]. Une affinité qui améliore également l'aptitude au compactage. En revanche, une teneur en eau élevée dans les agrégats peut affecter les caractéristiques des granulats et diminuer le rendement de la centrale.

C'est pour cela qu'il faut surveiller de près les taux d'humidité des stocks d'agrégats. Si toutes les couches de chaussées incorporent des recyclés, tous les matériaux des catégories de routes peuvent également être recyclés : des chaussées à fort trafic comme les autoroutes sont même particulièrement adaptées. « Souvent l'historique des structures de chaussées d'autoroutes est très bien connu. Ceci permet de réaliser un fraisage

couche par couche qui donne une grande homogénéité aux agrégats et permet d'incorporer de forts taux de recyclés dans la nouvelle route. L'idéal étant de pouvoir recycler une couche de roulement en une autre couche de roulement, ou une couche d'assise en une autre couche d'assise, les caractéristiques recherchées étant similaires ».

Bien que mûres, les techniques s'affinent et de nombreux travaux de recherche, lancés aussi bien par les entreprises que par les laboratoires de recherche du Réseau scientifique et technique dans beaucoup de pays surtout en Europe sont menés de front. Le recyclage à très fort taux (au-delà de 50 %) est mis en œuvre en France par une entreprise comme Eiffage travaux publics, qui a pu atteindre des taux maximums de 70 %. Aussi en Algérie, L'entreprise SONATRO a recyclé un tronçon routier sur ZERALDA à froid et un autre tronçon au sud à chaud, cette expérience aussi petite que soit elle, mais cette entreprise à réussi avec succès le recyclage, malheureusement cette technique est abandonnée par l'entreprise algérienne sans raison !?

La présente étude a pour objectif, d'intégrer et de réutiliser le matériau fraisât d'enrobé bitumineux dans des chaussées nouvelles, en formulant un béton bitumineux neuf avec différents pourcentage d'ajout de fraisât jusqu'à obtention d'un mélange ayant des qualités comparables à celles d'un enrobé neuf, en renforçant par ajout de granulats en plastiques ;

Dans notre cas, le granulats en plastique qui est utilisé comme additif dans les mélanges

(Béton Bitumineux+ Fraisât) est le PRPLAST S qui est lui-même un produit issu de recyclage de déchets plastiques ;

Après que les différents matériaux de mélange soient préparés, les échantillons avec différents pourcentages d'ajout de fraisât, en premier lieux, sont soumis aux essais MARSHALL et DURIEZ à sec et en présence d'eau.

Les résultats obtenus sur les différents mélanges sont ensuite comparés aux résultats obtenus sur les mélanges avec ajout du PRPLAST S soumis aux mêmes essais et réalisés dans les mêmes conditions de laboratoire

Le travail qui a été fait dans ce mémoire de fin d'étude comporte six chapitres :

**Dans le premier chapitre**, nous présentons des généralités sur les bétons bitumineux et les différents corps de chaussée avec une introduction sur l'histoire de la route.

Le deuxième chapitre, portera sur les bitumes, leurs constituants, leurs caractéristiques, ainsi que les différentes classes.

**Le deuxième chapitre** est consacré à l'étude bibliographique du bitume, le comportement rhéologique et les propriétés thermomécaniques des bitumes ainsi que ses caractéristiques physico-chimiques

**Dans le troisième chapitre**, nous présentons un état de l'Art sur le retraitement des chaussées usées et le recyclage des enrobés bitumineux,

**Le quatrième chapitre**, est réservé pour l'identification des matériaux utilisés dans l'étude expérimentale

**Le cinquième chapitre**, sont présentés les différents essais, tout en montrant le but de chaque essai, le mode opératoire, l'appareillage, et les résultats obtenue sous forme de tableaux avant et après renforcement.

**Le sixième chapitre** est un chapitre récapitulatif contenant toutes les interprétations des résultats obtenus lors des différents essais réalisées dans ce travail

On termine cette étude expérimentale par une conclusion générale ou on a résumé l'ensemble des résultats obtenus

# CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES BETONS BITUMINEUX

## 1. GENERALITES :

### 1. 1. GENERALITE SUR LES CHAUSSEES :

#### 1. 1 .1 .LA STRUCTURE DE CHAUSSEE :

Une chaussée se présente sous la forme d'une structure multicouche (figure 1.1), dont laquelle on peut distinguer trois niveaux distincts.

#### ➤ Les couches de surface comprennent :

**Couche de roulement** est la couche supérieure de la structure routière sur laquelle s'exerce directement les agressions conjuguées du trafic et du climat. Elle attribue à la chaussée les caractéristiques suivantes : adhérence, drainage, uni, bruit de roulement.

**Couche de liaison** (binder) est la couche intermédiaire entre la couche de roulement et la couche de base. Elle contribue à l'amélioration de l'uni de la chaussée et renforce la protection mécanique, thermique et hydraulique de l'assise par imperméabilisation. Elle supporte principalement les efforts tangentiels et assure un rôle primordial contre la formation d'ornières.

#### ➤ Les couches d'assise comprennent :

**Couche de base** est la couche située sous la couche de surface assurant une protection thermique de la plate-forme (couche de forme) et une capacité portante du revêtement. Elle est destinée à répartir les efforts dus aux charges verticales.

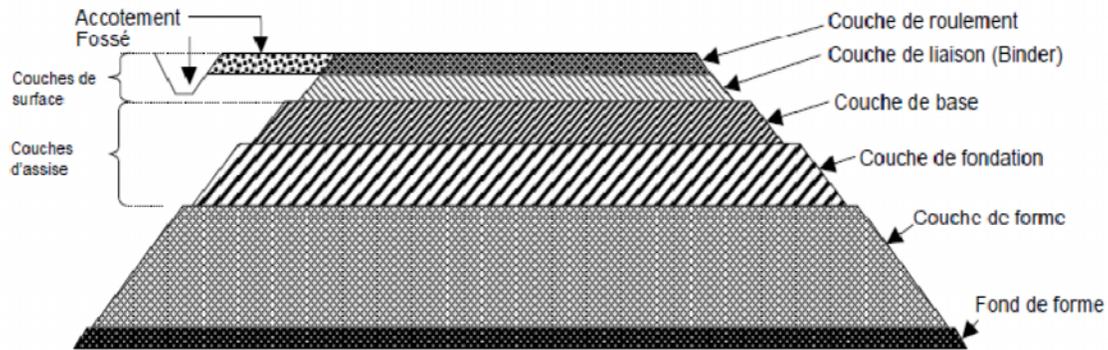
**Couche de fondation** est la couche située sous la couche de base, destinée à répartir les efforts dus aux charges verticales sur le sol de fondation et à former le support du revêtement. Elle assure ensemble avec la couche de base la protection thermique de la plate-forme.

**L'accotement** : est la plate-forme contiguë à la chaussée, renforcée ou non pour permettre l'immobilisation des véhicules.

**Le fossé** : est une partie de la route formant une tranchée ouverte dans le terrain servant à la récolte et l'évacuation des eaux de surface.

**La couche de forme** : est constituée de matériaux sélectionnés, de matériaux rapportés (remblai) ou réalisée par un traitement spécial destiné à améliorer les caractéristiques du terrain. Elle assure la protection du sol support et contribue à l'homogénéisation des caractéristiques portantes.

**Le fond de forme (sol support)** : C'est l'ensemble des matériaux en place, existant avant les terrassements ou à défaut le déblai, qui est l'ensemble des matériaux en place obtenu après excavation. [7], [27], [45],



**Figure 1.1 : Coupe transversale schématique de la chaussée, [45]**

### **1.1.2. TYPES DE CHAUSSEES:**

Le réseau routier français est caractérisé par une grande diversité de structures de chaussées que l'on peut regrouper en six grandes familles [38] [27] [37], [20].

#### **1.1.2.1.LES CHAUSSEES SOUPLES :**

Sont constituées d'une couche de fondation en grave non traitée et d'une couche de base bitumineuse d'épaisseur inférieure à 15 cm. La couche de surface est constituée d'une faible épaisseur de matériaux bitumineux parfois réduite à un simple enduit.

#### **1.1.2.2. LES CHAUSSEES BITUMINEUSES EPAISSES :**

Sont constituées de matériaux bitumineux en assise (fondation et base) d'épaisseur totale pouvant aller jusqu'à 40 cm, recouverts d'une couche de surface bitumineuse.

#### **1.1.2.3. LES CHAUSSEES A ASSISE TRAITEE AUX LIANTS HYDRAULIQUES OU CHAUSSEES SEMI RIGIDES :**

Comportent, sous une couche de surface bitumineuse, des couches de base et de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques (grave ciment, grave laitier, grave-cendres volantes). L'assise a une épaisseur totale comprise entre 20 et 50 cm.

#### **1.1.2.4. LES CHAUSSEES A STRUCTURE MIXTE :**

Présentent une couche de surface et une couche de base (de 10 à 20 cm) en matériaux bitumineux sur une couche de fondation (de 20 à 40 cm) traitée aux liants hydrauliques.

#### **1.1.2.5. LES CHAUSSEES A STRUCTURE INVERSE :**

Sont des chaussées à structure mixte dans lesquelles une couche de grave non traitée vient s'intercaler entre les couches bitumineuse et hydraulique.

#### **1.1.2.6. LES CHAUSSEES EN BETON DE CIMENT :**

Elles sont constituées par une couche de fondation en grave ciment (15 cm) , surmontée par une dalle de béton de 25 cm d'épaisseur. Des joints transversaux et longitudinaux sont réalisés tous les 4 à 5 m pour éviter une fissuration anarchique du béton.

#### **1.1.3. MODES D'ENDOMAGEMENT DES CHAUSSEES :**

Les chaussées subissent les agressions combinées des efforts mécaniques et des variations de climat ainsi que l'eau. Les dégradations les plus couramment rencontrées sont sur la couche de roulement :

- usure due aux efforts tangentiels exercés par les charges roulantes ;
- usure due à la présence d'eau ;
- orniérage par fluage (conditions extrêmes de température et trafic) ;
- fissuration de fatigue par manque d'adhérence de la couche de surface sur l'assise ;
- fissuration par remontée des fissures de la couche d'assise ;
- fissuration par fatigue thermique suite à un vieillissement du bitume sur les couches d'assise traitées ;
- fissuration de fatigue due à la répétition des efforts de traction par flexion ;
- fissuration de prise et de retrait thermique des graves traitées aux liants hydrauliques ;
- fissuration due au gradient thermique des dalles de béton ;
- pompage et décalage de dalle dans les couches présentant des fissures de retrait ou de joint sur les couches d'assise non liée et support de chaussée ;
- déformation permanente de la structure due au cumul de déformation plastique [36], [27] [38].

#### **1.1.4. PARAMETRES PRIS EN COMPTE POUR LE DIMENSIONNEMENT :**

La France a fait un choix résolument déterminé de méthode de dimensionnement au sortir de l'hiver 1962-1963 particulièrement rigoureux et qui avait mis à mal le réseau routier. Avant les années 1960, les structures de chaussée avaient peu évolué alors que le trafic poids lourds était en plein développement.

La méthode de calcul a pris en compte l'évolution des techniques et les capacités d'auscultation des chaussées, la « standardisation » des matériaux, la maîtrise de leurs caractéristiques et le travail sur les outils de calcul.

Les critères pris en compte pour dimensionner une chaussée sont :

- Le trafic ;
- La qualité de la plate forme support de chaussée ;
- Les caractéristiques des matériaux de chaussée et la qualité de réalisation ;
- Les conditions climatiques. [36], [27] [38].

#### **1.1.4.1. LES ETAPES DE DIMENSIONNEMENT D'UNE CHAUSSEE :**

**La 1ère étape :** choix de la couche de roulement et prédimensionnement de la structure ;

**La 2ème étape :** modélisation et calcul de la structure sous l'essieu de référence de 130 KN ;

**La 3ème étape :** vérification en fatigue de la structure et de la déformation du support ;

**La 4ème étape :** ajustement des épaisseurs calculées ;

**La 5ème étape :** vérification de la tenue au gel-dégel ;

**La 6ème étape :** définition de la coupe transversale de chaussée [36], [37] [38].

#### **1.1.5. DUREE DE VIE DES ROUTES :**

Les différentes phases de vie d'une route sont :

- Conception /dimensionnement ;
- Fabrication des enrobés ;
- Mise en œuvre des enrobés ;
- Entretien ;
- Démolition et recyclage.
- Dans chacune de ces phases, l'incidence des effets environnementaux est établie pour :

- La consommation d'énergie ;
- L'utilisation de matières naturelles non renouvelables ;
- L'émission d'éléments nocifs pour l'homme, les animaux ou la végétation ;
  
- Les incidences négatives sur la qualité de l'air, de l'eau et du sol ;
- La possibilité de recyclage [20].

### **1.1.5.1 LA DUREE DE VIE RESIDUELLE :**

La durée de vie résiduelle d'une chaussée est égale à la durée de vie escomptée diminuée de la durée de service.

La durée de vie escomptée de la structure d'une chaussée est le nombre d'années qui s'écoulent entre l'année de mise en service et l'année où la structure atteint son état limite de fin de vie appelé état critique de surface (vu sous l'angle de la fatigue ou sous l'angle des déformations du revêtement), peut être conditionné par le degré d'endommagement de la surface. L'état critique de l'endommagement est atteint lorsque son degré dépasse 50%.

La durée de vie résiduelle d'une chaussée est aussi la différence entre le nombre de véhicules commerciaux que la route pouvait supporter avant toute circulation et le nombre de véhicules commerciaux que la route a déjà supporté [47]. [20].

## **1.2- GÉNÉRALITÉS SUR LES ENROBÉS :**

### **1.2-1 DEFINITION :**

On appelle enrobé hydrocarboné tout mélange de granulats et de liant hydrocarboné. Le terme est donc plus général que celui de béton bitumineux puisqu'il inclut les mélanges dont le liant n'est pas forcément un bitume (goudron, liant à base de bitume fluidifié...).

Un enrobé bitumineux est défini comme un mélange de liant bitumineux

(5 à 7 % en masse), d'agrégats et de fines (passant à 80 µm) –les fines étant également appelées "filler".

L'obtention des enrobés par mélange des granulats et du bitume fait appel à des propriétés bien spécifiques aux liants hydrocarbonés en général et donc au bitume en particulier :

- un pouvoir d'adhésion aux granulats,
- une consistance variable avec la température

### **1.2-2 LES DIFFERENTS TYPES D'ENROBE :**

#### **1.2-2-1 BÉTON BITUMINEUX TRÈS MINCE BBTM1 ET BBTM2 :**

BÉTON BITUMINEUX TRÈS MINCE 0/6,3 TYPE 1 ET 2 (NF P 98-137) : [22] [27] [37]

#### **➤ Utilisation**

- Couche de roulement
- Epaisseur minimale 1,5 cm.
- Epaisseur moyenne d'utilisation 2,5 à 3 cm.

➤ **Caractéristiques générales**

- Module de richesse : 3,50 (3,60 à 3,90).
- Granularité : doit permettre l'obtention des caractéristiques mécaniques.

➤ **Caractéristiques mécaniques :**

- Essai Duriez à 18° C  
r (après immersion)/R (à sec)..... 0,8
- Essai de compactage PCG  
% de vides à 25 girations ..... 12 à 20
- Essai à l'orniéreur - stabilité mécanique (NF P 98-251.1)  
Déformation en % de l'épaisseur sur dalle de 5 cm pour 3000 cycles à 60°C (vides 16 à 22%) 20%.

➤ **Caractéristiques des composants**

- GRANULATS (voir annexe 4)

TRAFIC	Tl4	Tl3 et Tl2	Tl1
Caractéristique intrinsèques et de fabrication	CIIIa Ic= 100	BIIIa Rc 2	BIIa Rc 2

**Tableau 1.1 : Caractéristique intrinsèques et de fabrication des granulats pour BBTM**

- FINES  
Catégorie F2 au sens de la norme XP P 18-540 (voir annexe 1)
- LIANT

TRAFIC	Tl4	Tl3	Tl2	Tl1
Liant	bitume pur 50/70 ou 70/100	bitume pur 50/70	bitume modifié	Bitume modifié (dosage en additifs ≥ 2,5%)
	BBTM1		BBTM2	

**Tableau 1.2 : Caractéristique de liant pour BBTM**

➤ **Fabrication**

- Réalisée dans une centrale de classe 2 au sens de la norme (NF P 98-150).
- Température d'enrobage entre 140 et 180° C.

➤ **Mise en œuvre**

- Couche d'accrochage : La couche d'accrochage doit comporter au minimum 400 g de bitume résiduel par m<sup>2</sup>. Pour un trafic supérieur à Tl<sub>2</sub>, une émulsion de bitume modifié par additifs (avec additif supérieur ou égal à 2%) est nécessaire.
- Température de répannage : La température optimale de répannage se situe entre 140°C et 160° C. La température minimale est de 130° C.  
Pour les bitumes modifiés, la température de répannage est indiquée par le fournisseur sur la fiche technique produit.
- Rugosité géométrique: La hauteur au sable vraie mesurée après mise en œuvre doit être supérieure ou égale à 0,7mm pour 90% des points contrôlés (au moins 20 mesures).

**1.2-2-2 BÉTON BITUMINEUX MINCE BBM1 ET BBM2 :**

BBM1 ET BBM2 : BÉTON BITUMINEUX MINCE A 0/10 CLASSE 2 ET 3  
(NF P 98-132): [22] [27] [37]

➤ **Utilisation**

- Couche de liaison ou de roulement.
- Epaisseur minimale 2,5 cm.
- Epaisseur moyenne d'utilisation 3 à 4 cm.

➤ **Caractéristiques générales**

- Module de richesse : 3,30 à 3,55.
- Granularité : discontinue entre 2 mm et 6,3 mm, doit permettre l'obtention des caractéristiques mécaniques (% de passant à 2 mm, compris entre 25 et 35%).

➤ **Caractéristiques mécaniques : essai sur B.B.M. - A 0/10**

- Essai Duriez à 18° C  
Rapport r/R (r résistances compression après immersion) (R à sec)  
Classe 2 > 0,75  
Classe 3 > 0,75
- Essai de compactage PCG
  - Le pourcentage % de vides à 10 girations

Classe 2 > 11%

Classe 3 > 11%

➤ Le pourcentage % de vides à 40 girations

Classe 2 : 6 à 11%

Classe 3 : 6 à 11%

• Essai à l'ornièreur - stabilité mécanique (NF P 98-251.1)

Profondeur d'ornièr en % de l'épaisseur sur dalle de 5 cm et à 60°C, à une teneur en vides comprise entre 7 et 10 %

Classe 2 < 15 % à 10 000 cycles

Classe 3 < 10 % à 30 000 cycles

• **Caractéristiques des composants**

➤ **GRANULATS (voir annexe 4)**

Caractéristiques intrinsèques et de fabrication.

TRAFIC	T14	T13 et T12	T11
Couche de liaison	D IIIa Ic≥100	C IIIa Ic=100	C IIIa Rc 2
Couche de roulement	C IIIa Ic=100	B IIIa Rc 2	B IIIa Rc 2

**Tableau 1.3 : Caractéristique intrinsèques et de fabrication des granulats pour BBM**

• FINES

Catégorie F2 au sens de la norme XP P 18-540.(voir Annexe1)

• LIANT

TRAFIC	T14 et T13	T12	T11
Couche de liaison	50/70 bitume pur	bitume modifié	bitume modifié (dosage en additifs≥2,5%)
Couche de roulement	50/70 bitume pur	bitume modifié	bitume modifié (dosage en additifs≥2,5%)
	BBM1	BBM2	

**Tableau 1.4 : Caractéristique de liant pour BBM**

➤ **Fabrication**

• Réalisée dans une centrale de classe 2 au sens de la norme (NF P 98-150).

• Température d'enrobage entre 140 et 180° C.

### ➤ **Mise en œuvre**

- Couche d'accrochage : réalisée avec une émulsion de bitume pur à rupture rapide ECR 65 ou ECR 69, dosée à 250 g de bitume résiduel par m<sup>2</sup>
- Température de répandage : la température optimale se situe entre 130 et 150°C, avec au minimum 125°C. Pour les bitumes modifiés, la température est précisée par le fournisseur sur la fiche technique du produit.
- Compactage : l'atelier de compactage défini par le PAQ de l'entreprise doit conduire à un pourcentage de vides dont la valeur moyenne est entre 5 et 10 %.
- Rugosité géométrique: en couche de roulement, la hauteur au sable vraie mesurée, après mise en œuvre, doit être supérieure ou égale à 0,7mm pour 90% des points contrôlés (au moins 20 mesures).

### **1.2-2-3 EME : ENROBÉ À MODULE ÉLEVÉ**

EME : ENROBÉ À MODULE ÉLEVÉ 0/10 OU 0/14 CLASSE 2 (NF P 98-140):

[22] [27] [37]

### ➤ **Utilisation**

- Couche de base (chaussées fort trafic).
- Couche d'entretien avec apport structurel.
- Epaisseur minimale : 0/10 : 5 cm - 0/14 : 6 cm.
- Epaisseur moyenne d'utilisation : 0/10 : 6 à 8 cm - 0/14 : 7 à 12 cm.

### ➤ **Caractéristiques générales**

- Module de richesse > 3,40
- Granularité : doit permettre l'obtention des caractéristiques mécaniques
- **Caractéristiques mécaniques :**

#### Essai Duriez à 18° C

Rapport r (après immersion)/R (à sec) est de :

$$0/10 > 0,75$$

$$0/14 > 0,75$$

#### Essai de compactage PCG

- Le pourcentage % de vides à 80 girations : 0/10 < 6%
- Le pourcentage % de vides à 100 girations : 0/14 < 6%

#### Essai à l'orniérage :

Profondeur d'ornière en % de l'épaisseur sur dalle de 10 cm, à 30 000 cycles, à 60° C,

à un pourcentage de vides compris entre 3 et 6% Classe 2 < 15 % à 10 000 cycles :

$$0/10 < 7,5$$

$$0/14 < 7,5$$

Essai de module complexe :

À 15° C, 10 Hz, à un pourcentage de vides compris entre 3 et 6 %

$$0/10 > 14\ 000\ \text{Mpa}$$

$$0/14 > 14\ 000\ \text{Mpa}$$

Essai de fatigue :

Déformation relative  $\epsilon_6$  à un pourcentage de vides compris entre 3 et 6 %, à 106 cycles,

à 10° C et 25 Hz :

$$0/10 > 130.10^{-2}$$

$$0/14 > 130.10^{-6}$$

Essai de détermination du module et de la perte de linéarité (en traction directe)

À une température de 15° C et un temps de 0,02 s , à un pourcentage de vides compris entre 3 et 6 % :

$$0/10 > 14\ 000\ \text{MPa}$$

$$0/14 > 14\ 000\ \text{MPa}$$

➤ **Caractéristiques des composants**

- GRANULATS (voir annexe 4)

TRAFIC	T14	T13
Caractéristiques intrinsèque et de fabrication	D IIIa	C IIIa
Angularité	Ic ≥ 60	Rc ≥ 2

**Tableau 1.5 : Caractéristique intrinsèques et de fabrication des granulats pour EME**

- FINES

Catégorie F2 au sens de la norme (XP P 18-540). (voir annexe 2)

- LIANT

Le liant utilisé est :

- soit un bitume spécial industriel grade 10/15 ou 15/25 ;
- soit un bitume pur de grade 20/30 répondant aux spécifications de la norme (NF T65-001)

- soit un bitume modifié pour obtenir les performances mécaniques visées en particulier vis-à-vis de l'orniérage.
- 

➤ **Fabrication**

- Réalisée dans une centrale de classe 2 au sens de la norme NF P 98-150.
- Température d'enrobage entre 150 et 190° C

➤ **Mise en œuvre**

Couche d'accrochage : réalisée avec une émulsion de bitume pur à rupture rapide ECR 65 ou ECR 69, dosée à 250 g de bitume résiduel au m2.

Température minimale de répandage : 140° C, quelles que soient les conditions climatiques de mise en œuvre.

Compactage : L'atelier de compactage précisé par le PAQ de l'entreprise doit conduire à un pourcentage de

vides :                                    en moyenne ..... 4 %  
    en valeur maximale..... 6 %

**1.2-2-4 GB3 : GRAVE BITUME**

GB3 : GRAVE BITUME 0/14 CLASSE 3 – (NF P 98 -138): [22] [27] [37]

➤ **Utilisation**

- Couche de base.
- Couche de reprofilage et de liaison.
- Epaisseur minimale 7 cm.
- Epaisseur moyenne d'utilisation 8 à 12 cm.μ

➤ **Caractéristiques générales (cf NF P 98-150)( voir annexe 1)**

- Module de richesse : 2,8 à 2,9.
- Granularité : conforme à la norme et permettant d'obtenir les caractéristiques mécaniques souhaitées.

➤ **Caractéristiques mécaniques :**

Essai Duriez à 18° C

Pourcentage de vides..... 12 %  
 Résistance à la compression à sec (R)..... 6 MPa

r/R (r résistance après immersion)..... 0,70

Essai de compactage PCG

% de vides à 10 girations..... 14

% de vides à 100 girations..... 10

Essai d'orniérage

Profondeur d'ornière en % de l'épaisseur sur dalle de 10 cm, à 60° C, à un pourcentage de vides compris entre 7 et 10 % à 10 000 cycles ..... 10

Essai de module complexe

À 15° C, 10 Hz à un pourcentage de vides compris entre 7 et 10 %.... 9 000 MPa

Essai de fatigue

Déformation relative  $\epsilon$  à un pourcentage de vides compris entre 7 et 10 %, à 10<sup>6</sup> cycles, à 10° C et 25 Hz ..... 90.10-6

Essai de détermination du module et de la perte de linéarité (en traction directe)

À une température de 15° C et pour un temps de 0,02 s, à un pourcentage de vides compris entre 7 et 10 % ..... 9 000 MPa

➤ **Caractéristiques des composants**

- GRANULATS (voir annexe 4)

TRAFIC	T14	T13
Caractéristiques intrinsèque et de fabrication	D IIIa	C IIIa
Angularité	Ic ≥ 60	Rc ≥ 2

**Tableau 1.6: Caractéristique intrinsèques et de fabrication des granulats pour GB**

- FINES

Catégorie F2 au sens de la norme (XP P 18-540) (voir annexe 1).

- LIANT

Bitume pur **35/50**.

- AGREGATS RECYCLE

L'emploi d'agrégats recyclés d'enrobés en dosage inférieur ou égal à 10 % peut être envisagé sans étude de formulation supplémentaire sous réserve d'un stock homogène caractérisé par une fiche produit.

Au delà de 10 % et limité à 40 %, une vérification des caractéristiques mécaniques du mélange doit être faite.

➤ **Fabrication**

- Réalisée dans une centrale de classe 2 au sens de la norme NF P 98-150.

- Température d'enrobage entre 140 et 180° C

➤ **Mise en œuvre**

Couche d'accrochage : réalisée avec une émulsion de bitume pur à rupture rapide ECR 65 ou ECR 69, dosée à 250 g de bitume résiduel par m<sup>2</sup>

Température minimale de répannage : 1 35° C,

Compactage : L'atelier de compactage précisé par le PAQ de l'entreprise doit conduire un pourcentage de vides : en moyenne ..... 8 %

en maximum..... 10 %

### **1.2-2-5 GTLH-G3 : GRAVE TRAITÉE AUX LIANTS HYDRAULIQUES**

GTLH-G3:GRAVE TRAITÉE AUX LIANTS HYDRAULIQUES NF P 98-116:[ 22] [27] [37]

➤ **Utilisation**

- Réalisation de plates-formes support de chaussées.
- Réalisation des couches de fondation ou fondation/base.
- Epaisseur minimale 20 cm.
- Epaisseur moyenne maximale 32 cm

➤ **. Caractéristiques générales (cf NF P 98-150)**

- Caractéristiques mécaniques G3 au sens de la norme (NF P 98-116)(voir 1).
- Granularité : 0/14 ou 0/20 dans un fuseau de type 1 pour : T T13 et de type 2 pour : T = T14.
- Délai de maniabilité (NF P 98-231.5) supérieur à 8 heures aux conditions climatiques du chantier.

➤ **Caractéristiques des composants**

• LIANTS

**-Ciments**

Conformes aux normes (NF EN 197-1) et (NF EN 197-2)

Classe 32,5 et conforme à la norme (NF P 15-301)

Classe 42,5 pour travaux en arrière saison.

**-Liant spécial routier**

Liant hydraulique à base de laitier moulu ou de clinker conforme à la norme (NF P 15-108).

Certains de ces liants font l'objet d'Avis Techniques LCPC - SETRA (CFTR)

**-Laitier**

Laitier granulé prébroyé LP 12 au sens de la norme NF P 98-106.

Activation sulfatique.

- GRANULATS

Granulats issus de recyclage de bétons et produits de démolition, de mâchefers, de sous produits industriels ou BTP, de roches massives ou alluvionnaires, etc..

**Caractéristiques intrinsèques et de fabrication (voir annexe 4)**

	T14	T13	T12	T11
Bétons et produits de démolition recyclée	GR 2	GR 3	GR 4	
Calcaires locaux IDF	F IIIb	E III b	E III b	
Mâchefers ( MIOM)	F 61 état sec et moyen	F 61 état sec et moyen		
Granulats conformes à la NF P 18-540	E IIIb	E III b	E III b	D III b

**Tableau 1.7: Caractéristique intrinsèques et de fabrication des granulats pour RECYCLE**

**1.2.3. TENEUR EN LIANT :[38], [27], [1]**

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 (Fontana et al, 1998), notée et exprimée en m<sup>2</sup>/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 :

$$100 = 0,17 G + 0,33 g + 2,3 S + 12 s + 135 f \quad 1-1$$

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

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

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

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

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

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

$$= 2,5 + 1,3 f \quad 1-2$$

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

$$P = k5 \quad 1-3$$

avec : p : teneur en liant (%)

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

: surface spécifique des granulats (m<sup>2</sup>/kg)

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

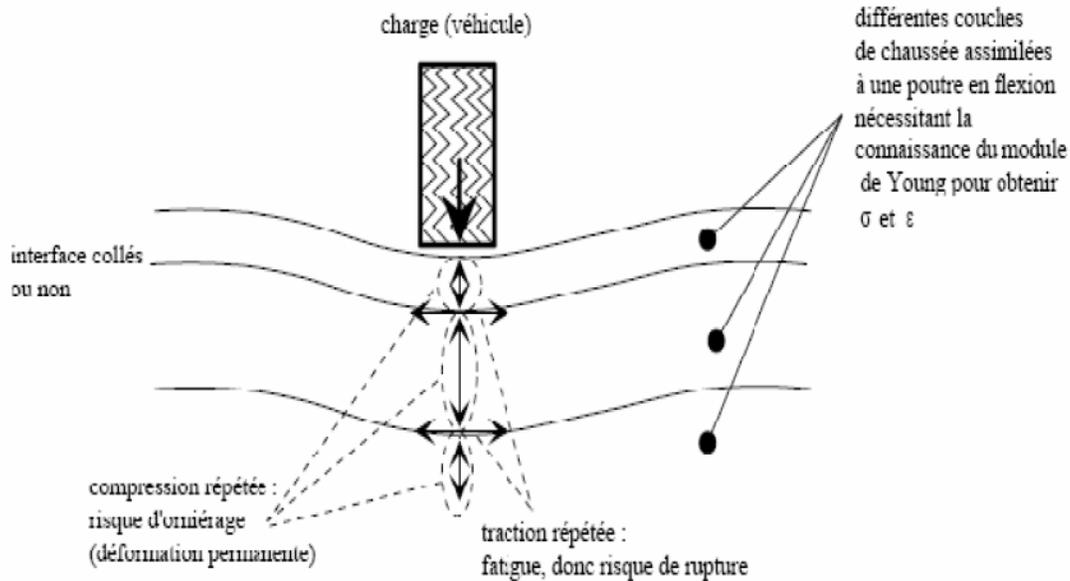
Plus globalement, la teneur en liant à retenir peut être définie à partir d'une étude en laboratoire tenant compte du trafic, de l'épaisseur de la couche d'enrobé, des compacités in situ exigées et de l'usage envisagé de la chaussée. En particulier, dans le cas d'un trafic Poids Lourds important (supérieur à 200 PL/j) la teneur en bitume doit diminuer.

## **1.2.4. INFLUENCE DES ACTIONS APPLIQUEES A LA CHAUSSEE**

### **1.2.4.1. EFFET DU TRAFIC**

Chaque couche de chaussée subit des écrasements et des flexions sous l'effet du trafic

(Figure 1-2). Le calcul des efforts et des déformations qui s'effectue traditionnellement en considérant des multicouches élastiques linéaires isotropes, nécessite, en premier lieu, la connaissance du module de Young et éventuellement du coefficient de Poisson. C'est précisément à partir de ces deux coefficients, que les logiciels *Alizé* ou encore *Ecoroute* –basés sur le modèle de Burmister (1943)- permettent la résolution du problème considéré comme élastique.



**Figure 1.2. Schématisation des sollicitations induites par le trafic (Di Benedetto, 1998) [ 6].**

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 peut aussi être dû 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 [18] [20] [3]

#### **1.2-4-2 EFFET DE LA TEMPERATURE : [1 [35] [18],[4]**

A basse température le bitume possède un comportement fragile. La chaussée est, par voie de conséquence, susceptible de se fissurer sous l'effet conjugué des conditions climatiques et des contraintes de trafic. Cependant, la fissuration thermique peut être facilement évitée à basse température si l'on utilise un bitume de grade élevé, c'est-à-dire un bitume moins "dur", et donc moins "cassant" à basse température. Néanmoins, un bitume de grade trop élevé se révèle néfaste vis-à-vis des problèmes d'orniérage (déformations permanentes de la chaussée) à température élevée. Le bitume idéal doit donc être à la fois le

moins susceptible possible aux phénomènes de **fissuration thermique** (à basse température) et d'**orniérage** (à température élevée).

Plus simplement, on doit donc exiger des enrobés deux qualités principales en rapport direct avec la dépendance du liant utilisé vis-à-vis de la température :

- la stabilité, i.e. la résistance à la déformation permanente qui est aggravée à haute température,
- la flexibilité, soit l'aptitude à supporter sans fissures thermiques les basses températures.

Ces conditions ont notamment amené les différents groupes pétroliers à développer de nouveaux bitumes pour couvrir ce large intervalle de température (-30°C à 60°C) : les bitumes modifiés aux polymères.

Pour résumer, d'après Di Benedetto (1998), outre le vieillissement du matériau, la température a deux effets mécaniques principaux [1] [3]:

- changement du module du matériau. Un béton bitumineux que l'on chauffe devient plus "mou". Plus généralement, ces matériaux sont dits "thermosensibles", c'est-à-dire que leur comportement viscoplastique change selon la température considérée,
- création de contraintes et déformations au sein du matériau en raison des dilatations ou contractions thermiques lors des changements de température (Figure 1-3).

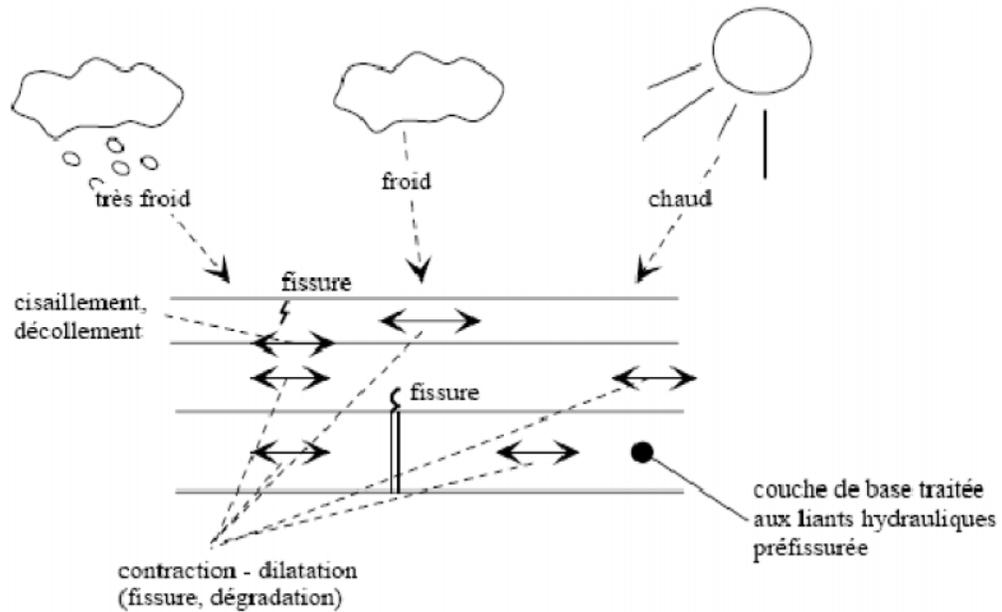
Le premier effet est, en général, caractérisé par la dépendance du module de rigidité vis-à-vis de la température et de la vitesse de chargement.

Le deuxième effet est particulièrement néfaste :

- lors d'un refroidissement, par exemple, la chaussée a tendance à se contracter. Or, les mouvements de contraction sont empêchés dans le sens longitudinal de la chaussée.

Cela revient donc à exercer une traction sur cette chaussée dans le sens longitudinal, d'où l'amorçage éventuel de fissures transversales. Ces dernières sont ensuite susceptibles de se propager à travers la structure lors de cycles thermiques (journaliers ou autres).

- lorsqu'une couche de base traitée aux liants hydrauliques existe dans la chaussée (structures semi-rigides). En effet, cette couche traitée aux liants hydrauliques est sujette au retrait thermique et de prise. Le retrait, empêché par le frottement à l'interface, peut provoquer une fissure dans la couche en béton bitumineux. Cette fissure évolue avec les cycles thermiques et peut progressivement traverser la couche.



**Figure 1-3. Schématisation des sollicitations induites par la température [6].**

### **1.3. MÉTHODES DE DÉTERMINATION DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES MATÉRIAUX BITUMINEUX**

Les propriétés mécaniques des matériaux bitumineux peuvent être déduites de l'analyse des résultats d'essais de laboratoire. Ces essais, normalisés lorsqu'ils servent au dimensionnement, sont effectués dans des conditions bien définies de température et sollicitation. Ils sont réalisés sur des éprouvettes confectionnées en laboratoire ou éventuellement prélevées sur place.

