

UNIVERSITÉ KASDI MERBAH - OUARGLA -

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE ET SCIENCES DE LA MATIÈRE
Département de Génie Civil et d'Hydraulique



MÉMOIRE

Master Académique en Génie Civil

Option : Voies et Ouvrages D'arts

Présenté par : * HACHANI Mohamed Ibrahim

*** DAAS Djihad**

THÈME

Etude expérimental d'un béton bitumineux modifié à la poudrette de caoutchouc
-Influence du mode de modification-

Soutenu publiquement

Le 22 / 06 / 2013

Devant le jury :

M. ABIMOULOUD Youcef

Président

UKM Ouargla

M. BENTATA Aissa

Examineur

UKM Ouargla

M. KEBAILI Nabil

Encadreur

UKM Ouargla

Année Universitaire 2012/2013

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Tous d'abord on remercie le bon dieu de nous avoir aidés durant toute la période de nos études.

Nous tenons à remercier dignement, profondément et sincèrement notre encadreur Mr KEBAILI Nabil pour son aide, sa patience, ses orientations pour le développement de notre sujet de mémoire, par sa qualité de conseils et la finesse de ses jugements.

Ainsi qu'à Mr AOUAM Abdou pour avoir contribué par ses conseils, et son assistance.

Nous tenons à adresser nos sincères remerciements à tous le personnel de laboratoire des travaux publics du Sud de Ouargla qui ont participé à notre formation.

Sans oublier : Mr BENZID Gérant du laboratoire « Betta » et Mr hachemi du laboratoire LTPS pour leur aide et coopération.

Nous remercions toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin dans la réussite de ce travail.

En fin toute nos gratitude aux membres du jury qui nous ont fait l'honneur de juger ce travail.

Dédicaces

*Du fond du cœur,
Nous avons l'honneur de dédier
Le fruit de nos années d'études
Aux personnes*

Suivantes :

○ *A nos très chers parents :*

Merci pour tous les sacrifices et tous les encouragements que vous avez déployé à notre égard. Tous les mots ne suffisent pas pour exprimer notre amour et notre appréciation à vous. Nous vous devons tout. Puisse dieu vous accorde santé et longue vie.

○ *A nos professeurs et enseignants*

Nous vous remercions pour toutes les informations que vous nous avez données, qui ont contribué à réaliser cette étude et qui nous aideront dans la vie professionnelle.

○ *A nos Collègues, amis et tous les étudiants de Génie civil*

On vous dédie ce travail avec notre gratitude et notre grand respect.

Sommaire

INTRODUCTION GÉNÉRALE	01
Chapitre I : Généralités sur les matériaux	
-1- LES LIANTS HYDROCARBONES	05
1. DÉFINITION	05
2. PROPRIETES	05
3. CLASSIFICATION DES LIANTS HYDROCARBONÉS	06
4. LES ESSAIS SUR LE BITUME PUR	07
4.1 Essai de pénétrabilité	07
4.2 Essai de ramollissement Bille et Anneau	08
4.3 Essai de densité relative « méthode du pycnomètre »	09
-2- LES GRANULATS	11
1. DÉFINITION	11
2. FAMILLES DE GRANULATS	11
3. LES ESSAIS SUR LES GRANULATS	12
3.1 Analyse granulométrique	12
3.2 Propreté superficielle	13
3.3 Essai d'aplatissement	13
3.4 Essai Los Angeles	13
3.5 Essai micro-deval en présence d'eau (MDE)	13
3.6 Essai d'équivalent de sable à 10 % des fines	13
3.7 Analyse chimique sommaire	14
4. CONCLUSION	14
Chapitre II : Généralités sur les enrobés bitumineux	
1. DÉFINITION	16
2. DIFFERENTS TYPES D'ENROBES BITUMINEUX	16
3. ÉTUDE DE FORMULATION	17
3.1 Composition granulométrique	17
3.2 Teneur en liant	17
3.3 La compacité	18
4. LES DIFFERENTS NIVEAUX DE FORMULATION	19
5. LES ESSAIS SUR LES ENROBES BITUMINEUX	20
5.1 Essai Marshall	20
5.2 Essai Duriez	24
6. FORMULATION EN ALGERIE	28
7. CONCLUSION	29

Chapitre III : Aperçu sur les polymères	
1. DÉFINITION	31
2. CLASSIFICATION DES POLYMÈRES	31
3. CAOUTCHOUC	34
4. ENROBE BITUMINEUX MODIFIÉS	35
5. CONCLUSION	36
Chapitre IV : Caractérisation des matériaux utilisés	
1. INTRODUCTION	38
2. LES MATÉRIAUX UTILISÉS	39
3. CARACTÉRISTIQUE DES MATÉRIAUX UTILISÉS	39
3.1 Le bitume	39
3.2 Les granulats	40
3.3 La poudre de caoutchouc	42
4. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS	42
Chapitre V : Formulation et résultats	
1. INTRODUCTION	44
2. ÉTUDE DE FORMULATION	45
2.1 Composition granulaire	45
2.2 Détermination de la teneur en bitume	46
2.3 Performances mécanique	47
3. DÉTERMINATION DE LA TENUEUR EN BITUME OPTIMALE	48
4. CONCLUSION	48
Chapitre VI : Enrobé modifié à la poudre	
1. INTRODUCTION	50
2. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES DEUX MODES	50
2.1 Mode A	50
2.2 Mode B	55
3. SYNTHÈSE GLOBALE ET COMPARAISON	59
4. CONCLUSION	62
CONCLUSION GÉNÉRALE	63
ANNEXES	-
HORS TEXTE	-
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	-

LISTE DES FIGURES

Figure I.1	Liants hydrocarbonés	06
Figure I.2	Composition du bitume	07
Figure I.3	Principe de l'essai de pénétrabilité	08
Figure I.4	Principe de ramollissement	08
Figure I.5	Les deux familles de granulats	11
Figure I.6	Les tamis utilisés selon les classes granulaires	12
Figure II.1	Les types des enrobés bitumineux	16
Figure II.2	Détermination de La compacité	18
Figure II.3	Niveaux de l'épreuve de formulation	19
Figure II.4	Schéma du moule et piston	24
Figure II.5	Organigramme de formulation d'enrobés bitumineux en Algérie	29
Figure III.1	Exemple d'unité du polymère	31
Figure III.2	Les différentes structure des polymères	32
Figure IV.1	La granulométrie des trois classes et fuseaux de référence	41
Figure V.1	Procédure de formulation normalisée	44
Figure V.2	Composition granulaire du béton bitumineux 0/14	45
Figure V.3	Courbe granulométrique et fuseau du mélange 0/14	45
Figure VI.1	Compacités en fonction de la teneur en déchets (Mode A)	51
Figure VI.2	Stabilités en fonction de la teneur en déchets (Mode A)	51
Figure VI.3	Fluage en fonction de la teneur en déchets (Mode A)	52
Figure VI.4	Quotients Marshall en fonction de la teneur en déchets (Mode A)	53
Figure VI.5	Vitesse sonique en fonction de la teneur en déchets (Mode A)	54
Figure VI.6	Etapas de compensation par la poudrette (Mode B)	55
Figure VI.7	Compacités en fonction de la teneur en déchets (Mode B)	56
Figure VI.8	Stabilités en fonction de la teneur en déchets (Mode B)	57
Figure VI.9	Fluage Marshall en fonction de la teneur en déchets (Mode B)	57
Figure VI.10	Quotient en fonction de la teneur en déchets (Mode B)	58
Figure VI.11	Quotient en fonction de la teneur en déchets (Mode B)	58
Figure VI.12	Schéma explicatif d'hétérogénéité en mode B	60
Figure VI.13	Comparaison entre éprouvette modifiée (12%) et l'éprouvette témoin	61

LISTE DES PHOTOS

Photo I.1 Le pycnomètre	09
Photo II.1 Préparation d'une éprouvette témoin pour l'essai Marshall	21
Photo II.2 Application de la compression (Marshall)	23
Photo II.3 La compression (Duriez)	27
Photo III.1 Le polymère	31
Photo VI.1 Essai ultrasonique sur éprouvette de béton bitumineux	53

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 Classification des bitumes purs	10
Tableau II.1 Le fuseau granulométrique du BB 0/14 et GB 0/20	17
Tableau III.1 Exemples des polymères usuels	33
Tableau IV.1 Origines des matériaux utilisés	39
Tableau IV.2 Caractéristiques du bitume utilisée	39
Tableau IV.3 Caractéristiques géotechniques des granulats utilisés	40
Tableau V.1 Teneurs en bitume	46
Tableau V.2 Performances mécaniques des mélanges	47
Tableau V.3 Performances du béton bitumineux 0/14 retenue	48
Tableau V.4 Composition optimale du mélange retenue	48
Tableau VI.1 Synthèse des résultats « mode A »	55
Tableau VI.2 Synthèse des résultats « mode B »	59
Tableau VI.3 Évaluation générale entre les trois types d'enrobés	62

الخلاصة

تعتبر النفايات المطاطية في اغلب الاحيان تهديدا للبيئة بسبب تواجدها الكثيف و بطء قابليتها للتحلل. يهدف هذا البحث الى تثمين المسحوق المطاطي في طبقة السير. ويتعلق الامر بتعديل سلوك الاسفلت بإضافة هذا المسحوق المستخلص من المواد المطاطية المخصصة لصنع نعال الاحذية.

يهدف هذا البحث التجريبي الى تقييم و مقارنة بعض خصائص الاسفلت المعدل وفق طريقتين:

• طريقة أ : ادماج هذا المسحوق بدلا من كتل معينة من الزفت

• طريقة ب: ادماج هذا المسحوق بدلا من كتل معينة من الرمل.

نلاحظ على اية حال, ان اضافة هذا المسحوق المطاطي يحسن بشكل كبير الخصائص الميكانيكية للخلطات الاسفلتية.
الكلمات المفتاح : الاسفلت – المسحوق المطاطي.

Résumé

Les déchets caoutchouteux en fin de cycle constituent souvent une menace pour l'environnement du fait de leur encombrement et faible biodégradabilité.

Le travail de recherche présenté a pour but de valoriser la poudrette de caoutchouc en couche de roulement. Il se rapporte au comportement d'un enrobé modifié suite à l'ajout de poudrettes issues du broyage des produits caoutchouteux destinés à la confection des semelles de chaussures.

L'objectif de l'expérimentation est d'évaluer et de comparer la variation de certains caractéristiques des enrobés bitumineux modifiés de deux façons différentes.

- Mode A : adjonction de la poudrette de caoutchouc dans le mélange relativement à la masse de bitume.
- Mode B : adjonction de la poudrette de caoutchouc dans le mélange relativement à la masse de sables.

On notera toutefois, que l'apport des poudrettes de caoutchoucs entraine une grande amélioration au niveau des propriétés mécaniques des enrobés bitumineux.

Mots clés : enrobé bitumineux – poudrette de caoutchouc.

Abstract

Waste rubbers in the end of the cycle are often a threat to the environment because of their congestion and low bio-degradability.

The present research aims to enhance the crumb rubber wearing course. It refers to the behavior of modified asphalt following the addition of crumb, from the crushing of rubber products intended for making shoe soles.

The objective of the experiment is to evaluate the performance improvement of the modified asphalt in two edit mode:

- Mode A: introducing the fine powder in the mixture relative to the mass of bitumen.
- Mode B: introducing the fine powder in the mixture relative to the mass of sand.

We note, however, that the addition of crumb rubber in the asphalt has a great influence on its characteristics.

Keywords: asphalt – rubber crumb.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'amélioration des caractéristiques des chaussées routières souples s'avère indispensable devant la croissance du trafic et le tonnage de plus en plus important des véhicules. Cette amélioration s'est développée, entre autre, par l'introduction de nouvelles techniques et procédés de modification des enrobés bitumineux ; ceci constitue un axe de recherche très étudié à travers le monde ces dernières années.

L'utilisation et l'amélioration des performances du bitume font donc l'objet de nombreuses recherches. Les expériences internationales et nationales ont montré que l'amélioration des propriétés mécaniques de l'enrobé de la couche de roulement peut se faire soit par adjonction du polymère ou l'un de ses dérivés au liant lors de la modification (procédé humide), soit par les ajouts au mélange hydrocarboné lors de l'opération de malaxage (procédé sec).

Dans cette étude, nous avons choisi, comme modifiant le déchet de caoutchouc provenant de la Société d'Application d'Elastomère, SAEL d'Oued-Smar. La modification concerne un béton bitumineux 0/14, effectuée selon le procédé sec. Ce travail est concentré sur l'influence du modifiant et du mode de modification sur les caractéristiques mécaniques de l'enrobé.

Notre poudrette provenant d'un caoutchouc synthétique ne fondent pas ; alors il ne correspond ni à la viscosité de bitume ni à la dureté de sable. Donc la question qui se pose est « le quelle de ces composant «sable 0/3 - bitume » se remplace efficacement par la poudrette de caoutchouc ? ».

C'est pour cela qu'on a effectué cette recherche intitulé «Etude expérimental d'un béton bitumineux modifié à la poudrette de caoutchouc - Influence du mode de modification » afin de répondre à cette question, par exécuter une étude expérimentale sert à comparer des éprouvettes modifiées à la poudrette de caoutchouc selon deux modes de modification :

- **Mode A** : compensation de la poudrette de caoutchouc à la place du bitume suivant des pourcentages déterminés.
- **Mode B** : compensation de la poudrette de caoutchouc à la place du sable 0/3 suivant des pourcentages déterminés.

Donc le but final de notre recherche est de trouver le mode de modification et la teneur de caoutchouc qui aboutit l'enrobé le plus performant.

Pour atteindre ce but, on a scindé le présent travail en deux parties :

- Partie bibliographique
- Partie expérimentale

La partie bibliographique, qui renferme les notions de base nécessaires à la compréhension du contenu du mémoire, se divise en trois (03) chapitres :

Chapitre I : GÉNÉRALITES SUR LES MATERIAUX

Ce chapitre contient des notions générales sur les principaux composants des mélanges hydrocarbonés « les liants hydrocarbonés – les granulats ». On a cité aussi les essais requis pour ces deux composants.

Chapitre II : GÉNÉRALITES SUR LES ENROBÉS BITUMINEUX

Ce chapitre est destiné à parler sur l'enrobé bitumineux par le définit et cité ses différents types, puis la méthode de formulation adopté dans notre expérimentation, en fine une explication détaillée sur les essais « Marshall et Duriez ».

Chapitre III : APERÇU SUR LES POLYMÈRES

Dans ce chapitre on a essayé de parler d'une façon générale du polymère et de ses nombreux types et de leur composition chimique. Et aussi de l'utilisation de ce produit dans les travaux routier et les deux procédé de modification « sèche, humide ».

La seconde partie « expérimentale » se divise en trois (03) chapitres :

Chapitre IV : CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISÉS

Ce chapitre présente l'origine des matériaux utilisés dans les mélanges hydrocarbonés « bitume-granulats-caoutchouc » et il englobe les résultats des essais qui les caractérisent.

Chapitre V : RESULTATS DE FORMULATION

Ce chapitre contient une étude de formulation détaillée pour trouver la composition optimale menant au mélange ordinaire le plus performant.

Chapitre VI : ENROBÉ MODIFIÉ À LA POUDRETTE

Ce chapitre traite tout les résultats expérimentaux concernant les mélange modifiés selon les deux modes A et B, puis l'analyse de ces résultats et les interprètent afin de trouver le mode de modification le plus performant.

Et enfin nous terminons ce travail par une conclusion générale.

Chap I. GÉNÉRALITÉS SUR LES MATERIAUX

1) LES LIANTS HYDROCARBONÉS

1. DÉFINITION

Un liant hydrocarboné est un matériau adhésif contenant du bitume, du goudron, ou les deux. La masse volumique du bitume est généralement prise égale à 1,03 t/m³.

L'itinéraire historique d'utilisation des liants hydrocarbonés en domaine routier peut être schématisé selon les périodes suivantes :

De 1900 à 1930 : Goudron de houille

De 1930 à 1950 : Emulsions de bitumes

Jusqu'en 1970 : les bitumes purs

Les années 70 : les bitumes polymères

Les années 80 : les liants modifiés et les additifs

Les années 90 : les bitumes spéciaux

2. PROPRIÉTÉS

Les qualités physiques et chimiques du bitume ont fait de lui un matériau de toute première importance

- Il possède un grand pouvoir agglomérant car il adhère à la majorité des matériaux usuels : pierre, béton, bois, métal, verre.
- C'est un excellent isolant électrique.
- Il est léger, ductile et souple. Du point de vue mécanique, il se comporte comme un matériau plastique.
- Il est insoluble dans l'eau, mais l'on peut en obtenir des solutions dans des nombreux solvants organiques. Il est pratiquement inerte vis-à-vis de la plupart des agents chimiques usuels. [1]

3. CLASSIFICATION DES LIANTS HYDROCARBONÉS

Selon leur structure :

- Goudron de houille
- Bitume pur « naturel »
- Bitume fluidifié,
- Bitume fluxé, Émulsion de bitume
- Bitume modifié
- Bitumes spéciaux.

Selon leur usage :

- Bitume routier
- Bitume industriel

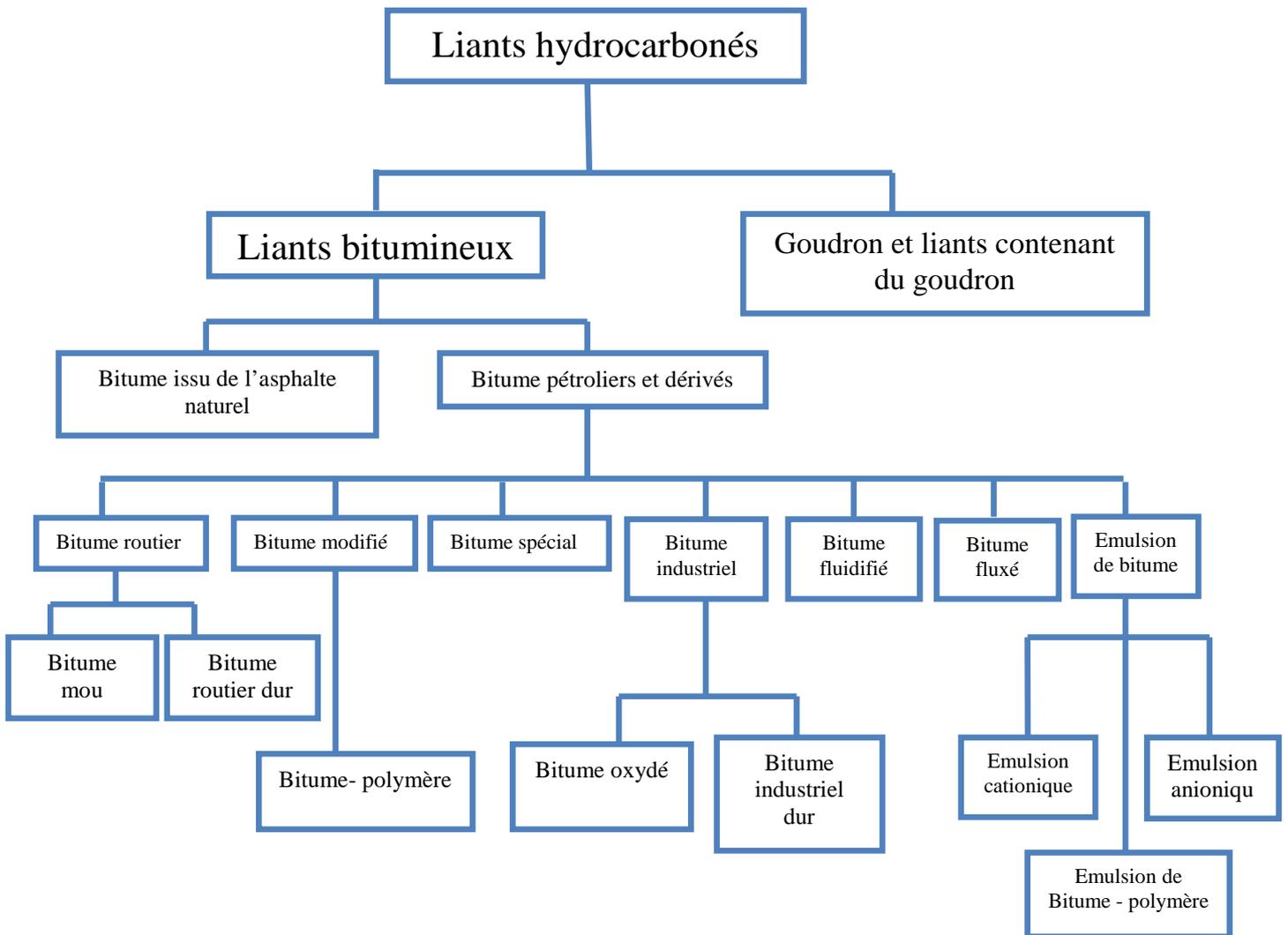


Figure I.1 Liants hydrocarbonés [1]

Le bitume se compose généralement de deux grandes composantes [1]

- **Les asphaltènes «partie solide»** : Ils constituent le corps du bitume et représentent jusqu'à 30% du bitume. Leur point de ramollissement est très élevé «supérieur à 150 °C». Le pourcentage d'asphaltènes croît avec la dureté du bitume.
- **Les maltènes «partie huileuse»** : Ils représentent 70 à 100% du bitume. Ils sont constitués essentiellement par les résines et les huiles.

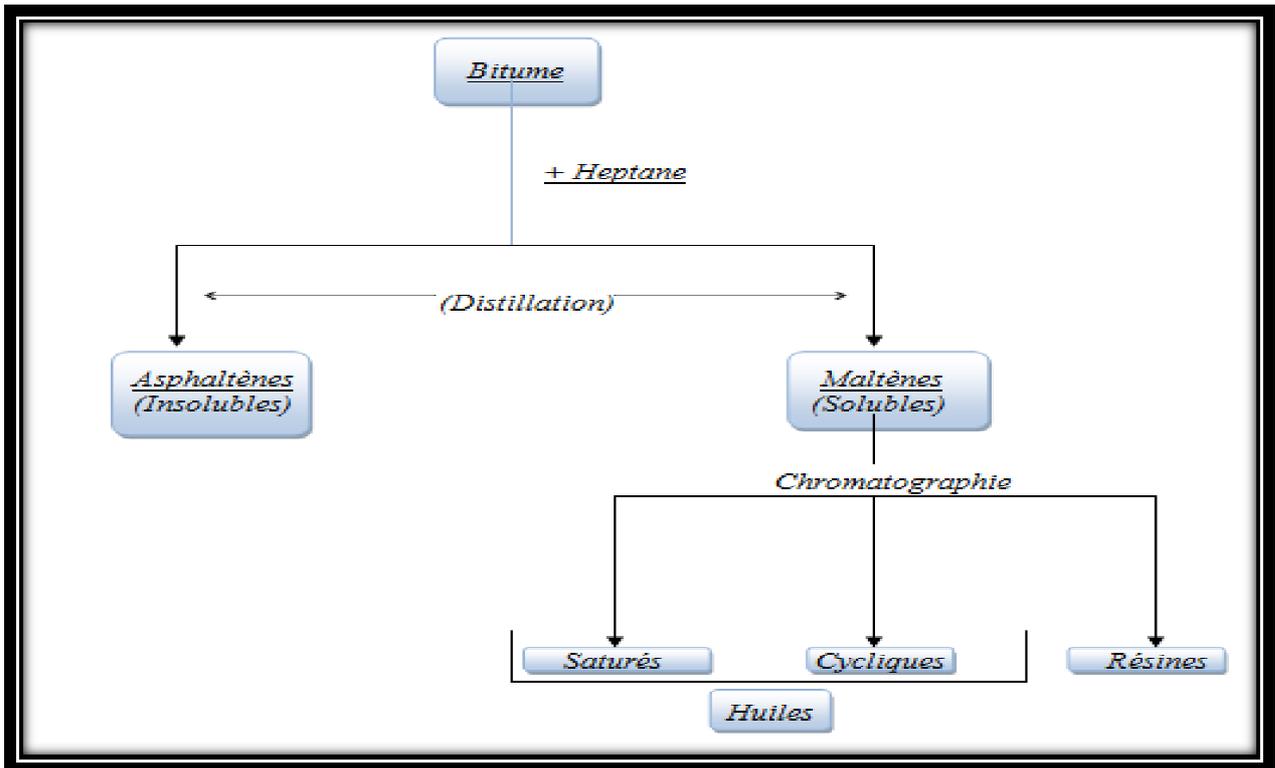


Figure I.2 Composition du bitume

4. LES ESSAIS SUR LE BITUME PUR

4.1 Essai de pénétrabilité (NF EN 1426 - Décembre 1999)

4.1.1 Définition : la pénétrabilité est un essai de classification de bitume ; elle concerne à classer le bitume selon des intervalles des valeurs des profondeurs aux lesquelles une aiguille les pénétrera dans des conditions prescrites de température, de charge et de durée d'application de la charge.

4.1.2 Principe d'essai : mesurer la pénétration d'une aiguille de référence dans l'échantillon d'essai conditionné (bitume). Les conditions opératoires qui s'appliquent aux pénétrations inférieures ou égales à (500 x 0,1mm), sont : Température 25 °C, Charge appliquée 100g, Durée d'application de la charge 5s.

Pour les pénétrations supérieures à cette limite, la température d'essai doit être de 15 °C, alors que la charge appliquée et sa durée d'application restent inchangées.

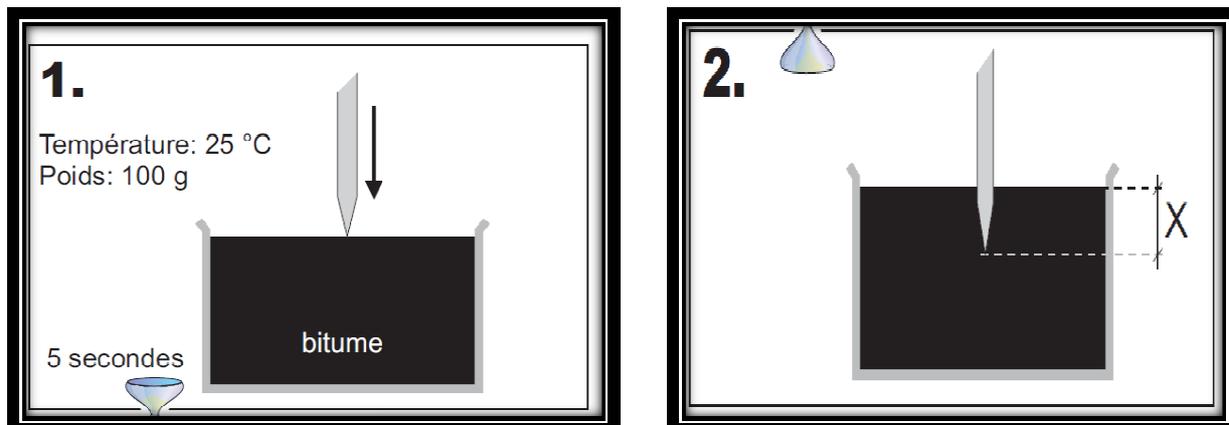


Figure I.3 Principe de l'essai de pénétrabilité

4.2 Essai de ramollissement Bille et Anneau (NF EN 1427 - janvier 2000)

4.2.2 Définition: Température de ramollissement c'est à laquelle le matériau dans les conditions de référence de l'essai atteint une certaine consistance. Donc cet essai concerne à déterminer la température du ramollissement des bitumes et des liants bitumineux, dans la plage des températures de 30 °C à 150 °C.

4.2.2 Principe d'essai : Deux disques horizontaux de bitume, moulés dans des anneaux de laiton à épaulement, sont chauffés dans un bain liquide avec un taux d'élévation de la température contrôlé, alors que chacun soutient une bille d'acier. La température de ramollissement notée doit correspondre à la moyenne des températures auxquelles les deux disques se ramollissent suffisamment pour permettre à chaque bille, enveloppée de liant bitumineux, de descendre d'une hauteur de 25mm.