Les essais de caractérisation des propriétés mécaniques des matériaux bitumineux sont nombreux et divers, il est néanmoins possible de les classer en différentes catégories. Une première classification en trois catégories qui est plus liée à l'interprétation de l'essai qu'à sa nature, est proposée par Bonnot en 1973 et en 1984. Une seconde classification proposée par Di Benedetto (1990), introduit deux catégories d'essai : les essais homogènes et les essais non homogènes [6].[7]

#### **1.3-1 CLASSIFICATION SELON LE TYPE D'INTERPRÉTATION CONSIDÉRÉ**

La première catégorie est celle des "essais empiriques" dans lesquels le mode de sollicitation est très différent de celui existant dans la chaussée. Ces essais ne permettent pas de déterminer une propriété intrinsèque du matériau. La relation entre la propriété d'usage et le résultat de l'essai ne peut pas être déterminée de façon théorique. Seule l'expérience du praticien et des comparaisons pour de nombreux cas permettent de tirer des conclusions. La propriété d'usage est fonction de paramètres liés au matériau (sa composition) et de paramètres liés à l'usage (les charges, la température, la vitesse de circulation). Pour la

propriété d'usage "résistance à l'orniérage", l'exemple type d'essai de cette catégorie est l'essai Marshall.[6],[4]

De plus, les "essais empiriques" ne peuvent être considérés comme valables que si on a l'assurance que le classement obtenu pour les matériaux est le même que celui qui se produit dans la chaussée sous l'effet des sollicitations réelles, au moins pour une gamme donnée de sollicitation. Cependant, ces essais se sont révélés insuffisants pour traduire correctement la réalité des conditions de travail d'une chaussée et prédire le comportement *in-situ* des matériaux innovants utilisant notamment des Bitumes Modifiés par des Polymères (BMP).

La deuxième catégorie correspond aux "essais de simulation". Cette catégorie d'essai correspond à une première voie pouvant être suivie afin d'améliorer la représentativité des essais. Il s'agit d'utiliser des sollicitations les plus proches possibles, bien qu'à échelle réduite, de celles existant dans la chaussée. Malheureusement, ces essais restent empiriques car les sollicitations appliquées dans ces essais sous charge roulante sont suffisamment complexes, notamment quant aux conditions aux limites, pour qu'il ne soit pas possible d'en déduire de façon théorique la réponse aux sollicitations réelles. [11]

La troisième catégorie d'essai est celle des "essais de détermination". Elle correspond à une voie toute différente suivie pour assurer la représentativité des essais. Elle consiste à les choisir de telle sorte que l'on puisse passer, par une méthode théorique, de leurs résultats à la propriété d'usage désirée. Cela nécessite une modélisation de la structure de la chaussée et la connaissance des lois de comportement de l'enrobé ; cette modélisation et ces lois peuvent d'ailleurs être seulement approchées. Ces essais utilisent des sollicitations simples, parfaitement définies, et permettent de déterminer les propriétés intrinsèques des matériaux, c'est-à-dire indépendantes des conditions d'essai. Cette voie semble la plus prometteuse.[6]

### **1.3-2 CLASSIFICATION SELON L'ÉTAT DE CONTRAINTE ET DE DÉFORMATION :**

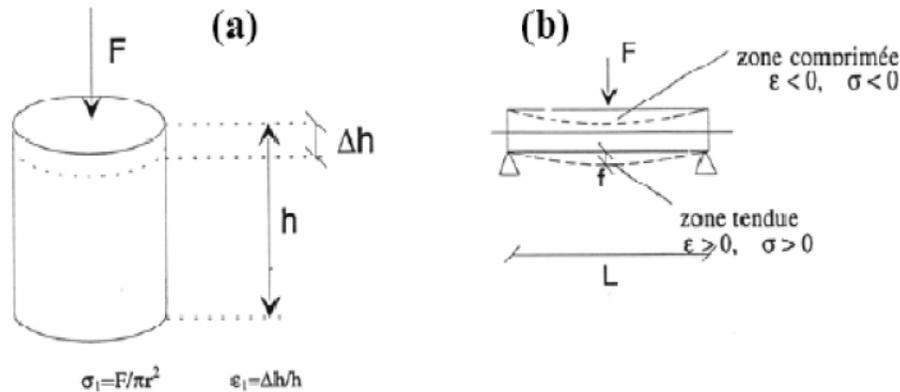
Les différents essais existants sur les matériaux bitumineux, ou plus généralement sur les géomatériaux, peuvent être classés en deux grandes catégories : les "essais homogènes" et les "essais non homogènes". Les essais homogènes permettent d'avoir accès directement aux contraintes et déformations, donc à la loi de comportement. Pour les essais non homogènes il faut postuler une loi de comportement a priori (viscoélastique linéaire par exemple) et prendre en compte la structure de l'éprouvette (données géométriques) pour obtenir après des calculs qui sont souvent compliqués, les paramètres de la loi de comportement (le module complexe par exemple). La Figure 1-4.a présente un exemple d'un essai homogène.

Les essais non homogènes peuvent être utilisés dans le cas où le comportement du matériau est simple (élasticité linéaire isotrope ou viscoélasticité linéaire isotrope).

Quand on postule en avance le comportement du matériau, on peut avoir une grande erreur dans la loi de comportement obtenue.

La Figure 1-4.b présente un exemple d'un essai non homogène.

On peut conclure que les essais homogènes semblent plus pertinents pour décrire le comportement du matériau. En effet, leur analyse conduit plus facilement à définir les paramètres de comportement.[6],[7]



**Figure 1-4 Exemple d'essai : a) essai de traction-compression (homogène),  
b) essai de flexion de poutre (non homogène).[7]**

## CONCLUSION :

Dans la chaussée, l'enrobé bitumineux est soumis à des températures et des fréquences de sollicitation variables dans le temps. Les conditions de sollicitation vont également varier en fonction de la structure de la chaussée mise en œuvre et de l'emplacement considéré. Le comportement d'un enrobé bitumineux au sein d'une chaussée est donc fort complexe puisqu'il dépend à la fois de la température (thermoplastique), du temps (visqueux) et d'autres paramètres. Ces différents aspects de comportement lui-sont conférés par le bitume.

En conséquence, il est nécessaire de décrire le comportement des bitumes du point de vue physico-chimique, structurel et rhéologique afin de cerner son influence sur le comportement des enrobés. Les chapitres qui suivent traitent ces points particuliers.

**2- GENERALITES SUR LES BITUMES :**

Dans l'antiquité, les bitumes et asphaltes naturels étaient déjà utilisés pour le jointoiment des briques et la réalisation d'étanchéités.

Jusqu'au 17<sup>ème</sup> siècle, le goudron de bois fut le seul matériau utilisé pour la construction et pour le traitement des bateaux, ensuite remplacé par le goudron extrait de la houille.

Au début du 20<sup>ème</sup> siècle, on réalise les premiers chantiers d'épandage de goudron sur les routes pour lutter contre la poussière soulevée par les premiers véhicules automobiles.[27]

**2-1- ORIGINE ET APPLICATION DU BITUME :**

Les bitumes sont surtout composés de carbone d'hydrogène, auxquels s'ajoutent l'oxygène, le soufre, l'azote, ainsi que des traces de divers métaux (Fer (Fe), Vanadium (V), Nickel (Ni), Aluminium (Al), Silicium (Si), Magnésium (Mg), Cobalt (Co), Cuivre (Cu), Etain (Sn), Zinc (Zn)). Ces éléments chimiques sont arrangés en molécules complexes différant par leur masse molaire qui varie entre 400 et 4000 g/mol. Généralement, ces molécules sont séparées par leur caractère plutôt aliphatique ou aromatique, et la présence de groupements polaires. Il faut, par ailleurs, préciser que le bitume ne contient pas de macromolécules.[18,28]

<b>Eléments</b>	<b>Concentration en % en masse</b>
Carbone	79-88
Hydrogène	0-13
Soufre	0-9
Oxygène	0-8
Azote	0-3

**Tableau 2.1. Composition élémentaire chimique des bitumes**

Le bitume est utilisé dans l'industrie pour ses propriétés d'étanchéité et d'isolation (thermique et acoustique). Néanmoins les applications routières sont les plus nombreuses puisque, en effet 90% de la production de bitume est utilisée sous forme d'enrobés et d'enduits superficiels. Par ailleurs, on estime que la totalité des réserves mondiales du pétrole brut devrait dépasser les 600Gt, ce qui laisse présager un long et bel avenir à cette industrie.

On outre, il convient de distinguer les termes de bitume et de liant hydrocarboné trop souvent confondus, en effet, le liant hydrocarboné peut être sous forme de :

Goudron, qui provient de la pyrogénéation (à l'abri de l'air) de matières d'origine végétales : houille, lignite, tourbe, bois,..., les goudrons routiers sont essentiellement tirés de la houille.

Les liants naturels, que l'on trouve à l'état naturel, le plus souvent associés à des matières minérales, qui sont utilisés depuis longtemps, il s'agit des roches Asphaltites qui, après broyage, donnent la poudre d'asphalte ainsi que des bitumes naturels (Asphaltite, bitume de Trinidad ou de Selenitza,..) ;

Les bitumes qui sont produits en raffinerie à partir de la distillation fractionnée de certains pétroles bruts dits « bruts à bitume» [11]

### **2.1.1. FABRICATION DU BITUME :**

Concernant les principaux modes de fabrication des bitumes, citons la distillation en raffinerie des pétroles brutes, lourds contenant suffisamment de fractions lourdes pour produire du bitume.

La première étape de ce processus consiste en une distillation atmosphérique qui permet de séparer les fractions légères du pétrole (essence, kérosène, gaz) des fractions lourdes. Ces dernières étant ensuite distillées sous vides pour produire fuels, huiles et bitumes. Outre la distillation, citons encore les procédés de soufflage et de désasphaltage ; le premier procédé consiste à oxyder les résidus sous vides par soufflage d'air chaud à 250°C. Le deuxième procédé quant à lui est utilisé pour des résidus sous vides ayant une teneur en fractions lubrifiantes trop importante et consiste à traverser les résidus sous vides par un courant ascendant de solvant ; la différence de solubilité des fractions bitumineuse vis-à-vis du solvant employé permet alors d'obtenir le bitume souhaité dans ce dernier cas le bitume présente une faible pénétrabilité.[27]

#### **2.1.1.1. LE PÉTROLE :**

La composition du pétrole brut varie selon les origines géographiques. Il est essentiellement constitué par des hydrocarbures paraffiniques, aromatiques et naphthéniques auxquels viennent s'ajouter des composés oxygénés, azotés et soufrés en proportions variables.

Le pétrole que nous utilisons actuellement est le résultat d'une lente dégradation au fond des océans du plancton (sédiments organiques et minéraux). Celui-ci s'est déposé par couches, entraînant la formation de strates, qui sont le siège de la formation du pétrole (mais aussi du gaz naturel).

Ces strates souvent séparées par une épaisseur de dépôt argileux constituent alors une roche imperméable.

La strate dans laquelle va avoir lieu la dégradation du plancton est appelée roche mère, qui est en quelque sorte une éponge dans laquelle se forme, après fossilisation des sédiments, du pétrole et du gaz naturel brut.

Le pétrole, le gaz et l'eau de mer vont ensuite remonter, par pression lithostatique (pression exercée par le poids des couches supérieures).

## Principe de fabrication des bitumes

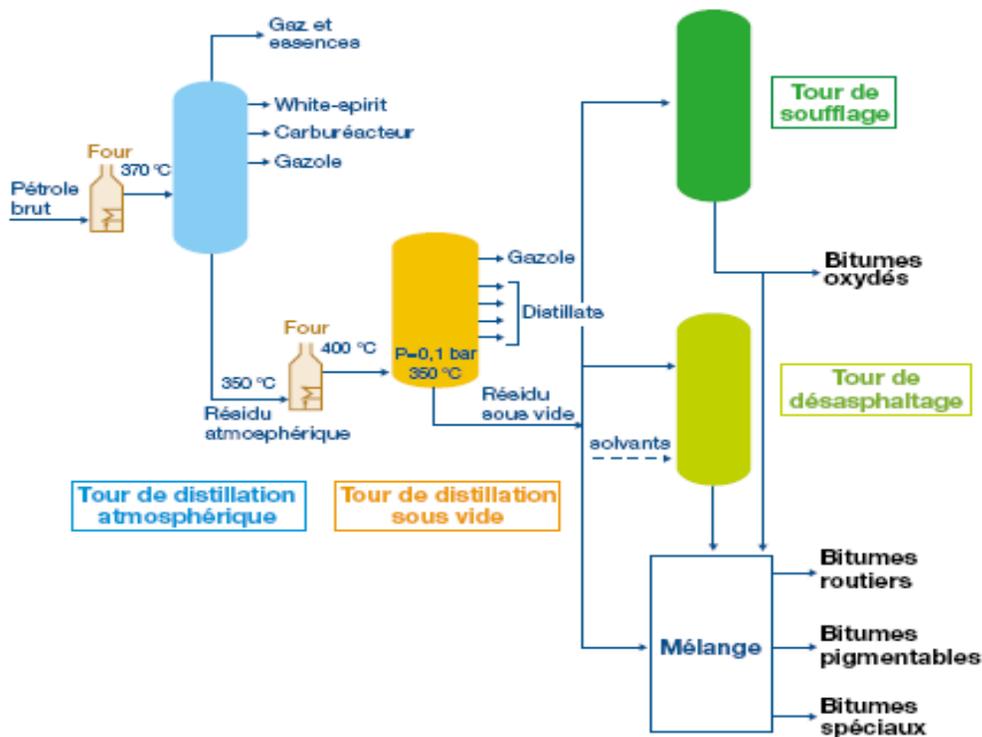


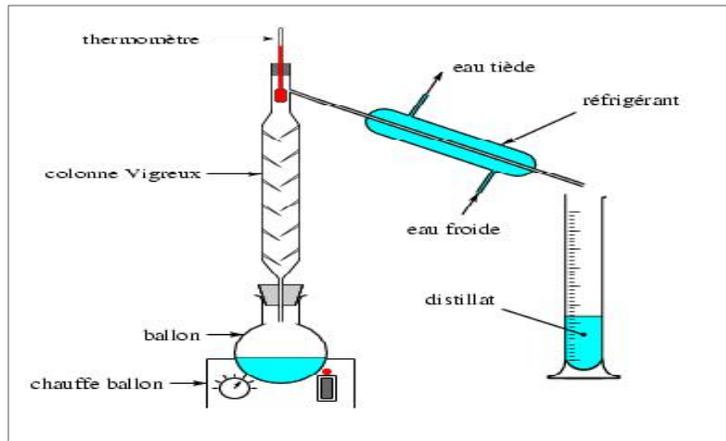
Figure 2-1 : PRINCIPE DE FABRICATION DU BITUME

### 2.1.1.2. LE RAFFINAGE :

Dans une raffinerie, les diverses installations transforment le pétrole brut en produits finis allant des bitumes et fiouls aux différents combustibles et carburants, gaz et bases pour la chimie. Le raffinage comporte différents procédés en fonction des bruts et de produits attendus:

#### ➤ LA DISTILLATION ATMOSPHERIQUE

Cette étape permet de séparer le pétrole brut en coupes d'hydrocarbures. En effet, celui-ci est composé de différents hydrocarbures conduisant à diverses utilisations (kérosène, asphalte, bitume...). La séparation des différents constituants est faite selon leur volatilité. La phase vapeur est éliminée et condensée. La fraction lourde, restant en fond de colonne constitue le résidu de distillation atmosphérique (fioul lourd).



**Figure 2.2. Schéma de distillation.**

### ➤ LA DISTILLATION SOUS VIDES

La pression réduite (4 à 5 kPa en tête, 13 kPa au fond) qui règne à l'intérieur de la tour de distillation, permet de poursuivre la séparation des constituants du pétrole sans les dégrader thermiquement. Les soutirages latéraux donnent des distillats qui constituent les bases pour l'industrie de la lubrification. Plus le point de prélèvement est proche du fond de tour, plus la viscosité du distillat est forte. Enfin, en fond de tour, du fioul lourd ou le bitume est recueilli suivant les conditions de marche de cet équipement. En effet, pour fabriquer du bitume par distillation il faut à la fois que les deux conditions suivantes soient réunies :

- Utilisation d'un brut à bitume dans le cocktail à distiller
- Conditions de fonctionnement (température et pression réduite) qui permettent d'atteindre le point de coupe correspondant

Les bitumes ainsi préparés sont dits « de distillation directe ».

### ➤ DESASPHALTAGE

Ce procédé est destiné à traiter des bruts à huiles peu chargés en bitume, qui donneraient un trop faible rendement en fond de tour sous vide. Il consiste à précipiter le bitume à l'aide de propane liquide. La précipitation est réalisée dans une tour d'une dizaine de mètres de hauteur en mélangeant 6 à 10 volumes de propane avec un volume de « fond sous vide ». La réaction se fait à une température variant de 45°C à 75°C sous forte pression pour maintenir le propane en phase liquide. En tête de tour, le propane emporte l'huile desasphaltée et en fond, le résidu dit de « desasphaltage » qui est évacué, contient encore du propane. Les deux courants doivent subir un dégazage avant de partir vers leur stockage.

### ➤ SOUFFLAGE

La rectification à l'air consiste à traiter un résidu atmosphérique dans une unité dite « d'oxydation » pour le durcir. L'opération se déroule dans une tour à oxyder ou tour de soufflage, le plus souvent en mode

dit « continu ». Le résidu, porté à une température comprise entre 250°C et 280°C, est traversé par un fort débit d'air. La majorité des réactions chimiques qui se déroulent au sein de la charge sont trois types:

- déshydrogénation de certains sites moléculaires
- condensation moléculaire
- craquage thermique des liaisons les moins stables

Le bitume soutiré de l'unité présente une viscosité plus élevée que celle de la charge. Au cours de l'oxydation, les molécules d'asphaltées se condensent et les molécules appartenant à la famille dite des « résines », font de même.

Ces condensations entraînent d'une part une augmentation de la concentration en asphaltées et de la masse molaire des asphaltées et des résines, et d'autre part une réduction de la teneur en résines par transformation de certaines de ces dernières en asphaltées. Le bitume ainsi obtenu est nettement plus structuré et de ce fait présente une moindre sensibilité à la température.

## **2.2. PROPRIETES PHYSICO CHIMIQUE DE BITUME:**

Le bitume est un continuum d'espèces chimiques variées séparées depuis les premiers travaux de Boussingault (1837) en deux familles :

Selon leur solubilité dans le n-heptane. On distingue ainsi les composés insolubles appelés asphaltées (qui représentent jusqu'à 20% en masse pour les bitumes routiers) des maltènes, composés solubles dans le n-heptane.

Plusieurs auteurs ont cherché à comprendre comment toutes ces espèces de polarité et d'aromaticité différentes s'organisent dans ce milieu. Cette compréhension de la structure des bitumes est importante car elle va notamment influencer sur les propriétés rhéologiques du matériau.[11]

### **2.2.1 COMPOSITION CHIMIQUE DE BITUME**

Le bitume se caractérise par l'existence d'espèces chimiques non miscibles, au sein d'un milieu quasi homogène.

#### **Fractions SARA**

La chromatographie liquide sur gel d'alumine a été employée (Corbett, 1968) pour séparer les espèces présentes dans la phase malténique en fonction de la polarité des solvants utilisés.

Ainsi les bitumes sont habituellement décomposés en 4 familles:

- Les dérivés saturés qui sont élués par un solvant peu polaire comme l'heptane.
- Les dérivés aromatiques extraites par le toluène.
- Les résines extraites par **CHCl<sub>3</sub>**/méthanol.
- Les asphaltènes qui restent adsorbent sur le lit d'alumine

D'une manière générale, le bitume est un continuum où l'on passe graduellement des saturés aux asphaltènes en augmentant progressivement la taille des molécules, leur aromaticité et leur teneur en hétéroatomes.[11]

#### ➤ **LES SATURÉS**

Ils sont constitués d'hydrocarbures aliphatiques à chaînes linéaires ou ramifiées. Ce sont des **huiles visqueuses non polaires de couleur paille ou blanche, essentiellement constituées de carbone et d'hydrogène**. On y trouve des alcanes linéaires cristallisables (paraffines), peu de groupements polaires et aussi des cycles naphthéniques. Cette fraction représente 5 à 20 % du bitume (Planche *et al.*, 1997).[1],[11]

#### ➤ **LES AROMATIQUES**

Ce sont des liquides jaunes à rouge foncé. Ils contiennent en quantité importante les éléments carbone et hydrogène. Ce sont des composés naphthéniques aromatiques de faible masse moléculaire (300 à 2000 g/mole) constitués de chaînes carbonées non polaires ou dominent les systèmes aromatiques mono et bicycliques. Ils constituent 40% à 65 % du bitume total (Pieri, 1995).[1][11]

#### ➤ **LES RÉSINES**

Ce sont des composés naphtho-aromatiques de masse molaire plus élevée (entre 500 et 50000 g/mole) dont la taille est comprise entre 1 nm et 5 nm et qui ne représentent que 10% d'un bitume routier. Les travaux de Koots et Speight (1975) montrent que leur composition est proche de celle des asphaltènes mais avec des masses molaires plus faibles. Ces résines sont de nature très polaire et de ce fait ont des propriétés adhésives très fortes. Ce sont des agents de dispersion ou de peptisation des asphaltènes.[9] [18]

#### ➤ **LES ASPHALTÈNES**

Ce sont des solides amorphes noirs ou bruns de masse molaire très élevée (entre 1000 et 100000 g/mole dans la majorité des cas). Leur taille varie de 5 nm à 30 nm.

Les asphaltènes sont des composés hydrocarbonés avec un rapport molaire C/H proche de un (1) caractéristique de cycles aromatiques condensés (Moschopedis *et al.*, 1976; Yen *et al.*, 1961).

Des résultats obtenus en Résonance magnétique Nucléaire (RMN) (Michon *et al.*, 1997) au 13°C montrent que 50% des atomes de carbone sont impliqués dans des cycles aromatiques alors que seulement 5 % des atomes d'hydrogène sont présents dans ces mêmes cycles ce qui indique une polycondensation des noyaux aromatiques.

D'autres méthodes d'analyse chimique telles que la fluorescence UV-EES ou l'IRTF montrent que les asphaltènes comportent, outre les nombreux noyaux aromatiques polycondensés, des groupements aliphatiques pendants.

L'oxygène, l'azote et le soufre sont présents en quantité significative dans une composition des asphaltènes ainsi que de faibles quantités de métaux: nickel, vanadium, fer, sodium.

La teneur en asphaltènes est comprise entre 5 à 20 % des bitumes. Selon la norme française (AFNOR T60-115), ils sont définis par leur caractère insoluble dans le n-heptane à la température d'ébullition et soluble dans le toluène chaud. [9][11]

## **2.2.2. CLASSIFICATIONS DES BITUMES**

Les caractérisations traditionnelles et la classification des liants bitumineux reposent sur deux essais normalisés empiriques qui ont l'avantage d'être simples, largement répandus et de se révéler fiables et reproductibles

### **2.2.2.1. LA TEMPERATURE DE RAMOLLISSEMENT BILLE ET ANNEAU (TBA):**

Elle donne une température d'équiconsistance (de l'ordre de 40°C à 80°C selon les bitumes). Ce test consiste à déterminer la température pour laquelle un anneau de bitume supportant une bille d'acier, se déforme en s'allongeant jusqu'à atteindre un repère situé à une distance prédéterminée.

Sa valeur est attachée aux comportements à la déformation permanente aux températures de service élevées [16]

### **2.2.2.2 LA PENETRABILITE :**

C'est un indicateur de la consistance aux températures ambiantes.

Ce test mesure la profondeur d'enfoncement d'une aiguille aux dimensions imposées à 25°C sous une charge de 100g pendant cinq secondes. Elle s'exprime en dixièmes de millimètre. Cette mesure peut se réaliser à différentes températures et fournir une information sur la susceptibilité thermique du liant.[1]

Cette définition des classes de bitumes du plus dur au plus mou (Nor, 1999) (10/20 à 160/220).

Pfeiffer et Doormal (1936) ont cherché à classer les bitumes suivant les propriétés rhéologiques et leur dépendance avec la température. Un indice de pénétration IP est calculé à partir de la pénétrabilité à 25°C (P25) et la TBA, suivant la formule:

$$\frac{20-IP}{10+IP} = \frac{\log P25 - \log 800}{25-TBA}$$

Dans ce calcul, TBA est considérée comme la température équivisqueuse à laquelle la pénétrabilité vaut 800 dixièmes de mm.

L'IP varie globalement entre les valeurs (-2) et (+6). Selon cette classification, les bitumes à IP inférieur à 0 sont des bitumes sol, ceux à IP supérieur à 2 des bitumes gel, les autres des bitumes sol-gel.

Malgré sa précision limitée, l'IP est donc un indicateur assez pertinent de la susceptibilité thermique du bitume en relation avec sa composition chimique.

L'incidence de la structure sur le comportement rhéologique des bitumes a été mise en évidence en se basant sur la notion de bitume sol et gel (Loeber et al., 1996). Pour cela, Gaestel et al. (1971) ont introduit un indice de stabilité colloïdale IC défini par:

$$IC = \frac{X_{\text{asph}} + X_{\text{sat}}}{X_{\text{resine}} + X_{\text{aro}}} \quad 2.2$$

Où  $x_i$  est la fraction massique en espèces  $i$ . Plus le rapport IC est grand, plus le bitume est de type gel et sa stabilité colloïdale est médiocre.

Gaestel note également que toutes les caractéristiques du liant (point de ramollissement, ductilité, température de fragilisation, susceptibilité thermique, retour élastique etc...) varient de façon sensible avec l'indice colloïdal.

Lesueur et al. (1996) ont conforté le modèle de structure colloïdale des bitumes par des mesures rhéologiques. La peptisation des asphaltènes par les résines augmente le rayon des particules. Storm et al. (1991) ont introduit la notion de paramètre de solvation pour décrire l'épaisseur de la couche de résine autour des asphaltènes en fonction de la température. A basse température, la fraction volumique de la phase solide peut atteindre une valeur maximale correspondant à un empilement compact. La structure devient stable et indépendante de la température.[26]

### **2.2.3. LES LIANTS BITUMINEUX [18]**

Les bitumes sont employés pour la fabrication des mélanges bitumineux. Ils sont appelés aussi « liants noirs », sont des mélanges d'hydrocarbures qui appartiennent à la famille des liants organiques et dont le représentant principal est le bitume. On y rencontre des asphaltènes (solides) en solution dans des matières liquides (les maltènes ou huiles pétrolières), ces derniers sont composés d'huiles saturés, d'huiles aromatiques et de résines, ils résultent de la distillation fractionnée des pétroles bruts. Ils se divisent en 03 classes :

### **2.2.3.1. LES BITUMES LIQUIDES :**

Sont des mélanges de bitume solide et de solvant, ils ont des viscosités différentes selon le pourcentage de bitume par rapport aux solvants ;

### **2.2.3.2. LES BITUMES SOLIDES :**

Sont solides ou semi- solides à la température ambiante. Ils sont employés à chaud dans la préparation des mélanges bitumineux. On les classe suivant la profondeur à laquelle pénètre une aiguille normalisé soumise à un poids de 100g durant 5s à 25°C ;

### **2.2.3.3. LES EMULSION :**

Sont des mélanges d'eau, de bitume et d'agents émulsifiants. Il en existe deux types : les émulsions anioniques, utilisées avec des granulats portant des charges positives, et les émulsions cationiques, utilisées avec des granulats acides dont les charges négatives attirent les charges positives. [8]

La densité des bitumes à 25°C est voisine de 1.

### **2.2.4. SPÉCIFICATIONS ALGERIENNES DES BITUMES**

Tenant compte du climat algérien, du procédé de fabrication du bitume et de certains critères de performances des chaussées liées à l'orniérage, à la fatigue et à la fissuration à basse température, l'Organisme de Contrôle des Travaux publics "CTTP", après des études spécifiques in-situ et en laboratoire, recommande depuis 2004 de nouvelles limites de spécifications des bitumes. Ces limites de spécifications sont données selon deux groupes de bitumes à savoir, ceux fabriqués par soufflage [ $1 < I_p < 3,5$ ] ainsi que par distillation directe [ $-1 \leq I_p \leq +1$ ]. La différence entre ces spécifications pour les deux types de bitumes réside dans la limite de la température bille et anneau comme le montre le tableau 2.2:

		<b>liants</b>				
<b>Caractéristiques</b>		<b>Normes</b>	<b>20/30</b>	<b>40/50</b>	<b>60/70</b>	<b>80/100</b>
<b>Pénétrabilité à 25°C (1/10 mm)</b>		NF T66-004	20 à 30	40 à 50	60 à 70	80 à 100
<b>Température bille et anneau (°C)</b>		NF T66-004	57 à 62	52 à 57	47 à 52	41 à 47
<b>Température bille et anneau (°C)</b>	<b>Bitume soufflé</b>	NF T66-004	62 à 68	57 à 61	52 à 56	46 à 51
<b>Ductilité à 25°C (cm)</b>		NF T66-006	25	60	80	80
<b>Différence de TBA après RTFOT ( TBA)</b>		ASTM	8	9	9	9
		D 2872-85				
<b>Perte de masse au chauffage (%)</b>		ASTM	-	< 1	< 1	< 2
		D 2872-85				
<b>Point d'éclair (°C)</b>		NF T60-118	250	> 230	> 230	> 230
<b>Densité à 25°C</b>		NF T66-007	1 à 1,1	1 à 1,1	1 à 1,1	1 à 0,07

**Tableau 2.2. Caractéristiques des bitumes selon les spécifications du CTPP.**

### **2.2.5. CHOIX DE L'UTILISATION D'UNE CLASSE DE BITUME :**

La chaussée subit des dégradations due aux sollicitations du trafic et du climat telles que :

- les déformations à haute température (orniérage) ;
- les fissurations par fatigue sous le passage répété des véhicules ;
- les fissurations aux basses températures.

La résistance de la chaussée vis-à-vis de ces dégradations dépend de la performance du mélange et notamment du grade du bitume utilisé.

Le choix de la classe de bitume tient compte des paramètres suivants :

- les sollicitations appliquées à la chaussée (trafic et climat) ;
- la susceptibilité du bitume à la température qui est fonction de son mode de fabrication
- l'augmentation de la température de ramollissement du bitume Bille et Anneau ( TBA) due au vieillissement lors de la fabrication de l'enrobé en centrale.[18]

#### **2.2.5.1. CHOIX SELON LE TRAFIC ET L'ALTITUDE :**

Les classes recommandées selon le trafic et l'altitude sont présentées dans le tableau 2. 3.

Zone	Altitude (m)	Classe / trafic (PL.MJA)		
		trafic < 150	150 trafic < 500	trafic 500
I	alt 500	60/70	40/50 ou 60/70	40/50
	alt > 500	80/100	60/70 ou 80/100	60/70
II	alt 500	40/50	20/30 ou 40/50	20/30
	500 < alt 1000	60/70	40/50 ou 60/70	40/50
	alt > 1000	80/100	60/70 ou 80/100	60/70
III	500 alt 1000	40/50	20/30 ou 40/50	20/30
	alt > 1000	60/70	40/50 ou 60/70	40/50

**Tableau 2.3. Choix de la classe du bitume**

### 2.2.5.2. CHOIX SELON LE CLIMAT :

Une étude spécifique sur la diversité du climat algérien a permis de faire un découpage de l'Algérie en trois principales zones climatiques.

#### ZONE I

Il s'agit de la région septentrionale du Tell. Elle est dominée par un climat méditerranéen caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers doux et pluvieux. Elle représente la zone la plus humide de l'Algérie.

#### ZONE II

Elle correspond principalement à la région des Hauts plateaux. Caractérisée par un climat semi-aride, elle présente de longs hivers froids avec de courtes périodes de neige et des étés chauds et courts.

#### ZONE III

Il s'agit de la zone du Sahara. C'est une région très aride soumise à des vents fréquents et violents. Les températures y sont extrêmement élevées durant la journée.

Ces zones se distinguent essentiellement par trois caractéristiques (voir tableau 2.4) :

- la température maximale moyenne au sol ;
- la température minimale moyenne au sol ;
- la hauteur de précipitation annuelle moyenne.

	Température maximale moyenne au sol (°C)	Température minimale moyenne au sol (°C)	Hauteur de la précipitation annuelle moyenne (mm)
<b>Zone I</b>	45	- 2,5 Tmin 2,5	h 600
<b>Zone II</b>	45 < Tmax 50	< - 2,5	h < 600
<b>Zone III</b>	> 50	- 5	h < 100

**Tableau 2.4. Caractéristiques des zones climatiques**

## CONCLUSION

Dans cette première partie de ce chapitre, nous avons résumé la difficulté que pose la caractérisation chimique des bitumes. La tendance actuelle qui considère que le bitume est formé de quatre familles, ne correspondant pas à des entités chimiques bien définies, mais résultant de différents procédés de séparation, il s'agit des saturés, résines, asphaltènes et maltènes.

Ces différents constituants ne forment pas un simple mélange mais plutôt un ensemble organisé avec une interaction très marquée des divers éléments affectant ainsi l'équilibre colloïdal de la structure du liant. Cet état d'équilibre est fortement influencé par les conditions de température d'élaboration et d'utilisation des bitumes. La caractérisation chimique ne permet pas, à elle seule, d'expliquer les changements d'états du bitume. Des études rhéologiques sont alors nécessaires dans les différents domaines de températures afin de mieux cerner et d'expliquer son comportement.

Aussi nous avons parlé de quelques spécifications algériennes sur les bitumes ainsi que le choix de l'utilisation d'une classe de bitume sur le territoire Algérien soit selon le climat soit selon le trafic et l'altitude.

### 2.3. DESCRIPTION DE COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DES BITUMES :

Le bitume est un liquide viscoélastique. Sa caractéristique principale est sa grande susceptibilité thermique. Ce matériau se présente comme un liquide newtonien, peu visqueux à haute température, et comme un solide vitreux élastique à basse température.

#### 2.3.1 RAPPEL MECANIQUE DES MILIEUX CONTINUS :

La rhéologie s'intéresse au comportement des matériaux sous contrainte mécanique.

La mécanique des milieux continus permet de relier les tenseurs des contraintes et des déformations dans le cas des faibles sollicitations. L'hypothèse des faibles déformations permet de considérer la réponse du matériau comme linéaire (ce qui signifie que multiplier la contrainte par un facteur  $x$  multiplie la déformation par  $x$ ).

Dans le cas le plus général, l'équation rhéologique d'état d'un solide élastique s'écrit sous la forme: [1][3]

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl}$$

2.3

Ce qui définit un tenseur des coefficients élastiques  $C_{ijkl}$  et  $\epsilon_{kl}$  sont respectivement les composantes des tenseurs contrainte et déformation.

Dans le cas d'un matériau isotrope seules 2 composantes sont indépendantes et la loi de Hooke s'écrit: [1]

$$\sigma_{ij} = \nu \text{tr}(\epsilon) + 2G\epsilon_{ij} \quad 2.4$$

et  $G$  sont les constantes de Lamé.  $G$  est le module de cisaillement. Dans le cas d'une expérience de traction uniaxiale on définit le module de Young

$E = \frac{\sigma_{11}}{\epsilon_{11}}$  et le coefficient de Poisson  $\nu = -\frac{\epsilon_{22}}{\epsilon_{11}}$  que l'on peut relier au coefficient de Lamé par les relations

$$E = \frac{(2G+3\lambda)G}{G+\lambda} \quad 2.5$$

et

$$\nu = \frac{\lambda}{2(G+\lambda)} \quad 2.6$$

Le comportement d'un corps viscoélastique linéaire est intermédiaire entre le comportement du solide élastique parfait et celui du liquide Newtonien.

La contrainte imposée à un corps viscoélastique ne dépend pas seulement de la déformation actuelle du corps mais aussi des déformations qu'il a subies dans le passé.

Dans le domaine linéaire, l'additivité des déformations et des contraintes qui en résultent se traduit par la relation: [1]

$$\sigma(t) = E(0) \epsilon(t) + \int_0^t r(t-\tau) \dot{\epsilon}(\tau) d\tau \quad 2.7$$

Ou:

$\sigma(t)$  est la contrainte

$\epsilon$  est la déformation

$\dot{\epsilon}$  est la vitesse de déformation

$r$  est le temps de relaxation

et  $r(t)$  est appelée fonction de relaxation.

### 2.3.2. COMPORTEMENT SOUS SOLLICITATION ALTERNEE :

Dans le cas d'une expérience sous sollicitation alternée, le matériau est soumis à une déformation sinusoïdale de pulsation  $\omega$  (en rad/s) que l'on écrit sous la forme complexe

$$\epsilon^*(t) = \epsilon_0 \exp(j\omega t) \quad 2.8$$

et on définit alors le module complexe:

$$G^*(\omega) = \frac{\sigma(\omega)}{\epsilon(\omega)}$$

2.9

Généralement on écrit:  $G^*(\omega) = G'(\omega) + jG''(\omega)$  ou  $G'(\omega)$  est le module élastique (ou module de conservation) et  $G''(\omega)$  est le module visqueux (ou module de perte). On définit aussi un angle de phase (déphasage entre la déformation et la contrainte, toutes deux sinusoïdales):

$$\tan \delta(\omega) = G''(\omega) / G'(\omega) \quad 2.10$$

vaut  $0^\circ$  si le matériau a un comportement de type élastique (loi de Hooke) et  $90^\circ$  si le matériau a un comportement de type liquide Newtonien.

Des relations analytiques exactes décrites par Kronig R de L. et Kramer H. A. (Tschoegl, 1989) relient entre elles la norme et l'angle de phase du module complexe  $G^*$ . [16]

### 2.3.3. EXPLOITATION DES MESURES EN ANALYSE VISCOELASTIQUE :

Les deux composantes du module complexe présentent entre elles des relations caractéristiques que l'on peut faire apparaître graphiquement.