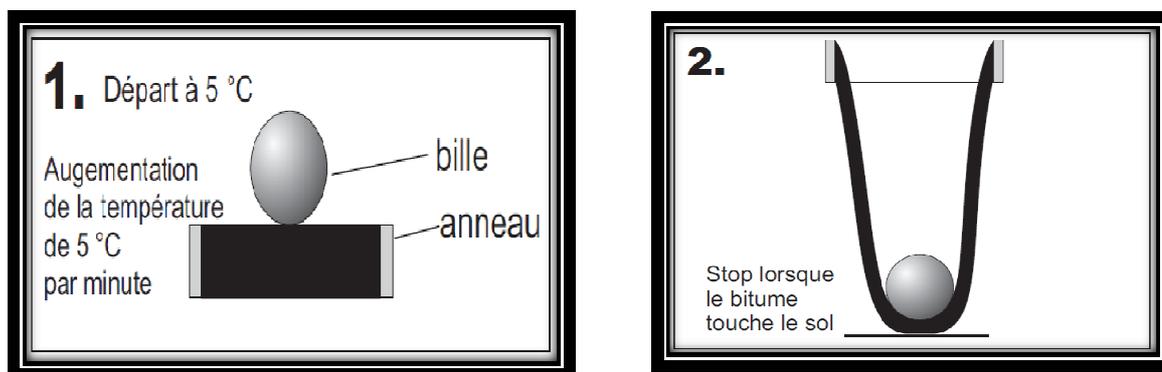


Figure I.4 Principe de ramollissement

4.3 Essai de densité relative « méthode du pycnomètre » (NF EN 15326 - juin 2007)

4.3.1 Définition: Tous les matériaux ont ses densités relatives. La détermination de la densité et la masse volumique des liants bitumineux est indispensable dans les calculs de la compacité.

4.3.2 Principe d'essai : La masse d'un échantillon de bitume et la masse du liquide d'essai correspondant à des volumes identiques sont comparées. L'égalité des volumes est assurée par le remplissage du pycnomètre et par le débordement du liquide.

Le pycnomètre calibré est rempli aux trois quarts de sa capacité avec le liant bitumineux dont on cherche la masse volumique ; il est pesé avec le bouchon. Le pycnomètre est rempli avec un liquide d'essai et pesé à nouveau.



Photo I.1 Le pycnomètre

Tableau I.1 : Classification des bitumes purs

Caractéristique	Méthode normalisée de référence	Classe					
		20 - 30	40 - 50	60 - 70	80 - 100	180 - 220	
Pénétrabilité à 25°C,100g ,5S	1/10 ^e mm	NF T-66 - 004	20/30	40/50	60/70	80/100	180/220
Ductilité à 25°C	cm	NF T-66 - 006	≥ 25	≥ 60	≥ 80	≥ 100	≥ 100
Densité relative à 25°C		NF T-66 - 007	1,0–1,1	1,0–1,1	1,0–1,1	1,0 -1.07	1,0 -1.07
Point de ramollissement bille et anneau (TBA)	°C	NF T-66 - 008	52/68	47/60	43/56	41/51	34/43
Perte de masse au chauffage	%	NF T-66 - 011	-	-	-	-	≤ 2
Pénétrabilité restante après perte de masse au chauffage		NF T-66 - 011	-	-	-	-	≥ 70
Solubilité	%	NF T-66 - 012	≥ 99,5	≥ 99,5	≥ 99,5	≥ 99,5	≥ 99,5
Teneur en paraffine	%	NF T-66 - 015	≤ 4,5	≤ 4,5	≤ 4,5	≤ 4,5	≤ 4,5
Point de fragilité Fraass	°C	NF T 66 - 026	-	-	-	≤ -10	≤ -13
ΔT bille et anneau après RTFOT ⁽¹⁾	°C	NF T 66 - 032	≤ 8	≤ 8	≤ 8	≤ 9	-
TBA minimale après RTFOT ⁽¹⁾	°C	NF T 66 - 032	≥ 57	≥ 52	≥ 47	≥ 44	-
Pénétrabilité restante après RTFOT ⁽¹⁾	%	NF T 66 - 032	≥ 60	≥ 60	≥ 60	≥ 55	-
Point d'éclair	°C	NF T-66 - 118	≥ 250	≥ 250	≥ 230	≥ 230	≥ 230

(1) :Rolling Thin Film Oven Test.

2) LES GRANULATS

1. DÉFINITION

On appelle granulats un ensemble de grains minéraux, de dimension comprise entre 0 et 125mm, de provenance naturelle ou artificielle destinés à la confection : [2]

- Des mortiers, des bétons.
- Des couches de fondation, des couches de base de roulement de chaussée.
- Des assises de ballastes de voies ferrées.

Les granulats utilisés dans les travaux de génie civil doivent répondre à des impératifs de qualité et de caractéristiques propres à chaque usage.

Leur nature et leur forme varient en fonction des gisements et des techniques de production.

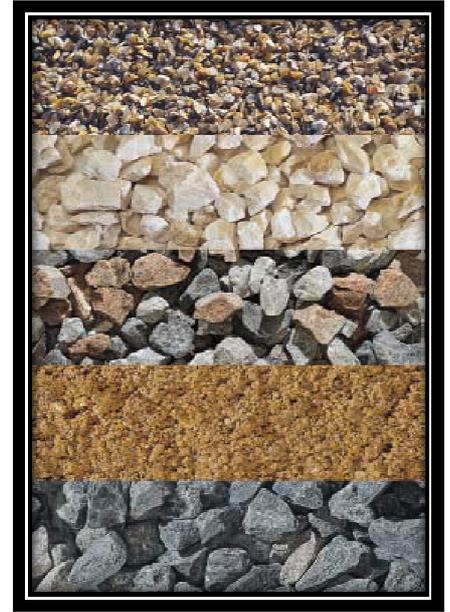


Photo I.2 Les granulas

2. FAMILLES DE GRANULATS [3]

On peut classer les granulats en deux grandes familles :

- Granulats naturels ;
- Granulats artificiels légers.

La figure suivante représente ces deux familles avec plus de détails :

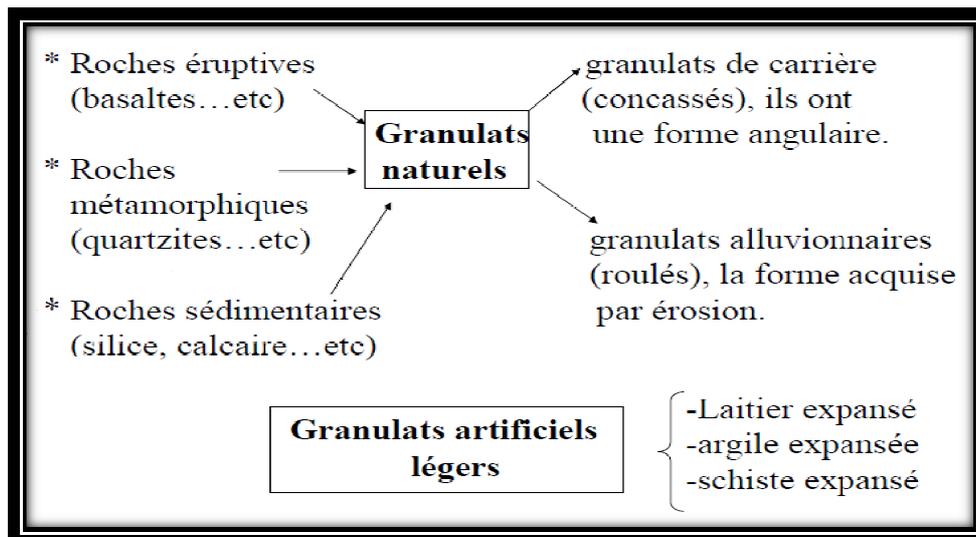


Figure I.5 Les deux familles de granulats

3. LES ESSAIS SUR LES GRANULATS

3.1 Analyse granulométrique (EN FN 933-1 - mai 2012)

3.1.1 But de l'essai : L'analyse granulométrique consiste à classer en classes granulaires un échantillon d'essai ou une masse de concassé ou roulé.

L'essai à pour but de déterminer en poids la distribution des grains du matériau, on sépare par tamisage les plus gros éléments jusqu'à 0,08mm puis par sédimentation les éléments inférieurs à 0,08mm.

3.1.2 Principe d'essai : L'analyse granulométrique consiste à fractionner des granulats au moyen d'une colonne de tamis dont les dimensions des mailles sont normalisées et décroissantes du haut vers le bas.

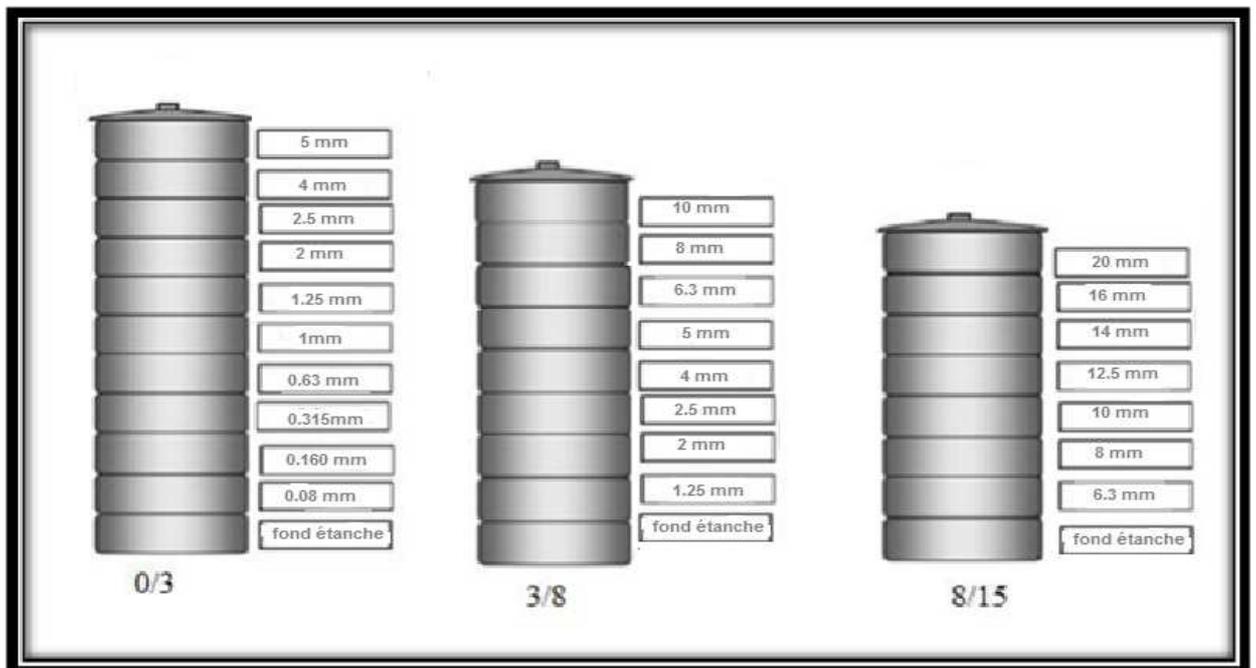


Figure I.6 Les tamis utilisés selon les classes granulaires

- On trace la courbe granulométrique après le calcul du pourcentage des tamisâtes partiels par la formule suivante :

$$Tamisa (i)\% = 100 - refus (i) \%$$

- En abscisse : les dimensions des mailles en échelle logarithmique ;
- En ordonnée : les pourcentages sur une échelle arithmétique ;
- La courbe doit être tracée de manière continue.

3.2 Propreté superficielle (NF P 18-591 septembre 1990)

La propreté superficielle est définie comme étant le pourcentage pondéral des particules inférieures à 0,5mm mélangées ou adhérentes à la surface des granulats supérieurs à 2mm. Ces particules sont séparées par lavage sur le tamis correspondant.

3.3 Essai d'aplatissement (EN FN 933-3 mars 1997)

Plus les gravillons sont plats, moins leur mise en place dans la route ou dans les bétons est facile et plus ils sont fragiles. Il est donc important de contrôler le coefficient d'aplatissement des granulats. Ce coefficient permet de caractériser la forme plus ou moins massive des granulats.

3.4 Essai Los Angeles (NF P 18-573 Décembre 1990)

Cet essai permet de déterminer la résistance aux chocs des granulats. Il simule les chocs des roues des véhicules sur une route.

L'essai consiste à introduire des gravillons dans le cylindre de la machine Los Angeles. Lors de sa rotation, les granulats sont heurtés par des boulets plus lourds que les gravillons. La masse des éléments inférieurs à 1,6mm à la fin de l'essai donne la résistance aux chocs du granulat. Plus le résultat est faible, plus le granulat est résistant aux chocs.

3.5 Essai micro-deval en présence d'eau (MDE) (NF P 18-572 Décembre 1990)

Cet essai permet de déterminer l'usure d'une chaussée sous l'effet de frottements (pneus des véhicules).

L'essai consiste à introduire des granulats dans le cylindre de la machine MDE, avec de l'eau et des billes de taille normalisée équivalente à celle des gravillons. Lors de la rotation du cylindre, les gravillons frottent sur les billes. La masse des éléments inférieurs à 1,6mm à la fin de l'essai donne la résistance à l'usure du granulat. Plus le résultat est faible, plus le granulat est résistant à l'usure.

3.6 Essai d'équivalent de sable à 10 % des fines (NF P 18-572 Décembre 1990)

L'essai d'équivalent de sable à 10% de fines permet de mesurer la propreté d'un sable sur la fraction passant au tamis de 2mm, et dont la proportion des éléments fins passant au tamis de 0.08mm a été ramenée à 10% à l'aide d'un sable correcteur si nécessaire.

L'essai consiste à introduire la fraction 0/2mm d'un sable ayant 10% de fines dans une éprouvette graduée, puis à séparer les fines des éléments plus grossiers par immersion et agitation dans une solution flocculant de chlorure de calcium. Après un repos de 20 min, la hauteur de sédiment (h_2) et la hauteur totale de sédiment + la hauteur de flocculat (h_1) sont mesurées.

On en déduit l'équivalent de sable. Plus le résultat est élevé, plus les fines sont moins argileuses.

3.7 Analyse chimique sommaire (NF P15-461version 1964)

L'analyse chimique des granulats consiste à déterminer le taux des composants suivants :

- Les Insolubles
- Les Carbonates CaCO_3
- Les chlorures NaCl
- Les sulfates CaSO_4

Ces essais sont effectués afin de vérifier l'efficacité et la compatibilité de ces granulats entre eux et le liant utilisé.

4. CONCLUSION

Dans ce chapitre on a essayé d'aborder brièvement les deux principaux composants d'un enrobé bitumineux, d'abord dans la première partie on a défini d'une façon générale les liants hydrocarbonés et on a cité ses différents types ; ensuite on a ajouté une petite précision sur les bitumes purs, leur composition et les principaux essais requis dans les travaux routier. Dans la deuxième partie on a suivi presque les mêmes étapes pour l'agrégat: définition générale, les différentes familles d'agrégats et les principaux essais.

Chap II. GÉNÉRALITÉS SUR LES ENROBÉS BITUMINEUX

1. DÉFINITION

Les " **Enrobés bitumineux**" sont des matériaux résultant d'un mélange des granulats et d'un liant hydrocarboné.

Le mélange liant-granulats obtenu est constitué de trois phases :

- La phase solide : représentée par le squelette granulaire ;
- La phase visqueuse : représentée par l'apport du liant qui assure la cohésion ;
- La phase gazeuse : représentée par le pourcentage des vides contenus dans le mélange.

2. DIFFÉRENTS TYPES D'ENROBÉS BITUMINEUX

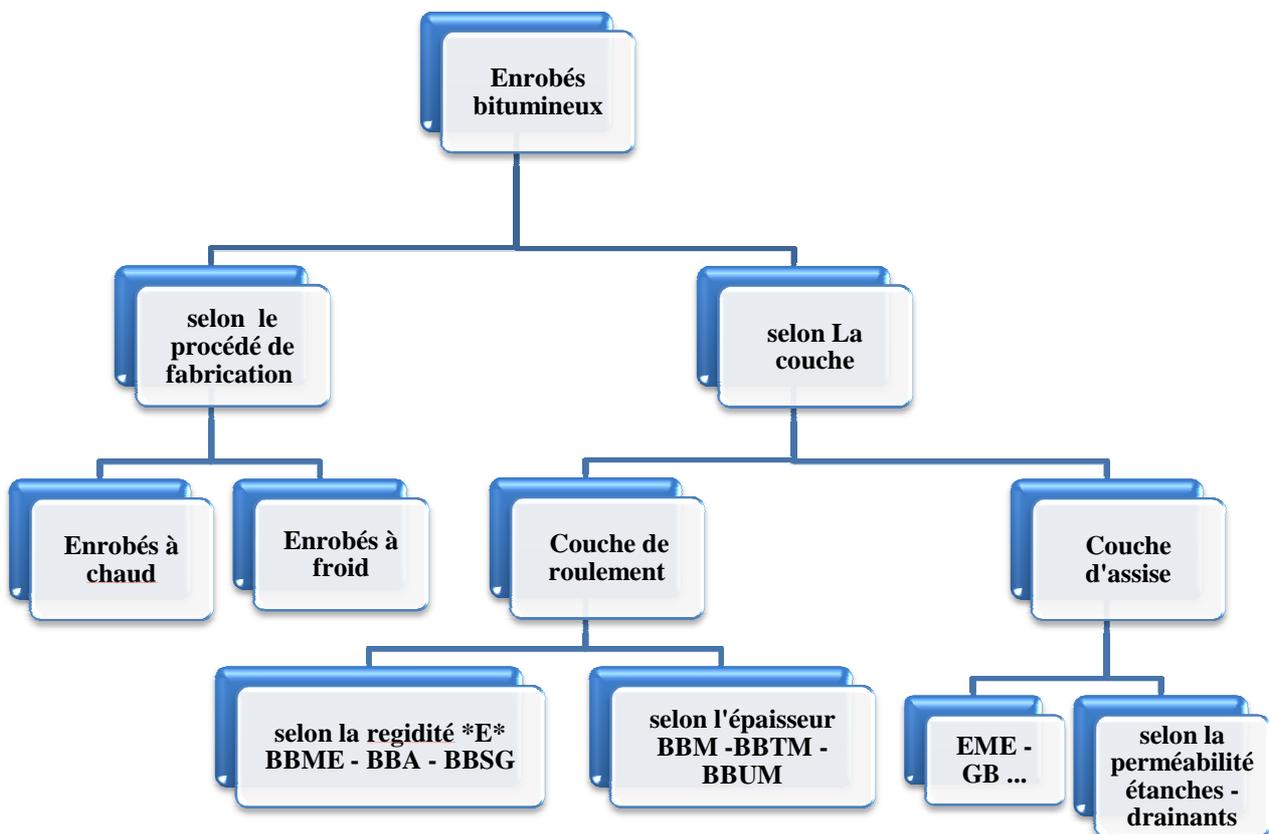


Figure II.1 Les types d'enrobés bitumineux

- BBME : Béton Bitumineux Module Elève.
- BBA : Béton Bitumineux Aéronautique
- BBSG : Béton Bitumineux Semi Grenu
- BBM : Béton Bitumineux Mince
- BBTM : Béton Bitumineux Très Ultra Mince
- * BBUM : Béton Bitumineux Ultra Mince
- * EME : Enrobé a Module Elève
- * GB : Grave Bitume.

3. ÉTUDE DE FORMULATION

Un matériau routier performant doit assurer un comportement mécanique excellent (diminution des épaisseurs des structures) et durable (réduction des coûts d'entretien directs et indirects).

Donc l'objectif principal de la formulation est de déterminer une composition optimale de granulats, de liants et de vides qui permette d'atteindre les performances visées.

On peut dire que la formulation est basée sur deux phases principales ; à savoir la composition granulométrique et le dosage en liant.

3.1 Composition granulométrique

Les enrobés bitumineux doivent répondre à certaines règles de composition granulométrique que l'on résume sous forme de fuseaux à l'intérieur desquels la courbe granulométrique du mélange considéré peut se déplacer.

L'étude de la composition granulométrique de l'enrobé comporte deux étapes :

- La forme de la courbe (continuité)
- Son état de compaction (nature et intensité du compactage).

La composition granulométrique du mélange devra être, selon le type d'enrobé, à l'intérieur des fourchettes données dans le tableau suivant :

Tableau II.1 : Le fuseau granulométrique du BB 0/14 et GB 0/20 [4]

Tamis (mm)	BB 0/14	GB 0/20
20	-	85-100
14	94-100	-
10	72-84	65-75
6.3	50-66	45-60
2	20-40	25-40
0,08	7-10	6-9

3.2 Teneur en liant [4]

Par définition, on appelle teneur en liant, la masse de liant sur la masse des granulats secs, exprimée en pourcentage.

La teneur en liant d'un enrobé bitumineux à retenir pour un chantier est définie à partir d'une étude de laboratoire qui consiste à choisir, à partir d'un granulat simple ou composé entrant dans le fuseau recommandé, une teneur en liant en fonction de la surface spécifique du granulat.

$$\Sigma = 0,25G + 2,3S + 12s + 150f \text{ en (kg/m}^2\text{)}$$

Avec les proportions massiques :

- **G**, pourcentage des éléments supérieurs à 6,3mm
- **S**, pourcentage des éléments compris entre 6,3mm et 0,250mm
- **s**, pourcentage des éléments compris entre 0,250mm et 0,08mm
- **f**, pourcentage des éléments inférieurs à 0.08mm

La teneur en liant est donnée alors par la formule suivante :

$$\text{Teneur en Liant} = k \cdot \alpha \cdot \sqrt[5]{\Sigma}$$

- **k** : le module de richesse qui caractérise l'épaisseur moyenne du film de bitume autour des granulats, il prend les valeurs suivant :

- de 2 à 2,6 pour les graves bitumes « **GB** »
- de 3,3 à 3,9 pour un béton bitumineux « **BB** »

- **α** : coefficient correcteur destiné à tenir compte de la masse volumique réel des granulats « **MVR_g** ».

$$\alpha = 2,65 / \text{MVR}_g$$

3.3 La compacité [5]

La compacité est un terme qui décrit le taux d'intensité obtenu d'un mélange hydrocarboné après le compactage.

$$\% \text{ de vides} = 100 \left(1 - \frac{\text{MVA}}{\text{MVR}} \right)$$



$$\text{COMPACITÉ} = 100 - \% \text{ de vides}$$

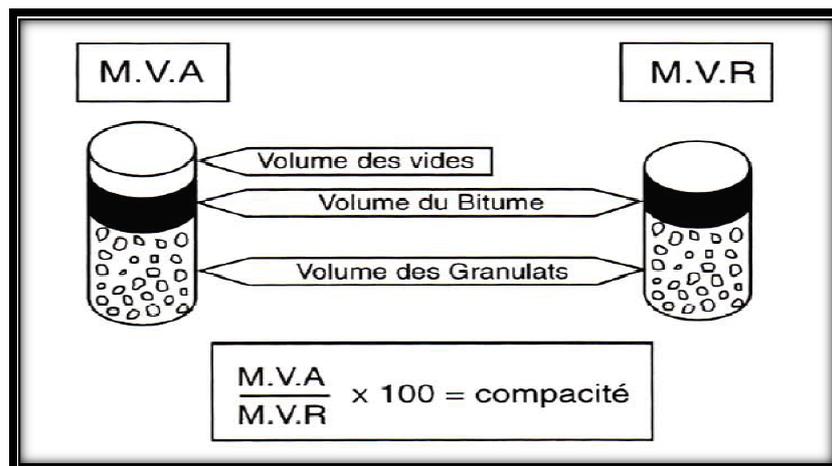


Figure II.2 Détermination de la compacité

$$\text{MVR enrobés} = \frac{\text{Poids (granulats + bitume)}}{\text{Volume (granulats + bitume)}}$$

La masse volumique apparente (MVA) se mesure sur une éprouvette fabriquée en laboratoire. Elle est égale au rapport de la masse de l'échantillon sur son volume « déterminé par pesée hydrostatique ou par mesure géométrique ».

4. LES DIFFÉRENTS NIVEAUX DE FORMULATION [6]

Le niveau d'étude de formulation dépend en général du type d'enrobé, du niveau de sollicitation de la chaussée et de l'importance du chantier. La plupart des enrobés nécessitent au minima une étude de deux niveau excepté les enrobés à module élevé que la norme 13108-1 oriente vers une étude de niveau 4. Les différents essais présentés ci-dessous permettent de vérifier les caractéristiques de l'enrobé formulé vis-à-vis des normes en vigueur.

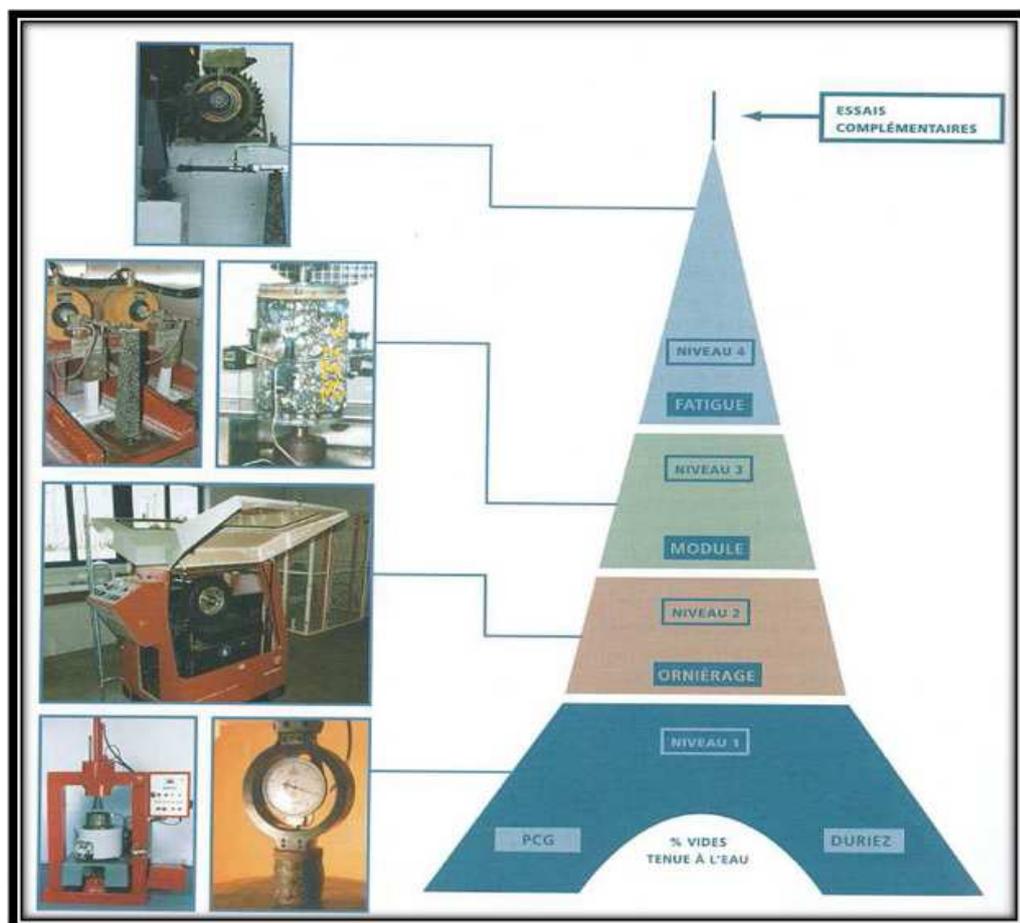


Figure II.3 Niveaux de l'épreuve de formulation

- **Niveau 1** : Ce niveau permet d'estimer le comportement des matériaux « essai Duriez - essai Presse à Cisaillement Giratoire ».
- **Niveau 2** : Ce niveau comporte les essais du niveau 1 auxquels s'ajoute l'essai de résistance à l'orniérage.

- **Niveau 3** : Ce niveau comporte les essais des niveaux précédents auxquels s'ajoute un essai de module. Cet essai de module est spécifié dans le cas de chantiers importants et lorsque la couche intervient dans le fonctionnement structurel de la chaussée.
- **Niveau 4** : Ce niveau comporte tous les essais cités précédemment ainsi qu'un essai de détermination de la résistance à la fatigue. Le recours à cet essai intervient généralement pour des chantiers importants, notamment sur le réseau autoroutier.

5. LES ESSAIS SUR LES ENROBÉS BITUMINEUX

5.1 Essai Marshall (NF P 98-251-2 Avril 1992)

5.1.1 But : L'essai permet de déterminer pour une température et une énergie de compactage données le «**pourcentage des vides**», la «**stabilité**» et le «**fluage**» dits Marshall d'un mélange hydrocarboné à chaud.

5.1.2 Domaine d'application : Elle s'applique aux mélanges hydrocarbonés à chaud fabriqués en laboratoire ou prélevés sur chantier de dimension « **D ≤ 20mm** », utilisés dans le domaine des travaux publics.

5.1.3 Principe de l'essai : L'essai consiste à compacter des éprouvettes par damage selon un processus déterminé, puis à les soumettre à un essai de compression suivant une génératrice dans des conditions définies.

5.1.4 Appareillage:

Appareillage Spécifique

*Au moins trois moules de compactage comportant chacun une base, un corps de moule et une hausse, la base et la hausse s'adaptent aux deux extrémités du corps de moule.

*Deux pistons extracteurs de diamètre légèrement inférieur au diamètre intérieur du moule.

*Une dame de compactage comportant un marteau pesant 4 536g. Ce marteau coulisse librement sur une tige de guidage et tombe en chute libre de 457mm sur la base de la dame.