#### ➤ Diagramme Cole-Cole

La figure 2.1 représente l'espace de Cole-Cole. On obtient ici une courbe en arc de cercle partant de l'origine et se refermant sur la valeur du module atteinte aux très basses températures et hautes fréquences. Les principales différences entre les produits résident dans la valeur des pentes que présente cette courbe au voisinage de l'origine ainsi que dans sa partie décroissante. [1]

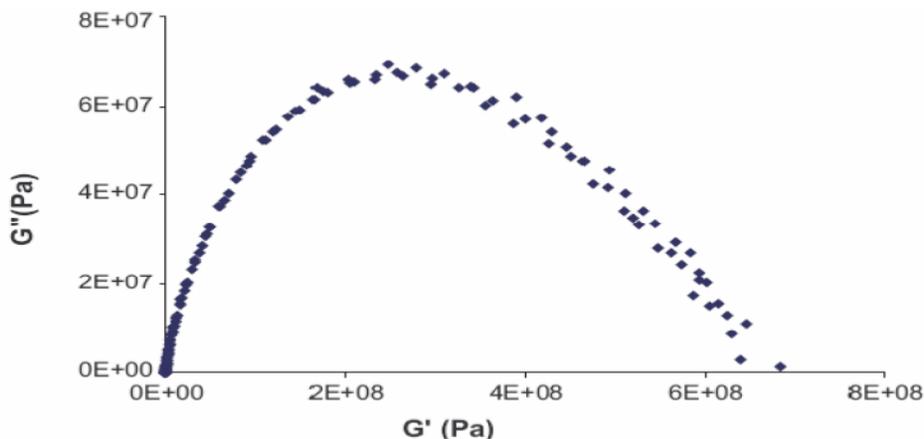


Fig. 2.3 – Diagramme Cole Cole pour un bitume de distillation directe

## ➤ Courbes de Black

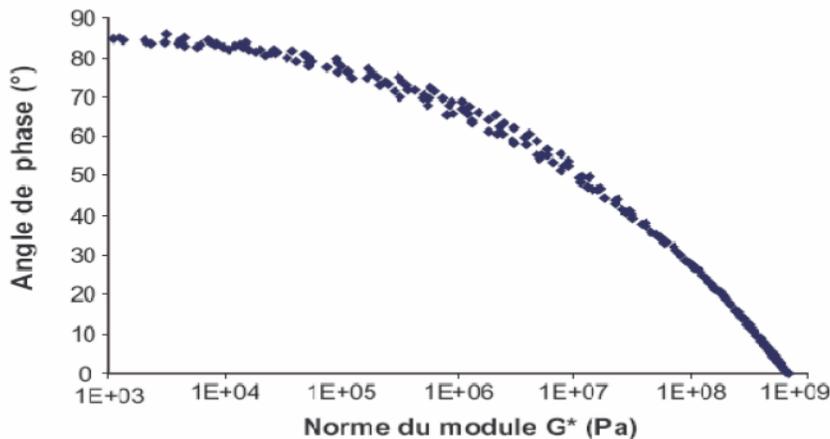
Un mode de représentation particulièrement intéressant est la courbe de Black qui s'obtient en portant  $(\delta, T)$ , en fonction de  $\log(|G^*|(\delta, T))$  (figure 2.2).

La représentation de Black couvre toute la gamme des températures et des fréquences utilisées sans nécessiter de calcul préalable car la norme du module et l'angle de phase sont des valeurs obtenues expérimentalement (Ramond et al., 1995).

Compte tenu du coefficient de dilatation thermique des bitumes de l'ordre de  $10^6 \text{ C}^{-1}$ , les corrections faites habituellement sur la norme du module en fonction de la masse volumique sont négligeables et ne sont pas prises en considération.

Lorsqu'on reporte sur un même diagramme de Black les résultats obtenus à partir de plusieurs géométries d'échantillon, la courbe reste unique si aucune erreur de mesure ne s'est produite comme par exemple l'utilisation d'un facteur de forme inadapté ou des gammes de températures conduisant à des raideurs d'échantillon trop proches des limites de l'appareillage.

Comme on le verra ultérieurement, on peut observer dans cette représentation, des discontinuités entre les isothermes. Elles peuvent être interprétées en termes de modification physicochimique de la structure du liant.[1]



**Fig. 2.4 – Courbe de Black pour un bitume de distillation directe**

## Principe d'Equivalence Temps-Température (PETT)

Le Principe d'Equivalence Temps Température (PETT) décrit pour les matériaux viscoélastiques l'équivalence entre énergie thermique et énergie mécanique.

Ce principe s'applique à des matériaux qui relaxent au voisinage, par exemple, d'une transition vitreuse (Williams et al., 1955). On considère qu'il peut toujours s'appliquer à un matériau hétérogène à condition que la phase dispersée ne provoque pas de relaxation supplémentaire.

Plusieurs auteurs ont travaillé sur l'applicabilité du PETT pour les bitumes. Un bitume à forte teneur en asphaltées est moins enclin à suivre le PETT à haute température (Lesueur, 1996).

La représentation de Black montre un mauvais recouvrement des isothermes signifiant clairement que température et temps ne sont pas équivalents dans cette région. Les matériaux à forte teneur en fractions cristallisables mettent également en défaut cette équivalence en particulier dans la zone des bas modules (hautes températures).

La relaxation de la phase dispersée, qui correspond ici à la dissolution des paraffines se superposent aux effets de la transition vitreuse du bitume.[1]

### **2.4. MODELISATION DE COMPORTEMENT VISCOELASTIQUE LINEAIRE**

La plupart des modèles proposés pour décrire le comportement viscoélastique sont ainsi basés sur la construction des courbes maîtresses. Ils montrent tous que la rhéologie des bitumes est gouvernée par la largeur du spectre des temps de relaxation.[ 12]

#### Dobson

Dobson (1969) a proposé la formule suivante pour décrire toutes courbes maîtresses en fonction de la fréquence réduite  $w_r$

$$\text{Log}(G_r^{-b} - 1) = -b \log(w_r) - \frac{20,5 - W_r^{-b}}{230,3} \quad 2.11$$

Pour  $w_r > 10^{-1/b}$  :  $\log(G_r) = \log(w_r)$

Pour  $w_r < 10^{-1/b}$  ou  $G_r = G^*/G$  et  $w_r = aT - \theta / Gg$

Avec :  $G$  : module vitreux

$\theta$ : viscosité newtonienne  $b$ : largeur du spectre de relaxation

#### Jongepier et Kuilman

Un modèle couramment employé est le modèle de Jongepier et Kuilman (1969). Ce modèle repose sur une loi log normale du spectre des temps de relaxation  $H(\tau)$  donnée par

L'équation 2.12. [12]

$$H(\tau) = \frac{G_\infty}{\alpha \sqrt{\pi}} \exp - \left( \frac{\ln \tau / \tau_m}{\sigma} \right)^2. \quad 2.12$$

Le module de perte qui en découle (équation 2.12), suit, en première approximation une loi de distribution équivalente.

$$G'' = \int_{-\infty}^{\infty} H(\tau) \frac{w_\tau}{1+(w_\tau)^2} d \ln \tau \quad 2.13$$

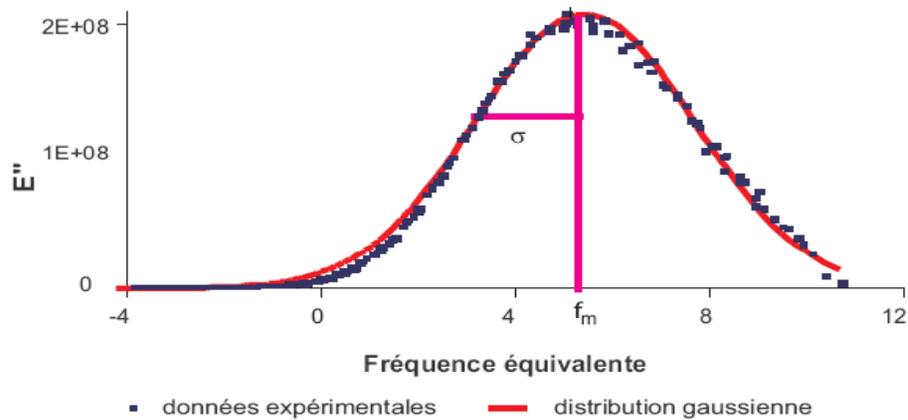
A partir des points expérimentaux, il est alors aisé de préciser la position du maximum par l'échelle des fréquences ( $f_m$ ) malgré le faible nombre de points obtenus autour de cette valeur (figure 2.3) et de déterminer l'écart-type de la distribution.  $f_m$  est la fréquence équivalente correspondant à une transition du régime viscoélastique au régime vitreux.

### Anderson

Anderson (1993); Christensen et Anderson (1992) dans le cadre des travaux du Strategic Highway Research Program (SHRP) ont proposé deux relations pour décrire le comportement des bitumes: [12]

$$\log(G_r) = - \frac{R}{\log 2} \log \left( 1 + \left[ \frac{w_r}{w_x} \right]^{\frac{-\log 2}{R}} \right) \quad 2.14$$

$$\delta(w) = 90 \left( 1 + \left[ \frac{w_r}{w_x} \right]^{\frac{\log 2}{R}} \right)^{-1} \quad 2.15$$



**Fig. 2.5 – Modélisation de la courbe maîtresse de module de perte par un modèle de Jongepier et Kuilman**

Avec la pulsation réduite  $r = aT$  et  $x$  la fréquence pour laquelle  $G' = G''$  ( $\delta = 45^\circ$ ).

Enfin

$$G_r = \frac{|G|}{G_\infty} \quad 2.16$$

$R$  est défini comme un indice rhéologique. Il est aisément déterminé par le rapport des modules à  $\delta = 45^\circ$  selon l'équation 2.16. Il est similaire au coefficient  $b$  de Dobson et peut être relié au coefficient de Jongepier et Kuilman. [ 12]

#### 2.4.1. MODELISATION STRUCTURELLE DES BITUMES

Les bitumes purs présentent deux relaxations.

##### Relaxation à haute température

A des températures supérieures à  $60^\circ\text{C}$  le bitume s'écoule comme un liquide newtonien. Le paramètre important dans cette région est donc la viscosité newtonienne.

Le modèle colloïdal a été utilisé (Storm et al. 1991, 1995) pour décrire la dépendance en température de la viscosité des bitumes. La viscosité newtonienne du liant  $\eta_0$  est déduite de la viscosité newtonienne de la phase maltène  $\eta_0^m$ , de la fraction volumique d'asphaltènes  $x_{asph}$ , de la compacité maximale  $\phi_m$  et d'un paramètre de solvation  $K$  représentant l'épaisseur de la couche de résines qui entoure les noyaux d'asphaltènes:

$$\eta_0 = \eta_0^m \left( 1 - \frac{Kx_{asph}}{\phi_m} \right)^{-2,5} \quad 2.17$$

Une loi d'Arrhenius décrit bien la dépendance en température de la viscosité newtonienne des maltènes ainsi que du paramètre de solvation réduit  $K/m$ . Les énergies d'activation pour ces lois sont sensiblement constantes. (Lesueur, 1996; Storm et al., 1991).

La variation de la viscosité newtonienne en fonction de la température suit également une loi d'Arrhenius, encore appelée loi de Vogel-Fulcher (R.Skulski, 1999), qui peut être donnée par rapport à une température de référence  $T_{ref}$  :

$$\text{Log} \left( \frac{\eta(T)}{\eta(T_{ref})} \right) = 0,43422 \frac{H}{R} \left[ \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right] \quad 2.18$$

$H$  est l'énergie d'activation de l'écoulement visqueux et  $R$  la constante des gaz parfaits.

Entre 20 et 75 °C des effets viscoélastiques apparaissent que l'on peut observer en représentant la viscosité complexe en fonction de la fréquence.

Un maximum de la composante de dissipation  $\omega''$  met en évidence une relaxation dans le domaine fréquences/températures étudié. Cette relaxation peut être décrite par la loi phénoménologique proposée par Havriliak et Nagami (1966)

$$\eta^*(\omega) = \eta_0 [1 + (j\omega \tau_\alpha)^a]^{-b} \quad 2.19$$

Avec:

$\eta_0$  est la viscosité newtonienne calculée par l'équation 2.17,

$a$  et  $b$  ( $a > 0$  et  $b < 1$ ) sont évalués graphiquement sur le diagramme Cole-Cole.

Cette relaxation à haute température est attribuée au mouvement brownien des asphaltènes et le temps de relaxation est donné par la loi de Navier-Stokes:

$$\tau_\alpha = \frac{6\pi\eta_0 K a_0^3}{k_B T} \quad 2.20$$

Avec :

$\eta_0$  est la viscosité du bitume

$K$  est le paramètre de solvation

$a_0$  est le rayon du noyau d'asphaltée

$k_B$  est la constante de Boltzmann

$T$  est la température

## **Relaxation à basse température**

A basse température, la matrice se solidifie et le bitume atteint son plateau vitreux (comportement élastique). La courbe de variation du module complexe en fonction de la fréquence peut être décrite par le modèle de Christensen et Anderson (2.14 et 2.15), ce qui introduit un temps de relaxation supplémentaire, associé à la transition vitreuse de la matrice. Le module vitreux d'un bitume varie entre 0,6 et 2GPa (Anderson, 1993; Ramond et Such, 1990) et n'est pas fonction de sa teneur en asphaltènes.

Ces temps de relaxation varient en fonction de la température selon une loi WLF donc les coefficients  $C_1$   $C_2$  dépendent de la nature du bitume (mais en général pas du grade).

La température de référence est fortement corrélée à la température  $T_g$  mesurée en DSC.

L'indice rhéologique  $R$  (défini dans le modèle d'Anderson) augmente lorsque la teneur en asphaltènes croît (Christensen et Anderson, 1991; Lesueur, 1996).

Ces deux modélisations ne sont valables que dans un domaine de température limitée autour de chaque relaxation. Les effets conjugués des deux phénomènes à température ambiante ne sont pas pris en compte par ces auteurs.[1]

## **2.5. PROPRIÉTÉS RHÉOLOGIQUES DES LIANTS BITUMINEUX**

Si la rhéologie du liant ne constitue pas un but en soi, celle-ci peut toutefois se concevoir comme une approche nécessaire mais non suffisante des propriétés de l'enrobé. Dans le cas présent, il s'agit donc d'apprécier au mieux l'influence des propriétés du liant bitumineux sur celles de l'enrobé, sachant que de tous les facteurs de formulation, le bitume est sans doute celui qui a l'influence la plus nette sur les propriétés rhéologiques des enrobés. .[4]

### **2.5.1 CLASSES DE COMPORTEMENT DES BITUMES PURS EN FONCTION DE $\dot{\epsilon}$ ET $T$**

La Figure 2.6 permet d'identifier simplement les principaux types de comportement des bitumes en fonction de l'amplitude de la déformation ( $\dot{\epsilon}$ ) et de la température  $T$ , pour une vitesse de déformation fixée. On y distingue :

- les domaines fragile et ductile, où la résistance à la traction  $\sigma_p$  peut être mesurée,
- la rupture fragile, qui peut être caractérisée par la ténacité  $K_c$  ou l'énergie de rupture  $G_c$  (Mécanique Linéaire de la Rupture),

- le comportement élastique linéaire, caractérisé par les modules  $E$  et  $G$ ,
- le domaine viscoélastique linéaire, caractérisé par les modules complexes  $E^*$  et  $G^*$ ,
- le comportement purement visqueux (Newtonien), caractérisé par la viscosité  $\eta$ , pour des déformations de l'ordre de quelques pour cent, le domaine où le comportement est fortement non linéaire.

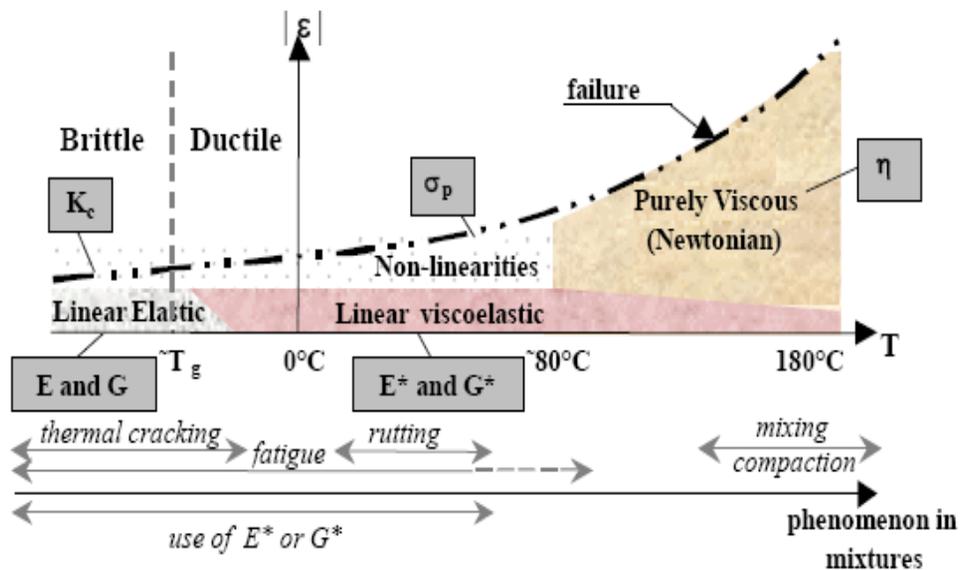


Figure 2.6. Classes de comportement des bitumes en fonction de  $(\epsilon)$  et  $T$ . Les paramètres  $K_c$ ,  $E$ ,  $G$ ,  $E^*$ ,  $G^*$  et  $\eta$  sont introduits par la suite.[8]

## 2.5.2 LES CARACTÉRISTIQUES CLASSIQUES DES BITUMES

### 2.5.2-1 PENETRABILITE (NF T 66-004)

La pénétrabilité du bitume représente 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. C'est donc une mesure de la consistance du bitume. La pénétrabilité la plus couramment utilisée est celle mesurée à 25°C.

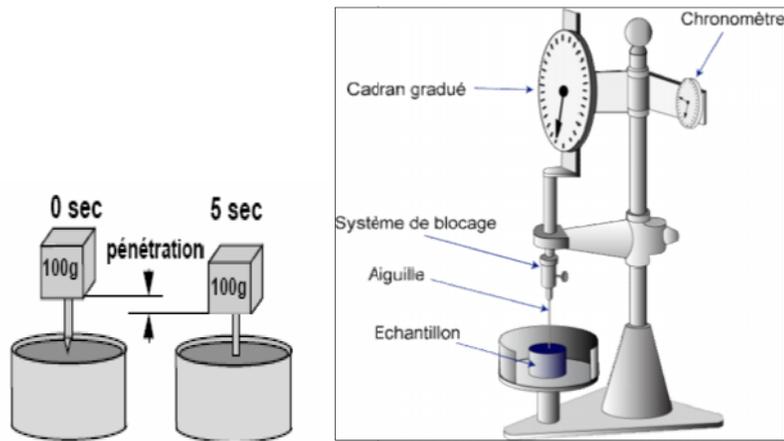
Dans ces conditions, plus un bitume est dur, plus la valeur de sa pénétrabilité est faible.[26]

A titre d'exemple, on distingue les classes :

10/20 et 35/50  $\Rightarrow$  bitumes durs

50/70 et 70/100  $\Rightarrow$  bitumes semi-durs

180/220  $\Rightarrow$  bitumes mous

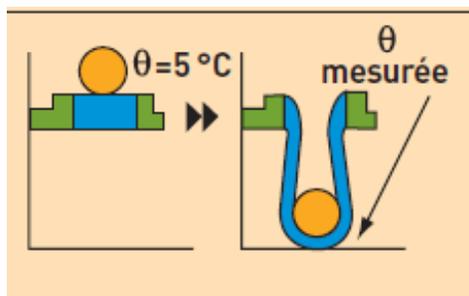


**Figure 2.7. Essai de pénétrabilité pour le bitume.(18)**

### 2.5.2.2 : POINT DE RAMOLLISSEMENT BILLE ANNEAU (NF T 66-008)

C'est la température à laquelle s'enfonce une bille à travers un anneau de bitume dans des conditions définies de fabrication et d'essai. Par voie de conséquence, il s'agit de la température à laquelle le bitume étudié atteint un certain degré de ramollissement.

Les résultats des deux essais empiriques précédents (Pénétrabilité à 25°C et Température Bille Anneau) permettent d'identifier le liant examiné et de le classer par rapport aux spécifications actuellement admises.[4]



**Figure 2.8 : Essai bille et anneau[18, 20]**

### 2.5.2-3 TEMPERATURE DE FRAGILITE FRAASS (NF T 66-006)

La température de fragilité Fraass correspond à la température à laquelle un film mince de bitume rompt sous l'effet d'une flexion, dans des conditions opératoires de fabrication et d'essai bien définies. [4]

Cet essai empirique donne une indication sur les propriétés à froid d'un bitume.

Ramond et Such (1990) précisent que, par expérience, on sait que la zone critique où se présentent les phénomènes de fissuration correspond à des liants bitumineux dont :

La pénétration est inférieure à 20 1/10 mm,

La température de ramollissement est supérieure à 70°C,

La température de fragilité Fraass est supérieure à 0°C.

#### 2.5.2.4 ESSAI RTFOT "Rolling Thin Film Oven Test" (NF T 66-032)

A l'enrobage, les granulats chauffés aux environs de 160°C sont mis en contact avec le bitume chaud qui se répartit en film mince autour du granulat, favorisant ainsi un vieillissement du liant. L'oxydation chimique est violente car l'apport énergétique est intense (température et oxygène de l'air). L'essai RTFOT est employé pour permettre de caractériser ce type de vieillissement des bitumes car il reproduit assez bien l'oxydation et les pertes de matières volatiles qui apparaissent dans la centrale d'enrobage et lors de la mise en œuvre. 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 sur le liant vieilli : pénétrabilité et température de ramollissement bille et anneau. Ces valeurs, dites après RTFOT, sont alors comparées aux valeurs initiales. Elles sont plus proches de celles du liant extrait de l'enrobé, que de celles obtenues sur le bitume d'origine. La Figure 2.9 présente une schématisation de cet essai.[1]

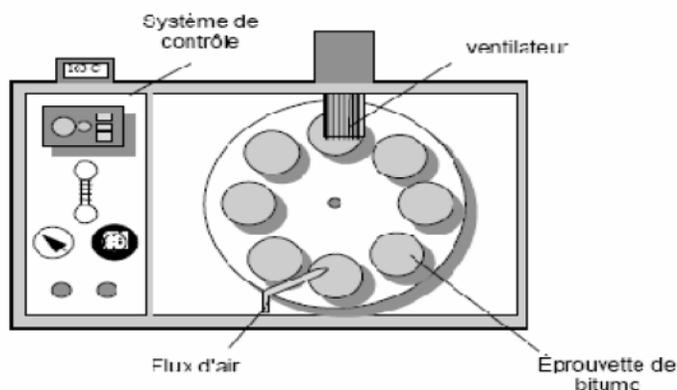


Figure 2.9. ESSAI RTFOT.[18, 1]

#### 2.5.2.5 ESSAI PAV "Pressure Aging Vessel" (AASHTO PP1)

Cet essai est employé pour permettre de caractériser le vieillissement des bitumes in-situ (après 3 à 5 années de service). Le résidu de l'essai RTFOT est chauffé et versé dans des plateaux métalliques (coupelles contenant environ 50g de liant) qui constituent les éprouvettes de l'essai PAV. Ces plateaux sont rangés dans un rack qui sera placé dans un récipient dans une enceinte thermique. A la température de l'essai (100°C), une pression d'air de 300psi (=20bars=2MPa) est appliquée dans le récipient. Après une durée de vingt heures (qui constitue un avantage important de l'essai), 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.[18]

On mesure alors les propriétés habituelles du liant : pénétrabilité et température de ramollissement bille et anneau. Ces valeurs, dites après PAV, sont alors comparées aux valeurs initiales et aux valeurs obtenues après RTFOT. Une schématisation de cet essai est présentée Figure 2.10.

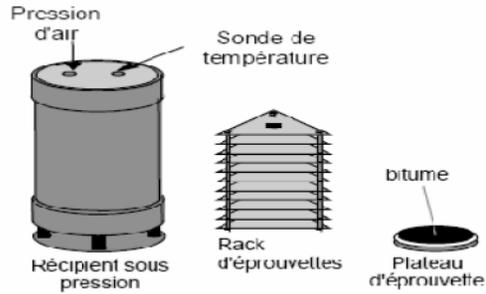


Figure 2.10. Essai PAV[1,18]

## 2.6. CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS RHÉOLOGIQUES DU LIANT DANS LE DOMAINE LINÉAIRE (VEL)

### 2.6.1. DEFINITION D'UN CORPS VISCOELASTIQUE :

Un corps monodimensionnel et non vieillissant est dit viscoélastique (par opposition à viscoplastique) si l'effacement est total lors d'une expérience d'effacement. Cette expérience représentée Figure 2.9 consiste à appliquer un créneau de déformation au matériau.

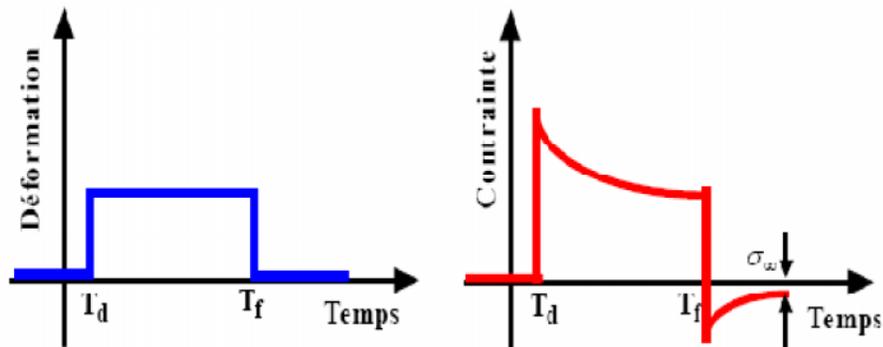
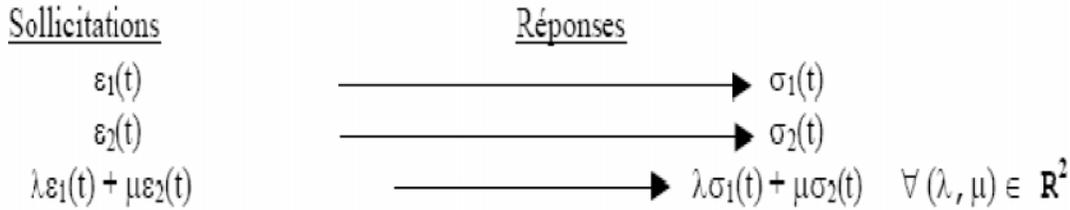


Figure 2.11. Expérience d'effacement (à gauche) et réponse du matériau en contrainte (à droite).

### 2.6.2 .DEFINITION D'UN CORPS VISCOELASTIQUE LINEAIRE

De plus, un matériau viscoélastique possède un comportement linéaire s'il suit le principe de superposition de Boltzmann, c'est-à-dire si sa réponse à une sollicitation composée d'un certain nombre de sollicitations élémentaires est la somme des réponses à chacune de ces sollicitations (Salençon, 1983) [11].



### 2.6.3. FONCTION DE RETARD (ou de fluage) ET FONCTION DE RELATION

#### 2.6.3 .1. FONCTION DE RETARD (ou de fluage)

Le phénomène de fluage correspond à l'accroissement différé dans le temps des déformations. On détermine la fonction de fluage, à température constante, sur une éprouvette d'un matériau viscoélastique linéaire en imposant à partir d'un instant  $t_0$  une contrainte  $\sigma_0$  constante.[16]

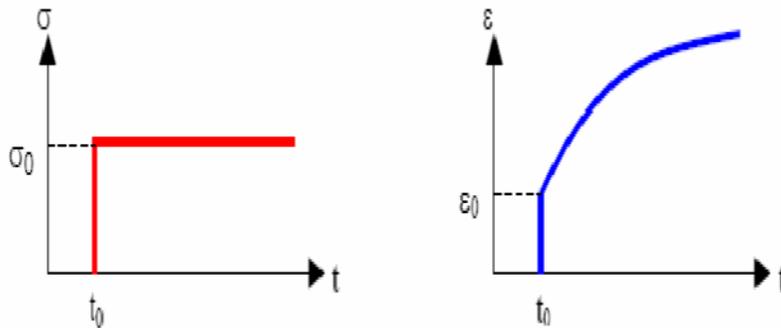


Figure 2.12. Essai de fluage - comportement à contrainte constante.

La contrainte échelon imposée est définie par :

$$\sigma(t) = \sigma_0 H(t - t_0) \quad 2.21$$

Avec :  $H(t-t_0) = 0$  si  $t-t_0 < 0$

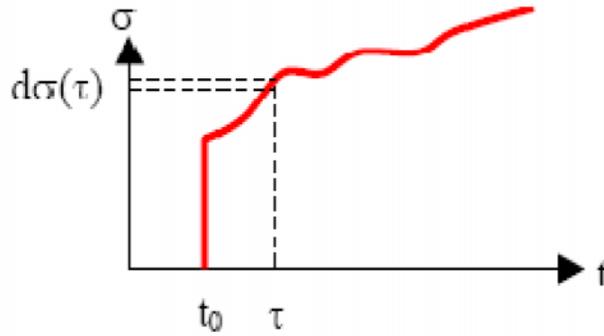
$$H(t-t_0) = 1 \text{ si } t-t_0 > 0$$

La réponse en déformation est :

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 J(t_0, t) \quad 2.22$$

avec  $J(t_0, t)$  fonction de fluage ou de retard.

Pour une contrainte qui varie dans le temps, à température constante, de la forme suivante :



**Figure 2.13. Sollicitation à contrainte variable dans le temps.**

La réponse, à l'instant  $t$ , à l'incrément de contrainte  $d\sigma(\tau)$  effectué à l'instant  $\tau$ , vaut :

$$d\varepsilon(t) = d\sigma(\tau) J(\tau, t) \quad 2.23$$

Puis, pour le matériau viscoélastique considéré, comme le principe de superposition de Boltzmann s'applique, la déformation  $\varepsilon(t)$  est la somme des réponses à chacune des sollicitations élémentaires, on peut donc écrire :

$$\varepsilon(t) = \int_{t_0}^t J(\tau, t) d\sigma(\tau) \quad \text{ou} \quad \varepsilon(t) = \int_{t_0}^t J(\tau, t) \sigma(\tau) d\tau \quad \text{si } \sigma \text{ dérivable pour } \tau > t_0 \quad 2.24$$

Pour un matériau non vieillissant (dont les propriétés rhéologiques n'évoluent pas au cours du temps), on a :

$$\varepsilon(t) = \sigma(t_0) J(t - t_0) + \int_{t_0}^t J(t - T) \sigma(\tau) d\tau \quad 2.25$$

En intégrant par parties le second terme de l'expression ci-dessus, on trouve :

$$\varepsilon(t) = \sigma(t_0) J(0) + \int_{t_0}^t \sigma(\tau) \frac{\partial J}{\partial \tau} (\tau - t_0) d\tau \quad 2.26$$

Le premier terme représente la réponse instantanée, tandis que le deuxième terme représente la réponse différée.

Enfin, pour un solide, la fonction de fluage tend vers une limite finie pour  $t \rightarrow +\infty$ , tandis que pour un liquide elle croît sans limite (Ferry, 1980) [16].

### 2.6.3 -2- FONCTION DE RELAXATION

La relaxation est la diminution des contraintes en fonction du temps d'un matériau soumis à une déformation maintenue constante dans le temps.

A température fixe, à partir de l'instant  $t_0$ , on impose une déformation échelon :

$$\sigma(t) = \sigma_0 H(t - t_0) \quad (2.27)$$

2.27

Avec :  $H(t-t_0) = 0$  si  $t-t_0 < 0$  et  $H(t-t_0) = 1$  si  $t-t_0 > 0$

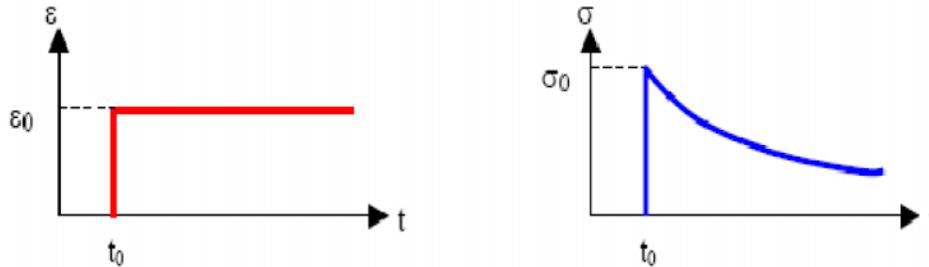


Figure 2.14. Essai de relaxation - comportement à déformation constante.

La réponse en contrainte est :

$$\sigma(t) = \sigma_0 R(t - t_0) \quad (2.28)$$

Avec :

$R(t_0, t)$  fonction de relaxation.

En faisant l'hypothèse de matériau non-vieillissant, pour une déformation qui varie dans le temps, à température constante, la contrainte peut s'écrire :

$$\sigma(t) = \varepsilon(t)R(0) + \int_{t_0}^t \dot{\varepsilon}(\tau) \frac{\partial R}{\partial \tau} (\tau - t_0) d\tau \quad (2.29)$$

Le premier terme représente la réponse instantanée, tandis que le deuxième terme représente la réponse différée.

### 2.6.3 .3 CALCUL OPERATIONNEL :

Les relations integro-différentielles Equation (2.26) & Equation (2.29), dont les paramètres dépendent du temps, sont extrêmement difficiles à utiliser en pratique. En vue de simplifier ces équations, l'utilisation de la transformation de Laplace-Carson pour l'étude de la viscoélasticité linéaire a été décrite par Mandel (1958) [16]. Par le biais de la transformation de Laplace-Carson, on aboutit, en effet, à des résultats simples et applicables pratiquement. Ainsi, par la transformation de Carson, définie par :

$$g^*(p) = p \int_0^{+\infty} e^{-pt} g(t) dt \quad (2.30)$$

2.30

avec :

$g(t)$  : valeur au temps  $t$  d'une fonction  $g$  quelconque,

$p$  : temps dans le domaine transformé de Laplace.

Les Equation 2.26 & Equation 2.29 deviennent :

$$J^*(p) = J^*(p) \quad 2.31$$

$$R^*(p) = R^*(p) \quad 2.32$$

où  $\varepsilon^*$ ,  $\sigma^*$ ,  $J^*$  et  $R^*$  sont les transformées de Carson respectives de la déformation, de la contrainte, de la fonction de fluage, et de la fonction de relaxation.

Ces équations sont algébriques et elles ont les mêmes formes que les équations de l'élasticité.

On remarque enfin que :

$$J^*(p) R^*(p) = 1 \quad 2.33$$

#### 2.6.3 -4 MODULE COMPLEXE $E^*$ (Mode Fréquentiel)

Une des possibilités pour décrire le comportement viscoélastique linéaire est de calculer expérimentalement et de tracer l'évolution du module complexe. Pour ce faire, on utilise un signal de chargement sinusoïdal de fréquence  $f$  et de pulsation  $\omega = 2\pi f$ . Physiquement, le module complexe  $E^*$  représente en module ( $|E^*|$ ) le rapport des amplitudes de la contrainte sinusoïdale appliquée et de la déformation correspondante (ou réciproquement), et en argument ( $\delta$ ) le déphasage qui existe entre la contrainte et la déformation.  $E^*$  n'est autre que la fonction complexe de relaxation  $R^*$  prise au point  $p = i\omega$ .

L'Equation 2-33 devient alors :

$$J^*(i\omega) R^*(i\omega) = 1 \quad 2.34$$

En écriture complexe,  $E^*$  s'écrit :

$$E^* = E_1 + i E_2 \text{ ou } E^* = E_0 e^{i\delta} \text{ ou } E^* = E_0 (\cos \delta + i \sin \delta) \quad 2.35$$

Avec :

$i$  est le nombre complexe dont le carré vaut  $(-1)$ ,

$E_1$  la partie réelle, parfois appelée le module d'élasticité,

$E_2$  le module de perte,

$E_0$  le module de  $E^*$ ,

$\delta$  l'angle de déphasage entre la contrainte et la déformation.

A partir de l'Equation 2.33, en posant  $\mathbf{p} = \mathbf{i} \omega$  et  $\mathbf{J}^*(\mathbf{i} \omega) = \mathbf{J1}(\omega) - \mathbf{i} \mathbf{J2}(\omega)$ , on obtient en écriture complexe les relations suivantes :

$$\mathbf{J1}(\omega) = \frac{E_1(\omega)}{[E_1(\omega)]^2 + [E_2(\omega)]^2} \quad 2.36$$

$$\mathbf{J2}(\omega) = \frac{E_2(\omega)}{[E_1(\omega)]^2 + [E_2(\omega)]^2} \quad 2.37$$

#### 2.6.3-5- PRINCIPE D'EQUIVALENCE TEMPS-TEMPERATURE (PETT)

Les appareillages ayant, en particulier, des limites d'utilisation en fréquence, toutes les mesures possibles se trouvent confinées dans un domaine étroit qui ne correspond pas forcément aux besoins des applications. Néanmoins, différents auteurs –dont Huet (1963)– ont constaté, en reportant les composantes du module complexe dans le plan complexe (E1, E2), appelé aussi plan Cole-Cole. [11]

#### CONCLUSION

Dans ce chapitre, les principales propriétés rhéologiques des liants ont été présentées. La méthodologie d'étude des bitumes dans le domaine viscoélastique linéaire a été développée. Le moyen d'approche le plus approprié pour décrire ce comportement est de réaliser des essais dynamiques. .

La difficulté inhérente aux liants bitumineux tient à leur extrême complexité de leur composition, de leur comportement rhéologique ainsi que les relations entre leurs caractéristiques et celle des enrobés.

## **CHAPITRE III : GENERALITES SUR LE RECYCLAGE DES BETONS BITUMINEUX**

### **3. TECHNIQUES DE RECYCLAGE DU BETON ASPHALTIQUE :**

#### **3.1. INTRODUCTION :**

La réutilisation ou le recyclage du vieil asphalte n'est pas un concept « nouveau », puisque les matériaux asphaltiques récupérés des chaussées sont recyclés, aussi bien à chaud qu'à froid, depuis au moins le début du 20<sup>ème</sup> siècle (ARRA, 2001). La technologie et le matériel de recyclage de l'asphalte ont toutefois peu progressé jusqu'aux années 1970,

Lorsque, aiguillonnés par la crise énergétique, les efforts en matière de recyclage de l'asphalte ont augmenté en réaction aux pressions sociales et environnementales visant à faire diminuer la demande pour les produits fabriqués à l'aide de combustibles fossiles ou d'hydrocarbures pétroliers non renouvelables.

L'utilisation de chaussées asphaltiques récupérées (CAR) pour produire un enrobé à chaud recyclé dans une centrale (à fournée, à four tournant ou combinant les deux modes) est une pratique bien établie et elle continue de croître partout au Canada, l'enrobé à chaud recyclé (ECR) étant inclus dans la plupart des devis descriptifs des organismes (provinciaux et bon nombre d'organismes municipaux) canadiens pour les mélanges de couche de liant en particulier et pour une certaine utilisation dans les mélanges de couches de roulement (Emery, 1991). Cependant, les progrès continus dans le domaine des techniques de recyclage, notamment la thermorégénération, le recyclage à froid en place (RFP) et le recyclage à froid en poste d'enrobage (RFPE) ainsi que leur mise en pratique avec succès et leurs performances positives sans cesse croissantes, offrent aux gestionnaires de chaussées un plus grand nombre de choix rentables et techniquement acceptables en matière de réutilisation ou de recyclage relativement aux travaux d'entretien ou de réhabilitation des chaussées. Ces dernières années, le RFP est devenu le procédé de recyclage à froid le plus privilégiés dans le cas de l'amélioration ou du renforcement de la structure et de l'entretien des chaussées en asphalte municipales, tandis que l'évolution de la technologie canadienne des préchauffeurs à soufflerie d'air chaud de troisième génération a entraîné l'amélioration de la qualité de la réhabilitation de l'asphalte par thermorégénération. Il s'est avéré que ces méthodes de réhabilitation offraient des performances rentables et améliorées en ce qui a trait au cycle de vie des chaussées. Le recyclage de l'asphalte est devenu un élément clé de l'industrie routière canadienne et il est essentiel d'adopter la technologie appropriée pour s'assurer d'obtenir la qualité de chaussée souhaitée; il est également essentiel d'évaluer les propriétés des matériaux de recyclage pour faire en sorte que le problème qu'on est en train de corriger ne se répète pas. Bien qu'il soit possible de mélanger des fragments, des fraises ou des morceaux de CAR à un granulat classique (sable et gravier ou pierre concassée) ou à du BR (béton recyclé) pour servir de fondation inférieure granulaire ou de matériau d'accotement, il est suggéré de chercher à faire la meilleure utilisation possible des matériaux recyclés. On encourage l'utilisation de matériau CAR dans les procédés qui profitent pleinement des caractéristiques du granulat et du ciment bitumineux. La réutilisation

de ces matériaux dans les mélanges routiers est par conséquent préférable, tant du point de vue de la gestion des matériaux que de celui du développement durable.