Appareillage non spécifique

- Une presse à avancement moyen à vide équipée d'un dispositif de mesure d'effort.
- Un bain thermostatique contenant les éprouvettes et les mâchoires d'écrasement. (Voir document hors texte N°1)

5.1.5 Préparation des éprouvettes : Dans le cas d'une préparation en laboratoire le mélange hydrocarboné est fabriqué conformément à la norme NFP 98-250-1.

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 : $180^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$

Les granulats secs à mélanger sont maintenus à une température supérieure de 20°C à celle de référence. (Ex: 40/50 $\rightarrow 160+20^{\circ}\text{C}$)

Les moules sont portés à la température de référence de préparation des éprouvettes (2h au minimum)

5.1.5.1 Détermination préalable de la masse des éprouvettes :

La masse des éprouvettes est déterminée par confection d'un éprouvette témoin, d'une masse indicative de 1200 g, compactée dans les mêmes conditions que les éprouvettes d'essai.

À partir de six mesures de la hauteur réparties sur le pourtour de l'éprouvette témoin, la masse « **m** » correspondant à une éprouvette de hauteur théorique de $d \sim 63,5\text{mm}$.



Photo II.1 Préparation d'une éprouvette pour l'essai Marshall

5.1.5.2 Remplissage des moules et compactage :

- ✓ Peser la quantité « m » de mélange hydrocarboné.
- ✓ Après avoir placé un disque de papier en fond de moule, introduire le mélange en une seule fois dans le moule légèrement enduit d'oléate de sodium glycériné.
- ✓ Un disque de papier est mis en place à la surface du mélange hydrocarboné.
- ✓ Les moules sont remplis successivement.
- ✓ Un des moules contenant le mélange hydrocarboné est fixé sur le socle en bois.
- ✓ L'éprouvette n° 1 est immédiatement compactée, les autres moules étant placés dans une étuve à la température de référence.
- ✓ La dame étant maintenue perpendiculairement au moule, le mélange est compacté en appliquant 50 coups de marteau de la dame en 55s sur les deux faces de l'éprouvette.
- ✓ L'éprouvette n° 2 est compacté 5 min après l'éprouvette n° 1 et ainsi de suite.
- ✓ Le moule est placé, pendant au moins 15min, sous un jet circulaire d'eau froide maintenu de telle façon qu'il ne mouille pas l'éprouvette.
- ✓ Le moule est conservé 1h au moins à température ambiante (15 à 25°C) avant démoulage.
- ✓ Le démoulage est effectué en faisant passer l'éprouvette du moule dans la hausse à l'aide d'un piston extracteur.

5.1.6 Mode opératoire :

5.1.6.1 Vérification des éprouvettes:

Après démoulage, les éprouvettes numérotées sont pesées « mi ».

Les dimensions de l'éprouvette sont mesurées, en six zones différentes pour la hauteur et trois pour le diamètre.

La masse volumique apparente MVa est calculée à partir des mesures géométriques. Si la MVa d'une éprouvette s'éloigne de la masse volumique apparente moyenne des éprouvettes de $\pm 2\%$, la série est rejetée.

Pour chaque éprouvette la moyenne des six mesures de hauteur doit être comprise entre 62,5 et 65mm, avec une tolérance pour chaque mesure de $\pm 1,5\text{mm}$ par rapport à la moyenne, sinon la série est rejetée.

5.1.6.2 Mesure de la masse volumique apparente par pesée hydrostatique :

La mesure est réalisée suivant la norme NF P 98-250-6 sans paraffinage.

5.1.6.3 Conservation des éprouvettes :

Les éprouvettes sont conservées 5h au moins à température ambiante après leur compactage.

5.1.6.4 Application de la compression :

Les éprouvettes et les mâchoires d'écrasement sont immergées dans l'eau à 60°C pendant 30min.

Les éprouvettes sont placées dans les mâchoires d'écrasement.

L'ensemble est porté entre les plateaux de la presse pour être soumis à l'essai de compression.

La vitesse du plateau de la presse est réglée à 0,85mm/s.

La stabilité Marshall est la valeur de la charge maximale à la rupture de l'éprouvette.

Le fluage Marshall est la valeur de l'affaissement de l'éprouvette, selon son diamètre vertical, au moment de la rupture.



Photo II.2 Application de la compression Marshall

5.1.7 Expression des résultats :

- 1- La stabilité Marshall est exprimée en déca newtons « daN » et représente la moyenne des résultats d'au moins trois éprouvettes.
- 2- Le fluage Marshall, exprimé en dixièmes de millimètre « 1/10mm », représente la moyenne des affaissements d'au moins trois éprouvettes.
- 3- Le pourcentage de vides, soit V en pourcentage, est donné par :

$$V\% = 100 \left(1 - \frac{MVA}{MVR} \right)$$

- **MVA**: la masse volumique apparente.
- **MVR**: la masse volumique réelle.

$$MVR \text{ enrobés} = \frac{\text{Poids (granulats + bitume)}}{\text{Volume (granulats + bitume)}}$$

5.2 Essai Duriez (NF P 98-251-1 SEPTEMBRE 2002)

5.2.1 But : Cette norme spécifie une méthode d'essai ayant pour but de déterminer à 18°C pour un compactage donné, la tenue à l'eau d'un mélange hydrocarboné à chaud à partir du rapport des résistances à la compression avec et sans immersion des éprouvettes.

- **NOTE**

L'essai se pratique à 18 °C, Il peut être pratiqué à d'autres températures, en particulier à 0°C et à 50 °C pour permettre d'appréhender une forme de susceptibilité thermique du mélange hydrocarboné.

Cette essai s'applique aux mélanges hydrocarbonés à chaud fabriqués en laboratoire ou prélevés sur chantier (grave bitume, bétons bitumineux, autres enrobés) utilisés dans le domaine des travaux publics.

5.2.2 Principe : 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 de 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.

5.2.3 Appareillage :

- **Moules et piston**

— mélanges hydrocarbonés de $D < 14 \text{ mm}$

Un minimum de 12 moules métalliques cylindriques de diamètre intérieur 80 mm et de hauteur minimale 190mm et des pistons de diamètre extérieur minimal de 79,75mm et pouvant coulisser librement par rapport au moule.

— mélanges hydrocarbonés de $D \geq 14 \text{ mm}$

Un minimum de 10 moules métalliques cylindriques de diamètre intérieur 120mm et de hauteur minimale 270mm.

Des pistons de diamètre extérieur minimal de 119,75mm et pouvant coulisser librement par rapport au moule.

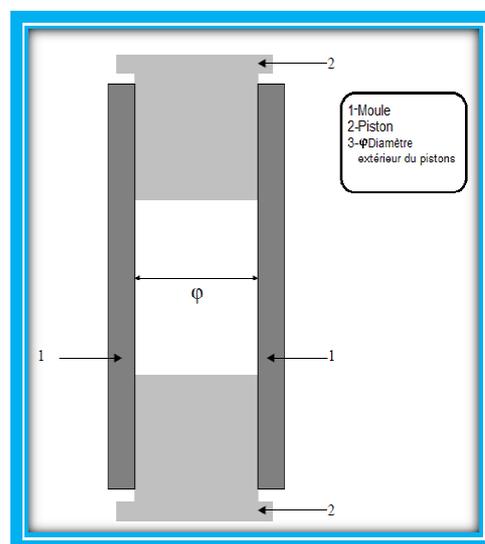


Figure II.4 Schéma du moule et piston

- Une presse permettant le compactage à double effet et le maintien :
 - D'une charge de 60kN pendant 5min sur chaque éprouvette pour les mélanges hydrocarbonés de $D < 14\text{mm}$.
 - D'une charge de 180kN pendant 5min sur chaque éprouvette pour les mélanges hydrocarbonés de $D \geq 14\text{mm}$.
- Un système d'application de la charge comportant au moins une rotule permettant un avancement moyen à vide de 1mm/s, équipé d'un dispositif permettant de mesurer l'effort au cours de l'essai.

5.2.4 Préparation des éprouvettes :

Le mélange hydrocarboné doit être fabriqué selon la NF P 98-250-1. Les températures de référence de préparation des éprouvettes de mélanges à base de bitume pur sont définies comme suit :

- bitume 80/100 : $140\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$;
- bitume 60/70 : $150\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$;
- bitume 40/50 : $160\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$;
- bitume 20/30 : $180\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$.

Les granulats secs à mélanger sont maintenus à une température supérieure de 20°C à celle de référence.

Ex: 40/50  $(160+20)\text{ °C}$ les moules sont portés à la température de référence de préparation des éprouvettes (2 h au minimum)

a) Remplissage des moules

- ✓ Les prélèvements ont les masses suivantes :
 - 1 000g dans le cas des mélanges hydrocarbonés de $D < 14\text{ mm}$.
 - 3 500g dans le cas des mélanges hydrocarbonés de $D \geq 14\text{ mm}$.
- ✓ Un piston est placé à la partie inférieure du moule.
- ✓ Le prélèvement est introduit en une seule fois dans le moule très légèrement enduit d'oléate de soude glycéринé.
- ✓ Les moules pleins sont ensuite introduits dans une étuve dont la température à proximité est à la température de référence ; ils doivent y séjourner entre $\frac{1}{2}\text{ h}$ et 2h.

b) Compactage des éprouvettes

- ✓ Un piston est placé à la partie supérieure du moule.
- ✓ Le compactage des éprouvettes doit être réalisé par double effet.
- ✓ Charge appliquée :
 - pour les mélanges hydrocarbonés de $D < 14\text{mm}$, 60kN.
 - pour les mélanges hydrocarbonés de $D \geq 14\text{mm}$, 180kN.
- ✓ La charge doit être atteinte entre 5 s et 60 s maximum et maintenue entre 300s et 305s.
- ✓ Au bout de ce temps, la mise en charge est interrompue.
- ✓ Les éprouvettes sont conservées couchées dans leur moule au minimum 4h jusqu'à retour à la température ambiante, puis elles sont démoulées.

5.2.5 Mode opératoire :

a) Vérification des éprouvettes

Après démoulage, On calcule la masse volumique apparente MVa à partir des mesures géométriques :

$$MVa = \frac{4 \times M}{\pi \phi^2 h}$$

- M : la masse de l'éprouvette ;
- ϕ : le diamètre de l'éprouvette ;
- H : l'hauteur de l'éprouvette.

- Si la MVa d'une éprouvette s'éloigne de la moyenne de $\pm 1\%$, elle est rejetée.
- Si la MVa de plusieurs éprouvettes s'en éloigne, la série complète est rejetée.

b) Conservation à température ambiante

Jusqu'au jour J+1, les éprouvettes sont conservées debout à température ambiante (15°C à 25°C) sur une surface plane.

c) Répartition des éprouvettes

À partir des masses volumiques apparentes géométriques mesurées, les éprouvettes sont réparties en trois lots homogènes d'éprouvettes.

La MVa moyenne de chaque lot doit être la plus proche de la MVa moyenne de la totalité des éprouvettes.

- Deux éprouvettes sont destinées à la mesure des masses volumiques apparentes hydrostatiques «MVA»
- Cinq éprouvettes sont destinées à la conservation sans immersion dans le cas des mélanges hydrocarbonés de $D < 14$ mm, quatre dans le cas de ceux de $D \geq 14$ mm.
- Les éprouvettes restantes sont destinées à la conservation en immersion.

d) Mesure de la masse volumique apparente par pesée hydrostatique

- Si ($\%V < 15$ %), la mesure est réalisée suivant la NF P 98-250-6.
 - Si ($\%V > 15$ %), on utilise la masse volumique apparente géométrique.
- %V:** pourcentage de vides géométriques du mélange hydrocarboné.

e) Conservation des éprouvettes sans immersion

« J » étant le jour de confection des éprouvettes, on commence la conservation sans immersion au jour « J + 1 ».

Les éprouvettes sont conservées à 18 °C et dans une ambiance à 50% d'humidité relative pendant 7j.

f) Conservation des éprouvettes avec immersion

Pour les essais réalisés à 18 °C, les éprouvettes sont soumises à un traitement de dégazage à J+1. Pendant 1h, les éprouvettes, lavées rapidement, sont soumises à une pression résiduelle de 47 kPa.

Ensuite, l'eau est introduite jusqu'à immersion complète des éprouvettes tout en maintenant la pression résiduelle de 47kPa.

Les éprouvettes sont maintenues immergées pendant 2h sous la même pression.

Ensuite les éprouvettes sont immergées dans de l'eau à 18 °C jusqu'à J+8.

Les éprouvettes sont remises en conservation au moins deux heures avant de subir les essais mécaniques.

g) L'application de la compression

Au jour J+8, les éprouvettes sont soumises à l'essai de compression, qu'elles aient été conservées avec ou sans Immersion.

La vitesse du plateau de la presse est 1mm/s. La résistance à la compression simple est déterminée à partir de la charge maximale à la rupture de l'éprouvette.



Photo II.3 La compression (Duriez)

5.2.6 Expression des résultats

➤ Résistance en compression

La résistance à la compression simple à une température donnée, avec ou sans immersion, est le rapport de la charge maximale à la section circulaire des éprouvettes. Il est exprimé en méga pascals et représente la moyenne de quatre ou cinq mesures suivant la dimension D du mélange hydrocarboné soumis à l'essai.

On établit également le rapport « r/R » avec « r » et la résistance avec immersion et « R » la résistance sans immersion.

➤ Pourcentage des vides:

$$V\% = 100\left(1 - \frac{MVA}{MVR}\right)$$

6. FORMULATION EN ALGERIE

La méthode de formulation en Algérie est basée sur ces deux essais :

- L'essai de Marshall
- L'essai Duriez.