Les méthodes actuelles de réutilisation ou de recyclage du vieil asphalte sont décrites dans les articles qui suivent : Le Basic Asphalt Recycling Manual de l'ARRA (ARRA, 2001) et les ABCs of Asphalt Pavement Recycling (OHMPA, 2003) de l'Ontario Hot Mix Producers Association (OHMPA) sont des ouvrages recommandés dans lesquels on pourra trouver des renseignements supplémentaires.

Le transporteur à courroie à droite transfère le matériau CAR transformé vers le haut au centre, où il est introduit dans le malaxeur à tambour continu.



**Figure 3-1 : Poste d'enrobage type à fournée, à débits parallèles. .[39]**



**Figure 3-2 : Poste d'enrobage type à fournée et à four tournant, à écoulement à contre-courant. .[39]**

### **3.2. TECHNIQUE DE RECYCLAGE DE BETON ASPHALTIQUE :**

#### **3.2.1. RETRAITEMENT A CHAUD DES FRAISAT RECYCLE EN CENTRALE :**

##### **3.2.1. 1 OBJECTIF DE LA TECHNIQUE :**

L'objectif du recyclage à chaud est de fabriquer un enrobé ayant des qualités comparables à celles d'un enrobé neuf, en réutilisant des matériaux récupérés, tout en respectant les contraintes environnementales et technico-économiques. La composition est étudiée pour respecter les caractéristiques de l'une des techniques définies par les normes pour les enrobés hydrocarbonés à chaud. Cette technique est apparue en France vers 1980, à une époque où l'entretien du réseau routier commençait à occuper une place importante. La distinction entre recyclage à faible taux (< 20%) et recyclage à fort taux (> 20%), conditionnée à l'origine par le manque d'adaptation des centrales d'enrobage et l'hétérogénéité de certains enrobés de récupération, reste d'actualité mais traduit maintenant un choix stratégique. .[24]

Le liant de régénération est soit un bitume classique lorsque le liant des matériaux à recycler est peu vieilli et/ou le taux de recyclage est faible, soit un liant spécifique dans le cas contraire. La réalisation d'un chantier de recyclage peut se décomposer en plusieurs opérations qui s'enchaînent ou s'effectuent simultanément suivant le cas :

- récupération des enrobés ;
- stockage des enrobés récupérés par fraisage ou après concassage ;
- fabrication des enrobés recyclés en respectant :
  - un chauffage et un séchage des enrobés récupérés sans dégradation du liant ancien ;
  - une protection efficace du liant de régénération, qui présente souvent une susceptibilité thermique plus importante que celle des liants classiques ;
  - un temps de malaxage permettant un mélange aussi parfait que possible entre le liant ancien et le liant de régénération ;
  - les règles habituelles pour la fabrication des enrobés traditionnels, et plus précisément l'homogénéité du produit final, le respect de l'environnement en matière d'émission de particules solides et de polluants gazeux ;
- mise en œuvre des enrobés recyclés de façon classique par des ateliers traditionnels.

##### **ASPECT NORMATIF :**

Deux documents liés à la normalisation font référence à la fabrication des enrobés recyclés en centrale à chaud :

- la norme (NF P 98-150) de décembre 1992 « Exécution des corps de chaussées, couches de liaison et couches de roulement en enrobés hydrocarbonés » ;

- le guide d'application des normes pour le réseau routier national. Ce document fixe les taux de recyclés en fonction du type de centrale d'enrobage. .[34]

### 3.2.1.2. LE RECYCLAGE A FAIBLE TAUX

Avec les équipements actuels, presque toutes les entreprises peuvent pratiquer le recyclage à faible taux. Cependant, cette technique est utilisée essentiellement sur quelques centrales discontinues.

#### 3.2.1.2.1. CARACTERISTIQUES DES CHANTIERS.[25]

Les conditions de réalisation peuvent être synthétisées comme suit :

- fabrication essentiellement réalisée en centrales fixes discontinues ;
- localisation des centrales à proximité des grandes agglomérations où se conjuguent les potentialités de récupération et de réemploi ;
- surveillance rigoureuse de la collecte et du stockage des matériaux à recycler ;
- préparation de ces matériaux (les fraisât ne représentent qu'environ 15 % de la récupération), par réduction des plaques stockées et concassage.

Cela impose une gestion comprenant le classement des divers types de matériaux de dépose et la pratique de mélanges d'homogénéisation ;

- le domaine d'emploi privilégié concerne les chaussées à sollicitations modérées pour une utilisation possible dans toutes les couches, même en couche de roulement.

#### 3. 2.1 .2.2 . APTITUDE DES CENTRALES DISCONTINUES : .[39]

Le dosage est assuré par un doseur pondéral avec une trémie apte à assurer un bon écoulement du produit.

L'enrobés à recycler ne transitent pas par le sécheur. Dans la plupart des cas, ils sont incorporés aux granulats naturels surchauffés au pied de l'élévateur à chaud.

La formule suivante permet de calculer de façon approchée l'écart DT entre la température de surchauffe des granulats naturels et la température de sortie des enrobés (150 °C) en fonction du taux de recyclage R et de la teneur en eau WR des enrobés à recycler, la température de départ des granulats et des enrobés à recycler étant de 15 °C.

$$DT = R (75WR + 310) / 2,3 (100-R)$$

ex : pour R = 20 et WR = 2

Nous trouvons DT = 50 °C.

L'ensemble des matériaux est ensuite introduit, en court-circuitant le crible, dans le malaxeur où la répartition du liant ancien et les transferts de chaleur s'effectuent jusqu'au moment de l'introduction du liant d'apport. L'automatisme doit impérativement tenir compte du déphasage temporel entre l'introduction des granulats naturels et des recyclés.

Afin d'assurer une bonne homogénéisation entre granulats naturels et recyclés, le temps de malaxage à sec est augmenté d'environ 10 à 15 s, ce qui pénalise la cadence horaire (réduction d'environ 20 %). Cette méthode permet un taux de recyclage de l'ordre de 15 %. La limitation résulte de la capacité d'évacuation de la vapeur d'eau par le système de mise en dépression de la tour et de l'encrassement potentiel au niveau de l'élévateur à chaud.

### **3.2.1.2.3 BILAN TECHNIQUE**

Les enrobés à recycler proviennent de fraisage ou de concassage et possèdent, en général, les caractéristiques suivantes :

- granulométrie avant désenrobage est de 0/20 à 0/31 mm ;
- granulométrie après désenrobage est de 0/10 à 0/14 avec une teneur en fines variant de 8 à 12 %
- teneur en bitume est de 4 à 6 %. Compte tenu du faible taux de recyclage, le liant de régénération est un bitume classique (classe de pénétrabilité 80/100 voire 60/70). On adapte la pénétrabilité du liant de correction à la dureté finale recherchée en tenant compte du vieillissement imputable à la fabrication des enrobés. Pour une énergie et un temps de malaxage convenables, la régénération du liant ancien est bien assurée. L'homogénéité d'un enrobé contenant 10 à 15 % de matériaux recyclés est comparable à celle d'un enrobé neuf.

### **3.2.1. 3 LE RECYCLAGE A FORT TAUX :**

La prise en compte des impératifs qualitatifs, économiques et environnementaux a conditionné la définition d'une méthodologie d'étude des matériaux à recycler et l'évolution des centrales d'enrobage. .[24]

#### **3.2.1. 3. 1 CARACTERISTIQUES DES CHANTIERS : .[31]**

Le recyclage des enrobés offre des possibilités intéressantes pour les chantiers d'entretien. Diverses opportunités peuvent se présenter :

- travaux visant à résoudre des problèmes de décollement d'interface entre une couche de roulement et son support ;
- traitement de dégradations (faiénçage, fissuration) d'une couche de roulement devenant liaison après la mise en place d'un enrobé d'entretien ;
- réparation de fissures imputables au vieillissement du bitume ;
- traitement des voies lentes particulièrement dégradées et permettant de limiter les problèmes de rehausse de niveau.

Deux catégories de chantier conditionnent l'organisation générale :

### ➤ LES CHANTIERS EN CIRCUIT FERME

L'enrobé fraisé est recyclé sur le site même d'où il est extrait. Les opérations de fraisage, fabrication avec recyclage et mise en place sont simultanées.

Les ateliers de fraisage et de mise en œuvre sont décalés dans l'espace pour des considérations de phasage des opérations et d'exploitation de l'itinéraire sur lequel les travaux s'effectuent sous circulation.

Ces chantiers présentent l'avantage de se prêter à l'industrialisation et à la mise en place d'un plan qualité de bon niveau. Ils nécessitent toutefois la présence, dans un périmètre proche, d'une centrale de fabrication adaptée et de quantités à traiter suffisamment importantes pour que la technique soit économiquement acceptable. [31]

### ➤ LES CHANTIERS EN CIRCUIT OUVERT

L'enrobé fraisé n'est pas réutilisé sur le site d'extraction. L'utilisation ultérieure est souvent orientée vers des itinéraires à sollicitations plus faibles, du fait soit du trafic, soit de la situation dans les couches inférieures de la chaussée. Il est nécessaire d'être vigilant quant aux conditions de stockage, afin d'éviter les problèmes d'agglomération du fraisât. [31]

### ➤ ETUDES PREALABLES

Un chantier de recyclage fait obligatoirement l'objet d'une étude préalable. Une méthodologie d'étude en laboratoire a été définie par le LCPC et le Laboratoire Régional de Blois]. Les principales phases de cette étude sont :

Evaluation de la nature et de la quantité d'enrobés récupérables

On distingue 4 cas selon le mode de démolition et l'homogénéité de l'ancien enrobé :

- enrobés fraisés en provenance d'une section homogène ou d'origines diverses ;
- enrobés déposés et concassés en provenance d'une section homogène ou d'origines diverses. [24]

#### **3.2.1. 3. 2. CARACTERISATION DE L'ENROBE A RECYCLE :**

Cette opération permet de confirmer la faisabilité du recyclage. Elle comprend :

- l'analyse granulométrique du produit fraisé ou concassé non désenrobé
- l'identification de l'enrobé, (teneur en eau, teneur en liant, granulométrie après désenrobage)
- la caractérisation du liant vieilli, (pénétrabilité, IP, TBA, point de fragilité Fraass, teneur en asphaltènes).

La phase de fraisage doit être menée de manière rigoureuse afin d'obtenir un fraisât le plus régulier possible (teneur en eau maximale de 3 %). [30]

### ➤ CHOIX DU LIANT REGENERANT

On régénère un liant vieilli en lui apportant les parties plus légères qui lui font défaut. Une méthodologie d'étude en laboratoire a été définie par le LCPC. Le recyclage en centrale doit permettre la conservation des caractéristiques du liant régénérant, dont la susceptibilité thermique augmente avec le taux de recyclage. [31] [20]

### ➤ ETUDE DE FORMULATION ET DETERMINATION DU TAUX DE RECYCLAGE

A partir des paramètres déterminés précédemment, le taux de recyclage est calculé de manière à obtenir un enrobé ayant des caractéristiques comparables à celles exigées pour un enrobé neuf. Les déterminations de la composition granulométrique et du dosage optimal en liant régénérant se font à partir d'essais : PCG, Duriez, d'orniérage. Cette étude peut être complétée par des essais de traction directe pour déterminer le module du matériau recyclé. [31] [20]

#### 3.2.1. 3.3 APTITUDE DES CENTRALES DE FABRICATION :

La technologie du matériel joue un rôle important sur la qualité finale des enrobés et la pollution atmosphérique éventuelle. Elle conditionne, une fois fixés les caractéristiques des matériaux à recycler et l'usage prévu pour l'enrobé, le choix du taux de recyclage.

L'aptitude des centrales d'enrobage est liée à la nature des échanges thermiques qui régissent le processus de fabrication. Il existe deux modes de transfert de la chaleur nécessaire au séchage des matériaux :

- les sècheurs à chaleur indirecte dits « à conduction » dans lesquels il n'y a pas contact entre le fluide sécheur et les matériaux ;
- les sècheurs à chaleur directe dits « à convection » dans lesquels les matériaux sont en contact direct avec les gaz de combustion.

A l'intérieur du sécheur les gaz sont dirigés parallèlement au déplacement des granulats, soit à équicourant (les granulats et les gaz circulent dans le même sens), soit à contre-courant (les granulats et les gaz circulent en sens contraire).

Le souci permanent d'assurer la meilleure protection possible pour les matériaux recyclés et le liant de régénération a conduit les constructeurs à s'orienter vers des processus à chaleur indirecte où l'énergie calorifique est fournie par la surchauffe des granulats naturels.. [39] [20]

### ➤ CENTRALES DISCONTINUES

Les évolutions ont pour objectif d'augmenter la durée du traitement thermique des recyclés et de permettre ainsi un taux de recyclage supérieur à 20 %. A cet effet l'installation peut comporter :

- soit après le brûleur un allongement du sécheur et l'introduction des recyclés dans cette zone protégée de la flamme et du courant gazeux. Le taux de recyclage maxi est de l'ordre de 25 %, limitation imposée par le risque d'encrassement des godets de l'élévateur à chaud ;
- soit le séchage et le chauffage des recyclés (<130° C) dans un deuxième tambour rotatif fonctionnant à équicourant car l'humidité des recyclés les protège ainsi thermiquement en début de séchage. A la sortie de ce tambour les recyclés sont acheminés vers une trémie peseuse avant d'être introduits dans le malaxeur où s'effectue le mélange avec les granulats naturels légèrement surchauffés et le liant régénérant. Avec ce type de matériel le taux maxi de recyclage est d'environ 50 %.[39] [20]

#### ➤ **CENTRALE DE TYPE TAMBOUR SECHEUR ENROBEUR (TSE) A EQUICOURANT**

Le fonctionnement du T.S.E., qui associe dans le même tambour les fonctions séchage et enrobage, a imposé un principe d'échange thermique à équicourant. Le système d'introduction des recyclés par un anneau situé dans la partie centrale du tambour s'est imposée chez tous les constructeurs et l'introduction est effectuée en aval du rideau protecteur formé par les granulats naturels. [39] [20]

#### ➤ **TSE RECYCLEUR DE PREMIERE GENERATION**

Ces centrales, apparues sur le marché en 1979, ont un rapport longueur / diamètre du tube sécheur de 3 4. En aval du point d'injection du liant, la fin du tambour constitue le malaxeur rotatif destiné à homogénéiser le produit final (temps de transfert de l'ordre de 100 s). Ces installations ont été confrontées à des problèmes de répartition des échanges thermiques induisant une dégradation des liants (recyclés et régénérant) avec des conséquences directes sur l'environnement et la qualité des enrobés. De plus, la prise en compte plus stricte des problèmes d'émission de particules solides à l'atmosphère a amené les constructeurs à introduire l'emploi systématique de filtres à manches. La technique du recyclage a donc été obligée de s'adapter à des contraintes supplémentaires liées à la durée de vie des tissus filtrants. [39] [20]

#### ➤ **TSE DE GRANDE LONGUEUR**

La figure suivante montre cette deuxième génération de TSE recycleur, apparue vers 1985.

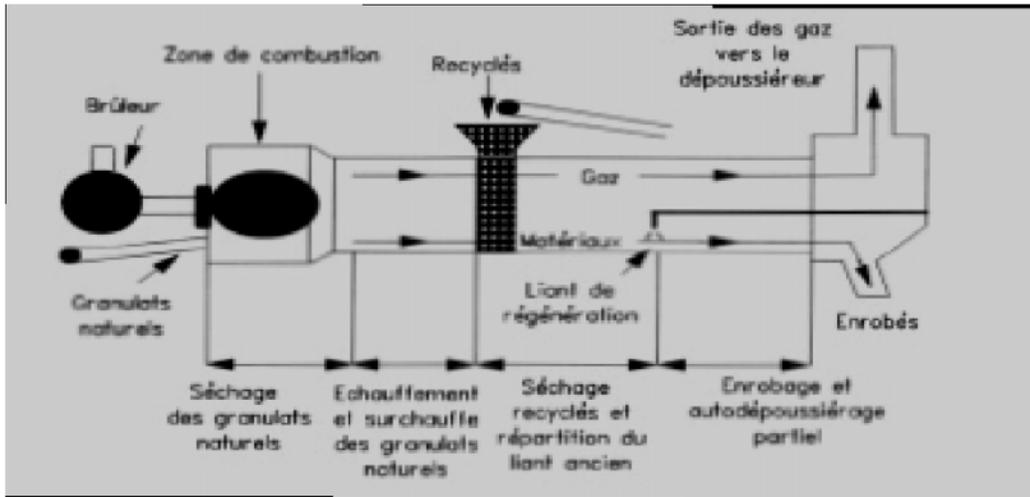
Ce matériel regroupe les aménagements suivants :

- allongement d'environ 50 % de la zone d'échauffement et de surchauffe des granulats naturels ainsi que de la zone de séchage des recyclés et répartition du liant ancien ;
- création d'une zone de combustion élargie ;
- développement des brûleurs fermés.

En conséquence,

- la zone disponible au-delà de la flamme permet un écran de granulats naturels plus dense et assure une protection plus efficace des matériaux recyclés ;
- l'augmentation des temps de transfert permet un meilleur échange thermique entre les gaz et les différents matériaux (granulats et recyclés).

Compte tenu des risques de colmatage des tissus filtrants par les particules bitumineuses le taux maximal de recyclage pour une centrale de type TSE équicourant munie d'un dépoussiéreur à manches est généralement fixé à 35 %.[39] [20]

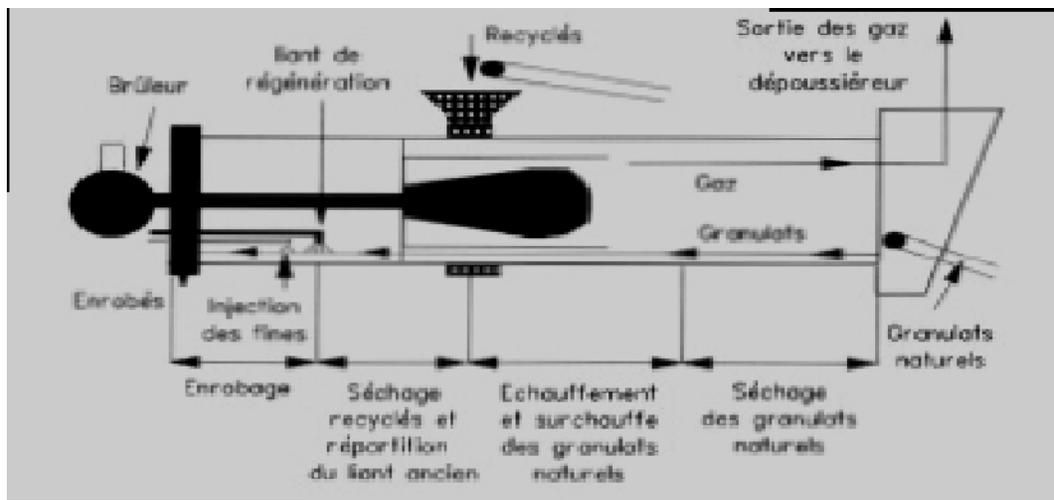


**Figure 3.3 TSE de grande longueur**

➤ **TSE EQUICOURANT AVEC MALAXEUR ADDITIONNEL**

Pour assurer une meilleure protection du liant régénérant vis-à-vis de la température des gaz de combustion, l'injection de celui-ci se trouve très proche de la sortie du tambour (< 1m), la zone de malaxage devient très réduite. La fonction enrobage n'est donc plus assurée correctement et un malaxeur additionnel devient nécessaire.

Par contre, le fait d'introduire le liant en fin de tambour diminue notablement le piégeage des particules enrobées, et les risques encourus pour le filtre à manches limitent, comme précédemment, le taux de recyclage à environ 35 %. [39] [20]



**Figure 3.4 : TSE équicourant avec malaxeur additionne**

## ➤ CENTRALE DE TYPE TAMBOUR SECHEUR ENROBEUR A CONTRE COURANT

Ce principe de fabrication, apparu en 1987, associe un sécheur à chaleur directe à contre-courant et un malaxeur.

L'objectif est d'introduire les recyclés et le liant régénérant en aval de la flamme de façon à les soustraire à l'action néfaste de la circulation des gaz de combustion à haute température. Les fractions légères du liant restent donc dans les enrobés.

L'énergie nécessaire au conditionnement des recyclés est amenée exclusivement par la surchauffe des granulats naturels (fi. Par contre, avec ce mode de fabrication, la fonction auto dépoussiérage propre à la technique TSE écuicourant n'existe plus et il convient d'être très vigilant quant à la réintroduction des particules solides récupérées.

Les capacités de ce type de matériel sont liées à l'architecture du malaxeur additionnel qui fixe l'importance des phases correspondant au traitement des recyclés et à l'enrobage. Pour les plus performantes des centrales actuelles, la durée de l'échange thermique par conduction entre les granulats surchauffés et les recyclés est de l'ordre de 60 s et l'enrobage s'effectue en suivant, pendant un temps estimé à environ 120 s.

Le taux maximal de recyclage se trouve limité par la température de l'enveloppe externe du tambour dans la zone de développement de la flamme et par la température de sortie des gaz à la fin de l'échange thermique gaz-granulats naturels. Enfin, il conviendrait actuellement de quantifier de façon plus précise le risque de dégradation du liant ancien dans le cas d'un échange thermique direct entre les recyclés et les granulats naturels surchauffés, lors de recyclage à fort taux.

Ainsi, en l'absence de résultats expérimentaux destinés à quantifier précisément le taux maximal de recyclage, celui-ci est estimé à 45 %.[39] [20]

### 3.2.1. 3. 4 ASPECT ENVIRONNEMENT :

Par décision de la commission N° 94/3/CE du **20/12/93** une liste des déchets a été établie en application de l'article (1.a) de la directive **7 5/ 442/ CEE** du conseil du **15 / 07 / 75** relatif aux déchets. Les enrobés de recyclage figurent dans ce catalogue européen des déchets

(article 17 00 00) sous la dénomination « Déchets de construction et de démolition, y compris la construction routière ».

Le traitement efficace des déchets de chantier trouve son point de départ dans le recyclage de ces matériaux qui étaient auparavant mis en décharge. A ce titre le recyclage d'enrobés est donc une technique favorable à l'environnement.

Cependant, chacun sait qu'en tentant de résoudre un problème on peut quelquefois en créer un autre ailleurs. Dans le cas du recyclage, il faut s'affranchir des risques de rejets à l'atmosphère de particules hydrocarbonées et de composés organiques néfastes à l'environnement.

A l'origine de la technique, les expérimentations de suivi concernaient exclusivement les caractéristiques des enrobés recyclés et le comportement sur le site.

L'aspect environnement consistait à respecter le seuil d'émission de particules solides (<150mg/m<sup>3</sup>) et à ne pas trop favoriser l'apparition de « fumées jaunes » en jouant sur les paramètres susceptibles de limiter la température des gaz au point d'introduction des recyclés, et la température des gaz au point d'injection du liant régénérant. Ceci explique que les centrales de type TSE munies d'un dépoussiéreur humide aient pu fabriquer avec des taux de recyclage de l'ordre de 60 à 65 %, mais que la conduite du poste sans fumée jaune relevait de circonstances exceptionnelles. Pour ce type de centrale le seuil de 50 % constitue une limite raisonnable qui permet une conduite systématiquement plus sereine.

La prise en compte plus stricte des problèmes d'environnement, par le biais notamment de l'arrêté du 1 mars 1993 (émission de particules solides < 100mg/m<sup>3</sup>), a quasiment condamné l'utilisation des dépoussiéreurs humides. La conséquence de la généralisation des filtres à manches a été, pour éviter de détériorer les tissus filtrants, la limitation du taux de recyclage à 35 %.

En matière de composés hydrocarbonés, une attention particulière est portée sur les émissions d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dont la limite est fixée à 0,5 g/h. Dans tous les cas l'apparition de fumées jaunes ou bleues est le signe d'une surchauffe des fraisât et/ou du liant régénérant et la solution passe par l'adaptation du taux de recyclage. D'une manière générale on peut penser que les enrobés fabriqués et mis en œuvre avec les moyens modernes satisfont aux exigences en matière d'émissions polluantes.

Actuellement, de nouveaux additifs, tels que les polymères, entrent dans la composition des enrobés et il appartient aux fournisseurs de ces produits d'informer les utilisateurs des conséquences possibles en matière d'environnement [31].

### **3.2.1. 3. 5. BILAN TECHNIQUE**

Le recyclage des enrobés en centrale est une solution intéressante. Des règles concernant les études de laboratoire, la préparation du chantier et les limites de la technique ont pu être établies. Le suivi pendant plus de dix ans de la technique de recyclage d'enrobés à chaud permet de conclure que le comportement d'ensemble des chantiers réalisés est satisfaisant.

Le bilan peut se résumer de la façon suivante :

- la fabrication en centrale de type TSE recycleur présente une bonne homogénéité ;
- la mise en œuvre est classique, avec toutefois une attention particulière pour le compactage du fait d'une grande maniabilité des enrobés recyclés à fort taux ;
- il n'y a pas de vieillissement marqué du liant imputable au processus de fabrication ;

- l'emploi en couche de roulement est possible sauf dans le cas d'utilisation de fraisât tout venant avec lesquels il convient de limiter le taux de recyclage à 10 ou 15% et pour des formulations de grave bitume ou d'enrobés de liaison ;
- l'obtention d'une bonne macro rugosité ne pose pas de problème si la centrale de fabrication respecte les dosages définis par l'étude.

La réussite suppose cependant :

- l'étude préalable du chantier avec la nécessité de vérifier l'homogénéité de la section à recycler, le taux de recyclage ainsi que la nature du régénérant, et les caractéristiques de l'enrobé régénéré ;
- une phase de fraisage menée de façon rigoureuse de manière à assurer la régularité du fraisât (granulométrie et teneur en eau) ;
- de la prudence dans les cas où il y a cumul des risques constitués par le recyclage à taux élevé (45%), une formulation conduisant à un excès de régénérant ou à une volatilité trop grande et un trafic intense et/ou canalisé ;
- une utilisation préférentielle des recyclés en couche de liaison, en association avec une technique mince ou très mince pour les chantiers fortement sollicités ;
- une étude spécifique portant notamment sur l'aspect environnement lorsque le taux de recyclage est supérieur à 45 %.[31] [24] [39]

## **CONCLUSION**

La technique du recyclage à chaud en centrale doit être considérée comme parfaitement opérationnelle. Le potentiel des entreprises est actuellement suffisant pour faire face à la demande en cas de durcissement des prescriptions en matière d'environnement.

Le domaine d'emploi du recyclage à chaud est vaste et compatible avec le parc de matériel existant. Cependant, le choix de cette technique résultera d'une attitude volontariste de la part du maître d'œuvre et de son maître d'ouvrage, après les indispensables études techniques et économiques préalables.

A l'avenir, il serait intéressant que les possibilités futures de recyclage soient prises en compte au moment de la conception d'un enrobé. Il faut toutefois remarquer que le développement des couches minces avec liants spéciaux ne favorisera pas l'homogénéité des futurs fraisât.

### **3.2.2. RETRAITEMENT DE FRAISAT RECYCLE A FROID**

#### **3.2.2.1. -INTRODUCTION**

La technique du recyclage à froid in situ du revêtement bitumineux a été introduite au Québec en 1992 par la firme Talon Sebeq Inc. L'équipement utilisé est un atelier intégré capable de planer le vieux revêtement à la profondeur requise, de traiter, après leur réduction à une taille maximale de 30mm,

les fraisât de planage par l'ajout d'une émulsion de bitume régénératrice et, finalement, d'épandre l'enrobé recyclé à froid sur la chaussée selon le profil spécifié.

Toutes ces opérations sont réalisées simultanément à une vitesse d'avancement d'environ 6 mètres par minute (figure 1). Les travaux progressent sur une voie à la fois, la largeur de coupe de la planeuse étant de 3,8 mètres. Ainsi, avec une vitesse d'exécution inégalée, une couche d'enrobés recyclés de 60 à 120mm d'épaisseur est mise en place tout en corrigeant le profil de la chaussée. On peut également mettre les fraisât de planage en réserve pour recyclage ultérieur lorsque les contraintes du chantier l'exigent. [25]



**Figure 3.5 Atelier de retraitement en place à froid[25]**

La technique du recyclage à froid in situ est une intervention superficielle limitée normalement au revêtement bitumineux de la chaussée. La profondeur d'intervention est comprise entre 60 et 120mm de profondeur. Sa fonction est de restaurer la surface de roulement durablement et de façon économique. En cela le procédé s'apparente aux autres techniques de resurfage, par exemple la technique forte répandue du planage repavage. Le procédé de recyclage sur place des enrobés est applicable partout où une réfection de la surface est requise

Lorsque c'est la réhabilitation en profondeur ou un renforcement plus conséquent de la structure de la chaussée qui est recherché, on appliquera plutôt la technique du décohesionnement suivi d'une stabilisation sur place de la fondation.

Les matériaux recyclés sont en général composés de 100% de vieux enrobés bitumineux (fraisât). Ils peuvent cependant inclure des matériaux provenant de la fondation granulaire sous-jacente, dans les cas où l'épaisseur du vieux revêtement en place est inférieure à la profondeur de l'intervention. Dans certains cas particuliers, des granulats neufs d'apport peuvent être incorporés à l'enrobé recyclé dans une proportion de 10 à 20% pour en améliorer les caractéristiques. Ces matériaux d'apport sont alors tout simplement épandus sur la chaussée devant l'atelier de recyclage

Près de deux millions et demi de mètres carrés de chaussée ont été remis à neuf en utilisant le recyclage à froid in situ des enrobés de surface dans l'est du Canada au cours de l'année 2000, dont plus de 300 000 dans la province de Québec. [25]

L'excellent rendement de la technique est maintenant largement établi et les suivis de chantiers concluent à l'excellent comportement des enrobés recyclés à froid, et ce dans plusieurs contextes d'utilisation différents. Les enrobés recyclés à froid utilisés à bon escient, ont un rendement comparable aux enrobés à chaud standards et leur résistance à la remontée des fissures est remarquable. [31]

Les enrobés recyclés à froid sont toutefois sensibles à l'effet s de l'eau et du gel et, s'ils peuvent offrir sans problème une excellente surface de roulement temporaire, ils doivent néanmoins être recouverts assez rapidement, les délais pouvant être de quelques semaines, selon les conditions météorologiques et l'importance du trafic. [31]

La nature et le type de couche de surface sont fonctions du dimensionnement structural. Normalement, sur les boulevards à forte circulation, une couche d'enrobés chaud conventionnels sera utilisée comme couche de roulement alors que, sur les rues résidentielles à faible circulation, un revêtement mince ou ultramine sera préféré pour des raisons d'économie.



**Figure 3.6 Recyclage d'une rue à faible circulation[25]**

### **3.2.2.2. LIANTS DE RECYCLAGE**

Plusieurs formulations d'émulsion de bitume, modifié ou non aux polymères, peuvent être utilisées avec succès pour retraiter les vieux enrobés. Des liants mixtes à haute performance, à base d'émulsions de bitume

modifiées par l'ajout d'une petite quantité de liants hydrauliques (moins de 1% de la masse du mélange) ont aussi été mis au point.

Le choix du liant dépend de la nature des matériaux à traiter et du niveau de performance recherché. Ainsi, sur une route à fort trafic, on choisira un liant qui cure rapidement afin d'être en mesure d'ouvrir à la circulation la surface fraîchement recyclée en moins de quelques heures. [30]

Les conditions climatiques sont aussi un élément à considérer.

Ainsi, le temps de cure des liants mixtes émulsions-ciment est moins influencé par des conditions climatiques défavorables que ne le serait celui d'un liant conventionnel.

### **3.2.2.3. EFFICACITÉ DE LA TECHNIQUE**

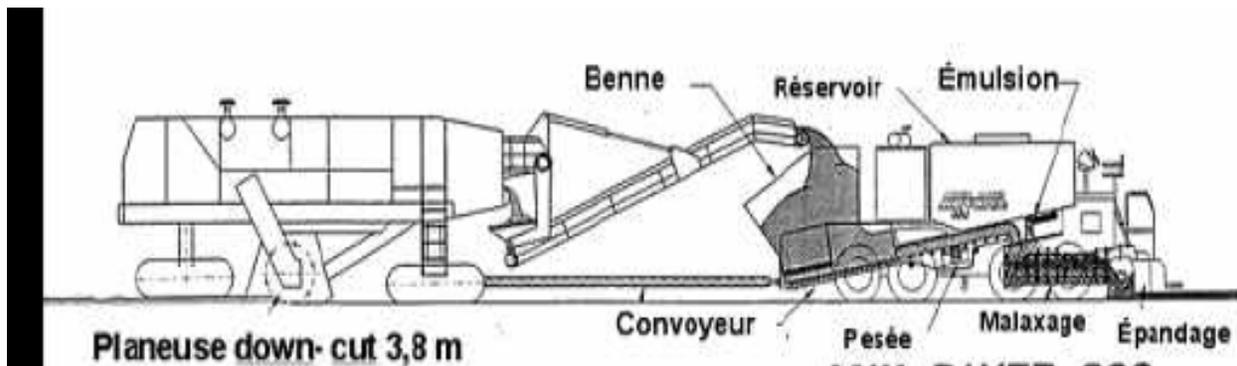
Au cours des dix dernières années, plusieurs chantiers de recyclage ont fait l'objet d'un suivi de performance. Malgré la diversité des formulations, des conditions de mise en œuvre et des charges de trafic, on relève une grande constance dans les conclusions de ces études : les enrobés recyclés à froid présentent une résistance remarquable à la fissuration.

L'évolution dans le temps de la fissuration sur les chantiers de recyclage est comparable, toutes choses étant égales, à celle qu'on observe sur des chaussées neuves.

La résistance relative à la fissuration est généralement bien supérieure à celle des chantiers de planage resurfaçage conventionnels.

Le comportement à l'orniérage s'est également avéré excellent. Ce comportement remarquable des enrobés recyclés à froid tient d'une part à leurs propriétés particulières d'élasticité et de résistance à la fatigue et d'autre part à l'épaisseur des couches.

Il est estimé cependant que la mise au point des nouveaux liants mixtes émulsion-ciment permettra d'envisager, raisonnablement, des valeurs de module de l'ordre de 1500 à 2000Mpa pour les enrobés recyclés à froid avec un comportement à l'eau grandement amélioré par rapport à celui des formules de mélange à base d'émulsions de bitume conventionnelles utilisées à Montréal en 1996. Les mesures requises pour confirmer ces valeurs de module restent cependant à déterminer. [25]



MIX-PAVER 800

**Figure 3.7 : vue schématique de l'équipement de recyclage compact utilisé pour les travaux urbains**

#### 3.2.2.4. ÉQUIPEMENT

L'atelier de recyclage en place schématisé aux figures ci dessus est de type «compact». Il est bien adapté aux chantiers de petites tailles et aux chantiers urbains encombrés. Il est composé d'une unité de planage de grande puissance dont la largeur de coupe est de 3,8m et d'une unité d'enrobage mobile de type Midland Mix-Paver. La planeuse a été dans ce cas modifiée pour produire directement des fraisât d'une taille maximale de 30mm. L'unité d'enrobage est équipée d'une table d'épandage dans laquelle les fraisât retraités se déversent directement à leur sortie du malaxeur.

Une version «allongée» du train de recyclage destiné, celle-là, aux grands chantiers routiers, est également disponible. [25]

Dans ce cas, on utilise une unité de planage non modifiée et on y ajoute une unité de tamisage et un concasseur pour réduire les fraisât à la taille désirée. Ce dernier agencement, moins flexible, permet cependant une plus grande productivité en chantier ouvert.

#### 3.2.2.5. CHANTIERS DE RECYCLAGE EN PLACE EN MILIEU URBAIN

Les travaux de réfection de chaussées urbaines requièrent l'utilisation de procédures de travail particulières en raison des nombreuses contraintes inhérentes au domaine urbain qui sont : la gestion du trafic, la faible tolérance à la nuisance, les contraintes géométriques ainsi que la présence des infrastructures et des services qui constituent des obstacles physiques.

Le déroulement des opérations demande de plus une préparation et une coordination sans faille. La gestion du trafic autour de l'équipement en action est un aspect particulièrement important sur les artères à forte circulation. Le plan de travail doit être précis et tenir compte de la géométrie de la chaussée, de la gestion du trafic et des obstacles à contourner. Les bordures et les accessoires doivent être dégagés et les réparations nécessaires effectuées avant de procéder au recyclage en place. De plus, les regards, puisards et boîtes de vanne doivent être abaissés sous le niveau de la surface de travail. Ils seront remis à niveau et ajustés après

le passage de l'atelier de recyclage. Le procédé est flexible et adaptable à un grand nombre de situations.

[31]

La chaussée peut être profilée à un niveau plus bas que le niveau original en ajustant la profondeur de planage et l'épaisseur de l'enrobé recyclé en conséquence.

Les rues résidentielles se prêtent particulièrement bien à la technique de resurfaçage par recyclage en place. Le trafic y est faible et les accessoires y sont généralement peu nombreux et placés le long des bordures. La tolérance à la nuisance est cependant faible et la rapidité d'exécution des chantiers de recyclage représente un avantage important. De plus, le niveau de sollicitation sur la chaussée étant généralement faible, il est possible d'utiliser un revêtement de surface mince ou ultramince en couche de roulement sans pour autant sous-dimensionner la structure. La technique du recyclage en place est donc particulièrement avantageuse sur le plan économique et moins incommode pour les résidents.

Dans le cas des boulevards urbains à forte circulation, c'est la gestion d'un trafic dense et la présence d'un plus grand nombre d'obstacles qui conditionnent l'ordonnancement des travaux. L'épaisseur du pavage est en général assez grande pour permettre d'abaisser le profil suffisamment pour laisser la place à une couche de roulement en enrobés à chaud conventionnels, dont l'épaisseur sera déterminée en fonction du trafic. La combinaison d'une couche de base épaisse en enrobés recyclés à froid et d'une couche de roulement en enrobés à chaud donne une excellente structure de chaussée résistante à la fissuration et capable de supporter la charge de trafic d'un boulevard urbain. Bien sûr, au-delà des généralités, chaque projet constitue un cas particulier qui doit faire l'objet d'une étude de dimensionnement appropriée. L'atelier de recyclage est assez flexible pour contourner la plupart des obstacles, bien qu'une chaussée préalablement dégagée de ces derniers contribue à accélérer les travaux. Par ailleurs, la nature modulaire de l'atelier de recyclage permet, lorsque c'est requis, d'en séparer les éléments pour obtenir une plus grande liberté de mouvement. Chaque élément dispose d'une traction indépendante et l'unité d'enrobage mobile dispose d'une benne de réserve suffisante pour lui assurer une certaine autonomie. .[25]

#### **3.2.2.5.1. PROFONDEUR D'INTERVENTION**

Le pavage existant est décohéssionné sur une profondeur variant de 70 à 110mm. L'épaisseur de la couche d'enrobés recyclés à froid variera en fonction de la structure prévue pour la nouvelle chaussée et du profil désiré. La nouvelle base d'enrobés recyclés à froid doit en effet être profilée de façon à laisser l'espace nécessaire à la couche d'enrobés de surface prévue

### **3.2.2.5.2. TRAVAIL AUTOUR DES ACCESSOIRES**

Les accessoires, les bordures et les trottoirs sont dégagés au moyen de mini planeuses avant l'opération de recyclage.

Une correction préalable par planage des cours d'eau peut aussi être effectuée, ce qui aura pour effet d'accélérer le déroulement des travaux de recyclage en place. Les accessoires tels les puisards, regards et boîtes de vannes sont abaissés sous le niveau de la surface de chaque fois que cela est possible. Il est aussi tout à fait envisageable de limiter les travaux de recyclage aux voies de roulement et de laisser des bandes non recyclées le long des bordures. Le procédé est flexible et les travaux de préparation ainsi que le plan de travail sont déterminés en fonction des objectifs de performance recherchés et des coûts.[25]

### **3.2.2.6 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU RECYCLAGE A FROID**

#### **3.2.2.6.1 AVANTAGES**

Comparé aux techniques traditionnelles de réhabilitation par rechargement, le retraitement en place à froid aux liants bitumineux présente un ensemble d'avantages. Il permet :

- d'économiser des matériaux nouveaux (granulats, bitume) par la réutilisation de tout ou partie des matériaux en place, ce qui représente une économie pour les maîtres d'ouvrage,
- de réduire la dépense énergétique sans les besoins de séchage, de transport, etc. des matériaux, si l'on considère le cycle entier de production des granulats,
- de réduire les besoins de transport des matériaux pour les travaux, avec comme conséquence moins de dommages aux routes du voisinage du chantier et des économies de carburant, de pneus et de matériels,
- de limiter les travaux annexes (ajustement des seuils, rehaussement des trottoirs, accès...),
- de permettre un rétablissement rapide de la circulation sur la section réhabilitée peu de temps après le compactage.

D'un point de vue technique, cette méthode de travaux permet :

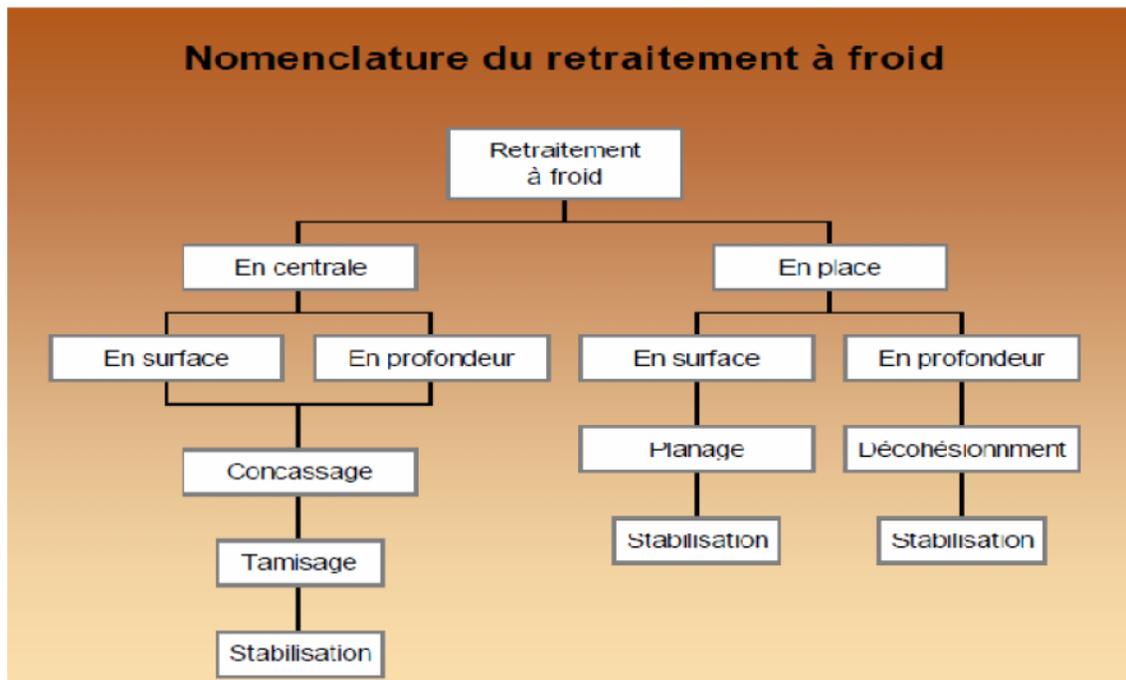
- de ne retraiter qu'une seule voie au besoin,
- de corriger le profil transversal de la chaussée et des défauts de courte longueur d'onde du profil longitudinal. Avec l'apport de granulats et des travaux menés en plusieurs opérations, des corrections peuvent être apportées, dans une certaine mesure, au profil longitudinal,
- d'accepter certaines fluctuations dans la composition des matériaux à retraiter,
- de réduire les efforts exercés sur les plates-formes support de faible portance, pendant les travaux, par rapport aux techniques traditionnelles exigeant une excavation des matériaux en place,
- de rouvrir la route à la circulation la nuit et pendant le week-end (si l'intensité du trafic poids lourds n'est pas très importante).

### 3.2.2.6.2 INCONVENIENTS

Les inconvénients de cette technique sont dus aux aspects suivants :

- des caractéristiques inadaptées des matériaux en place, c'est à dire : la présence de pavés ou de blocs qui ne peuvent pas être fragmentés, une teneur importante en matériaux argileux, une grande hétérogénéité
- une portance trop faible du support qui compromettrait : l'avancement régulier des machines de retraitement, le maintien d'une profondeur constante de travail et l'obtention d'un niveau correct de compactage,
- la présence de nombreuses sorties de réseaux et d'accès de services,
- les conditions climatiques (température trop basse, précipitations fréquentes) ne permettant pas la cure des matériaux traités à l'émulsion,
- le niveau des performances mécaniques exigées. Les caractéristiques de module et de la résistance à la fatigue sont inférieures à celles qui peuvent être obtenues avec les mélanges bitumineux chauds. De plus, avec l'émulsion, le besoin d'évacuation de l'eau résiduelle limite l'épaisseur maximum des couches retraitées à l'émulsion de bitume. Ces diverses considérations apportent des limites à l'utilisation de la technique de retraitement en place à froid en fonction du volume du trafic. Ces limites dépendent de la nature des travaux de retraitement et de la qualité du support des couches retraitées,
- le retraitement sans la protection d'une couche de roulement (au besoin réduite à un enduit superficiel) est limité aux routes à faible trafic dans les régions où les précipitations sont faibles en raison des risques d'arrachement. [46] [20]

## CONCLUSION



**Figure 3.8 : Nomenclature de retraitement à froid**

Le recyclage à froid des vieux enrobés permet d'obtenir, à un coût avantageux, une couche de base épaisse offrant une remarquable résistance à la remontée des fissures ainsi qu'un bon comportement à l'orniérage. Sur chaussées fortement dégradées, cette technique représente un choix avantageux quant à son coût d'utilisation, lorsqu'on la compare aux techniques traditionnelles de planage resurfaçage. Son potentiel d'utilisation en milieu urbain est élevé

## CHAPITRE4 : IDENTIFICATION DES MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES :

### 4. IDENTIFICATION DES MATERIAUX

#### 4.1 FORMULATION DU BETON BITUMINEUX 0/14 A RECYCLE :

L'étude de la formulation des enrobés bitumineux consiste à chercher la teneur optimale en liant pour assurer un certain seuil de stabilité, de compacité, de résistance à l'eau (désenrobage) et au fluage. Pour ce faire, nous avons procédé à :

- Identifier et classer les composants de base rentrant dans la constitution des matériaux étudiés soient les granulats et le bitume.
- Choisir un mélange granulaire composé des trois fractions granulométriques (0/4, 4/8 et le 8/16) s'insérant parfaitement dans un fuseau de référence.
- Déterminer la teneur optimale en bitume à l'égard des spécifications de compacité et de résistance mécanique (Marshall et Duriez) en vigueur en Algérie.
- Etablir des conclusions et des recommandations concernant les matériaux de base, la fabrication et la mise en œuvre du béton bitumineux.

#### 4.1.1 PROVENANCE DES MATERIAUX

Les granulats utilisés dans le cadre de la présente étude sont les fractions couramment utilisées en Algérie pour la fabrication des bétons bitumineux destinés aux couches de roulement.

Les matériaux ont été acheminés au laboratoire par les techniciens du CTPP. Les trois fractions utilisées sont données dans le tableau 4.1, ainsi que leurs origines,

Matériau	Carrières	Entreprise d'exploitation
Fillers	AIN TOUTA (wilaya de Bouira)	ENG
Sable 0/4	AIN TOUTA (wilaya de Bouira)	ENG
Gravier 4/8	AIN TOUTA (wilaya de Bouira)	ENG
Gravier 8/16	AIN TOUTA (wilaya de Bouira)	ENG

**Tableau 4.1. Provenance des granulats utilisés.**

- Le bitume **35/50** provient de NAFTAL

#### 4.1.2 ETUDE DE LABORATOIRE

L'étude de laboratoire aborde les principaux résultats d'essais, avec discussion et critique sur les valeurs obtenues. Elle se base sur les étapes suivantes :

- Analyse des constituants (granulats et bitume),
- Etude de la composition du squelette minéralogique du mélange,
- Etude des performances mécaniques des mélanges bitumineux,
- Détermination de la teneur optimale du bitume.

#### 4.1.2.1 IDENTIFICATION DES CONSTITUANTS

##### 4.1.2.1.1 LES GRANULATS

###### A - Caractéristiques intrinsèques des granulats

Afin de déterminer les caractéristiques intrinsèques des granulats, les essais suivants ont été réalisés :

- La masse volumique réelle (NA 255).
- La résistance aux chocs : essais LOS ANGELES (NA 458).
- La résistance à l'usure en présence d'eau : essai MICRO-DEVAL (NA 457).

Les résultats sont donnés par le tableau 4.2 :

Essais	Référence	Fillers	0/4	4/8	8/16
Masse volumique réelle [t/m <sup>3</sup> ]	NA 255	2,65	2,66	2,66	2,66
LA [%]	NA 458	-	25	19	18
MDE [%]	NA 457	-	-	19	14

**Tableau 4.2. Caractéristiques intrinsèques des granulats.**

###### B – Caractéristiques de fabrications des granulats

Pour ce qui est des caractéristiques de fabrication des granulats, les essais suivants ont été réalisés :

- L'analyse granulométrique (NA 2607),
- L'essai d'aplatissement (NA 256),
- La propreté superficielle (NF P18-591),
- L'équivalent de sable (NF EN 933-8).
- La valeur au bleu de méthylène (NA 1948).

Les résultats de ces essais sont regroupés dans le tableau 4.3.

Essais		Résultats				Spécifications
		8/16	4/8	0/4	Fillers	
Coefficient d'aplatissement [%]		6,06	4,14	-	-	25*
Propreté superficielle [%]		0,83	1,97	-	-	< 2
Equivalent de sable à 10% de fines [%]		-	-	71,88	-	60
Valeur au bleu de méthylène		-	-	-	0,33	< 2
Analyse granulométrique	Tamis	Tamisat (%)				
	2D	100	100	100	-	100
	1,4 D	100	100	100	-	98 – 100
	D	92	98	99	-	85 – 99
	D/1,4	59	54	24	-	25 – 80
	d	11	24	-	-	0 – 20
	d/2	2	1	-	-	5

**Tableau 4.3. Caractéristiques de fabrication des agrégats**

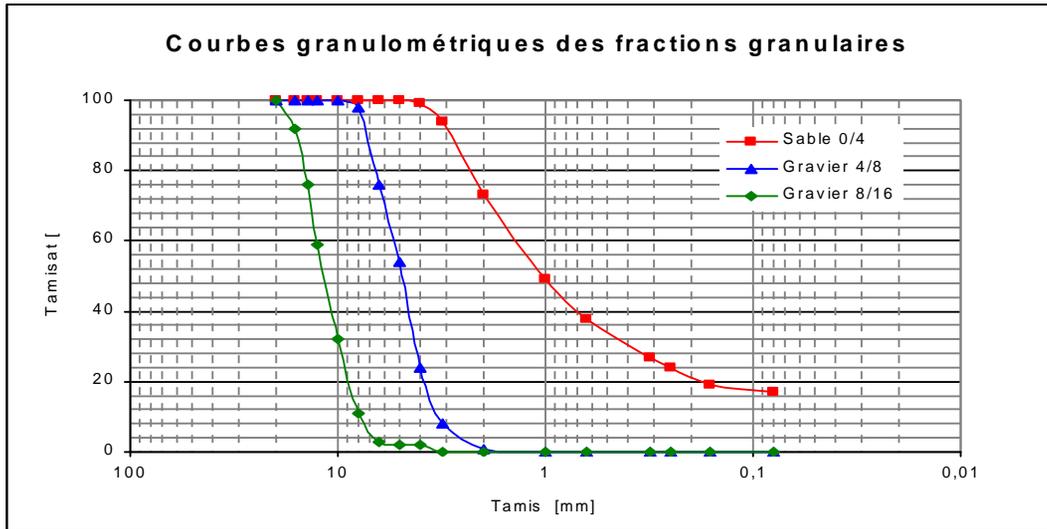
(\*) : 30% pour la fraction 4/8.

### C - Commentaires

- ✓ Du point de vue caractéristiques intrinsèques des granulats ; les résultats obtenus en fonction de leur utilisation en béton bitumineux sont conformes aux spécifications de la classe « C » de la norme NF P 18 - 545.
- ✓ Pour ce qui est des caractéristiques de fabrication des granulats ; les résultats sont conformes aux spécifications exigées vis-à-vis de la forme, la granulométrie et la propreté. Ces caractéristiques de fabrication les classent dans la catégorie III. Les caractéristiques de fabrication du sable le classent dans la catégorie « a ».

De ce fait, les granulats analysés peuvent être utilisés dans la confection d'un béton bitumineux semi grenu 0/14.

Les résultats de l'analyse granulométrique de chaque fraction sont donnés dans la figure 4.1.



**Figure 4.1 Courbes granulométriques des fractions granulaires**

**4.1.2.1.2 – LE BITUME**

Les analyses que nous avons effectuées sur le bitume sont :

- Densité relative à 25°C (norme NA 5224).
- Pénétrabilité à l’aiguille à 25°C (norme NA 5192),
- Point de ramollissement billes et anneaux (norme NA 2617),

Les caractéristiques physiques et mécaniques du bitume de base sont résumées dans le tableau 4.4.

Type d’essai	Résultat	Moyenne	Spécifications
Pénétrabilité à 25 °C (1/10 mm)	39 - 40	40	35 - 50
Température bille et anneau « TBA » (°C)	52,5 – 53	53	50 - 58
Densité relative (g/cm <sup>3</sup> )	1,01	1,01	1,0 à 1,05

**Tableau 4.4. Caractéristiques du bitume.**

**Commentaire :** Le bitume analysé répond bien aux caractéristiques de la classe 35/50 selon la norme NFT65-001.

**4.1.2.2 FORMULATION DES MELANGES BITUMINEUX :**

L’étude de formulation a été menée selon la démarche suivante :

- Choix de la formule granulaire,
- Détermination des teneurs en bitume,

- Composition des mélanges,
- Essais de performances mécaniques.

#### 4.1.2.2.1 CHOIX DE LA FORMULATION GRANULAIRE :

L'objectif visé est de maîtriser la disposition granulaire du squelette minérale et choisir une formule qui donne un mélange ayant la meilleure aptitude au compactage et qui pourrait conférer une meilleure stabilité au mélange hydrocarboné.

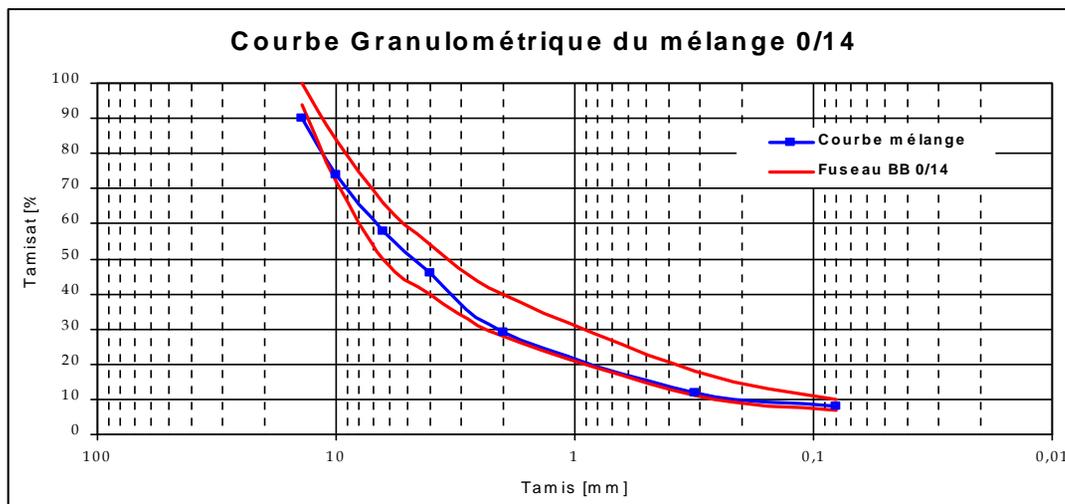
La composition suivante a été retenue ;

<i>Fractions</i>	<i>Pourcentage (%)</i>
Fillers	4
Sable 0/4	38
Fraction 4/8	20
Fraction 8/16	38

**Tableau 4.5. Composition du mélange granulométrique**

Les courbes granulométriques des mélanges issues de cette formule s'inscrivent parfaitement dans le fuseau spécifique au Béton bitumineux semi grenu 0/14 selon les recommandations algériennes pour l'utilisation des bitumes et enrobés bitumineux de Février 2004.

La courbe granulométrique du mélange est donnée dans la figure suivante :



**Figure 4.2. Courbe granulométrique du mélange granulaire**

#### 4.1.2.2 DETERMINATION DES TENEURES EN BITUME :

Pour déterminer cette teneur en liant optimale, on introduit la notion de surface spécifique des granulats notée et exprimée en m<sup>2</sup>/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 :

$$100 = 0,25 G + 2,3 S + 12 s + 135 f$$

Avec :

G : des éléments supérieurs à 6.3 mm,

S : des éléments compris entre 6.3 et 0.315 mm,

s : des éléments compris entre 0.315 et 0.08 mm,

f : des éléments inférieurs à 0.08 mm,

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

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

Avec :

P : teneur en liant (%)

α : coefficient destiné à tenir compte de la masse volumique réel des granulats « MVRg ». Si celle-ci diffère de 2.65 t/m<sup>3</sup>, on utilise la formule suivante :

$$\alpha = \frac{2.65}{MVR_g}$$

Σ : surface spécifique des granulats (m<sup>2</sup>/kg),

K : le module de richesse qui caractérise l'épaisseur moyenne du film de bitume autour des granulats riches (k varie pour un enrobé bitumineux 0/14 de 3,3 à 3,9),

Les teneurs en liants en fonction des modules de richesses sont données dans le tableau 4.6

<i>Formule</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
Module de richesse	3,45	3,6	3,75
Teneur en liant (%)	5,59	5,84	6,08

**Tableau 4.6. Teneurs en bitume retenues.**

#### 4.1.2.2.3 COMPOSITION DES MELANGES :

La fabrication de l'enrobé bitumineux au niveau du laboratoire a été réalisée conformément à la norme NFP 98-250-1.

#### 4.1.2.3 ESSAIS DE PERFORMANCES MECANIQUE :

Les essais réalisés pour tester les performances mécaniques du Béton Bitumineux sont :

- Essai MARSHALL (NF EN 12697-34).
- Essai Duriez (NA 5226).

#### A/ Essai MARSHALL

Les résultats des essais MARSHALL sont regroupés dans le tableau 4.7.

Formule granulaire	A	B	C	Spécifications
Teneur en bitume (%)	5,59	5,84	6,08	-
Densité vraie (t/m <sup>3</sup> )	2,45	2,44	2,45	-
Compacité (%)	93,47	94,67	93,83	95 - 97
Stabilité (KN)	10,42	12,80	18,03	> 10,5
Fluage (mm)	2,38	2,50	3,32	< 4
Quotient Marshall (KN/mm)	4,38	5,02	5,43	-

**Tableau 4.7. Résultats des essais MARSHALL**

#### COMMENTAIRES

D'après les résultats des essais Marshall effectués, nous remarquons que :

- Les compacités des éprouvettes sont acceptables.
- Les stabilités et les résistances aux fluages MARSHALL sont bon à l'exception de la formule A.
- La formule « C » présente les meilleures performances en termes de stabilité, fluage et quotient MARSHALL.

**NB :** Le quotient Marshall est un indicateur pour la résistance aux déformations, permanentes, contraintes de cisaillement et aussi pour l'orniérage des enrobés bitumineux. Les plus grandes valeurs du quotient indiquent que les mélanges sont plus résistants aux déformations permanentes

## B/ Essai DURIEZ

Les résultats des essais DURIEZ sont regroupés dans le tableau 4.8 :

Formule granulaire	A	B	C	Spécifications
Teneur en bitume (%)	5,59	5,84	6,08	-
Résistance à la compression à sec à 18°C (MPa)	8,3	11	11,7	> 7
Résistance à la compression (R) à 18°C conservées avec immersion. [MPa]	7	8,8	10,24	-
Rapport résistance immersion / à sec	0,84	0,80	0,88	> 0,80

**Tableau 4.8. Résultats des essais Duriez**

### COMMENTAIRES

D'après les résultats des essais DURIEZ effectués, nous remarquons que la résistance à la compression à sec et le rapport résistance après immersion sur résistance à sec sont conformes aux spécifications SETRA-LCPC. La formule « C » présente les meilleures performances en termes de résistance à la compression à sec.

## 4.2. IDENTIFICATION DE L'ENROBE A RECYCLE

### 4.2.1 FORMULATION DE L'ENROBE DE BASE

Les fraisât qui sont utilisés dans l'expérimentale appartient à un tronçon de l'autoroute Est Ouest à BOUIRA, leurs formulation à été proposé par l'entreprise de réalisation COSIDER Travaux Publics et a été vérifier par le laboratoire LCTP

Les matériaux qui ont été utilisé dans la formulation provenaient de la carrière ENG EL Hachimia.

**Le bitume** qui était utilisés dans la formulation est de la classe **40/50**

#### 4.2.1. 1 ESSAIS REALISES :

Les différents essais qui ont été réalisés pour la formulation sont comme suite :

- 1- Identification des granulats
- 2- Identification du bitume
- 3- Essai d'adhésivité
- 4-Formulation de béton bitumineux 0/14

a- Essai Duriez

b- Essai Marshall

#### 4.2.1.2 RESULTATS OBTENUS :

##### 4.2.1.2.1. IDENTIFICATION DES GRANULATS :

Les résultats obtenus sont illustré dans les tableaux ci-dessous :

	<b>3/8</b>	<b>8/15</b>	<b>SPECIFICATIONS CPS</b>
LOS ANGELES	21,02%	20,54%	< 15%
MICRO DEVAL HUMIDE	19,33%	18,85%	< 25%
COEFFICIENT D'APLATISSEMENT	24,17%	31,20%	
PROPRETE SUPERFICIELLE	0,80%	2,20%	

**Tableau 4.9 Résultat des essais sur granulats de fractions 8/15 et 3/8**

	<b>0/3</b>	<b>SPECIFICATIONS CPS</b>
EQUIVALENCE DE SABLE	37,85%	> 40%
INDICE DE PLASTICITE	6,10%	NON MESURABLE

**Tableau 4.10 Résultat des essais sur granulats de fractions 0/3**

##### 4.2.1.2.2. IDENTIFICATION DU LIANT (BITUME) :

Les résultats obtenus sont illustré dans le tableau 4.11

	<b>RESULTAT OBTENUS</b>	<b>SPECIFICATIONS CPS</b>
POINT DE RAMOLLISSEMENT	52	47 à 60
PENETRABILITE A 25° C	44	40 à 50
DENSITE RELATIVE A 25° C	1,04	1,01 à 1,04

**Tableau 4.11 Résultat des essais sur le bitume**

### 4.2.1.2.3 ANALYSE GRANULOMETRIQUE

Des différentes classes granulométrique étaient utilisées dans la formulation

Tamis	8/15	3/8	0/3
20	100	100	100
16	100	100	98,82
12,5	100	100	76,20
10	100	100	38,24
8	100	95,8	14,31
6,3	99,95	70,55	4,27
5	99,8	49,19	3,08
4	99,65	21,69	2,39
2	76,8	2,93	1,82
1	50,68	2,11	1,55
0,5	34,11	2,02	1,39
0,4	31,43	2,01	1,37
0,315	28,41	1,99	1,35
0,2	24,21	1,97	1,29
0,1	20,47	1,94	1,25
0,08	19,7	1,9	1,21

Tableau 4.12 La granulométrie de l'ancienne formulation de l'enrobé

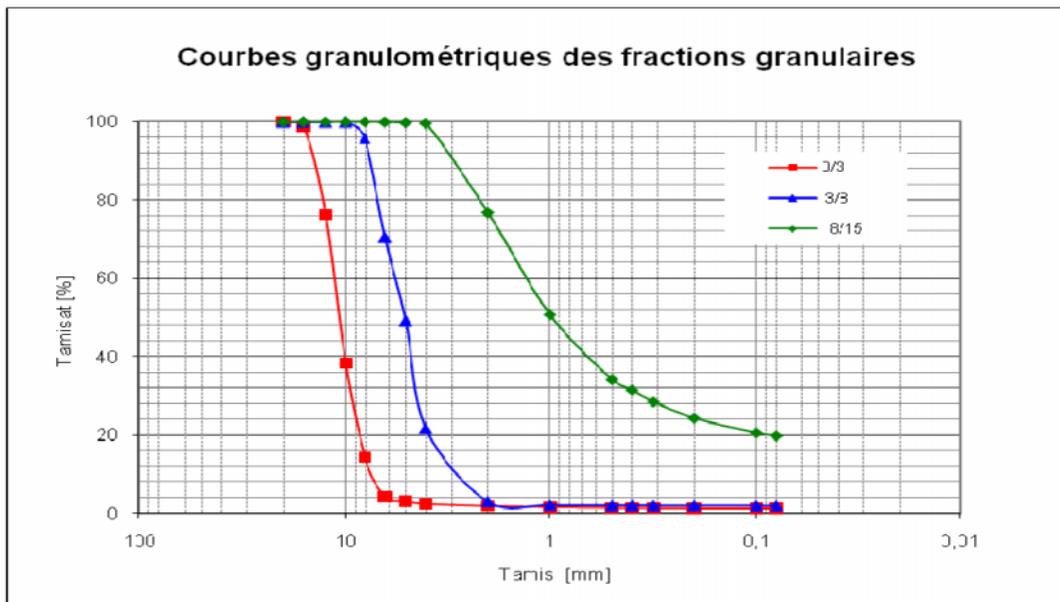


Figure 4.3 Courbes granulométriques des fractions granulaires

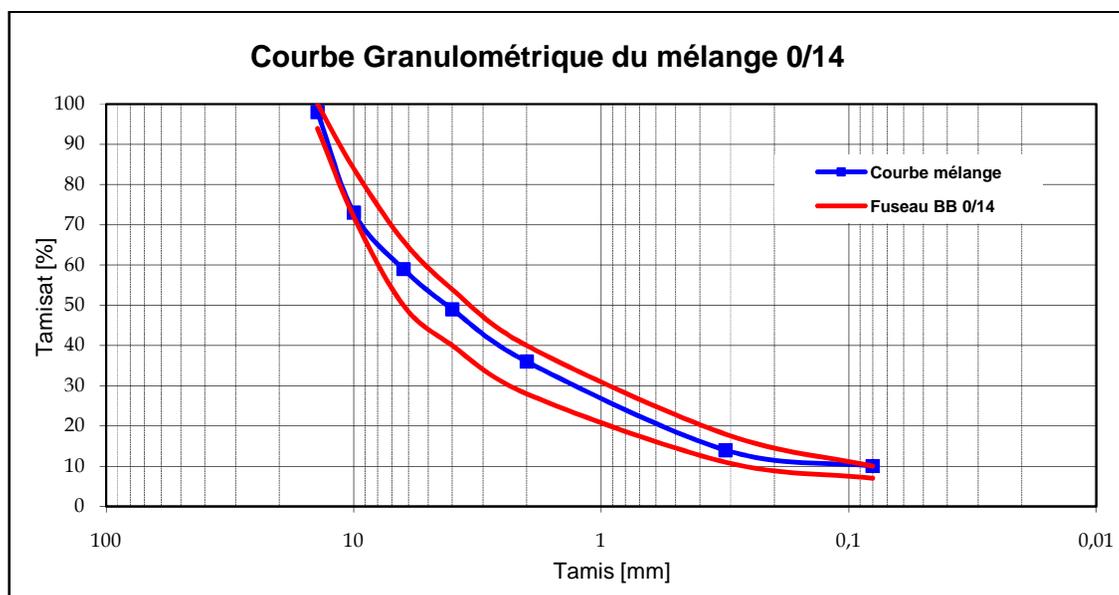
#### 4.2.1.2.4 FORMULATION DE L'ENROBE BB 0/14 :

Avec les classes granulaires 8/15, 3/8, 0/3 de la carrière E.N.G HACHIMIA, on pu obtenir un mélange qui s'insère dans le fuseau de référence Béton Bitumineux 0/14 (semi grenu) avec les proportions suivante :

Fractions	Pourcentage (%)
Sable 0/3	48%
Fraction 3/8	12%
Fraction 8/15	40%

**Tableau 4.13 Composition du mélange granulométrique**

La courbe granulométrique du mélange issu de cette formule s'insère parfaitement dans le fuseau de référence au Béton Bitumineux semi grenu 0/14



**Figure 4.4 : Courbes granulométriques du mélange 0/14**

A la base des résultats obtenus, les essais mécaniques sur enrobé ont été effectués et ont donné les résultats suivant :

**A / ESSAI MARSHALL :**

ESSAIS	RESULTATS DU LABO LCTP	SPECIFICATION CPS
MODULE DE RICHESSE	3,62	3,45 - 3,90
TENEUR EN LIANT %	6,08	
DENSITE VRAIE	2,38	
DENSITE APPARENTE	2,28	
COMPACITE EN %	95,8	MAX 96%
STABILITE MARSHALL EN KG	875	
FLUAGE AU (1/10) mm	29	

**Tableau 4.14 Résultats de l'essai MARSHALL****B / ESSAI DURIEZ NORMAL :**

ESSAIS	RESULTATS DU LABO LCTP	SPECIFICATION CPS
MODULE DE RICHESSE	3,62	3,45 - 3,90
TENEUR EN LIANT %	6,30	
DENSITE VRAIE	2,38	
DENSITE APPARENTE	2,25	
COMPACITE EN %	94,5	91% - 95%
RESISTANCE A LA COMPRESSION A SEC APRES 07 JRS EN BARS(R)	76	MIN 70 BAR
RESISTANCE A LA COMPRESSION IMMERSION 07 JRS EN BARS(r')	58	
RAPPORT IMMER/ COMPR (r'/R)	0,76	MIN 0,75

**Tableau 4.15 Résultats de l'essai DURIEZ****4.2.2. IDENTIFICATION DES CARACTERISTIQUES DES FRAISAT :****4.2.2. 1: GRANULOMETRIE DES FRAISATS :**

Le fraisage doit être réalisé de façon à obtenir des éléments qui doivent être compris entre 7 et 25 mm et une teneur en eau max de 3%

#### 4.2.2.2 ETUDE DE LABORATOIRE :

L'étude qui a été faite sur les fraisât au laboratoire de CTTTP consiste à :

a- étude granulométrique des fraisât sans extraction du liant

b- étude granulométrique des fraisât après extraction du liant

c- détermination de la teneur en liant

d- Après séparation de liant et de toluène avec une distillation sous vide qui est faite au CRD de Boumerdes on détermine la pénétrabilité, le point de ramollissement ainsi que le pourcentage des Asphaltène du bitume vieilli

##### **a/ Etude granulométrique des fraisât**

Après récupération des fraisât, on passe au quartage puis on tamise les fraisât, les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 4.16

<b>Tamis</b>	<b>FRAISAT</b>
20	100
16	96
14	89
12,5	81
10	65
8	54
6,3	42
5	33
4	18
3,15	18
2	8
1	2
0,63	1
0,315	
0,25	
0,16	
0,08	1

**Tableau 4.16 Granulométrie des fraisât avant extraction du liant**

##### **b/ Caractéristiques intrinsèques des fraisât :**

<b>Essais</b>	<b>Référence</b>	<b>Fraisât</b>
LA [%]	NA 458	23
MDE [%]	NA 457	21

**Tableau 4.17. Caractéristiques intrinsèques des fraisât**

**c/ Etude granulométrique après extraction du liant :**

Après extraction du liant par la méthode de KUMAGAWA en utilisant le toluène comme solvant, les résultats de l'analyse granulométrique sont présentés dans le tableau 4.18

Tamis	FRAISAT
20	100
14	97
10	85
8	76
6,3	65
5	59
4	54
3,15	49
2	38
1	26
0,63	20
0,315	14
0,08	9

**Tableau 4.18 Granulométrie des fraisât après extraction du liant**

**d/ Détermination de la teneur en liant :**

Avant extraction du liant par la méthode de KUMAGAWA au laboratoire de CTPP, on pèse les fraisât puis après extraction du liant on repese et la différence qu'il y est entre les deux pesées représente la teneur en liant les résultats obtenus son présenté dans la figure 4.19

ESSAIS	RESULTATS DU LABO CTPP
MODULE DE RICHESSE K	2,86
TENEUR EN LIANT % (6/5)	4,85
SURFACE SPECIFIQUE ( m <sup>2</sup> /kg)	13,92 m <sup>2</sup> /kg
POURCENTAGE DES FINES < 80μ	9

**Tableau 4.19 Teneur en liant des fraisât**

**e/ Essais de caractérisation du liant (Pénétrabilité, TBA et % des Asphaltène) :**

Le mélange liant avec le solvant est récupéré après que l'extraction est achevée, on passe à la récupération de liant bitumineux en évaporant le Toluène du mélange.

L'évaporation se fera avec la méthode de la distillation sous vide avec l'Evaporator, le mode opératoire de l'essai est comme suite :

- Introduire dans le ballon à distiller 350 cm<sup>3</sup> de solution de bitume d'une concentration approximative de 150 gr de bitume dans 1000 cm<sup>3</sup> de toluène ;
- Régler la vitesse de rotation du ballon de distillation à raison de 75 tr/min ;
- Chauffer le bain d'huile à une température de 120°C ;
- Réduire en même temps la pression progressivement à 30kpa ;
- Poursuivre la distillation jusqu'à ce que le volume de la solution soit réduit à environ 100 cm<sup>3</sup>, puis réalimenter le ballon de distillation par aspiration de la solution ;
- Répéter l'opération jusqu'à épuisement de la solution ;

En suite après récupération de bitume on effectue les essais de caractérisation (Pénétrabilité, Point de ramollissement ainsi que le pourcentage des asphaltène) de se dernier [20] [18]

Les résultats obtenus des essais effectués sur le liant récupéré sont présentés dans le tableau 4.20

ESSAIS REALISES	RESULTAT OBTENUS
POINT DE RAMOLLISSEMENT	60
PENETRABILITE (25°C) [1/10mm]	21

**Tableau 4.20 : Caractéristique du liant vieilli**

**f/: Résultats des essais Duriez et Marshall de fraisât brut**

Des éprouvettes de béton bitumineux ont été confectionnées avec le fraisât brut afin de tester les résistances mécaniques de cet enrobé moyennant les essais DURIEZ et MARSALL.

	Moyenne	Norme
<b>DURIEZ</b>		
Compacité (%)	84	91-95
R à sec (Mpa)	7,1	>7
r en immersion (Mpa)	4,8	
Rapport r/R	0,67	> 0,8
<b>MARSHALL</b>		
Compacité (%)	88	95-97
Stabilité KN	21	> 10,5
Fluage en mm	3,2	< 4
Quotient Marshall	6.56	2,5- 4,5

**Tableau 4.20 : Résultats des essais Duriez et Marshall de fraisât brut**

### 4.3- IDENTIFICATION DE L'ADDITIF

#### 4.3.1 ADDITIF POUR ENROBE BITUMINEUX :

L'additif que nous allons utiliser pour le renforcement est un produit de PR Industrie ; PRI qui recycle des produits plastiques (films plastiques, profilés de fenêtre, Polyéthylène haute densité (emballages de produits ménagers), matériaux chimiques contenant du carbone, de l'hydrogène et d'autres substances qui assure les formulations pour ses granulés et autres produits pour l'amélioration des revêtements routiers et pour l'industrie.

Ce polymère (plastomère à 95%) particulier d'une granulométrie de 4 mm introduit lors du malaxage, sur les granulats chauds avant enrobage en centrale d'enrobage, et conditionné en big – bag pour les centrales en continu avec une introduction, par l'intermédiaire d'un doseur et en sacs thermo fusibles prédosés pour les centrales discontinues.

Cet additif dénommé PR PLAST S offre, au niveau de l'enrobé, un triple effet de renforcement :

**A** - Un effet de liant obtenu par dissolution d'une certaine partie du polymère offrant notamment un abaissement de la pénétrabilité, une augmentation de la température bille et anneau, un abaissement de la susceptibilité thermique.

**B** - Un effet d'armature initié par des fibres plastiques présentes en créant des ponts à l'intérieur du squelette granulométrique.

**C** - Un effet bloquant dû aux particules ramollies provisoirement lors de la mise en œuvre et qui seront ainsi thermoformées lors du compactage en remplissant les vides du squelette granulométrique. L'ensemble de ces trois effets permet à l'enrobé ainsi amélioré d'obtenir une amélioration importante des performances des chaussées et de leur durée de service.