La méthodologie de formulation d'enrobés bitumineux en Algérie est présentée par l'organigramme suivant :

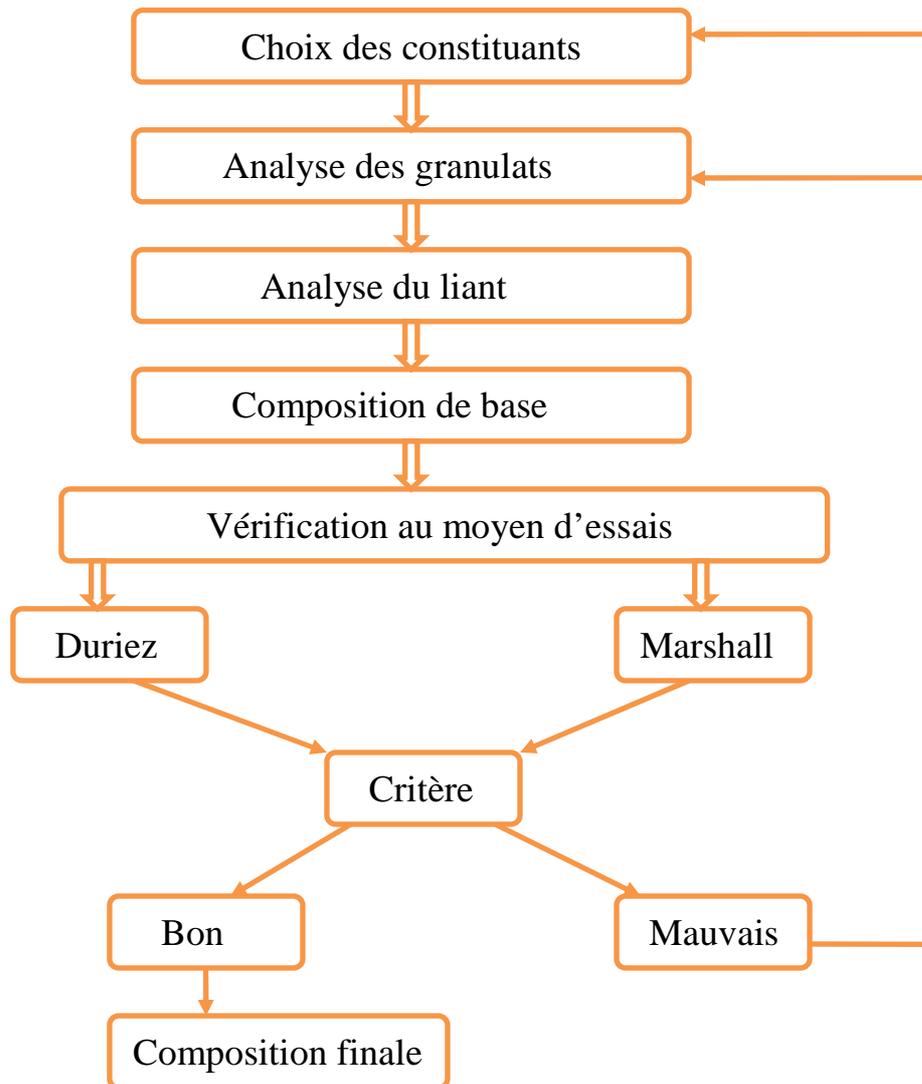


Figure II.5 Organigramme de formulation d'enrobés bitumineux en Algérie

7. CONCLUSION

Ce chapitre est destiné à parler des enrobés bitumineux par l'intermédiaire d'une définition et une citation de ses différents types par un organigramme, puis on a parlé de l'une des méthodes de formulation « méthode module de richesse » et les différents calculs nécessaires afin de trouver sa bonne composition ; ces calculs sont complétés aux niveaux du laboratoire par deux essais « Marshall et Duriez » pour déterminer la teneur optimale du liant bitumineux.

L'organigramme cité dans la figure (II.5) résume ces principales étapes.

Chap III. APERÇU SUR LES POLYMÈRES

1. DÉFINITION

Un polymère est un enchaînement d'unités structurales répétitives. L'unité de répétition dans le polymère étant le monomère.

Un monomère est une molécule composée principalement de carbone et d'hydrogène.

Le terme macromolécule désigne simplement des grandes molécules. Ce terme est souvent utilisé pour désigner un enchaînement de monomères.



Photo III.1 Le polymère

Les termes de polymères et monomères ont été obtenus à partir de la racine grecque poly (plusieurs), mono (un) et meros (en partie). [7]

- Exemple $\text{CH}_2\text{-CH}_2\text{-}$ est l'unité du polymère.
- Monomère $\text{HO-CH}_2\text{CH}_2\text{-OH}$ Éthylène glycol
- Dimère $\text{HO-CH}_2\text{CH}_2\text{-O-CH}_2\text{CH}_2\text{-OH}$ Di éthylène glycol
- polymère $(\text{-O-CH}_2\text{CH}_2\text{-O-CH}_2\text{CH}_2\text{-O-CH}_2\text{CH}_2\text{-})_n$ Polyethylene glycol

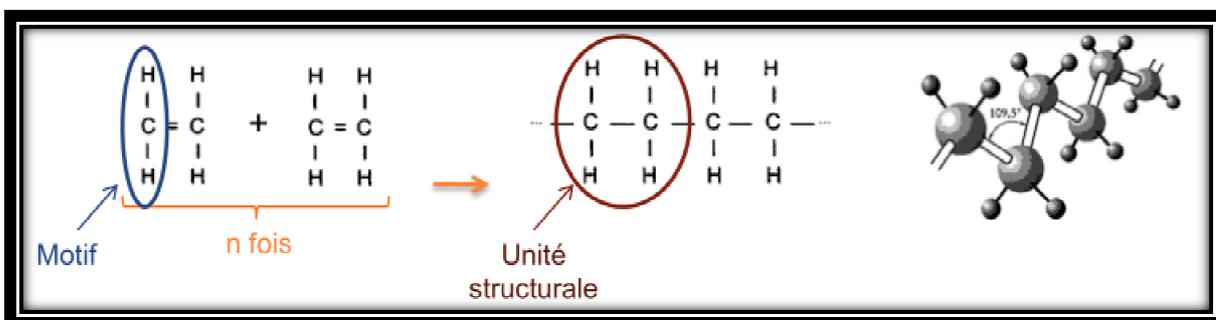


Figure III.1 Exemple d'unité du polymère

2. CLASSIFICATION DES POLYMÈRES [8]

Les polymères constituent la famille d'agents modifiants chimiques la plus utilisée pour la modification des enrobés bitumineux.

Ils se présentent sous la forme de macromolécules caractérisées par la répétition, un très grand nombre de fois, du même groupe d'atomes, motif constitutif formé d'un ou de plusieurs monomères.

On peut classer les polymères suivant leur :

- Structure
- Mode de synthèse
- Réaction à la température

2.1. Selon la structure

- a) **Linéaire:** Structure monodimensionnelle, longue et flexible.
- b) **Branché:** Branchement de molécules à certains endroits des chaînes de polymère.
- c) **Réticulé:** Interconnexion entre les chaînes. Structure tridimensionnelle.

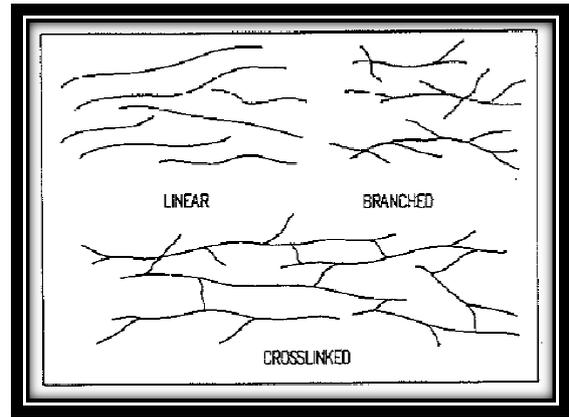


Figure III.2 Les différentes structure des polymères

2.2. Selon le mode de synthèse [9]

- a) **La condensation :** c'est une réaction organique entre deux entités chimiques et formation d'un troisième composé (polymère condensé), avec éjection d'une petite molécule (le plus souvent de l'eau).
- b) **L'addition :** c'est une réaction de polymérisation entraînant la formation de polymères d'addition
 - La réaction de polymérisation implique l'ouverture d'une double liaison.
 - Pas de formation d'autre composé en dehors du polymère ; l'unité structurale et le monomère ont la même composition chimique.

2.3. Selon la réaction à la température

a) Thermodurcissables :

Au chauffage → Dégradation possible (cracking) de la structure du polymère par rupture des chaînes primaires et des liaisons réticulées

Le chauffage ultérieur de polymères thermodurcissables conduit à leur dégradation thermique et non au ramollissement avec la possibilité de traitement à l'état visqueux.

Exemples : Résines (polyesters, epoxydes, phénoliques, poly imides), bakélite, caoutchouc
Ils sont très peu utilisés en association avec le bitume en technique routière.

b) Thermoplastiques :

Au chauffage → $\left\{ \begin{array}{l} \text{ramollissement} \\ \text{comportement fluide visqueux sous contrainte} \end{array} \right.$

Après refroidissement → redevient vitreux ou caoutchouteux

La transition qui se fait lors du chauffage est une transformation physique (non chimique) et réversible de la matière.

Ils sont combinés au bitume à température élevée, alors que le mélange se présente sous une forme fluide plus ou moins visqueuse.

Les polymères thermoplastiques sont subdivisés en deux familles: les élastomères et les plastomères qui se distinguent, aux températures d'usage, par des comportements différents du point de vue de leur rigidité, de leur déformabilité et de leur résilience.

- **Les élastomères** : Ce sont des composés naturels ou synthétiques présentant l'élasticité du caoutchouc à la température ambiante. Ils résistent bien à l'influence des produits tels que les huiles, les essences et sont insensibles à l'eau. Ils résistent également bien à l'oxygène et au rayonnement solaire; donc au vieillissement naturel. [9]

Parmi les polymères thermoplastiques élastomères, on distingue

- Les copolymères Styrène-isoprène-styrène (SIS)
- Les copolymères Styrène-Butadiène (SB)
- Les copolymères Styrène-Butadiène-Styrène (SBS)

Les élastomères les plus couramment utilisés pour la modification des bitumes sont obtenus par polymérisation anionique.

- **Les plastomères** : La modification des bitumes par des plastomères peut faire appel à différents types d'homopolymères ou de copolymères.

Dans le domaine routier on rencontre essentiellement des copolymères d'éthylène :

- EVA (copolymères d'éthylène et d'acétate de vinyle),
- EMA (copolymères d'éthylène et d'acrylate de méthyle)
- EBA (copolymères d'éthylène et d'acrylate de butyle).

La technologie des mélanges bitume-copolymères EVA est l'une des plus utilisées pour la modification des enrobés bitumineux. L'acétate de vinyle améliore la souplesse et l'adhésivité; l'éthylène quant à lui intervient pour améliorer la susceptibilité thermique.

Tableau III.1 Exemples des polymères usuels [7]

Monomère	Polymère	Quelques usages
Ethylène $\text{CH}_2 = \text{CH}_2$	Polyéthylène ..- $\text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2$ -..	Emballages, sacs poubelle, bouteilles, bassine
Styrène $\text{CH} = \text{CH}_2$	Polystyrène ..- $\text{CH}_2 - \text{CH} - \text{CH} - \text{CH}_2$ -..	Emballages, plaques isolantes
Chlorure de vinyle $\text{CH}_2 = \text{CHCl}$	Polychlorure de vinyle (P.V.C.) $\text{CH}_2 - \text{CHCl} - \text{CH}_2 - \text{CHCl} - \text{CH}_2 - \text{CHCl}$	Tuyaux, disques, bouteilles d'eau
Propylène $\text{CH}_2 = \text{CH} - \text{CH}_3$	Polypropylène ..- $\text{CH}_2 - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH} -$.. $\text{CH}_3 \quad \text{CH}_3$	Habillement, tapis, tissus industriels, cordages

3. CAOUTCHOUC [10]

Le terme « caoutchouc » provient de l'expression indienne « Cao Tchu » qui signifie « Bois qui pleure ».

Elle est globalement utilisée comme synonyme du terme élastomère, désignant ainsi tout polymère qui présente des propriétés élastiques obtenues après réticulation.

La réticulation correspond à une transformation chimique qui permet de créer un réseau tridimensionnel entre les chaînes de polymères. Pour les caoutchoucs, cette réaction chimique est appelée vulcanisation.

Le caoutchouc est, soit d'origine naturelle, provenant essentiellement de l'*Hevea brasiliensis*, soit synthétique, issu de la pétrochimie.

La classification courante consiste à séparer les caoutchoucs en trois catégories (les sigles utilisés sont ceux qui sont recommandés par la norme ISO 1 629 de 1995)

- a) **Les caoutchoucs à usages généraux :** Le caoutchouc naturel est intégré dans cette catégorie ainsi que trois types d'élastomères synthétiques dont le poly isoprène de synthèse, de composition chimique identique au caoutchouc naturel. Leurs bonnes caractéristiques mécaniques (grande élasticité, résistance à l'abrasion notamment) permettent une utilisation dans des applications très variées dont les pneumatiques.
- b) **Les caoutchoucs à usages spéciaux :** Ce sont par exemple les familles des NBR et EPDM3 qui présentent des propriétés spécifiques plus performantes, comme une bonne tenue aux huiles et carburants pour les premiers (exemple d'application : joints pour carburants) ou une résistance au vieillissement pour les seconds (exemple d'application : joints de vitrage dans l'automobile)
- c) **Les caoutchoucs à usages très spéciaux:** Ils se caractérisent par d'excellentes tenues thermiques et chimiques. Ils sont cependant coûteux et réservés à des applications très spécifiques (par exemple joints soumis à de hautes températures ou à des environnements chimiques agressifs dans les industries aéronautiques, aérospatiale, chimique, ...). Les caoutchoucs de silicone font partie de cette catégorie.

Les pneus et les semelles de chaussures sont principalement composés des caoutchoucs synthétiques, un dérivé du pétrole, et de caoutchouc naturel. Son recyclage comprend plusieurs étapes qui permettent de convertir un pneu en granulé ou en poudrette de caoutchouc ; qui peuvent à leur tour être utilisés pour modifier le mélange bitumineux chaud.

3.1 Processus de fabrication de granulés et poudrette de pneus usés [11]

- 1- Séparation : séparer la bande de roulement de la carcasse composée de feuille en caoutchouc synthétique (chambre à air), de toile de carcasse
- 2- Laminage des parties 100% en caoutchouc : découpe les flancs de la carcasse et de la bande de roulement en bandelettes. La largeur de découpe est ajustable.
- 3- Prébroyage : broyer grossièrement les bandelettes de caoutchouc obtenues précédemment avec des dimensions pré définies ; les parties non broyer sont pressées par une machine afin de séparer le caoutchouc des câbles d'acier qui les composent. Une fois cette opération effectuée, le caoutchouc est récupéré puis broyé
- 4- Le granulateur : C'est une machine pour broie selon la granulométrie prédéfinie tous les gros morceaux obtenus précédemment. Elle peut également traiter directement les bandelettes de caoutchouc, les morceaux, des semelles de chaussures.

4. ENROBÉ BITUMINEUX MODIFIÉS [12]

La modification des enrobés bitumineux peut s'opérer de deux manières :

- D'une part, des procédés dits "humides" ont été développés. Selon ces procédés, le caoutchouc est mélangé au bitume de telle manière qu'il réagisse avec lui et forme un liant caoutchouteux.
- D'autre part, des procédés dits "secs" ont également été développés dans lesquels le caoutchouc est mélangé au bitume en tant qu'agrégat.