**Figure 4.5. PRPLAST S**

Dans le cadre du domaine routier traditionnel, il s'emploie directement au malaxage des enrobés. Il est dosé en Big Bag pour les postes continus, et en sacs thermofusibles prédosés de 7 à 12 Kg pour les postes discontinus. Le taux d'ajout est généralement compris de 0,4 à 0,6 % ppc pour les applications routières et jusqu'à 1 % pour des zones très particulières, la température de fabrication comprise entre 170°C et 180°C maximum + big bag pour l'utilisation en centrale continue avec une introduction, par l'intermédiaire d'un doseur et en sacs thermo fusibles prédosés pour les centrales discontinues.

Ce produit n'est pas testé sur des bétons bitumineux recyclé pour cela le pourcentage d'ajout sera différent de celui proposé dans la fiche technique.

#### **4. 3.2 CARACTERISTIQUES PRINCIPALES :**

Le PRPLAST est un produit recyclé des plastiques (câble téléphoniques, bouchons de bouteilles plastiques,...) qui sont des polyéthylènes à basse densité.

Le polyéthylène à basse densité a été découvert par des ingénieurs anglais en 1933 (E.W Fawcette et R. OGISBO).

Le PELD est un polyéthylène fortement ramifié d'où sa basse densité ce qui lui confère une très bonne flexibilité.

Sa résistance chimique est bonne mais inférieure à celle de PEHD par rapport aux solvants organique.

La température maximale d'emploi : 80°C

La température de fragilisation : -50°C

La densité : 0,92

Aptitude au micro onde : Oui

Couleur : Translucide

Flexibilité : excellente, très bonne résistance chimique aux acides, aux alcools aliphatique aux esters aux hydrocarbures et à l'éther

Caractéristique	unité	Valeurs type
Densité	g/cm <sup>3</sup>	0.910-0.965
Point de fusion	°C	140-150
granulométrie	Mm	4
charge	%	Inférieur à 5%
plastomères	%	Supérieur à 95%

**Tableau 4.21 : Caractéristiques principales du PRPLAST S**

#### **4.3.2.1 PRINCIPAUX AVANTAGES :**

- résistance élevée au fluage ;
- amélioration considérable de la tenue à la fatigue de l'enrobé ;
- résistance très élevée à l'orniérage de l'enrobé notamment à haute température ;
- amélioration de la souplesse et de la cohésion de l'enrobé ;
- diminution de l'épaisseur de la couche de roulement d'environ 25% ;
- diminution de l'épaisseur d'environ 25% lors de la mise en œuvre de cet additif dans les couches d'enrobé (CR-BB-GB) et dans certaines configurations suppression de la CF (couche de forme) ;
- souplesse d'utilisation et de fabrication ;
- conditionnement en big-bag pour les centrales continues ;
- utilisable avec tous les grades de bitume.
- conditionnement en sacs thermofusibles prédosés pour les centrales discontinues dont le poids unitaire est fonction de celui des gâchées ;
- procédé sans aucune perte ;
- facilité remarquable de dosage ;
- durée de stockage illimitée ;
- pas besoin de qualification particulière du personnel pour la conduite en centrale et l'application.
- insensibilité aux écarts de températures diurnes, nocturnes, saisonnières ;
- impact sécuritaire important pour le trafic en toutes conditions climatiques et d'utilisation ;
- gain économique.

#### **4.3.3- DOMAINES D'APPLICATIONS :**

- autoroutes, routes à fort trafic.
- circulation agressive.
- carrefours et giratoires.
- voirie urbaine –voies de bus.
- pistes des aéroports.
- sols industriels et zones portuaires.
- aires de stockage des containers.
- régénération de voies à circulation lourde.

#### **CONCLUSION :**

Dans ce chapitre nous avons présentés et identifiés les caractéristiques générale des différents constituants pour les formulations des mélanges bétons bitumineux avec fraisât ainsi que le granulat plastique, qui vont être utilisés dans les essais expérimentales.

Nous avons commencé par une formulation d'un béton bitumineux neuf avec tous les essais nécessaire selon les normes, puis nous somme passés à l'identification des caractéristiques des différent constituants de fraisât à recyclé (essais sur les granulats et sur le liant).

Nous avons terminé ce chapitre par la présentation du granulat plastique qui est le PRPLAST, nous avons choisis ce produit parce qu'il est recyclé de déchets plastiques (95% plastomère)

Comme la couche de roulement subit beaucoup de charges et d'agressions qui provoque l'orniérage, le PRPLAST S anti orniérant est choisi parmi d'autre produit de la famille.

**5. LES ESSAIS MECANQUES REALISES****5.1. INTRODUCTION**

Les différents matériaux utilisés en construction routière, doivent être soumis à des essais mécaniques, pour étudier leur comportement sous différentes sollicitations.

Dans ce chapitre, sont présentés les différents essais réalisés après formulation.

Les essais Marshall et les essais Duriez normal (pour la couche de roulement, avec ajout de fraisât puis avec ajout de granulats plastique (PRPLAST S), et réalisés au laboratoire contrôle technique des travaux publics d'Alger (CTTP)

**5.2. ESSAIS MARCHALL**

La norme NF P 98-251-2 (avril 1992), spécifie une méthode d'essai ayant pour but de déterminer, pour une température et une énergie de compactage donné, le pourcentage de vides, «la stabilité» et «le fluage» dits Marshall, d'un mélange hydrocarboné à chaud.

**5.2.1. PRINCIPE DE L'ESSAI**

L'essai consiste à compacter des éprouvettes par damage selon un processus déterminé, puis les soumettre à un essai de compression (diamètre) suivant une génératrice dans des conditions définies [1].

**5.2.2. APPAREILLAGE**

Au moins trois moules de compactage comportant chacun, une base, un corps de moule, une hausse : la base et la hausse s'adaptent aux deux extrémités du corps du moule. Le diamètre intérieur du moule doit être de  $101.6\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$ .



**Figure 5.1 Moule Marshall**

Deux pistons extracteurs de diamètre légèrement inférieur au diamètre intérieur du moule.

Une dame de compactage comportant un marteau pesant  $4536g \pm 5g$ . Ce marteau coulisse librement sur une tige de guidage et tombe en chute libre de  $457 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$  sur la base de la dame.



**Figure 5.2 Dame électrique**

Un bloc support de moule en chêne de dimensions suivantes : largeur 300mm, longueur 300 mm, hauteur 450mm. Ce bloc muni de deux boulons servant pour le calage du moule.

Au moins trois mâchoires d'écrasement, chacune étant composée de deux demi mâchoires ayant un rayon de courbure intérieur compris entre 50.9mm et 51mm.

Un dispositif de mesure de fluage à 0.1mm près.

Une presse à avancement moyen à vide, réglée à la valeur de  $0.85 \text{ mm/s} \pm 0.1 \text{ mm/s}$ , équipée d'un dispositif permettant de mesurer l'effort au cours d'essai.



**Figure 5.3 Presse Marshall**

Un bain thermostatique pouvant contenir au moins trois éprouvettes et trois mâchoires d'écrasement.

Plaque chauffante électrique.

Un malaxeur pour le mélange granulaire avec ajout de bitume.

### **5.2.3. LE MODE OPERATOIRE**

1. Mettre à l'étuve le mélange retenu d'un poids total de 6000g ainsi que le bitume choisi et les moules Marshall à une température spécifiée pendant minimum 2 heures ;
2. Sortir de l'étuve la cuve contenant le mélange granulaire et la poser sur la plaque chauffante ainsi que le bitume;
3. Peser la quantité de bitume relative à chaque mélange ;
4. Malaxer le mélange granulaire pour homogénéiser pendant 30 secondes ;
5. Peser et verser la quantité du liant préconisée en actionnant le malaxeur pendant 2 à 5 minutes ;
6. Remplir le moule d'enrobé à raison de 1200g à 1g près ;
7. Compacter à la dame électrique à 50 coups par face pendant  $55\text{sec} \pm 5\text{sec}$  ;
8. Laisser refroidir le moule sous jet d'eau pendant 15minutes ;
9. Démouler les éprouvettes et les laisser refroidir pendant 5 heures à une température ambiante ;
10. Numéroter les éprouvettes de 1 à 4 et la cinquième sera utilisé pour mesurer la densité apparente par pesée hydrostatique ;
11. Peser les éprouvettes à 1g près ;

12. Mesurer les dimensions des éprouvettes au 0.1mm près en 4 zones différentes (en hauteur et 3 en diamètre) ;
13. Préparer le bain marré à  $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  ;
14. Immerger les éprouvettes et les mâchoires d'écrasement dans l'eau à  $60^{\circ}\text{C}$  pendant 30 minutes ; échelonner à 5 minutes par éprouvette ;
15. Sortir l'éprouvette du bain et la placer sur les mâchoires d'écrasement, l'ensemble est porté entre les plateaux de la presse réglée à une vitesse de 0.86mm/s ;
16. Procéder à l'écrasement et lire la valeur en KN correspond à la charge maximale de rupture ;
17. Mesurer la valeur de l'affaissement de l'éprouvette selon son diamètre vertical au moment de la rupture (fluage en 1/10) mm à l'aide du pied à coulisses.

#### **5.2.4. LES TEMPERATURES DE REFERENCES**

Les températures de référence de préparation des éprouvettes de mélanges à base de bitume pur, sont définies comme suit :

Bitume 80/100	$140^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$
Bitume 60 /70	$150^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$
Bitume 40 /50	$160^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$
Bitume 20 /30	$180^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$

Aussi les moules sont mis dans l'étuve et porté à la même température de référence de préparation des éprouvettes pendant deux heures

Les résultats des essais MARSHALL des différents mélanges préparés sont représentés dans le tableau 5-1 suivant :

<b>Formulation fraîsat en%</b>	<b>Stabilité MARSHALL (KN)</b>	<b>Fluage (mm)</b>	<b>Masse Volumique apparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>Formulation A Avec 0% de fraîsat</b>	19,18	3,89	2,29
	16,25	3,84	2,28
	18,65	3,76	2,28
	18,03	3,78	2,26
<b>Formulation B Avec 10% de fraîsat</b>	13,69	3,53	2,2
	13,98	3,89	2,27
	15,31	3,81	2,29
	14,66	3,74	2,31
<b>Formulation C Avec 20% de fraîsat</b>	14,38	3,56	2,35
	15,19	3,38	2,30
	10,15	3,23	2,29
	13,57	3,08	2,21
<b>Formulation D Avec 30% de fraîsat</b>	8,12	2,85	2,34
	8,58	2,99	2,33
	7,42	2,34	2,32
	8,04	3,06	2,31

**Tableau 5-1 : Résultats des essais MARSHALL en fonction des pourcentages d'ajout de fraîsat sans PR PLAST S**

Le tableau des résultats des essais MARSHALL des mélanges béton bitumineux fraisât avec 2% de PRPLAST S est présentés dans le tableau 5-2

<b>Formulation fraisât en%</b>	<b>Pourcentage d'ajout de granulat PRPLAST</b>	<b>Stabilité MARSHALL (KN)</b>	<b>Fluage (mm)</b>	<b>Masse Volumique apparente (g/cm3)</b>
<b>Formulation A Avec 0% de fraisât</b>	<b>2%</b>	18,73	3,58	2,32
		17,97	3,67	2,31
		18,12	3,56	2,31
		18,94	3,62	2,32
<b>Formulation B Avec 10% de fraisât</b>	<b>2%</b>	14,87	3,34	2,32
		14,64	3,33	2,32
		15,26	3,30	2,32
		13,98	3,28	2,31
<b>Formulation C Avec 20% de fraisât</b>	<b>2%</b>	14,76	3,32	2,32
		13,31	3,00	2,33
		13,28	3,04	2,33
		13,34	3,12	2,32
<b>Formulation D Avec 30% de fraisât</b>	<b>2%</b>	9,72	2,93	2,34
		10,26	2,86	2,33
		10,11	2,55	2,33
		10,02	2,79	2,32

**Tableau 5-2 : Résultats des essais MARSHALL en fonction des pourcentages  
d'ajout de fraisât avec 2% de PRPLAST S**

Le tableau des résultats des mélanges béton bitumineux fraisât avec 4% de PRPLAST S est présentés dans le tableau 5-3

<b>Formulation fraisât en%</b>	<b>Pourcentage d'ajout de granulat PRPLAST S</b>	<b>Stabilité MARSHALL (KN)</b>	<b>Fluage (mm)</b>	<b>Masse Volumique apparente (g/cm3)</b>
<b>Formulation A Avec 0% de fraisât</b>	<b>4%</b>	19,18	3,49	2,33
		19,47	3,43	2,32
		19,33	3,45	2,33
		18,94	3,47	2,32
<b>Formulation B Avec 10% de fraisât</b>	<b>4%</b>	15,91	3,16	2,33
		15,63	3,18	2,34
		15,87	3,20	2,34
		16,08	3,15	2,34
<b>Formulation C Avec 20% de fraisât</b>	<b>4%</b>	14,93	3,00	2,35
		15,52	3,14	2,33
		14,98	3,11	2,34
		15,08	3,12	2,35
<b>Formulation D Avec 30% de fraisât</b>	<b>4%</b>	12,72	2,82	2,34
		12,87	2,79	2,35
		12,05	2,81	2,35
		12,12	2,76	2,35

**Tableau 5-3 : Résultats des essais MARSHALL en fonction des pourcentages d'ajout de fraisât avec 4% de PRPLAST S**

Le tableau des résultats des mélanges béton bitumineux fraisât avec 6% de PRPLAST S est présentés dans le tableau 5-4

<b>Formulation fraisât en%</b>	<b>Pourcentage d'ajout de granulat PRPLAST S</b>	<b>Stabilité MARSHALL (KN)</b>	<b>Fluage (mm)</b>	<b>Masse Volumique apparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>Formulation A Avec 0% de fraisât</b>	<b>6%</b>	20,88	3,41	2,34
		20,3	3,26	2,33
		19,81	3,29	2,33
		20,58	3,32	2,33
<b>Formulation B Avec 10% de fraisât</b>	<b>6%</b>	18,56	3,09	2,35
		17,4	2,91	2,36
		17,86	3,13	2,35
		17,94	3,04	2,33
<b>Formulation C Avec 20% de fraisât</b>	<b>6%</b>	17,09	3,08	2,36
		16,43	3,14	2,36
		16,52	3,02	2,35
		15,87	3,08	2,34
<b>Formulation D Avec 30% de fraisât</b>	<b>6%</b>	15,08	2,84	2,37
		15,08	2,76	2,35
		14,96	2,68	2,36
		15,03	2,76	2,36

**Tableau 5-4 : Résultats des essais MARSHALL en fonction des pourcentages d'ajout de fraisât avec 6% de PRPLAST S**

Le tableau des résultats des mélanges béton bitumineux fraisât avec 8% de PRPLAST S est présentés dans le tableau 5-5

<b>Formulation fraisât en%</b>	<b>Pourcentage d'ajout de granulat PRPLAST S</b>	<b>Stabilité MARSHALL (KN)</b>	<b>Fluage (mm)</b>	<b>Masse Volumique apparente (g/cm3)</b>
<b>Formulation A Avec 0% de fraisât</b>	<b>8%</b>	20,96	3,34	2,36
		20,93	3,27	2,34
		20,97	3,32	2,35
		20,98	3,32	2,35
<b>Formulation B Avec 10% de fraisât</b>	<b>8%</b>	18,53	2,93	2,35
		18,86	2,97	2,36
		18,93	3,05	2,37
		18,97	3,28	2,35
<b>Formulation C Avec 20% de fraisât</b>	<b>8%</b>	17,86	2,91	2,36
		17,93	2,98	2,37
		16,97	3,12	2,35
		16,47	3,09	2,37
<b>Formulation D Avec 30% de fraisât</b>	<b>8%</b>	15,96	2,62	2,37
		15,93	2,53	2,36
		15,64	2,70	2,37
		14,98	2,58	2,37

**Tableau 5-5 : Résultats des essais MARSHALL en fonction des pourcentages d'ajout de fraisât avec 8% de PRPLAST S**

### **5 - 3. ESSAIS DURIEZ :**

La norme NF P 98-251-1 (septembre 2002), spécifie les essais à chargement statique sur mélanges hydrocarbonés. Elle décrit une méthode ayant pour but de déterminer, pour une température et un compactage donné, la tenue à l'eau d'un mélange hydrocarboné à chaud, à partir du rapport des résistances en compression avec et sans immersion des éprouvettes et leur pourcentage de vides

#### **5-3 .1 PRINCIPE DE L'ESSAI :**

Les éprouvettes nécessaires à la réalisation de l'essai sont fabriquées par compactage statique à double effet. Deux éprouvettes sont destinées à la mesure de la masse volumique par pesée hydrostatique pour calculer le pourcentage des vides. Les autres éprouvettes sont soumises à l'essai de compression après conservation à 18°C dans des conditions définies à l'air pour certaines éprouvettes en immersion pour d'autres

La tenue à l'eau, est caractérisée par le rapport des résistances avec ou sans immersion

#### **5-3 .2 APPAREILLAGE :**

##### **5-3 .2.1 MOULE ET PISTON :**

Mélanges hydrocarbonés  $D \leq 14$  mm un minimum de 12 moules métallique, cylindriques de diamètre compris entre  $[80 - 0,1]$  mm et  $[80 + 0,3]$  mm et de hauteur minimale 190 mm et es pistons de diamètre extérieur minimale de 79,75 et pouvant coulisser librement par rapport au moule

Mélanges hydrocarbonés de  $D > 14$  mm un minimum de 10 moules métalliques, cylindriques de diamètre intérieur compris entre  $[120 - 0,1]$  mm et  $[120 + 0,3]$  mm et de hauteur minimale 270 mm et des pistons de diamètre extérieur minimal de 119,75 mm et pouvant coulisser librement par rapport au moule



**Moule Duriez et Accessoires**

### **5-3 .2.2 PRESSE :**

Une presse qui permet de compacter à double effet et le maintien :

- a. charge de  $60\text{KN} \pm 0,5 \%$  pendant cinq minutes sur chaque éprouvette pour les mélanges hydrocarbonés de  $D \leq 14 \text{ mm}$
- b. charge de  $180 \text{ KN} \pm 0,5\%$  pendant cinq minutes sur chaque éprouvette pour les mélanges hydrocarbonés de  $D > 14 \text{ mm}$

Un système d'application de la charge comportant au moins une rotule permettant un avancement moyen à vide de  $1 \text{ mm/s}$ , équipé d'un dispositif permettant de mesurer l'effort au cours de l'essai d'exactitude relative de  $\pm 1\%$

### **5-3 .2 LE MODE OPERATOIRE :**

1. Mettre à l'étuve le mélange retenu d'un poids spécifié ainsi que le bitume choisi et les moules Duriez à une température spécifiée pendant minimum 2 heures
2. Sortir de l'étuve la cuve contenant le mélange granulaire et la poser sur la plaque chauffante ainsi que le bitume
3. Peser la quantité de bitume relative à chaque mélange
4. Malaxer le mélange granulaire pour homogénéiser pendant 30 secondes
5. Peser et versé la quantité du liant préconisée en actionnant le malaxeur pendant 2 à 5 minutes
6. Remplir le moule d'enrobé à un poids spécifié au gramme après
7. Compacter sous presse avec une charge suivant l'essai DURIEZ demandé  
(60 KN ou 180 KN)

Pour les autres liants hydrocarbonés la température de fabrication des mélanges sont celles définies par le fournisseur. Les moules sont portés à la température de référence de préparation des éprouvettes (2 heures au minimum).

Les résultats des essais DURIEZ normal pour le mélange béton bitumineux fraisât sans ajout de PRPLAST S sont présentés dans le tableau 5.6

<b>Formulation fraisât en%</b>	<b>Résistance après 7 jrs à l'air à 18° C (R) (mpa)</b>	<b>Résistance après 7 jrs en immersion à 18° C (r') (mpa)</b>	<b>Masse volumique apparente (g/cm3)</b>
<b>Formulation A Avec 0% de fraisât</b>	13,21	10,28	2,26
	12,96	10,76	2,24
	12,89	10,64	2,23
			2,26
			2,23
			2,26
<b>Formulation B Avec 10% de fraisât</b>	12,82	11,36	2,27
	13	11,23	2,25
	12,78	11,41	2,28
			2,26
			2,28
			2,29
<b>Formulation C Avec 20% de fraisât</b>	12,78	11,4	2,28
	12,8	11,5	2,3
	12,65	12,2	2,29
			2,28
			2,28
			2,3
<b>Formulation D Avec 30% de fraisât</b>	12,86	10,7	2,32
	12,31	13,2	2,33
	12,27	12	2,33
			2,33
			2,30
			2,33

**Tableau 5-6 : Résultats des essais DURIEZ en fonction des pourcentages d'ajout de fraisât**

Les résultats des essais DURIEZ normal pour le mélange béton bitumineux fraisât avec ajout de 2% de PRPLAST S sont présentés dans le tableau 5.7

Formulation fraisât en%	Pourcentage d'ajout de granulat PRPLAST S	Résistance après 7 jrs à l'air à 18° C (R) (mpa)	Résistance après 7 jrs en immersion à 18° C (r') (mpa)	Masse volumique apparente (g/cm3)
<b>Formulation A Avec 0% de fraisât</b>	<b>2%</b>	12,19	11,82	2,25
		14,17	12,28	2,24
		13,26	12,43	2,25
				2,26
				2,25
				2,26
<b>Formulation B Avec 10% de fraisât</b>	<b>2%</b>	12,83	11,86	2,29
		13,32	12,66	2,3
		12,53	13,07	2,28
				2,3
				2,29
				2,3
<b>Formulation C Avec 20% de fraisât</b>	<b>2%</b>	13,11	14,42	2,29
		12,83	14,33	2,33
		12,37	13,78	2,32
				2,32
				2,29
				2,3
<b>Formulation D Avec 30% de fraisât</b>	<b>2%</b>	12,54	14,37	2,33
		12,93	14,92	2,3
		12,47	14,93	2,31
				2,33
				2,32
				2,31

**Tableau 5-7 : Résultats des essais DURIEZ en fonction des pourcentages d'ajout de fraisât avec 2% de PRPLAST S**

Les résultats des essais DURIEZ normal pour le mélange béton bitumineux fraisât avec ajout de 4% de PRPLAST S sont présentés dans le tableau 5.8

Formulation fraisât en%	Pourcentage d'ajout de granulat PRPLAST S	Résistance après 7 jrs à l'air à 18° C (R) (mpa)	Résistance après 7 jrs en immersion à 18° C (r') (mpa)	Masse volumique apparente (g/cm3)
Formulation A Avec 0% de fraisât	4%	15,91	14,00	2,29
		15,87	14,21	2,29
		16,11	13,63	2,3
				2,3
				2,29
				2,28
Formulation B Avec 10% de fraisât	4%	15,82	14,45	2,31
		15,67	14,18	2,29
		15,43	14,34	2,31
				2,32
				2,32
				2,3
Formulation C Avec 20% de fraisât	4%	15,22	15,38	2,31
		15,03	15,22	2,33
		15,28	14,81	2,31
				2,32
				2,33
				2,33
Formulation D Avec 30% de fraisât	4%	14,77	15,52	2,33
		14,76	15,64	2,35
		15,14	15,64	2,34
				2,32
				2,32
				2,33

**Tableau 5-8 : Résultats des essais DURIEZ en fonction des pourcentages d'ajout de fraisât avec 4% de PRPLAST S**

Les résultats des essais DURIEZ normal pour le mélange béton bitumineux fraisât avec ajout de 6% de PRPLAST S sont présentés dans le tableau 5.9

Formulation fraisât en%	Pourcentage d'ajout de granulat PRPLAST S	Résistance après 7 jrs à l'air à 18° C (R) (mpa)	Résistance après 7 jrs en immersion à 18° C (r') (mpa)	Masse volumique apparente (g/cm3)
Formulation A Avec 0% de fraisât	6%	17,94	15,19	2,32
		17,5	15,42	2,30
		17,76	15,30	2,32
				2,33
				2,33
				2,34
Formulation B Avec 10% de fraisât	6%	16,13	16,52	2,36
		17,26	16,47	2,33
		17,73	16,54	2,34
				2,33
				2,34
				2,33
Formulation C Avec 20% de fraisât	6%	17,71	16,18	2,33
		16,14	16,92	2,35
		16,91	16,51	2,34
				2,35
				2,32
				2,33
Formulation D Avec 30% de fraisât	6%	16,13	16,74	2,35
		17,16	16,87	2,36
		16,23	17,04	2,34
				2,33
				2,35
				2,33

**Tableau 5-9 : Résultats des essais DURIEZ en fonction des pourcentages d'ajout de fraisât avec 6% de PRPLAST S**

Les résultats des essais DURIEZ normal pour le mélange béton bitumineux fraisât avec ajout de 8% de PRPLAST S sont présentés dans le tableau 5.10

Formulation fraisât en%	Pourcentage d'ajout de granulat PRPLAST S	Résistance après 7 jrs à l'air à 18° C (R) ( mpa )	Résistance après 7 jrs en immersion à 18° C (r') (mpa )	Masse volumique apparente (g/cm3)
Formulation A Avec 0% de fraisât	8%	18,02	15,27	2,33
		18,15	16,33	2,31
		17,63	16,74	2,33
				2,32
				2,33
				2,34
Formulation B Avec 10% de fraisât	8%	17,17	16,77	2,34
		17,92	16,63	2,33
		18,03	16,86	2,34
				2,32
				2,34
				2,33
Formulation C Avec 20% de fraisât	8%	17,91	16,93	2,35
		17,43	17,28	2,35
		17,58	16,73	2,34
				2,33
				2,35
				2,32
Formulation D Avec 30% de fraisât	8%	16,92	16,87	2,34
		17,67	17,47	2,36
		17,52	17,54	2,34
				2,35
				2,33
				2,33

**Tableau 5-10 : Résultats des essais DURIEZ en fonction des pourcentages d'ajout de fraisât avec 8% de PRPLAST S**

## CONCLUSION :

Dans ce chapitre nous avons illustré les essais Marshall et Duriez que nous avons réalisés au laboratoire de CTTP sur des bétons bitumineux mélanger avec différents pourcentages des fraisât d'une ancienne chaussée (semi rigide : 0/14) d'un tronçon de l'auto route Est Ouest qui a été réalisée en 2001 par l'entreprise COSIDER TP.

Pour une meilleure réutilisation de ces fraisât nous avons préparé en premier lieu un béton bitumineux neuf comme témoin puis nous avons opérés par variation de pourcentage d'ajout de fraisât tout en contrôlant le comportement des mélanges autrement dit le contrôle de la stabilité Marshall, le fluage ainsi que la résistance à la compression à sec et en immersion (DURIEZ).

Pour les granulats plastiques utilisés dans les essais pour le renforcement des matériaux à recyclé, nous avons utilisé le PRPLAST S anti orniérant ce produit étant un plastomère c'est un polyéthylène à basse densité, un recyclé de déchet plastique (câbles téléphoniques et bouchons des bouteilles plastiques).

Les interprétations des résultats obtenus des essais réalisés pour les différentes formulations pour les mélanges d'enrober bitumineux avec les différents pourcentages d'ajout de fraisât seront comparés aux résultats obtenus après renforcement par les différents pourcentages d'ajout de granulats plastiques (PRPLAST S) pour une meilleure évaluation des résultats cette partie fera l'objet du sixième chapitre.

## CHAPITRE VI :

## RESULTATS ET INTERPRETATIONS

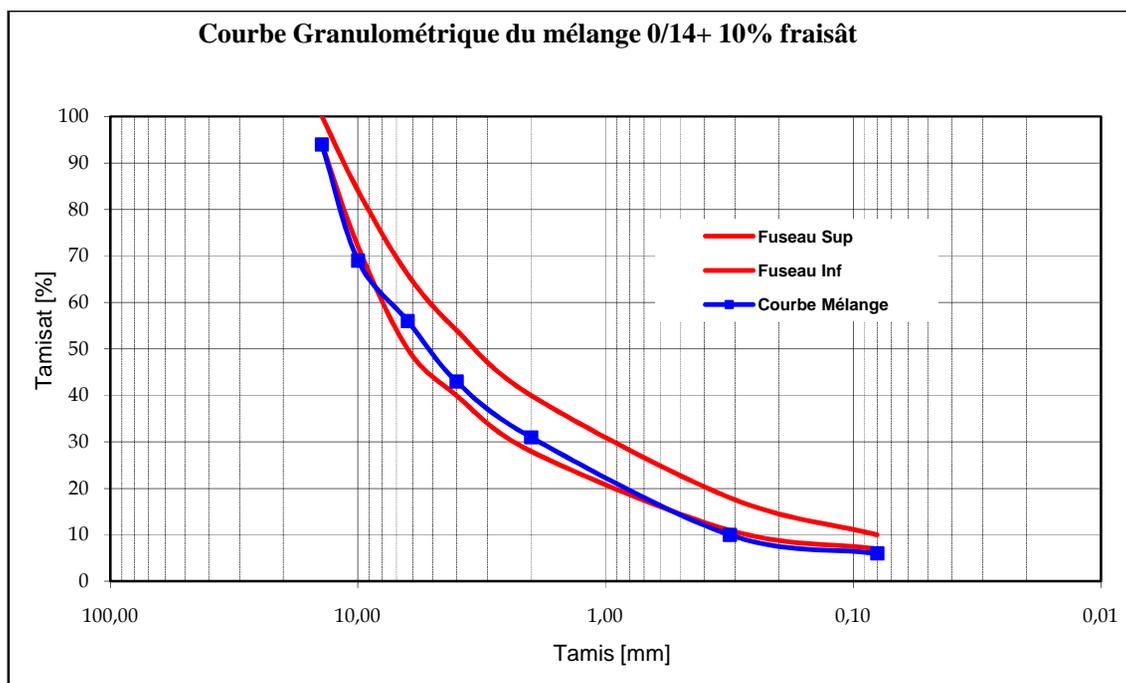
### 6. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

#### INTRODUCTION :

Après avoir réalisé les essais DURIEZ et MARSHALL sur les six formulations dont les trois premières concerne les mélanges béton bitumineux avec trois pourcentage différent d'ajout de fraisât et les trois dernières concerne le renforcement des trois premières formulations avec quatre pourcentages différents d'ajout de granulats plastiques (PRPLAST).

Ce chapitre constitue la synthèse de cette étude, elle contient ainsi les interprétations illustré avec des courbes montrant le comportement des mélanges béton bitumineux neuf avec les trois pourcentages d'ajout de fraisât puis avec les quatre pourcentages d'ajout de granulats plastiques.

La figure ci-dessous représente la courbe du mélange béton bitumineux avec 10% de fraisât



**Figure 6.1 : Courbe granulométrique du mélange 0/14 avec 10% des fraisât**

La figure ci-dessous représente la courbe du mélange béton bitumineux avec 20% de fraisât

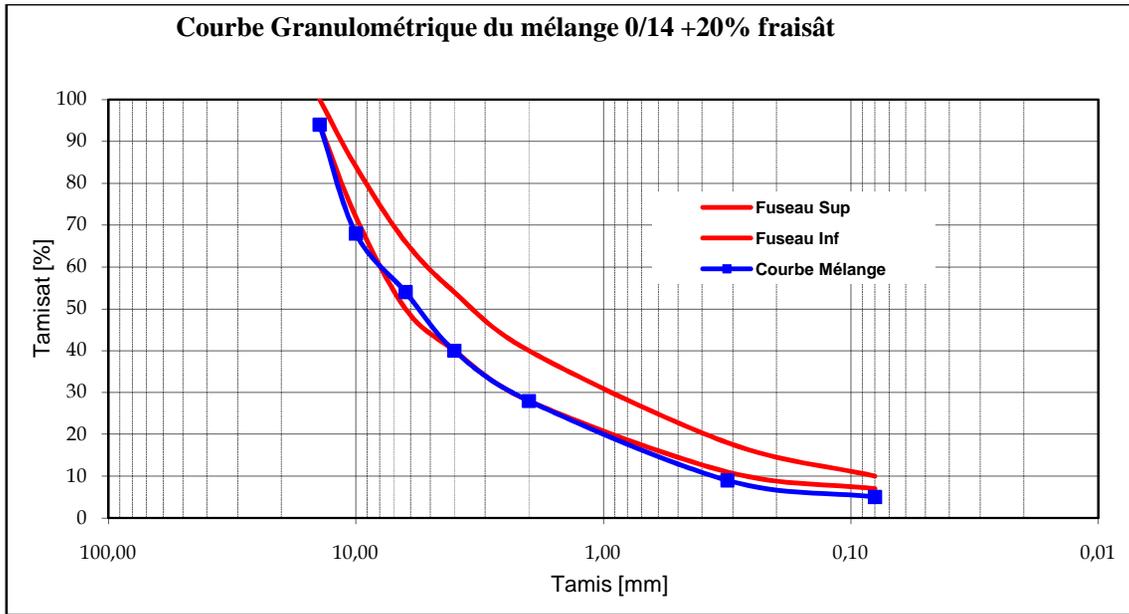


Figure 6.2 : Courbe granulométrique du mélange 0/14 avec 20% des fraisât

La figure ci-dessous représente la courbe du mélange béton bitumineux avec 30% de fraisât

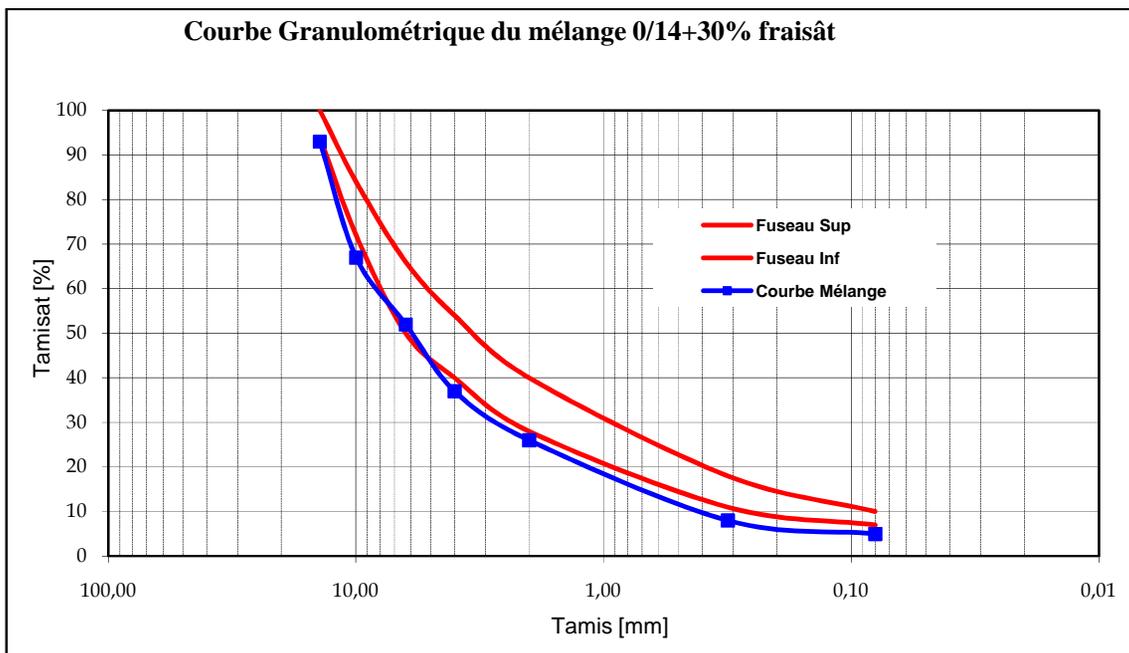


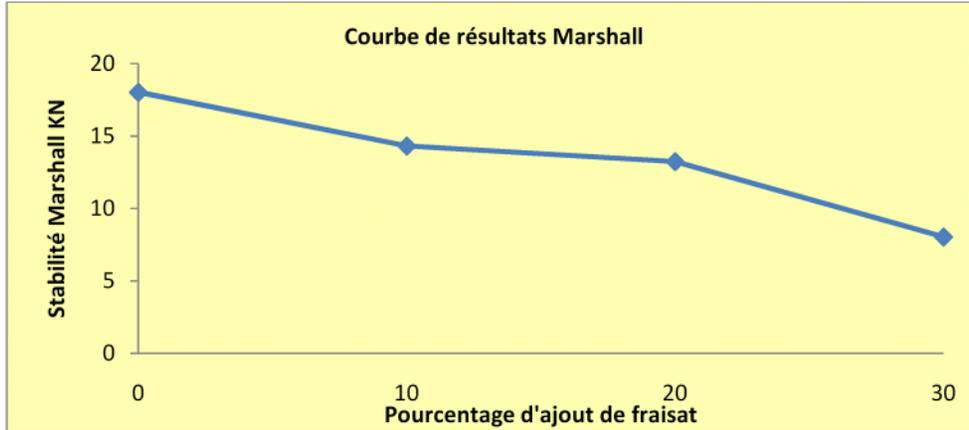
Figure 6.3 : Courbe granulométrique du mélange 0/14 avec 30% des fraisât

**6.1 .RESULTATS ET INTERPRETATION DES ESSAIS MARSHALL :**

**6.1.1 : RESULTATS ET INTERPRETATION DE LA STABILITE MARSHALL AVEC AJOUT DE FRAISAT AVANT ET APRES AJOUT DU PR PLAST S**

% fraisât	0	10	20	30
Stabilité Marshall (KN)	18,03	14,32	13,24	8,04

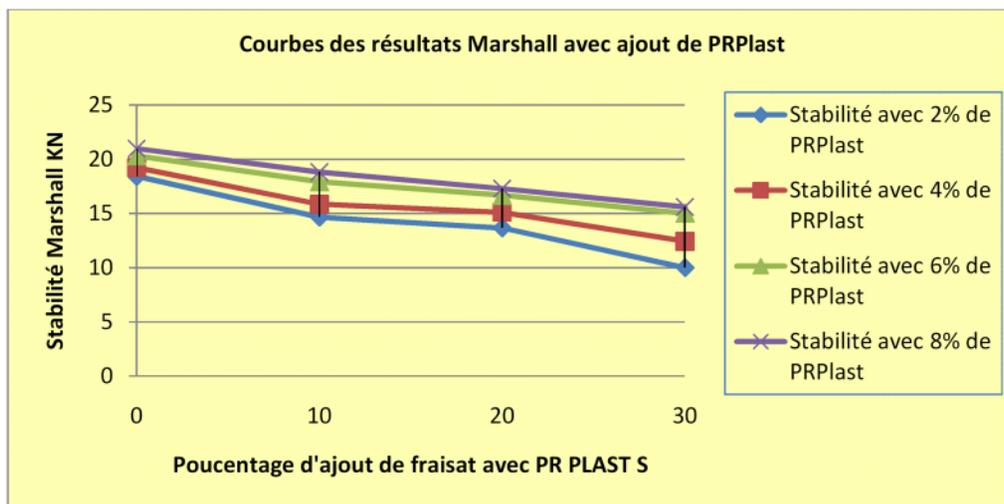
**Tableau 6.1 : Résultats de stabilité Marshall en fonction de pourcentage d’ajout de fraisât**



**Figure 6 .4 : Résultats d’essai Marshall en fonction du pourcentage d’ajout de fraisât**

% fraisât	0	10	20	30
Stabilité avec 2% de PRPlast	18,44	14,68	13,67	10,02
Stabilité avec 4% de PRPlast	19,23	15,87	15,12	12,44
Stabilité avec 6% de PRPlast	20,33	17,94	16,68	15,04
Stabilité avec 8% de PRPlast	20,98	18,82	17,3	15,62

**Tableau 6.2 : Marshall en fonction de pourcentage d’ajout de fraisât avec ajout de PRPLAST**



**Figure 6 .5 : Résultats d’essai Marshall en fonction du pourcentage d’ajout de fraisât avec ajout de PRPlast**

## INTERPRETATION

Les figures (6.4) et (6.5) montrent la variation de la stabilité Marshall en fonction du pourcentage d'ajout de fraisât et de PRPLAST S

Selon la figure (6.4) la valeur de stabilité obtenue avec la première formulation sans ajout est de 18 MPa, cette stabilité diminue de plus en plus avec l'ajout des fraisât et atteint la valeur de 8Mpa à 30% d'ajout des fraisât.

Cette diminution est due à l'ajout de fraisât comme ce dernier est un béton bitumineux vieillis et qui a perdu beaucoup de ses caractéristiques mécanique et chimique dont les granulats des différentes fractions qui sont usés ainsi que le bitume qui est vieillis.

En se référant à la figure (6.5), on constate que la stabilité Marshall s'améliore après ajout du PRPLAST S, sans ajout de fraisât, on enregistre la valeur de 18,44 Mpa avec 2% de PRPLAST et atteint la valeur de 20,98Mpa avec 8% , après ajout de fraisât on constate une diminution progressive de la stabilité pour les quatre mélanges avec les quatre pourcentages d'ajout du granulats plastiques comparons à celle obtenues sans ajout de fraisât ,à 30% d'ajout de fraisât les valeurs sont de : 10,02 Mpa avec 2% d'ajout en PRPLAST ; 12,44 Mpa avec 4% d'ajout ; 15,04Mpa avec 6% d'ajout et 15,62 Mpa avec 8% d'ajout .

Aussi nous constatons que les résultats obtenus avec 6% et 8% d'ajout se rapprochent.

Comparons les résultats obtenus après ajout des granulats plastiques pour les quatre formulations à celles obtenues avant le renforcement nous constatons l'influence positive de l'additif sur la stabilité Marshall

**6.1.2 : RESULTATS ET INTERPRETATION DE LA DENSITE APPARENTE MARSHALL AVEC AJOUT DE FRAISAT AVANT ET APRES AJOUT DU PR PLAST S**

% fraisât	0	10	20	30
Masse volumique apparente	2,27	2,26	2,28	2,32

Tableau 6.3 : Variation de la densité apparente en fonction du pourcentage d'ajout de fraisât

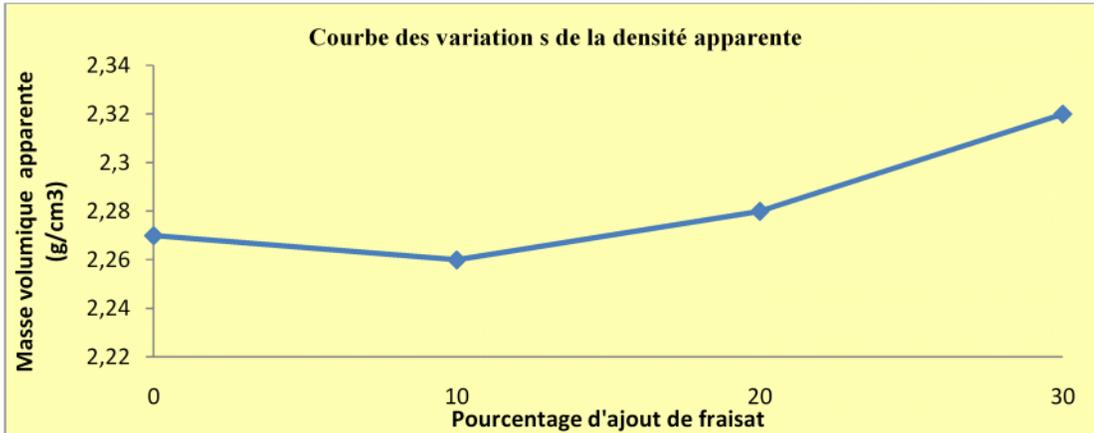


Figure 6.6 : Variation de la densité apparente en fonction du pourcentage d'ajout de fraisât

% fraisât	0	10	20	30
Masse volumique avec 2% de PRPlast	2,31	2,317	2,325	2,33
Masse volumique avec 4% de PRPlast	2,325	2,332	2,342	2,347
Masse volumique avec 6% de PRPlast	2,332	2,347	2,352	2,36
Masse volumique avec 8% de PRPlast	2,35	2,357	2,362	2,367

Tableau 6.4 : Variation de la densité apparente en fonction du pourcentage d'ajout de fraisât avec PRPLAST

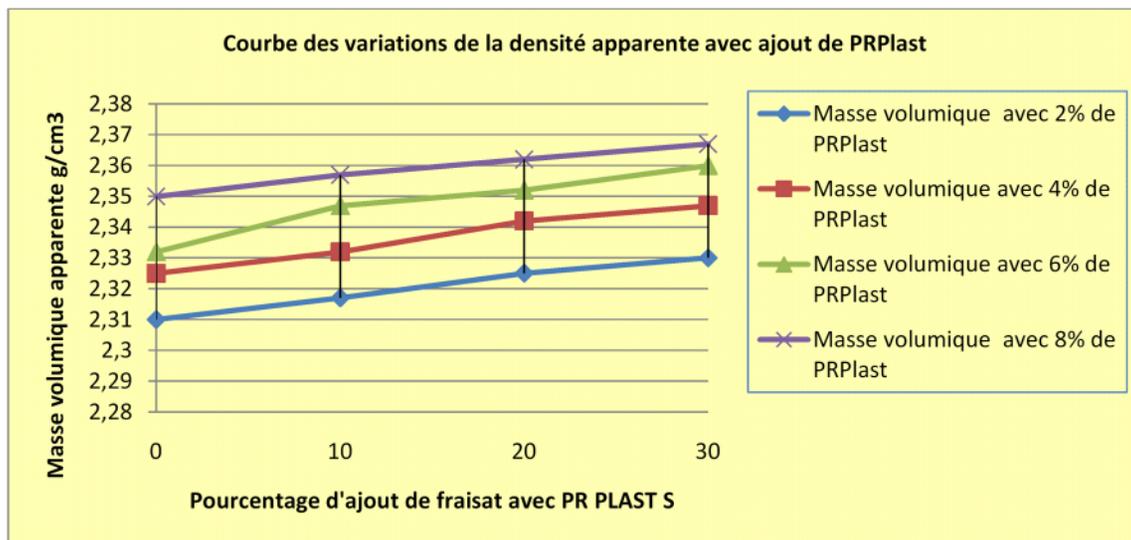


Figure 6.7 : Variation de la densité apparente en fonction du pourcentage d'ajout de fraisât avec PRPLAST

## INTERPRETATION

Selon la figure (6.6) la valeur de la masse volumique apparente à l'état naturel (sans ajout de fraisât) est de  $2,27 \text{ g/cm}^3$  pour la première formulation, après l'ajout des différents pourcentages de fraisât nous avons remarqué l'augmentation progressive de la masse volumique apparente qui atteint la valeur de  $2,32 \text{ g/cm}^3$  à 30% d'ajout de fraisât. Cela est dû à l'influence d'ajout de béton bitumineux recyclé.

D'après la figure (6.7) les masses volumiques apparentes obtenues sont supérieures aux masses volumiques apparentes trouvées avec les premières formulations et augmentent progressivement avec l'ajout de pourcentages de PRPLAST

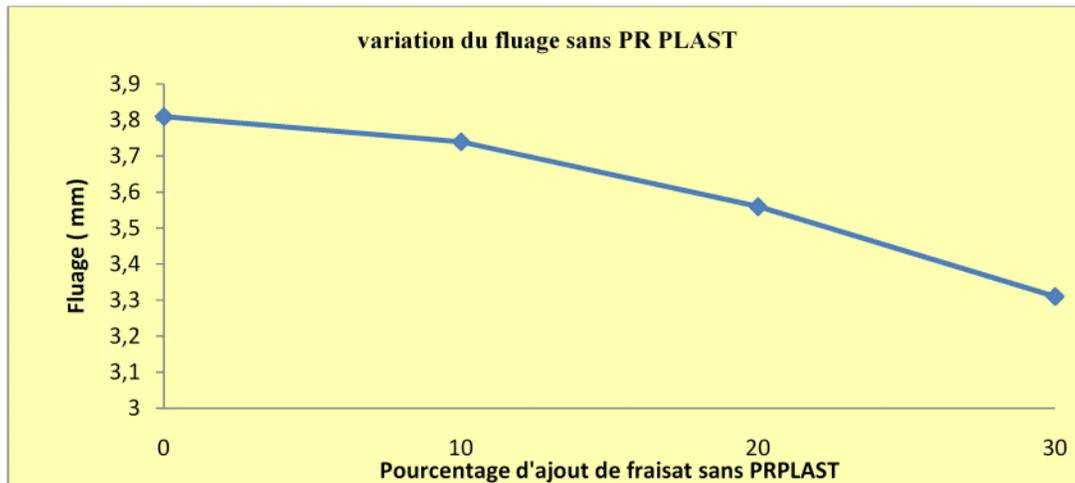
Les valeurs à 2% d'ajout de PRPLAST passe de  $2,31 \text{ g/cm}^3$  sans ajout de fraisât à  $2,33 \text{ g/cm}^3$  avec 30% d'ajout de fraisât, à 4% d'ajout de PRPLAST passe de  $2,325 \text{ g/cm}^3$  sans ajout de fraisât à  $2,347 \text{ g/cm}^3$  avec 30% d'ajout de fraisât, à 6% d'ajout de PRPLAST passe de  $2,332 \text{ g/cm}^3$  sans ajout de fraisât à  $2,36 \text{ g/cm}^3$  avec 30% d'ajout de fraisât, à 8% d'ajout de PRPLAST passe de  $2,35 \text{ g/cm}^3$  sans ajout de fraisât à  $2,367 \text{ g/cm}^3$  avec 30% d'ajout de fraisât

D'après les résultats obtenus, nous constatons que la masse volumique apparente augmente en fonction des pourcentages d'ajout de fraisât et d'ajout de granulat plastique.

**6.1.3 : RESULTATS ET INTERPRETATION DE FLUAGE MARSHALL AVEC AJOUT DE FRAISAT AVANT ET APRES AJOUT DU PR PLAST S**

% fraisât	0	10	20	30
FLUAGE (mm)	3,81	3,74	3,56	3,31

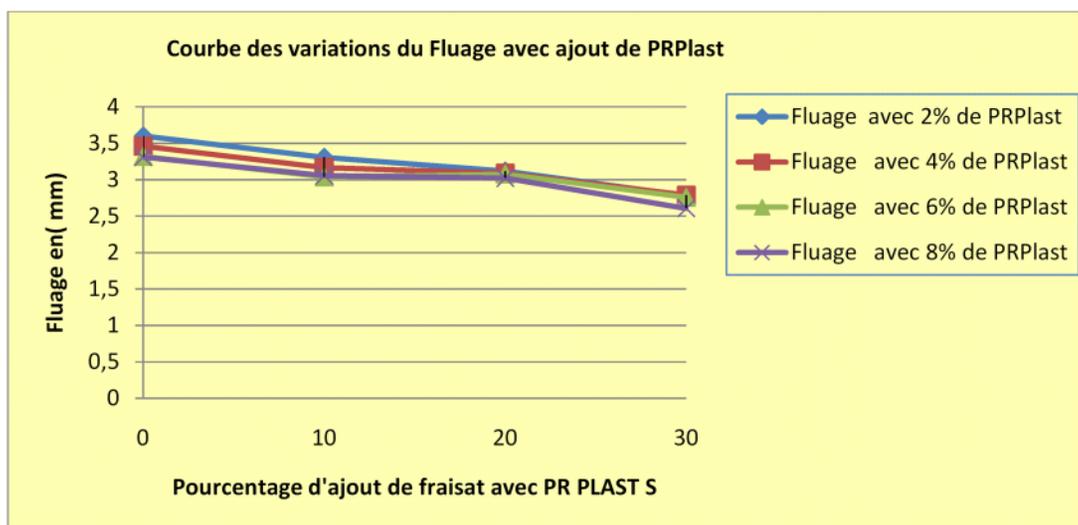
**Tableau 6.5 : Variation du fluage en fonction de pourcentage d'ajout**



**Figure 6 .8 : Variation du fluage en fonction du pourcentage d'ajout de fraisât**

% fraisât	0	10	20	30
Fluage avec 2% de PRPlast	3,6	3,31	3,12	2,78
Fluage avec 4% de PRPlast	3,46	3,17	3,09	2,79
Fluage avec 6% de PRPlast	3,32	3,04	3,08	2,78
Fluage avec 8% de PRPlast	3,31	3,06	3,03	2,75

**Tableau 6.6 : Variation du fluage en fonction de pourcentage d'ajout fraisât avec PRPLAST**



**Figure 6 .9 : Variation du fluage en fonction du pourcentage d'ajout de fraisât avec PRPLAST**

## INTERPRETATION

D'après la figure (6.8) nous constatons qu'il y a une diminution progressive avec l'ajout des différents pourcentages des fraisât, la valeur du fluage sans ajout de fraisât est de 3,81mm cette valeur diminue dès le premier ajout et atteint la valeur de 3,31mm avec 30% d'ajout.

Cette diminution est un signe de l'augmentation de la résistance au fluage qui est due au bitume contenus dans les fraisât, en effet le bitume une fois vieilli, il a tendance à durcir .

D'après la figure (6.9), les valeurs du fluage obtenues après l'ajout du PR PLAST S ont diminués par rapport aux premières valeurs obtenues avec les formulations des mélanges Béton Bitumineux avec fraisât, à 2% d'ajout de PRPLAST les valeurs passe de 3,6 mm sans ajout de fraisât à 2,78 mm avec 30% d'ajout de fraisât, à 4% d'ajout de PRPLAST les valeurs passe de 3,46 mm sans ajout de fraisât à 2,79 mm avec 30% d'ajout de fraisât, à 6% d'ajout de PRPLAST les valeurs passe de 3,32 mm sans ajout de fraisât à 2,78 mm avec 30% d'ajout de fraisât, à 8% d'ajout de PRPLAST les valeurs passe de 3,31 mm sans ajout de fraisât à 2,75 mm avec 30% d'ajout de fraisât.

D'après les résultats obtenus, nous constatons que la résistance au fluage à augmenté avec l'ajout des fraisât puis c'est encore amélioré avec l'ajout du PR PLAST S.

#### 6.1.4 RESUME DES RESULTATS DES ESSAIS MARSHALL

Les résultats des essais MARSHALL sans PRPLAST S sont regroupés dans le tableau 6.7.

Formule granulaire	A	B	C	D	Spécifications
Ajout de fraisât en %	0%	10%	20%	30%	
Teneur en bitume (%)	6,08	6,08	6,08	6,08	-
Densité apparente (t/m <sup>3</sup> )	2,27	2,26	2,28	2,32	-
Stabilité (KN)	18,03	14,32	13,24	8,04	> 10,5
Fluage (mm)	3,81	3,73	3,56	3,31	< 4
Quotient Marshall (KN/mm)	4,73	3,83	3,71	2,42	-

**Tableau 6.7 : LES RESULTATS DES ESSAIS MARSHALL AVEC AJOUT DE FRAISAT SANS PRPLAST**

Les résultats des essais MARSHALL sans PRPLAST S sont regroupés dans le tableau 6.8

Formule granulaire	A	B	C	D	Spécifications
Ajout de fraisât en %	0%	10%	20%	30%	-
Teneur en bitume (%)	6,08	6,08	6,08	6,08	-
Ajout du PR PLAST S	2%	2%	2%	2%	-
Densité apparente (t/m <sup>3</sup> )	2,31	2,317	2,325	2,33	-
Stabilité (KN)	18,44	14,68	13,67	10,02	> 10,5
Fluage (mm)	3,6	3,31	3,12	2,78	< 4
Quotient Marshall (KN/mm)	5,12	4,44	4,38	3,60	-

**Tableau 6.8 : LES RESULTATS DES ESSAIS MARSHALL AVEC AJOUT DE FRAISAT AVEC 2% de PRPLAST**

Les résultats des essais MARSHALL sans PRPLAST S sont regroupés dans le tableau 6.9

<b>Formule granulaire</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>Spécifications</b>
Ajout de fraisât en %	0%	10%	20%	30%	-
Teneur en bitume (%)	6,08	6,08	6,08	6,08	-
Ajout du PR PLAST S	4%	4%	4%	4%	-
Densité apparente (t/m <sup>3</sup> )	2,325	2,332	2,342	2,347	-
Stabilité (KN)	19,23	15,87	15,12	12,44	> 10,5
Fluage (mm)	3,46	3,17	3,09	2,79	< 4
Quotient Marshall (KN/mm)	5,56	5,01	4,89	4,46	-

**Tableau 6.9 : LES RESULTATS DES ESSAIS MARSHALL AVEC AJOUT DE FRAISAT AVEC 4% de PRPLAST**

Les résultats des essais MARSHALL sans PRPLAST S sont regroupés dans le tableau 6.10

<b>Formule granulaire</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>Spécifications</b>
Ajout de fraisât en %	0%	10%	20%	30%	-
Teneur en bitume (%)	6,08	6,08	6,08	6,08	-
Ajout du PR PLAST S	6%	6%	6%	6%	-
Densité apparente (t/m <sup>3</sup> )	2,332	2,347	2,352	2,36	-
Stabilité (KN)	20,33	17,94	16,68	15,04	> 10,5
Fluage (mm)	3,32	3,04	3,08	2,78	< 4
Quotient Marshall (KN/mm)	6,12	5,90	5,42	5,41	-

**Tableau 6.10 : LES RESULTATS DES ESSAIS MARSHALL AVEC AJOUT DE FRAISAT AVEC 6% de PRPLAST**

Les résultats des essais MARSHALL sans PRPLAST S sont regroupés dans le tableau 6.11

Formule granulaire	A	B	C	D	Spécifications
Ajout de fraisât en %	0%	10%	20%	30%	-
Teneur en bitume (%)	6,08	6,08	6,08	6,08	-
Ajout du PR PLAST S	8%	8%	8%	8%	-
Densité apparente (t/m <sup>3</sup> )	2,35	2,357	2,362	2,367	-
Stabilité (KN)	20,98	18,82	17,3	15,62	> 10,5
Fluage (mm)	3,31	3,06	3,03	2,75	< 4
Quotient Marshall (KN/mm)	6,34	6,15	5,71	5,68	-

**Tableau 6.11 : LES RESULTATS DES ESSAIS MARSHALL AVEC AJOUT DE FRAISAT AVEC 8% de PRPLAST**

#### COMMENTAIRES

D'après les résultats des essais Marshall avec les différents pourcentages d'ajout de fraisât nous constatons que la stabilité Marshall à 30% d'ajout de fraisât est au dessous de la spécification exigée par la norme, après le renforcement effectués avec le PRPLAST S, nous remarquons que Les stabilités et les résistances aux fluages MARSHALL augmentent à partir de 4% d'ajout en PRPLAST et se comporte comme un enrobé neuf à partir de 6% d'ajout en PRPLAST comme l'indique le quotient Marshall d'où on déduit que l'optimum d'ajout de granulats plastiques est de 6% .

#### NB :

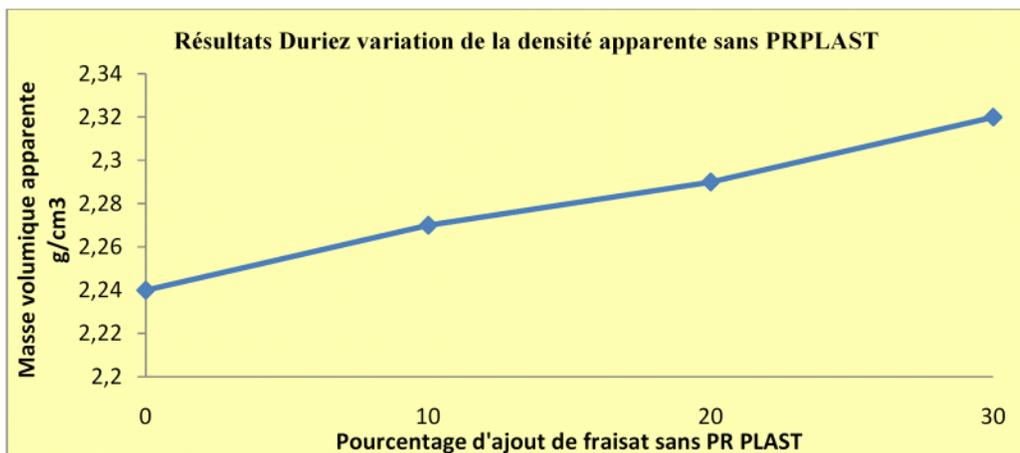
Le quotient MARSHALL est un indicateur pour la résistance aux déformations, permanentes, contraintes de cisaillement et aussi pour l'orniérage des enrobés bitumineux. Les plus grandes valeurs du quotient indiquent que les mélanges sont plus résistants aux déformations permanentes

**6.2 RESULTATS ET INTERPRETATIONS DES ESSAIS DURIEZ :**

**6.2.1. RESULTATS ET INTERPRETATION DE AL DENSITE APPARENTE DURIEZ AVEC AJOUT DE FRAISAT AVANT ET APRES AJOUT DU PRPLASTS :**

% fraisât	0	10	20	30
Masse volumique apparente	2,24	2,27	2,29	2,32

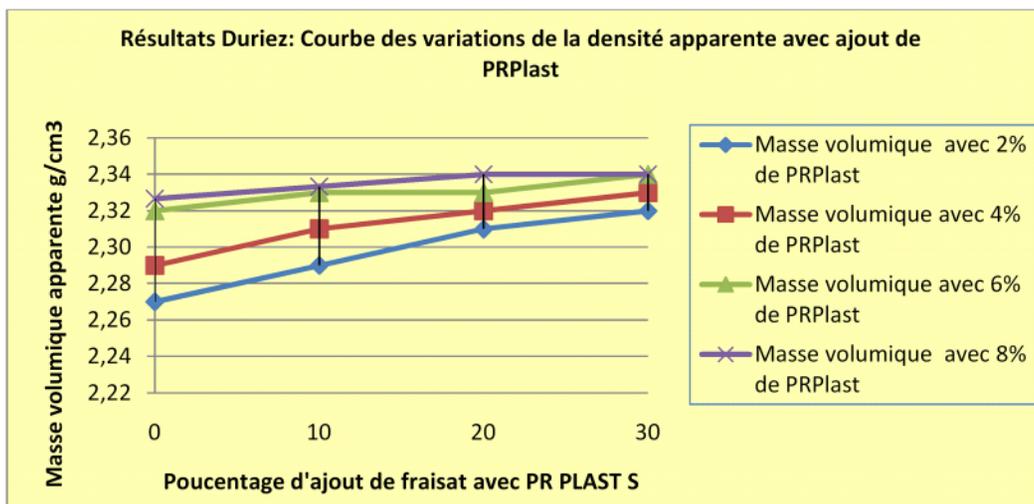
**Tableau 6 .12 : Variation de la densité apparente en fonction du pourcentage d’ajout de fraisât**



**Figure 6 .10 : Variation de la densité apparente en fonction du pourcentage d’ajout de fraisât**

% fraisât	0	10	20	30
Masse volumique avec 2% de PRPlast	2,27	2,29	2,31	2,32
Masse volumique avec 4% de PRPlast	2,29	2,31	2,32	2,33
Masse volumique avec 6% de PRPlast	2,32	2,33	2,33	2,34
Masse volumique avec 8% de PRPlast	2,33	2,33	2,34	2,34

**Tableau 6 .13 : Variation de la densité apparente en fonction du pourcentage d’ajout de fraisât avec PRPLAST**



**Figure 6 .11 : Variation de la densité apparente en fonction du pourcentage d’ajout de fraisât avec PRPLAST**

## INTERPRETATION

La figure (6.10) montre la variation de la masse volumique apparente sans ajout du PRPLAST, à l'état naturel (sans ajout de fraisât) la valeur est de  $2,24 \text{ g/cm}^3$  pour la première formulation, après l'ajout des différents pourcentages de fraisât nous avons remarqué l'augmentation progressive de la masse volumique apparente qui atteint la valeur de  $2,32 \text{ g/cm}^3$  à 30% d'ajout de fraisât.

D'après la figure (6.11) les masses volumiques apparentes obtenues sont supérieures aux masses volumiques apparentes trouvées avec les premières formulations c'est-à-dire les formulations avec ajout de fraisât, à 2% d'ajout en PRPLAST la valeur est de  $2,32 \text{ g/cm}^3$  à 30% d'ajout en fraisât, à 4% d'ajout en PRPLAST la valeur est de  $2,33 \text{ g/cm}^3$  à 30% d'ajout en fraisât, à 6% d'ajout en PRPLAST la valeur est de  $2,34 \text{ g/cm}^3$  à 30% d'ajout en fraisât et à 8% d'ajout en PRPLAST la valeur commence à se stabiliser et reste  $2,34 \text{ g/cm}^3$  à 30% d'ajout en fraisât.

D'après les résultats obtenus, nous constatons que la masse volumique apparente augmente en fonction des pourcentages d'ajout de fraisât et d'ajout de granulat plastique

**6.2.2. RESULTATS ET INTERPRETATION LA RESISTANCE A LA COMPRESSION A L'AIR A 18°C AVEC AJOUT DE FRAISAT AVANT ET APRES AJOUT DU PRPLASTS :**

% fraisat	0	10	20	30
Résistance à compression	13,02	12,87	12,74	12,48

Tableau 6. 14 : Variation de la résistance à la compression à l'air à 18°C, en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât

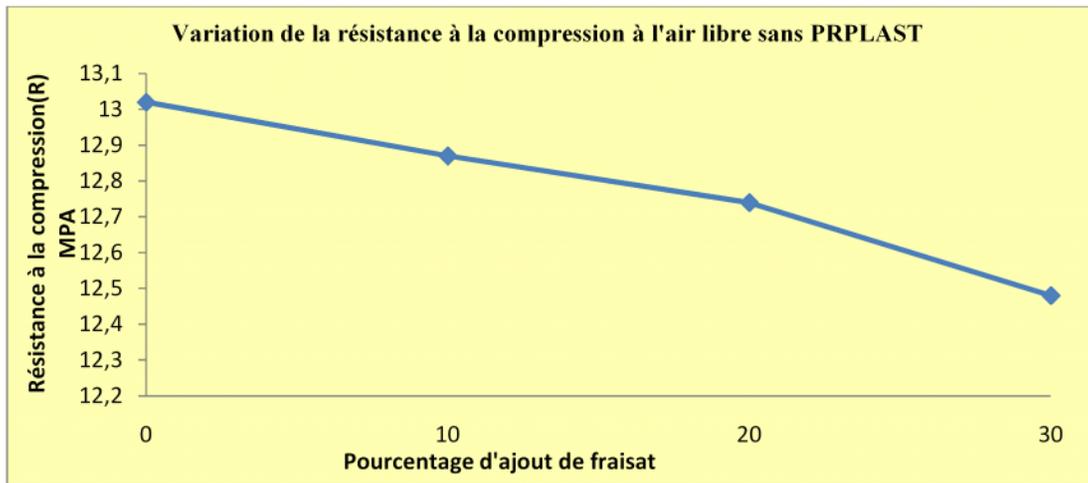


Figure 6. 12 : Variation de la résistance à la compression à l'air à 18°C, en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât

% fraisât	0	10	20	30
Résistance à la compression à l'air libre avec 2% de PRPlast	13,21	12,89	12,77	12,65
Résistance à la compression à l'air libre avec 4% de PRPlast	15,96	15,64	15,18	14,89
Résistance à la compression à l'air libre avec 6% de PRPlast	17,73	17,04	16,92	16,51
Résistance à la compression à l'air libre avec 8% de PRPlast	17,93	17,71	17,64	17,37

Tableau 6. 15 : Variation de la résistance à la compression à l'air à 18°C, en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât avec PRPLAST

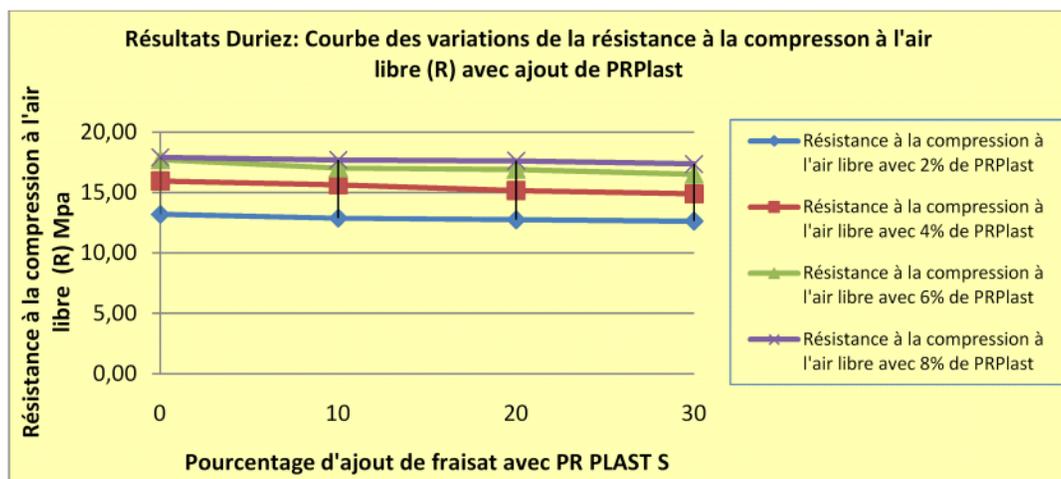


Figure 6. 13 : Variation de la résistance à la compression à l'air à 18°C, en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât avec PRPLAST

## INTERPRETATION

La figure (6.12) montre la variation de la résistance à la compression à l'air à 18°C, en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât, à l'état naturel (sans ajout de fraisât) la valeur est de 13,02 Mpa pour la première formulation, après ajout de différent pourcentage de fraisât nous remarquons une diminution progressive de la résistance à la compression qui atteint la valeur de 12,48 Mpa à 30%.

Cette diminution est probablement due à la diminution de la résistance des fraisât ajoutés.

D'après la figure (6.13) nous constatons que la variation de la résistance à la compression à l'air à 18°C, diminue en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât et augmente après ajout du PR PLAST, à 2% d'ajout de PRPLAST la valeur passe de 13,21 Mpa à 12,65 avec 30% d'ajout de fraisât, à 4% d'ajout la valeur passe de 15,96 Mpa à 14,89 avec 30% d'ajout de fraisât, à 6% d'ajout la valeur passe de 17,73 Mpa à 16,51 avec 30% d'ajout de fraisât à 8% d'ajout la valeur passe de 17,93 Mpa à 17,37 avec 30% d'ajout de fraisât.

La diminution de la résistance à la compression à l'air libre qui est enregistré après ajout de fraisât est lié à la résistance des granulats de ce dernier qui sont moins résistants comparés aux granulats neufs ainsi que le bitume vieilli contenu dans les fraisât.

L'augmentation de résistance enregistrée après ajout de granulats plastiques pour les différentes formulations montre l'influence positive de cet additif sur la résistance à la compression à l'air libre, aussi, nous constatons qu'à partir de 6% d'ajout de PRPLAST les valeurs des résistances obtenues commencent à se stabiliser et se rapprochent de celles enregistrées avec 8% d'ajout.

**6.2.3. RESULTATS ET INTERPRETATION LA RESISTANCE A LA COMPRESSION EN IMMERSION AVEC AJOUT DE FRAISAT AVANT ET APRES AJOUT DU PRPLASTS**

% fraisat	0	10	20	30
Résistance à la compression	10,56	11,33	11,7	11,96

Tableau 6.16 : Variation de la résistance à la compression en immersion, en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât

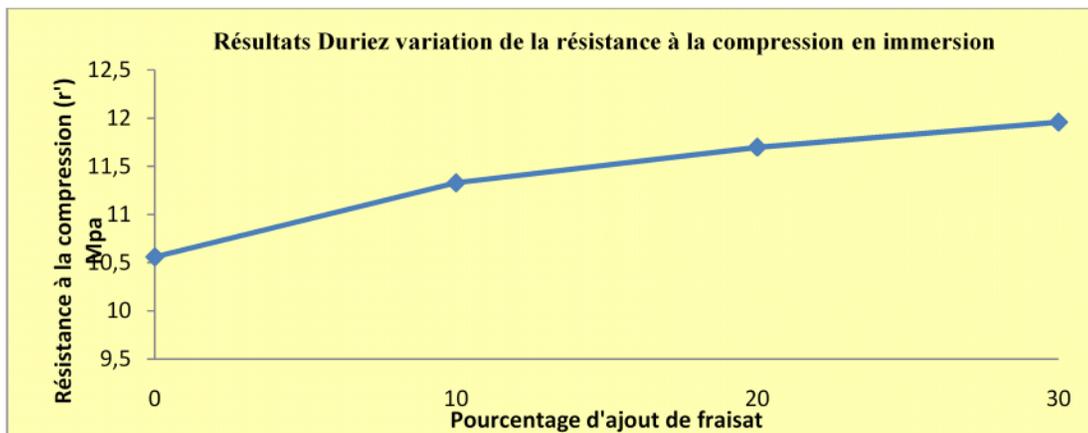


Figure 6. 14 : Variation de la résistance à la compression en immersion, en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât

% fraisât	0	10	20	30
Résistance à la compression en immersion avec 2% de PRPlast	12,18	12,53	14,18	14,74
Résistance à la compression en immersion avec 4% de PRPlast	13,95	14,32	15,14	15,60
Résistance à la compression en immersion avec 6% de PRPlast	15,30	16,42	16,53	16,88
Résistance à la compression en immersion avec 8% de PRPlast	16,11	16,98	17,31	17,29

Tableau 6.17 : Variation de la résistance à la compression en immersion, en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât

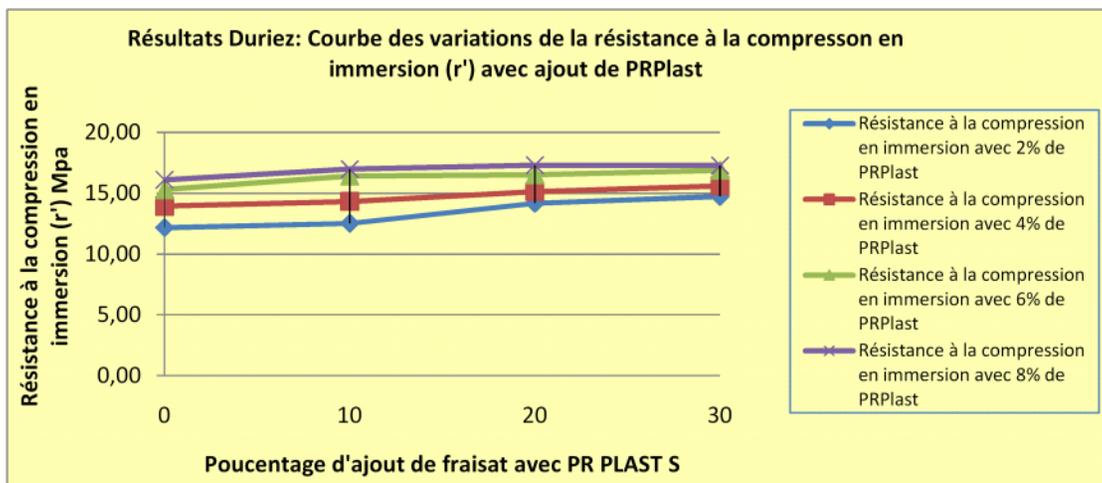


Figure 6.15 : Variation de la résistance à la compression en immersion, en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât avec PRPLAST

## INTERPRETATION

La figure (6.14) montre la variation de la résistance à la compression en immersion, en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât, à l'état naturel (sans ajout de fraisât) la valeur est de 10,16 Mpa pour la première formulation, après l'ajout des différents pourcentages de fraisât nous avons remarqué l'augmentation progressive de la résistance à la compression qui atteint la valeur de 11,96 Mpa à 30% d'ajout de fraisât.

Nous remarquons que la résistance à la compression en immersion augmente avec l'ajout de fraisât qui est probablement dû au bitume vieilli contenu dans le fraisât.

D'après la figure (6.15) la variation de la résistance à la compression en immersion, augmente en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât et du PR PLAST S, en effet d'après les résultats obtenus après ajout de fraisât ont augmenté puis après ajout de PRPLAST ont encore augmenté, à 2% d'ajout de PRPLAST la valeur passe de 12,18 Mpa à 14,74Mpa avec 30% d'ajout en fraisât, à 4% d'ajout de PRPLAST la valeur passe de 13,95 Mpa à 15,60Mpa avec 30% d'ajout en fraisât, à 6% d'ajout de PRPLAST la valeur passe de 15,30Mpa à 16,88 Mpa avec 30% d'ajout en fraisât, à 8% d'ajout de PRPLAST la valeur passe de 16,11Mpa à 17,29 Mpa avec 30% d'ajout en fraisât.

Cette augmentation de la résistance à la compression est dû au PRPLAST qui est très résistant et très flexible, comme c'est indiqué au chapitre IV concernant le PRPLAST qui est un polyéthylène à basse densité.