Pour la mise en œuvre de cette dernière catégorie de procédé, on considérait jusqu'à présent nécessaire d'utiliser de la poudrette ayant une granulométrie comprise entre 1 et 3 ou 2 et 4mm, c'est-à-dire une poudrette de caoutchouc ayant une granulométrie comparable à celle des gravillons.

4.1 Types des polymères compatibles avec les bitumes

Pour qu'un polymère soit efficace, il faut qu'il soit compatible avec la matrice bitumineuse. Le polymère doit améliorer la résistance du bitume à des températures élevées sans pour autant le rendre trop visqueux à la température de malaxage ou bien trop rigide à des températures basses. Si ce bitume est appelé à être utilisé dans le pavage des routes, il doit être capable de se malaxer dans des équipements conventionnels. Dans tous les cas, le bitume doit être disponible, moins coûteux et stable pendant le stockage et l'application. Les problèmes majeurs que posent les bitumes modifiés avec des polymères résident dans la mauvaise solubilité de certains polymères dans la matrice bitumineuse qui peut conduire à la séparation de phases. Les principaux groupes de polymères utilisés pour la modification des bitumes sont les suivants:

- polymères thermoplastiques
- caoutchoucs naturels et synthétiques
- caoutchoucs thermoplastiques
- polymères thermodurcissables

Actuellement, les bitumes sont modifiés surtout avec des caoutchoucs thermoplastiques, aussi bien qu'avec des polymères thermoplastiques. Les caoutchoucs naturels et synthétiques sont difficilement appliqués comme additifs, tandis que les résines thermodurcissables sont utilisées dans des applications particulièrement spéciales.

La proportion de polymère dans le bitume varie généralement de 2 à 10% en masse; la dose la plus utilisée est d'environ 5%. Cette limite est conditionnée par la viscosité aux températures de service, par des problèmes d'inversion de phase et par le coût du mélange. Les polymères recyclés réduisent quelque peu le coût total de fabrication de bitumes modifiés. Quelques fois, deux différents polymères sont ajoutés simultanément, dans le but de conférer au bitume modifié les performances requises.

5. CONCLUSION

Les polymères sont des ajouts largement utilisés dans le domaine routier grâce à leur efficacité et leur avantage qu'ils fournissent aux enrobés bitumineux.

Le polymère est un domaine vraiment très vaste ; A travers ce chapitre, nous avons essayé de cerner les grands ensembles traitant les polymères tels que leur types et composition chimique.

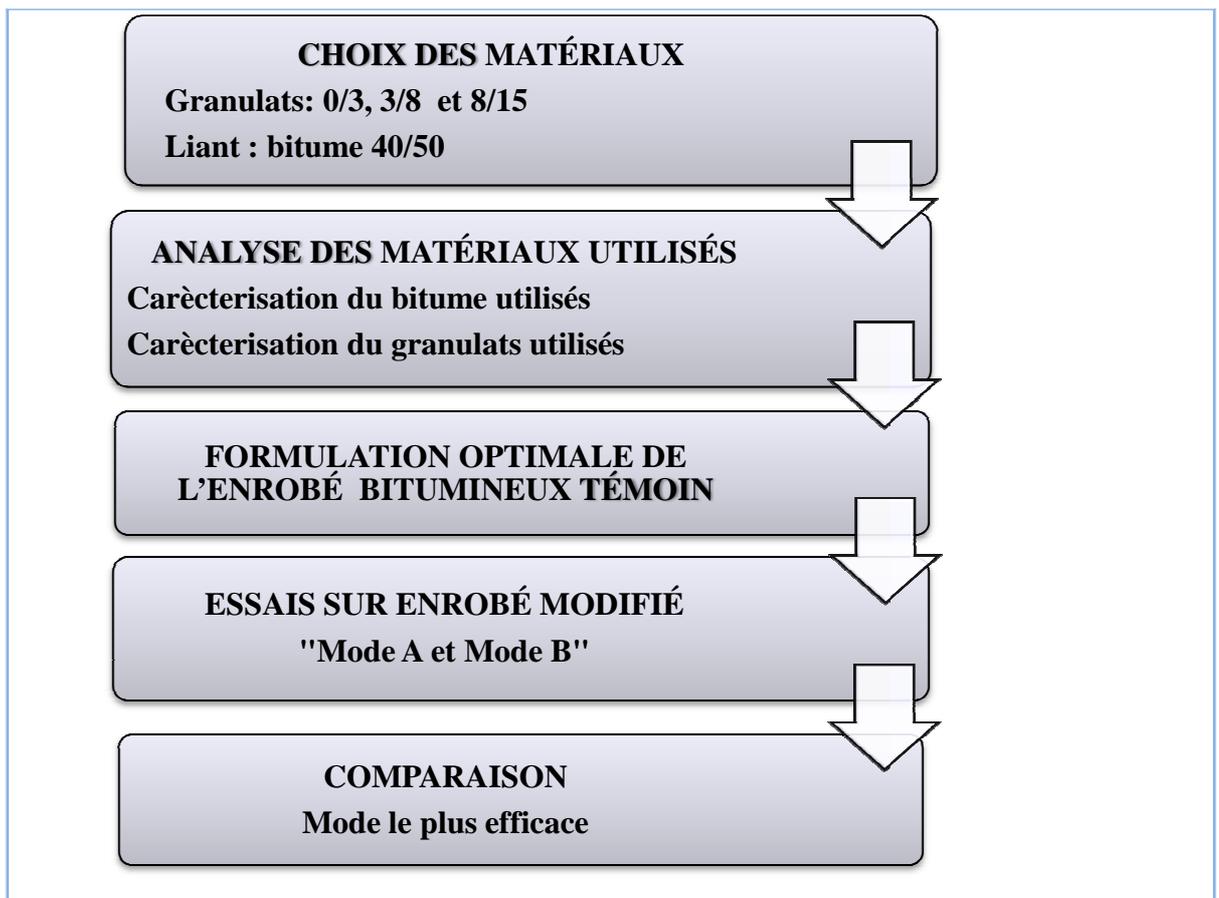
Chap IV. CARACTERISATION DES MATÉRIAUX UTILISÉS

1. INTRODUCTION

L'étude expérimentale s'est déroulée en trois (3) phases essentielles :

- ✓ 1^{ère} Phase : Identification des matériaux constitutifs (granulats, bitume, caoutchouc),
- ✓ 2^{ème} Phase : Etude des formulations et choix de la formulation optimale,
- ✓ 3^{ème} Phase : Etude de l'influence de la poudrette de caoutchouc sur les enrobés bitumineux pour les deux cas suivants:
 - substitution des pourcentages de bitume par d'autres pourcentages équivalents de caoutchouc.
 - Remplacer des pourcentages de sable 0/3 par d'autres pourcentages équivalents de caoutchouc.

Donc la procédure de travail va être comme suite :



2. LES MATERIAUX UTILISÉS

Le béton bitumineux 0/14 expérimenté se compose d'un squelette minéral ternaire, renfermant les granulats concassés 0/3, 3/8 et 8/15 et du caoutchouc.

Le liant hydrocarboné utilisé est le bitume pur 40/50 provenant des fondoirs de la centrale d'enrobage TOTAL à OUARGLA.

La présélection des granulats est faite sur la base de conformité de leurs caractéristiques intrinsèques et fabrication aux prescriptions spéciales. En dépit de cette analyse, nombreux agrégats de diverses carrières sont écartés et les granulats d'El Atteuf, de par leurs performances de dureté et d'aplatissement, avec le sable de concassé de Haoud El-Hamra, sont retenus pour composer le béton bitumineux expérimenté. En effet le sable choisi dispose de fines nécessaires susceptibles de pourvoir correctement le béton bitumineux préconisé.

Tableau IV.1 Origine des matériaux utilisés

Matériau	Provenance
Sable concassé 0/3	Carrière de Haoud El-Hamra, Wilaya d'Ouargla
Gravillons 3/8 et 8/15	Carrière d'El Atteuf, Wilaya de Ghardaïa
Bitume pur (40/50)	Centrale d'enrobage TOTAL à Ouargla
Poudrette de caoutchouc	SAEL / Société d'Application d'Elastomères Zone industrielle Oued Smar-Alger

3. CARACTERISATIQUE DES MATERIAUX UTILISÉS

3.1 Le bitume

Le bitume expérimenté a été caractérisé moyennant les essais « Pénétrabilité-Température de Ramollissement- Densité au Pycnomètre ». Le tableau suivant présente les résultats obtenus.

Pour plus de détail voire «Annexe A».

Tableau IV.2 Caractéristiques du bitume utilisée

Essai	Norme	Résultat	Spécifications
Pénétrabilité au 1/10mm à 25 °C	NF EN 1426	45	40 à 50
Température de Ramollissement (BA)	NF EN 1427	56	47 à 60
Densité relative à 25 °C	NF EN 15325	1,088	1,00 à 1,10

3.2 Les granulats

Le tableau (IV.3) présent les résultats à l'issu des essais de caractérisation appliqués aux trois classes granulaire. La figure (IV.1) présente les courbes et les fuseaux granulaires de ces trois classes. «Voire Annexe A».

Tableau IV.3 Caractéristiques géotechniques des granulats utilisés

Norme	Essais	Tamis (mm)	Résultat			Spécifications
			0/3	3/8	8/15	
EN FN 933-1	Analyse granulométrique	20			100,00	
		16			83,00	
		14			62,00	
		12,5		100,00	40,00	
		10		99,94	11,00	
		8		90,00	7,00	
		6,3	100,00	62,00	3,00	
		5	99,81	37,00		
		4	99,42	19,00		
		2,5	90,00	6,00		
		2	85,00	0,10		
		1,25	71,00	0,00		
		1	60,00			
		0,63	59,00			
		0,315	40,00			
0,16	34,00					
0,08	22,00					
NF P15-461	Analyse chimique (%)	Insolubles	26,30	13,47		
		Sulfates	1,68	0,23		
		Carbonates	66,40	73,38		
		Chlorures	0,012	0,004		
NF P18-591	Propreté	P (%)	-	0,575	0,18	< 1%
EN FN 933-3	Aplatissement	A (%)	-	7,54	10,69	< 20%
NF P18-573	Los Angeles	LA (%)	-	18,40		< 25%
NF P18-572	Micro-Deval Humide	MDE (%)	-	14,65		< 20%
NF P18-597	ES à 10% de fines	ES (%)	61,32	-	-	> 40%
NF P18-554	Masse volumique réelle	MVR (g/cm ³)	2,58	2,62	2,62	

Le sable concassé de Haoud El-Hamra à une forte teneur en carbonates ($\text{CaCO}_3=66,40\%$) ce qui nous permet de dire que c'est un sable calcaire.

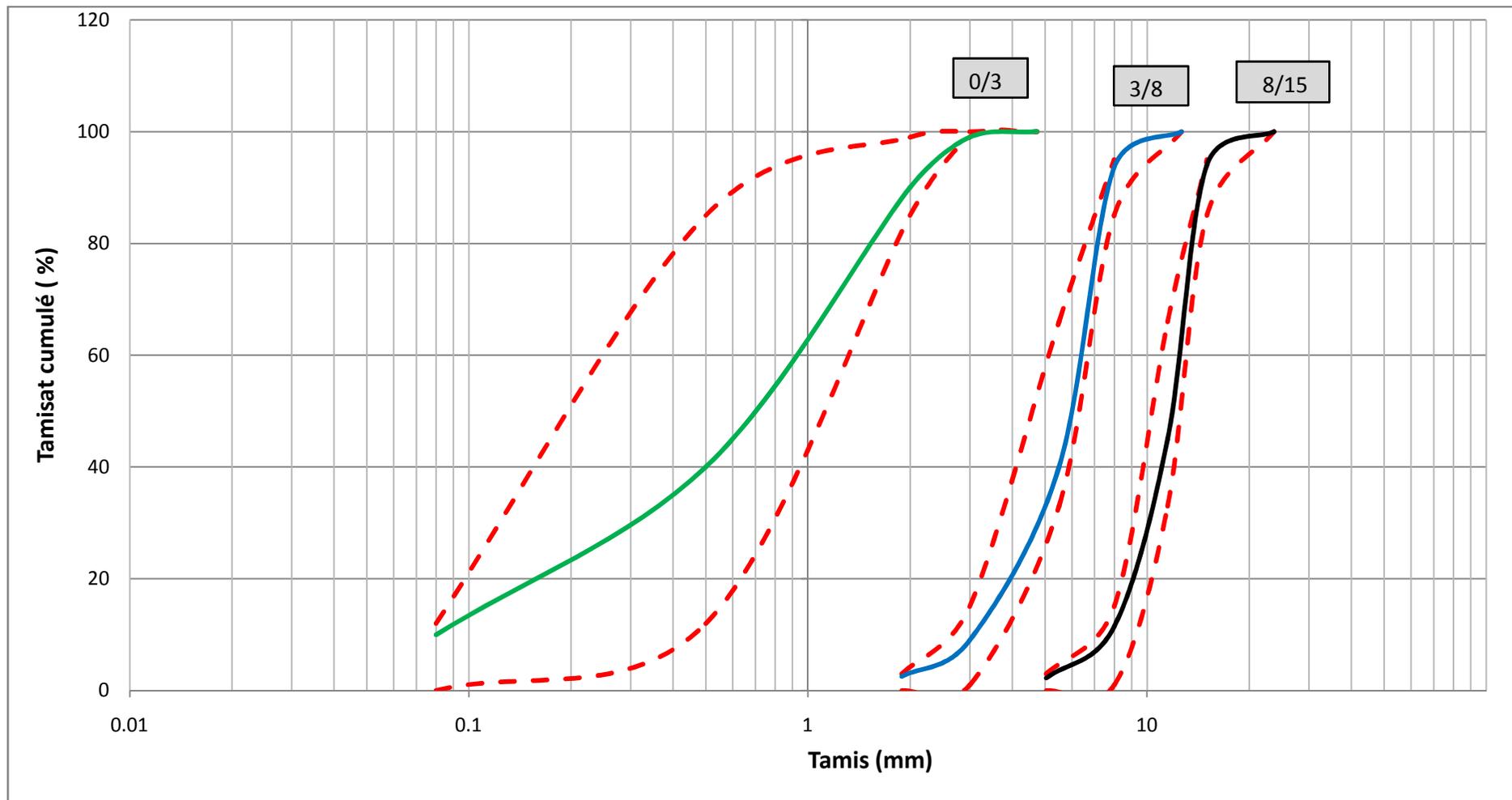


Figure IV.1 Courbes granulométriques des classes 0/3 ; 3/8 et 8/15 avec fuseaux de référence

3.3 La poudrette de caoutchouc

Le polymère que nous avons étudié est un déchet industriel de couleur noirâtre provenant du broyage de chutes de caoutchouc ; il présente une granularité assez fine. Sa masse volumique calculée suivant la norme « ISO 2781-A mai 2008 » est de l'ordre de $0,5\text{g/cm}^3$. « Voir document hors texte N° 2 ».