#### 6.2.4 RESUME DES RESULTATS DES ESSAIS DURIEZ :

Les résultats des essais DURIEZ avec ajout de fraisât sont regroupés dans le tableau 6.18 :

Formule granulaire	A	B	C	D	Spécifications
Ajout de fraisât en %	0%	10%	20%	30%	
Teneur en bitume (%)	6,08	6,08	6,08	6,08	-
Densité apparente (t/m <sup>3</sup> )	2,24	2,27	2,29	2,32	-
Résistance à la compression à sec à 18°C (MPa)	13,02	12,87	12,74	12,48	> 7
Résistance à la compression (R) à 18°C conservées avec immersion. [MPa]	10,56	11,33	11,7	11,96	-
Rapport résistance immersion (r') / à sec	0,81	0,88	0,91	0,95	> 0,80

**Tableau 6.18 : Les résultats des essais DURIEZ avec ajout de fraisât sans PRPLAST S**

Les résultats des essais DURIEZ avec ajout de fraisât après renforcement avec PR PLAST sont regroupés dans le tableau 6.19 :

Formule granulaire	A	B	C	D	Spécifications
Ajout de fraisât en %	0%	10%	20%	30%	
Ajout du PR PLAST S	2%	2%	2%	2%	
Teneur en bitume (%)	6,08	6,08	6,08	6,08	-
Densité apparente (t/m <sup>3</sup> )	2,27	2,29	2,31	2,32	-
Résistance à la compression à sec à 18°C (MPa)	13,21	12,89	12,77	12,65	> 7
Résistance à la compression (R) à 18°C conservées avec immersion. [MPa]	12,18	12,53	14,18	14,74	-
Rapport résistance immersion (r') / à sec	0,92	0,97	1,11	1,17	> 0,80

**Tableau 6.19 : Les résultats des essais DURIEZ avec ajout de fraisât avec 2% de PRPLAST S**

Formule granulaire	A	B	C	D	Spécifications
Ajout de fraisat en %	0%	10%	20%	30%	
Ajout du PR PLAST S	4%	4%	4%	4%	
Teneur en bitume (%)	6,08	6,08	6,08	6,08	-
Densité apparente (t/m <sup>3</sup> )	2,29	2,31	2,32	2,33	-
Résistance à la compression à sec à 18°C (MPa)	15,96	15,64	15,18	14,89	> 7
Résistance à la compression (R) à 18°C conservées avec immersion. [MPa]	13,95	14,32	15,14	15,60	-
Rapport résistance immersion (r') / à sec	0,87	0,92	1,00	1,05	> 0,80

**Tableau 6.20 : Les résultats des essais DURIEZ avec ajout de fraisât avec 4% de PRPLAST S**

Formule granulaire	A	B	C	D	Spécifications
Ajout de fraisat en %	0%	10%	20%	30%	
Ajout du PR PLAST S	6%	6%	6%	6%	
Teneur en bitume (%)	6,08	6,08	6,08	6,08	-
Densité apparente (t/m <sup>3</sup> )	2,32	2,33	2,33	2,34	-
Résistance à la compression à sec à 18°C (MPa)	17,73	17,04	16,92	16,51	> 7
Résistance à la compression (R) à 18°C conservées avec immersion. [MPa]	15,30	16,42	16,53	16,88	-
Rapport résistance immersion (r') / à sec	0,86	0,96	0,98	1,02	> 0,80

**Tableau 6.21 : Les résultats des essais DURIEZ avec ajout de fraisât avec 6% de PRPLAST S**

<i>Formule granulaire</i>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>Spécifications</b>
<i>Ajout de fraisat en %</i>	0%	10%	20%	30%	
<i>Ajout du PR PLAST S</i>	8%	8%	8%	8%	
<i>Teneur en bitume (%)</i>	6,08	6,08	6,08	6,08	-
<i>Densité apparente (t/m<sup>3</sup>)</i>	2,33	2,33	2,34	2,34	-
<i>Résistance à la compression à sec à 18°C (MPa)</i>	17,93	17,71	17,64	17,37	> 7
<i>Résistance à la compression (R) à 18°C conservées avec immersion. [MPa]</i>	16,11	16,98	17,31	17,29	-
<i>Rapport résistance immersion (r') / (R) à sec</i>	0,90	0,96	0,98	1,00	> 0,80

**Tableau 6.22 : Les résultats des essais DURIEZ avec ajout de fraisât avec 8% de PRPLAST S**

**COMMENTAIRES :**

D'après les résultats des essais DURIEZ effectués avec ajout de fraisât nous constatons que le rapport : résistance immersion (r') / la résistance (R) à sec, évolue avec l'augmentation du pourcentage d'ajout des fraisât. Cela prouve que le matériau fraisât résiste à la compression, cette résistance est être dû au bitume vieilli, mélangé avec l'enrobé neuf le bitume devient plus mou une fois sorti de l'étuve ce qui le rend plus résistant à la compression.

Après renforcement avec le PRPLAST S, nous remarquons une augmentation de la résistance à la compression et plus le pourcentage d'ajout de granulat plastique augmente plus la résistance augmente.

Les résultats du rapport résistance après immersion sur résistance à sec pour les différentes formule avec ou sans renforcement, sont conformes aux spécifications SETRA- LCPC.

Toutes les formules présentent de meilleures performances en termes de résistance à la compression surtout après renforcement avec le PRPLAST.

### **6. 3. CONCLUSION :**

Les interprétations des résultats des essais effectués avec les différents pourcentages d'ajout de fraisât montrent clairement que le recyclage des chaussées peut être effectué sans contraintes jusqu'à 30% de matériau à recyclé malgré que la stabilité Marshall à ce pourcentage d'ajout est faible mais le rapport de stabilité sur le fluage, appelé quotient Marshall (MQ) renseigne sur la résistance du matériau à la déformation permanente en service [Hinislioglu & Agar 2004]. En calculons le MQ on aperçoit clairement que les mélanges résistent aux déformations permanentes par contre les résultats des essais Duriez effectués sur les différents mélanges, à la compression à sec ou en immersion à 18°C augmentent avec l'augmentation de l'ajout en fraisât.

Après renforcement effectué avec les granulats plastiques pour les mélanges, nous avons constatés qu'à partir de 6% d'ajout en PRPLAST les mélanges se comportent comme un enrobé neuf et s'a apparais clairement avec 30% d'ajout de fraisât qui le cas le plus défavorable des mélanges effectués.

Les essais Marshall et Duriez réalisés sur les mélanges béton bitumeux et fraisât nous ont permis de mieux caractériser leurs comportement et de déterminé le pourcentage d'ajout de fraisât optimal que l'on peu recyclé qui de 30% de ce matériau tout en restons dans les normes exigé par SETRA et LCTP ainsi que l'optimum d'ajout de granulats plastiques qui est de 6% pour atteindre les meilleurs résistances aux déformations permanentes du fluage ainsi que la compression à sec et l'ornierage.

## CONCLUSION GENERALE

Dans cette présente étude expérimentale, nous avons fixé comme objectif, le renforcement des bétons bitumineux recyclé par des granulats en plastiques pour une meilleure réutilisation du matériau FRAISAT.

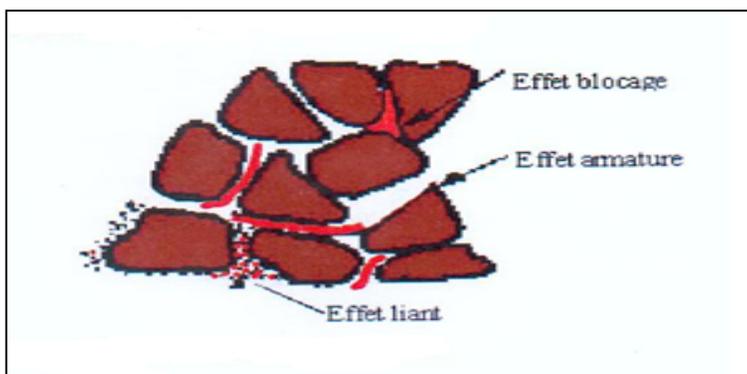
Les Fraisât utilisés dans la présente étude sont d'une ancienne chaussée semi rigide (0/14) d'un tronçon de l'autoroute Est Ouest à BOUIRA, leurs formulation à été proposé par l'entreprise de réalisation qui a été réalisée en 2001 COSIDER Travaux Publics et a été vérifier par le laboratoire LCTP.

Les matériaux qui ont été utilisé dans la formulation provenaient de la carrière ENG EL Hachimia. **Le bitume** qui a était utilisés dans la formulation est de classe **40/50**.

D'après les résultats des essais effectués avec les différents pourcentages d'ajout de fraisât on en déduit que le recyclage des chaussées peut être effectué sans contraintes jusqu'à 30% de matériau à recycler malgré que la stabilité Marshall à ce pourcentage d'ajout est faible.

Après renforcement effectué avec les granulats plastiques pour les mélanges, nous avons constaté que la résistance s'améliore dès le premier pourcentage d'ajout c a d avec 2% d'additif et augmente avec l'augmentation de ce dernier et commence à se stabilise à partir de 6% d'ajout en PRPLAST  
L'ajout de granulat plastique nous a permis d'obtenir trois effets qui sont:

1. un effet sur le liant dû à l'augmentation de la viscosité du bitume par dissolution vraie de certaines matières plastiques, ou dispersion à l'état fondu ;
2. un effet d'armature provoqué par les lanières ou les fibres plastiques encore suffisamment rigides et suffisamment longues, pour créer des ponts à l'intérieur du squelette granulométrique.
3. un effet bloquant dû aux plastiques ramollis provisoirement pendant la mise en œuvre, de taille courte et qui vont être thermoformés lors du compactage pour remplir les vides du squelette granulométrique.



Ce travail a été consacré sur l'évaluation des performances que peut apporter le procédé de renforcement du béton bitumineux recyclé avec des granulats plastique recyclé (PRPLAST S). Cette modification nous a permis d'une part, de recycler des déchets industriels fraisât et plastiques, et d'autre part, de corriger des formules d'enrobés bitumineux présentant une faible résistance aux déformations permanentes

Le thermo-recyclage est source d'économie de matières premières : granulat et bitume. Il contribue indirectement à la sauvegarde de l'environnement. Les conditions économiques et les progrès techniques réalisés ces dix dernières années montrent que ce type de technique offre des possibilités intéressantes pour les gestionnaires routiers, d'autant que l'amélioration permanente des matériels devrait apporter l'homogénéité souhaitée.

## ANNEXE 1

### TABLEAU 1 : CORRESPONDANCE ENTRE LES NOUVELLES ET ANCIENNES NORMES

Nouvelles normes NF EN	Anciennes normes NF P	Terminologie associée aux normes NF P
NF EN 13108-1 Enrobés Bitumineux	NF P 98-130	Béton Bitumineux Semi-Grenu (BBSG)
	NF P 98-131	Béton Bitumineux pour chaussées Aéronautiques (BBA)
	NF P 98-132	Béton Bitumineux Mince (BBM)
	NF P 98-136	Béton Bitumineux pour couche de surface de chaussées Souples à faible trafic (BBS)
	NF P 98-138	Grave Bitume (GB)
	NF P 98-140	Enrobés à Module Elevé (EME)
	NF P 98-141	Béton Bitumineux à Module Elevé (BBME)
NF EN 13108-2 Bétons Bitumineux Très Minces	XP P 98-137	Béton Bitumineux Très Mince (BBTM)
NF EN 13108-7 Bétons Bitumineux Drainants	NF P 98-134	Béton Bitumineux Drainant (BBDr)
NF EN 13108-8 Agréats d'enrobés	XP P 98-135	Caractérisation des agrégats d'enrobés pour recyclage à chaud en centrale

XP P 18-540	1997	Granulats- la terminologie usuelle des granulats selon leurs dimensions
NF P 18-560	SEPT 1990	Granulats- Analyse granulométrique par tamisage
NF P 18-561	SEPT 1990	Granulats-Mesures du coefficient d'aplatissement
NF P 18-572	DEC 1990	Granulats-Essai d'usure micro-deval
NF P 18-573	DEC 1990	Granulats-Essai Los Angeles
NF P 18-574	DEC 1990	Granulats-Essai de fragmentation dynamique
NF P 18-575	DEC 1990	Granulats-Mesure de coefficient de polissage accéléré des gravillons
NF P 18-578	SEPT 1990	Granulats-Mesure de la rugosité d'une surface à l'aide du pendule de frottement
NF P 18-591	SEPT 1990	Granulats- Détermination de la propreté superficielle
NF P 18-592	DEC 1990	Granulats- Essai au bleu de méthylène ; Méthode à la tache
NF P 18-593	DEC 1990	Granulats- Sensibilité au gel
NF P 18-597	DEC 1990	Granulats- Détermination de la propreté des sables : équivalent de sable à 10%
NF P 18-598	OCT 1991	Granulats- Equivalent de sable

### TABLEAU 2 –LES DIFFERENTES NORMES UTILISE DANS CE MEMOIRE

## ANNEX 2 - TERMINOLOGIE

Granulat	Matériau granulaire utilisé dans la construction. Un granulat peut être naturel, artificiel ou recyclé.
Granulat naturel	Granulat d'origine minérale n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique
Granulat artificiel	Granulat d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des modifications thermiques ou autres
Granulat recyclé	Granulat résultant de la transformation de matériaux inorganiques antérieurement utilisés dans la construction
Classe granulaire	Désignation des granulats en termes de dimension inférieure (d) et supérieure (D) de tamis, exprimée en d/D
Gravillon	Désignation des classes granulaires de grosse dimension, pour lesquelles D est inférieur ou égal à 45 mm et d supérieur ou égal à 2 mm
Sable	Désignation des classes granulaires de petite dimension, pour lesquelles D est inférieur ou égal à 2mm et dont le refus sur le tamis de 0.063 mm est important
Fines	Fraction granulaire passant au tamis de 0.063 mm
Filler	Granulat dont la plupart des grains passent au tamis de 0.063mm, et qui peut être ajouté aux matériaux de construction pour leur conférer certaines caractéristiques
Filler d'apport	Filler d'origine minérale, qui a été produit séparément
Grave	Granulat composé de gravillons et de sables
Granularité	Distribution dimensionnelle des grains exprimée en pourcentages de masse passant au travers d'un ensemble spécifié de tamis
Passant	Partie du granulat passant au travers le plus petit des tamis utilisés dans la désignation de la classe granulaire
Refus	Partie retenue du granulat sur le plus grand des tamis utilisés dans la désignation de la classe granulaire
Courbe granulométrique	Représentation graphique de la granularité, qui comporte l'indication des passants, exprimés en %, à différents tamis, exprimés en millimètres
Liant bitumineux	Matériau adhésif contenant du bitume
Liant hydrocarboné	Terme générique pour un matériau adhésif contenant du bitume, du goudron, ou les deux
Bitume	Matériau pratiquement non volatil, adhésif et hydrophobe, dérivé du pétrole brut ou présent dans l'asphalte naturel, qui est entièrement soluble dans le toluène ou presque, et très visqueux ou presque solide à la température ambiante
bitumineux	Adjectif applicable aux liants et mélanges de liants et de granulats contenant du bitume
Bitume routier	Bitume utilisé pour l'enrobage des granulats destinés à la construction et l'entretien des routes et des structures assimilées
Bitume modifié	Bitume dont les propriétés rhéologiques ont été modifiées pendant la fabrication par emploi d'un agent chimique
Bitume modifié aux polymères	Bitume modifié dans lequel le modificateur utilisé est un ou plusieurs polymères organiques

Bitume spécial	Bitume fabriqué au moyen de procédés et à partir de bases choisies afin de lui conférer des propriétés particulières le rendant apte à répondre à certaines exigences plus rigoureuses imposées pour les applications routières ou industrielles
Fluidifiant ou fluxant	Fluide ajouté à un autre pour en déduire la viscosité
Huile de fluxage	Huile peu volatile servant à la fabrication de bitume fluxé
Bitume fluidifié	Bitume dont la viscosité a été réduite en lui ajoutant un solvant assez volatil
Bitume fluidifié pétrolier	Bitume dont la viscosité a été réduite en ajoutant un solvant assez volatil dérivé du pétrole
Bitume fluxé	Bitume dont la viscosité a été réduite par l'ajout d'une huile de fluxage
Bitume fluxé pétrolier	Bitume dont la viscosité a été réduite par l'ajout d'une huile de fluxage dérivé du pétrole
Emulsion	Dispersion d'un liquide dans un autre liquide avec lequel il n'est pas miscible
Phase dispersée	Liquide qui a été dispersée en fines particules dans la phase continue
Phase continue	Liquide dans lequel on a dispersé la phase dispersée
Emulsifiant	Produit qui contribue à la formation d'une émulsion
Emulsion de bitume	Emulsion dans laquelle la phase dispersée est du bitume
Emulsion cationique de bitume	Emulsion dans laquelle l'émulsifiant confère une polarité positive aux particules dispersées de bitume
Emulsion de bitume - polymère	Emulsion dans laquelle la phase dispersée est un bitume modifié par des polymères ou bien une émulsion de bitume modifié avec du latex
Bitume naturel	Bitume assez dur que l'on trouve dans les dépôts naturels, souvent mélangé à des fines minérales plus ou moins grosses, qui est pratiquement solide à 25°C mais qui est un liquide visqueux à 175°C
Bitume résiduel	Bitume obtenu après départ de l'eau d'une émulsion ou des éléments volatils d'un bitume fluxé ou fluidifié
Liant clair	Liant de synthèse pour la fabrication d'enrobés colorés
Enrobés bitumineux	Mélange de granulats et d'un liant bitumineux
Enrobé hydrocarboné	Mélange de granulats et d'un liant hydrocarboné, et éventuellement de recyclés d'asphalte, de dopes et/ou d'additifs
Agrégats d'enrobés	Matériau granulaire obtenu par fraisage ou de la démolition d'enrobés bitumineux susceptible d'être recyclés en centrale au sein d'enrobés de recyclage à chaud. Ils peuvent encore être appelés 'recyclats' ou recyclés.
Masse volumique apparente	Masse par unité de volume, incluant les vides d'air, d'un corps d'épreuve à une température d'essai connue
Masse volumique réelle	Masse par unité de volume, sans vide d'air, du matériau bitumineux à une température d'essai connue

Vide	Volume d'air entre les granulats enrobés de bitume dans une éprouvette bitumineuse compactée
Pourcentage de vides	Volume de vides dans une éprouvette bitumineuse, exprimé en pourcentage du volume total de cette éprouvette
% extérieur	Pourcentage de liant rapporté à la masse de granulats secs
% intérieur	Pourcentage de liant rapporté à la masse du mélange bitumineux (granulats + liant + additifs éventuels)
Teneur en liant TL Teneur en liant tl	Rapport de la masse de liant hydrocarboné à la masse de granulats secs, exprimé en % extérieur Rapport de la masse de liant hydrocarboné à la masse total du mélange, exprimé en % intérieur
Couche d'accrochage	Pellicule de liant hydrocarboné répandue sur un support préalablement à la mise en oeuvre d'une couche d'enrobé, destiné à assurer le collage de cette dernière sur le support
Fraisage	Opération de désagrégation et d'enlèvement de matériau liés à l'aide d'un tambour rotatif équipé d'outils adaptés (dents, pics, couteaux,...)
Gravillonnage	Répendage d'une couche de gravillons
Mastic hydrocarboné	Mélange de fines et d'un liant hydrocarboné
Mortier hydrocarboné	Mélange de fines, de sable et d'un liant hydrocarboné
Préenrobage	Enrobage à froid ou à chaud en centrale de granulats avec un liant hydrocarboné, avant traitement ou usage ultérieur

### ANNEXE 3 LISTE DE REFERENCE DE QUELQUES NORMES

Référence de la norme	Titre
EN 12697-1	Mélange bitumineux – Essais pour mélanges hydrocarbonés à chaud – Partie 1 : Teneur en bitume
EN 12697-2	Mélange bitumineux – Essais pour mélanges hydrocarbonés à chaud – Partie 2 : Granulométrie
EN 12697-3	Mélange bitumineux – Essais pour mélanges hydrocarbonés à chaud – Partie 3 : Extraction des bitumes à l'évaporateur
EN 12697-5	Mélange bitumineux – Essais pour mélanges hydrocarbonés à chaud – Partie 5 : Masse volumique maximale (masse volumique réelle) des matériaux bitumineux
EN 12697-6	Mélange bitumineux – Essais pour mélanges hydrocarbonés à chaud – Partie 6 : Masse volumique apparente des éprouvettes bitumineuses
EN 12697-8	Mélange bitumineux – Essais pour mélanges hydrocarbonés à chaud – Partie 8 : Détermination des pourcentages de vides caractéristiques des éprouvettes bitumineuses
EN 12697-9	Mélange bitumineux – Essais pour mélanges hydrocarbonés à chaud – Partie 9 : Détermination de la masse volumique de référence
EN 12697-10	Mélange bitumineux – Essais pour mélanges hydrocarbonés à chaud – Partie 10 : Compactabilité
EN 12697-11	Mélange bitumineux – Essais pour mélanges hydrocarbonés à chaud – Partie 11 : Détermination de l'affinité entre granulats et bitume
EN 12697-12	Mélange bitumineux – Essais pour mélanges hydrocarbonés à chaud – Partie 12 : Détermination de la sensibilité à l'eau des éprouvettes bitumineuses
Mélange bitumineux – Essais pour mélanges hydrocarbonés à chaud – Partie 13 : Mesure de la température	
EN 12697-17	Mélange bitumineux – Essais pour mélanges hydrocarbonés à chaud – Partie 17 : Perte de particules de spécimen poreux d'asphalte
EN 12697-27	Mélange bitumineux – Essais pour mélanges hydrocarbonés à chaud – Partie 27 : Echantillonnage
EN 12697-28	Mélange bitumineux – Essais pour mélanges hydrocarbonés à chaud – Partie 28 : Préparation des échantillons pour la détermination de la teneur en liant, de la teneur en eau et de la granularité
EN 12697-29	Mélange bitumineux – Essais pour mélanges hydrocarbonés à chaud – Partie 29 : Détermination des dimensions des éprouvettes d'enrobés hydrocarbonés
EN 12697-31	Mélange bitumineux – Essais pour mélanges hydrocarbonés à chaud – Partie 31 : Confection d'éprouvettes à la presse à compactage giratoire
EN 12697-34	Mélange bitumineux – Essais pour mélanges hydrocarbonés à chaud – Partie 34 : Essai Marshall
EN 12697-35	Mélange bitumineux – Essais pour mélanges hydrocarbonés à chaud – Partie 35 : Malaxage en laboratoire
EN 12697-36	Mélange bitumineux – Essais pour mélanges hydrocarbonés

	à chaud – Partie 36 : Détermination des épaisseurs de chaussée bitumineuse
EN 12697-38	Mélange bitumineux – Essais pour mélanges hydrocarbonés à chaud – Partie 38 : Equipement commun et calibrage
EN 12697-40	Mélange bitumineux – Essais pour mélanges hydrocarbonés à chaud – Partie 40 : Perméabilité en place
EN 12697-43	Mélange bitumineux – Essais pour mélanges hydrocarbonés à chaud – Partie 43 : Résistance aux carburants
EN 12591	Bitumes et liants bitumineux – Spécifications des bitumes routiers
EN 14023	Bitumes et liants bitumineux – Spécifications des bitumes modifiés par des polymères
EN 1425	Bitumes et liants bitumineux – Caractéristiques des propriétés sensorielles
EN 1426	Bitumes et liants bitumineux – Détermination de la pénétrabilité à l'aiguille
EN 1427	Bitumes et liants bitumineux – Détermination de la température de ramollissement – Méthode Bille et Anneau
EN 12592	Bitumes et liants bitumineux – Détermination de la solubilité
EN 12593	Bitumes et liants bitumineux – Détermination du point de fragilité Fraaß
EN 12594	Bitumes et liants bitumineux – Préparation des échantillons d'essai
EN 13398	Bitumes et liants bitumineux – Détermination du retour élastique des bitumes modifiés
EN 13399	Bitumes et liants bitumineux – Détermination de la stabilité au stockage des bitumes modifiés
EN 13702-2	Bitumes et liants bitumineux – Détermination de la viscosité dynamique des bitumes modifiés – Partie 2 : Méthode au viscosimètre coaxial
NF P98-251-1	Essais relatifs aux chaussées : Essais statiques sur mélanges hydrocarbonés – Partie 1 : Essai Duriez sur mélanges hydrocarbonés à chaud
NF P98-218-3	Essais relatifs aux chaussées : Essais liés à l'uni – Partie 3 : Détermination de quantificateurs d'uni longitudinal à partir de relevés profilométriques
NF P98-220-2	Essais relatifs aux chaussées : Essais liés à l'adhérence – Partie 2 : Méthode permettant d'obtenir un coefficient de frottement longitudinal
NF P98-241-1	Essais relatifs aux chaussées : Mesure de la masse volumique des matériaux en place – Partie 1 : Mesure ponctuelle de la masse volumique moyenne apparente par gamma densimètre à transmission directe

## ANNEXE 4

### SPECIFICATIONS MINIMALES EN FONCTION DES CLASSES D'ENDUITS SUPERFICIELS D'USURE

Classe d'enduits			Chaussée routière				Chaussée aéronautique
			ESU0	ESU1	ESU2	ESU3	
Enduits	Rugosité minimale		R3	R2	R1bis		R1
	Aspect visuel minimal		V3	V2		V1	V3
Liant stabilisé	Minimum de la cohésion maximale		≥ 0,8 j/cm <sup>2</sup>				
Granulats (1) (2)	Classe		AI	BI	BII (4)	CII	BII
	CPA (5)		XP P 18-101 (*)	≥ 0,55	≥ 0,50		
	Rc Ic			Rc ≥ 4	Rc ≥ 2		Ic = 100
Dispositif d'épandage de liant	Tolérance (g/m <sup>2</sup> )		NF P 98-276	± 50		± 100	± 50
	CVT (%)	Poste fixe	NF P 98-276	≤ 5			
		In situ	NF P 98-275-1 NF P 98-275-2	≤ 10			
Dispositif d'épandage des gravillons	Tolérance (l/m <sup>2</sup> )		NF P 98-739 NF P 98-276-1	± 1			
	CVT (%)		NF P 98-739 NF P 98-276-2	≤ 10	≤ 15		≤ 10
Rejet			Balayage dans les 48 h		-		Elimination (3)
<p>(1) Les classes granulaires d/D utilisées en enduits superficiels sont 2/4 - 4/6,3 - 6,3/10 - 10/14 - 14/20.</p> <p>(2) Pour les chaussées aéronautiques, la classe granulaire maximale à utiliser est 2/4.</p> <p>(3) Pour les chaussées aéronautiques, le voile de scellement est obligatoire après élimination du rejet et avant mise en service.</p> <p>(4) Pour cette classe d'enduits, les granulats de type B II devront avoir une propreté inférieure ou égale à 0,5.</p> <p>(5) La règle de compensation 100 CPA par la somme des coefficients LA + MDE ou inversement s'applique.</p>							
(*) La norme XP P 18-101 est remplacée par la norme XP P 18-540 d'Octobre 1997.							

**Tableau 4.1 :Spécifications minimales en fonction des classes d'enduit superficielle d'usure**

Produits	Caractéristiques	Classe de trafic				
		CT <sub>1</sub>	CT <sub>2</sub>	CT <sub>3</sub>	CT <sub>4</sub>	CT <sub>5</sub>
BBA	Résistance mécanique des gravillons	C			B	
	Caractéristiques de fabrication des gravillons	III (II pour discontinu)				
	Caractéristiques de fabrication de sables	a				
	Angularité des gravillons et des sables	Ic ≥ 100	Rc ≥ 2			
BBSG, BBM ou BBME	Résistance mécanique des gravillons	C			B	
	Caractéristiques de fabrication des gravillons	III (II pour discontinu)				
	Caractéristiques de fabrication de sables	a				
	Angularité des gravillons et des sables	Rc ≥ 2				
BBTM	Résistance mécanique des gravillons	B				
	Caractéristiques de fabrication des gravillons	II				
	Caractéristiques de fabrication de sables	a				
	Angularité des gravillons et des sables	Rc ≥ 2				
ECF	Résistance mécanique des gravillons	C			B	
	Caractéristiques de fabrication des gravillons	III (II pour discontinu)				
	Caractéristiques de fabrication de sables	a				
	Angularité des gravillons et des sables	Ic ≥ 60		Ic = 100	Rc ≥ 2	
ESU	Résistance mécanique des gravillons	C	B	Sans objet		
	Caractéristiques de fabrication des gravillons	III	II	Sans objet		
	Caractéristiques de fabrication de sables	a			Sans objet	
	Angularité des gravillons et des sables	Ic = 100			Sans objet	
BBS	Résistance mécanique des gravillons	C			Sans objet	
	Caractéristiques de fabrication des gravillons	III			Sans objet	
	Caractéristiques de fabrication de sables	a			Sans objet	
	Angularité des gravillons et des sables	Ic = 100			Sans objet	
EP	Résistance mécanique des gravillons	C			B	
	Caractéristiques de fabrication des gravillons	III				
	Caractéristiques de fabrication de sables	a				
	Angularité des gravillons et des sables	Ic ≥ 60				

Tableau 4.2. : Spécifications des caractéristiques des granulats pour couche de roulement

Produits	Caractéristiques	Classe de trafic				
		CT <sub>1</sub>	CT <sub>2</sub>	CT <sub>3</sub>	CT <sub>4</sub>	CT <sub>5</sub>
Liaison BBA, BBSG, BBM BBME	Résistance mécanique des gravillons	sans objet	D (*) (**)	C (*)		D
	Caractéristiques de fabrication des gravillons	sans objet	III			
	Caractéristiques de fabrication de sables	sans objet	a			
Liaison sable enrobé	Résistance mécanique des gravillons	sans objet		C		
	Caractéristiques de fabrication des gravillons	sans objet		III		
	Caractéristiques de fabrication de sables	sans objet		a		
Assises GB, EME	Résistance mécanique des gravillons	sans objet	D		C	
	Caractéristiques de fabrication des gravillons	sans objet	III			
	Caractéristiques de fabrication de sables	sans objet	a			

**Tableau 4.3: Spécifications des caractéristiques des granulats pour couches de liaison et d'assise**

(\*) B pour BBA

(\*\*) C pour le BBM

Usage	Classe de trafic				
	CT <sub>1</sub>	CT <sub>2</sub>	CT <sub>3</sub>	CT <sub>4</sub>	CT <sub>5</sub>
Liaison	Ic ≥ 30	Ic ≥ 60	Ic = 100	Rc ≥ 2	
Base	Ic ≥ 30	Ic ≥ 60	Ic = 100		
Fondation	Ic ≥ 30	Ic ≥ 30	Ic ≥ 60		

**Tableau 4.4. : Spécifications d'angularité des granulats pour couches de liaison et d'assise**

## **BIBLIOGRAPHIE**

1. BÉGHIN A., *Apport de mesures rhéologiques et de pelage à l'analyse de la rupture de liants bitumineux*, Thèse de doctorat Université de Paris 6, 2003
2. BERTAUX J-M., LE CLERC S., MARCIANO Y., *Du comportement à froid des bitumes et des enrobés bitumineux*, *Revue générale des routes et aérodromes*, N°739 pp. 24-27, 1996.
3. BOUSSAD N., DONY A., *La rhéologie des liants : un outil performant pour prédire le module des enrobés*, *Revue générale des routes et aérodromes*, N°739, pp. 21-23, 1996.
4. BRÛLÉ B., *Liants bitumineux : Caractéristiques fonctionnelles et méthodes d'essais*, *Revue Générale Routes et Aérodromes*, N°758, pp. 71-77, 1998
5. CTPP, *Recommandation algériennes sur l'utilisation des bitumes et enrobés bitumineux à chaud*, MTP 2004.
6. DI BENEDETTO H., CORTE J.F., *Matériaux routiers bitumineux 1 : description et propriétés des constituants*, Hermès, 2004
7. HARLIN M., *Le bitume : Propriétés, caractéristiques, essais de laboratoire et spécifications*, Formation continue E.N.P.C. Session Couche de roulement, Paris, Novembre 1992.
8. IRASTORZA-BARBET D., *Recherche et innovation dans la profession routière*, *Revue Générale Routes et Aérodromes*, N°793, pp. 15-17, 2001
9. KENNEL M., *Morphologie et rôle des asphaltènes dans les bitumes routiers*, *Bulletin de liaison ponts et chaussées*, N° spécial V, pp. 73-78, 1977
10. KHATCHIRIAN N., *Quand le liant bitume-caoutchouc Flexochape® fait exploser les nouvelles spécifications du SHRP*, *Revue générale des routes et aérodromes*, N°732, pp. 25-30, 1995.
11. LECLERC A-M., MOREUX J., COTE D., TOURANGEAU G., *Caractérisation et guide de sélection des bitumes L'expérience du Québec*, *Revue générale des routes et aérodromes*, N°761, pp. 21-28, 1998.
12. LESAGE J., *Approche de caractérisation des bitumes améliorés, à l'aide de tests rhéologiques SHRP*, *Revue générale des routes et aérodromes*, N°739, pp. 31-33, 1996.
13. LOIZOS A., *Enrobés modifiés anti-orbiérants expérience crétoise*, *Revue Générale Routes et Aérodromes*, N°782, pp. 41-44, 2000
14. MIGLIORI F., GRÉGOIRE R., *Contribution de la distillation simulé à la caractérisation des liants hydrocarbonés*, *Bulletin de liaison ponts et chaussées*, N°181, pp. 47-52, 1992.
15. MURPHY M., O'MAHONY M., LYCETT C., JAMIESON I., *Recycled polymers for use as bitumen modifiers*, *Journal of Materials in Civil Engineering*, pp. 306-314, 2001.
16. OLARD F., DI BENEDETTO H., ECKMANN B., *Rhéologie des bitumes: Prédiction des résultats des tests de fluage BBR à partir des résultats de module complexe*, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, N°252-253, pp. 3-15, 2004
17. MEZIANI F., *Amélioration des caractéristiques mécaniques d'une couche de chaussée souples par des matériaux composites*, Thèse magister Université de Mouloud Mammeri de TiziOuzou, 2008
18. SAOULA S., *Approche Modéliste et Valorisation des Enrobés Modifiés par Ajout de Polymères - Impact sur l'Environnement*, Thèse de Doctorat Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, 2010.

19. SUCH C., RAMOND G., *Les spécifications SHRP sur les bitumes et la température de ramollissement bille et anneau, Bulletin de liaison ponts et chaussées, N°200, pp. 3-12, 1995*
20. HASSOUN B, *Contribution à la faisabilité du recyclage des enrobés bitumineux des chaussées en Algérie, Thèse magister Université de Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2009*
21. *GUIDE SETRA Guide technique Retraitement en place à froid des anciennes chaussées*
22. *CATALOGUE 3 : REVUE FRANCAISE Structure et types Chaussées*
23. TP ROUTES *Le recyclage tient la route - Toute l'info – revue française : Le Moniteur.fr*
24. CFTR – INFO *Enrobes bitumineux à chaud : mise en application des nouvelles normes NF EN*
25. Guy Bergeron, ing. M. Sc. *Ministère des Transports du Québec Service des chaussées Performance des techniques de retraitement en place et de recyclage à froid au Québec*
26. Jean-Georges MALLOUK, ing. *Les enrobés bitumineux tome 2 : Laboratoires*
27. Christian BABILOTTE CERTU et Michel FAURE. *Les cours de l'ENTPE, Cours de Routes tome 2, conception et dimensionnement des chaussées*
28. ZAKAR P., *Sur les tendances actuelles des recherches en matière de bitume, La Technique Routière 11, N°4, 1974.*
29. VÉRHÉE F., DELORME J-L., *Enrobés classiques et à module élevé. Bilan de comportement des enrobes à module élevé, Bulletin de liaison ponts et chaussées, N°172, pp. 43-46, 1991.*
30. M.HUET, J.C. POIRIER (1986), *Méthodologie d'étude en laboratoire des enrobés bitumineux de recyclage, bulletin de liaison Labo. P. et Ch., 144, juillet-août, pp. 89-93.*
31. BICHERON G., BRULÉ B., MIGLIORI F. (1986), *Régénération des liants pour enrobés : méthodologie d'étude en laboratoire. Exemple de quelques cas de chantiers, bulletin de liaison Labo. P. et Ch., 143, mai-juin, pp. 103-110.*
32. *Association Internationale Permanente des Congrès de la Route (AIPCR), (1995), Aspects sanitaires et environnementaux liés à l'utilisation des mélanges bitumineux*
33. Murphy, Daniel et John Emery (1997). *Evaluation of Modified Cold In-Place Asphalt Recycling Compte rendu des communications, 42e congrès annuel de l'Association canadienne des techniques de l'asphalte, vol. XLII, p. 84-106.*
34. Zeisner, G. F. (1995). *Cold In-Place Asphalt Recycling in the Regional Municipality of Ottawa-Carleton, AQTR, 30e congrès annuel, recueil des communications, T. 1, p. 159-170*
35. François OLARD, 2003, « *comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à basses températures, Relation entre les propriétés du liant et de l'enrobé* », *Thèse*
36. Scétauroute, 1997, *Manuel de conception des chaussées d'autoroutes, (4ème édition).*
37. Jean BERTHIER, professeur à l'Ecole Nationale des ponts et chaussées, *Techniques de l'ingénieur : projets et construction de routes, 1992*
38. Hervé BRUNEL, université d'Orléans I.U.T. de Bourges, *Département de génie civil : cours de routes 2007/2008*

39. P.MONERON, 1997, « retraitement à chaud des matériaux bitumineux en centrale »,  
LCPC Nantes
40. Luc Gagnon, 1982, « Techniques routières ».
41. DI BENEDETTO H., CORTE J.F., *Matériaux routiers bitumineux 1 : description et propriétés des constituants*, Hermès, 2004.
42. DI BENEDETTO H., CORTE J.F., *Matériaux routiers bitumineux 2 : constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges*, Hermès, 2004.
43. DI BENEDETTO H., PARTL M.N., FRANCKEN L., DE LA ROCHE SAINT ANDRE C., *Stiffness testing for bituminous Mixtures*, *Journal of Materials and Structures*, Vol. 34, pp. 66-70, 2001.
44. AJOUR et al., *Constitution et propriétés physico-mécaniques des bitumes*, *Journées d'information Bitumes et enrobés bitumineux*, pp 21-139, Paris, 1971.
45. GRAND-DUCHE DE LUXEMBOURG *Cahier des charges 'enrober à chaud' (CDC-ENR05)*  
PONTES ET CHAUSSEES
46. S. SAOULA, S<sup>1</sup>. HADDADI<sup>2</sup>, K. AIT MOKHTAR<sup>3</sup> – *performances mécaniques des bétons bitumineux modifiés à base d'additifs polymères -SBEIDCO-* ENSET Oran (Alegria) - Octobre 12-14, 2009
47. BULLETIN CRR, 1998, (*Centre de Recherches Routières*) N°34, P1.

Nom du document : memoire final déposé.docx  
Répertoire : C:\Documents and Settings\fd\Bureau  
Modèle : C:\Documents and Settings\fd\Application  
Data\Microsoft\Templates\Normal.dotm  
Titre :  
Sujet :  
Auteur : fd  
Mots clés :  
Commentaires :  
Date de création : 20/04/2011 10:20:00  
N° de révision : 84  
Dernier enregist. le : 02/05/2011 12:02:00  
Dernier enregistrement par : fd  
Temps total d'édition :269 Minutes  
Dernière impression sur : 02/05/2011 12:04:00  
Tel qu'à la dernière impression  
Nombre de pages : 161  
Nombre de mots : 40 330 (approx.)  
Nombre de caractères : 221 819 (approx.)