Ce matériau est élastique à température ambiante compatible avec le bitume et les agrégats.

Cette poudrette provenant d'un caoutchouc synthétique se décompose avant de fondre.

4. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

À la lumière des résultats expérimentaux, on constate que les caractéristiques intrinsèques et de fabrication des composants du béton bitumineux 0/14 formulé, sont conformes aux spécifications requises en matière de conception géotechnique des chaussées.

D'abord on a vérifié que notre bitume est de classe 40/50.

En suite on a constaté que les trois classes granulaires sont presque totalement incluses dans le fuseau et aussi la quantité des éléments plats est faible dans les deux classes 3/8 et 8/15.

Dans l'ensemble, nous avons des granulats qui présentent des caractéristiques qui sont conformes aux normes et aux spécifications à savoir un poids spécifique satisfaisant, des gravillons propres et présentant un bon comportement à l'usure et au choc.

Chap V. FORMULATION ET RESULTATS

1. INTRODUCTION

L'étude de formulation d'un enrobé bitumineux comporte deux phases principales ; à savoir la composition granulométrique et le dosage en liant.

La méthode utilisée dans notre étude consiste à ajuster la courbe du mélange granulaire dans le fuseau de spécification d'un béton bitumineux 0/14.

L'étude de formulation proprement dite est focalisée sur les essais Marshall et Duriez, respectivement au sens des normes NFP 98-251-2 Avril 1992 et NFP 98-251-1 Septembre 2002.

Le cheminement de l'étude de composition est explicité par le diagramme suivant :

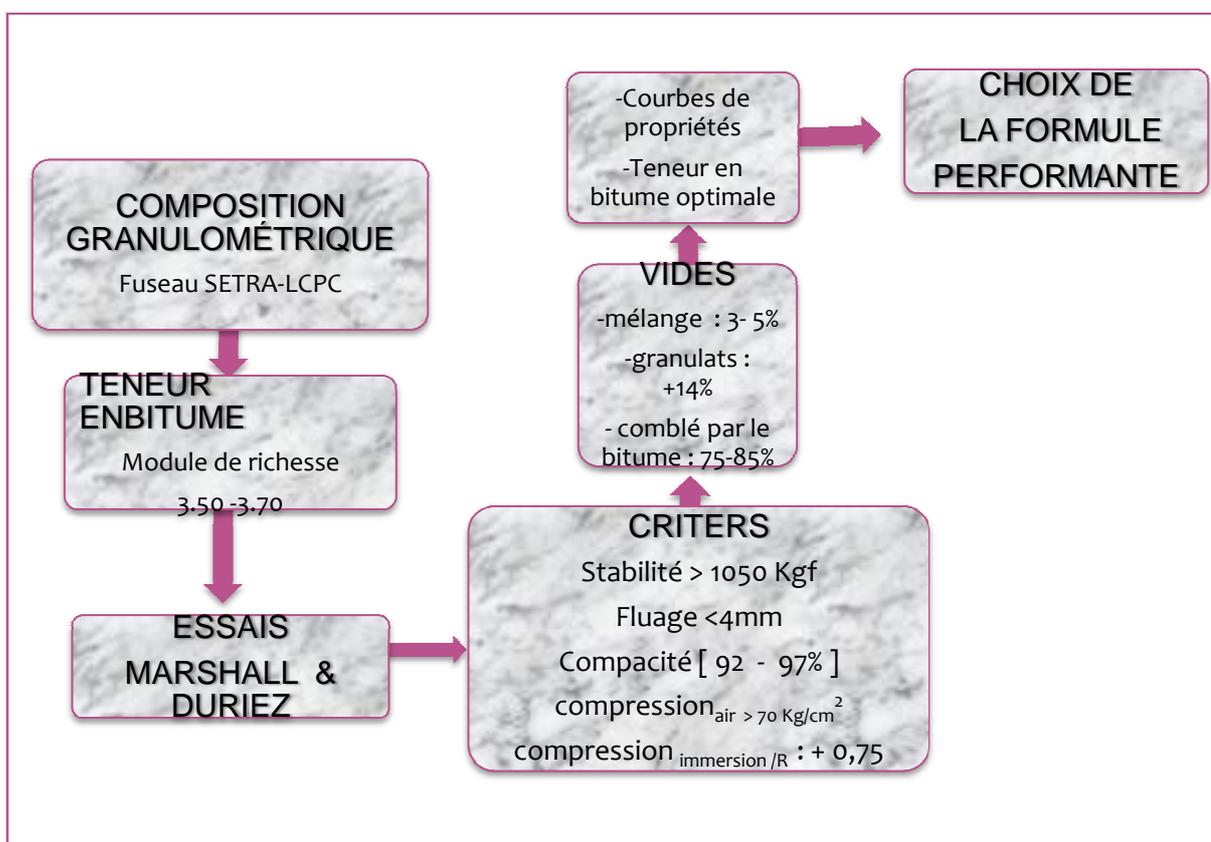


Figure V.1 Procédure de formulation normalisée

2. ETUDE DE FORMULATION

2.1 Composition granulaire

Dans le chapitre précédent, nous avons tracé les courbes granulométriques des différentes fractions de matériaux granulaires, donc il nous ne reste que trouver la composition granulaire finale pour que la courbe du mélange soit incluse totalement dans le fuseau du BB 0/14 présenté dans le paragraphe 3 du troisième chapitre de l'étude bibliographique.

Après plusieurs tentatives nous avons trouvé que la meilleure composition est celle présentée dans la figure V.2.

La courbe granulométrique déduite de ces fractions s'insère presque totalement dans le fuseau de référence du béton bitumineux 0/14 (voir la figure V.3).

(Le détail est présenté en Annexe-B-)

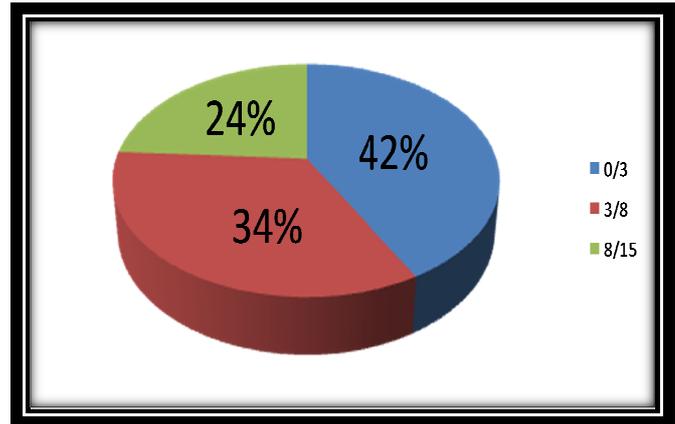


Figure V.2 Composition granulaire du béton bitumineux 0/14

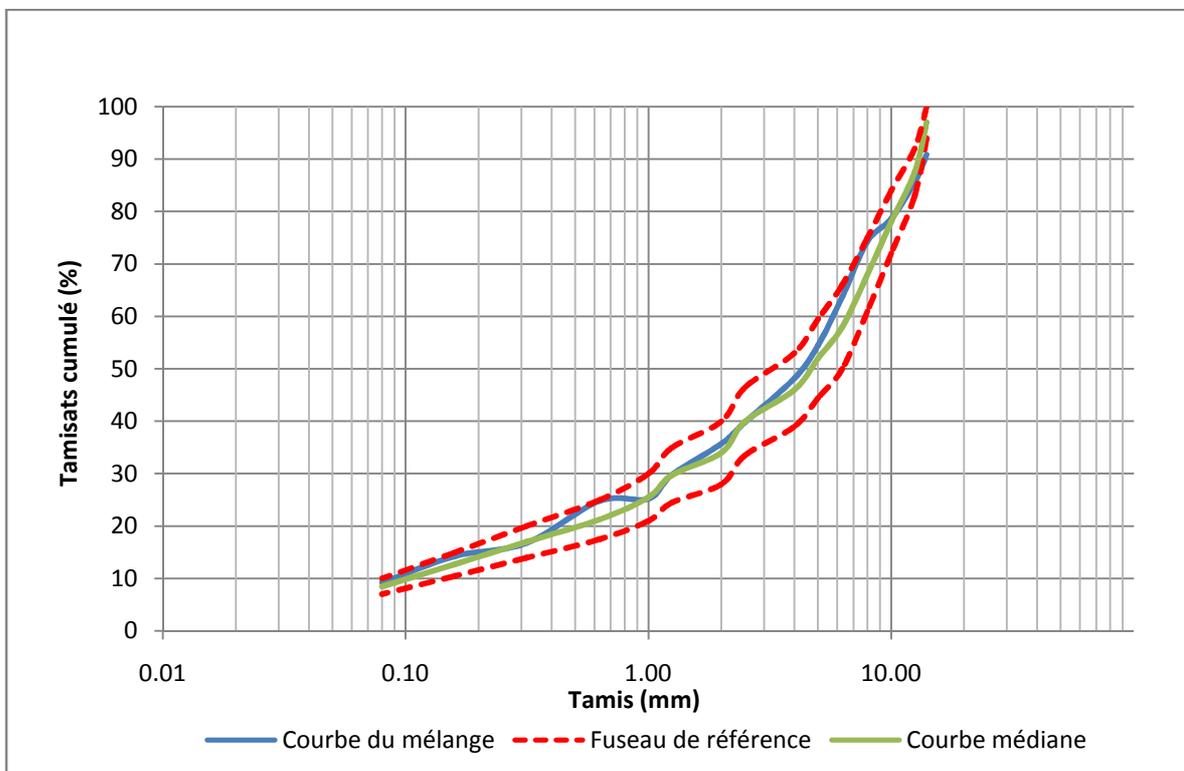


Figure V.3 Courbe granulométrique et fuseau du mélange 0/14

2.2 Détermination de la teneur en bitume

Les teneurs en liant du béton bitumineux expérimenté sont évaluées via la formule suivante :

$$\text{TENEUR EN LIANT} = \alpha \cdot K \cdot \Sigma$$

$$\alpha = 2.65 / MVR_g \quad \Rightarrow \quad MVR_g = P_i \cdot \delta_i$$

MVR_g est la masse volumique réelle des granulats

P_i : Pourcentage de la fraction i .

δ_i : Poids spécifique de la fraction i .

K = module de richesse compris entre 3,3 et 3,90

Σ = Surface spécifique conventionnelle :

$\Sigma = 0,25G + 2,3S + 12s + 150f$ avec :

G : proportion des éléments supérieurs à 6,3 mm

S : proportion des éléments compris entre 6,3 et 0,250 mm

s : proportion des éléments compris entre 0,250 et 0,063 mm

f : proportion des éléments inférieurs à 0,08 mm.

$$\alpha = 1,018$$

$$\Sigma = 16,15 \text{ Kg/m}^2$$

Notons que dans le tableau ci-dessous, les teneurs en liant exprimées sont relatives au poids des granulats. Les pourcentages du liant sont rapportés au poids du mélange.

Tableau V.1 Teneurs en bitume

Module de Richesse (K)	3,45	3,50	3,55	3,60	3,65
α	1,018				
Σ (Kg/m ²)	16,15				
Teneur en liant par rapport aux granulats (%)	6,13	6,21	6,30	6,39	6,48
Teneur en liant par rapport au mélange (%)	5,77	5,85	5,93	6,01	6,09

2.3 Performances mécaniques

Les performances obtenues aux essais Marshall et Duriez sont consignés dans le tableau suivant :

Tableau V.2 Performances mécaniques des mélanges

Essai		RESULTATS					Spécification BB 0/14
		A	B	C	D	E	
Module de richesse	<i>K</i>	3,45	3,50	3,55	3,60	3,65	
Teneur en liant	%	5,77	5,85	5,93	6,01	6,09	-
Densité théorique	g/cm ³	2,409	2,407	2,405	2,402	2,400	-
DURIEZ							
Densité apparente	g/cm ³	2,236	2,241	2,246	2,248	2,233	
Compacité	%	92,79	93,09	93,40	93,57	93,04	> 92
Résistance à la compression à l'air	(R)Bars	107,12	112,19	115,09	117,45	114,15	> 70
Résistance à la compression après immersion	(r) Bars	79,60	83,96	89,34	92,60	86,31	-
Rapport immersion compression	(r/R)	0,743	0,784	0,776	0,796	0,756	> 0,75
V%	%	7,21	6,91	6,60	6,43	6,96	< 8
MARSHALL							
Densité apparente	g/cm ³	2,283	2,291	2,298	2,301	2,276	
Compacité	%	92,74	93,27	93,66	93,71	92,84	> 92
Stabilité Marshall	kN	11,43	11,62	11,92	12,16	11,82	> 10,50
Fluage Marshall	mm	3,54	3,45	3,41	3,39	3,39	< 4
V%	%	7,26	6,73	6,34	6,29	7,16	< 8

V% : pourcentage des vides.

3. DETERMINATION DE LA TENEUR EN BITUME OPTIMALE

La variation des paramètres de l'enrobé en fonction de la teneur en bitume est traduite par les représentations graphiques, dites courbes de propriétés (voir annexe – B-) qui fournissent :

- ✓ La stabilité maximale
- ✓ Le fluage minimal

Les performances correspondantes à la teneur en bitume optimale de 5,995% \approx 6,00%, sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau V.3 Performances du béton bitumineux 0/14 retenue

Propriétés Marshall	Résultat	Conformité
Stabilité [KN]	12,17	> 10,50
Fluage [mm]	3.4	< 4
Volume des vides du mélange [%]	6,27	>8

Les épreuves Duriez effectuées ont aussi révélé par rapport au dosage en bitume optimal, des caractéristiques en matière de densité, résistances et rapport immersion compression très rassurantes.

On retient :

TENEUR OPTIMALE EN BITUME = 6.00 %

4. CONCLUSION

À La lumière des résultats expérimentaux, on constate que les caractéristiques intrinsèques et de fabrication des composants du béton bitumineux 0/14 formulé, sont conformes aux spécifications requises en matière de conception géotechnique de chaussées.

L'étude de formulation de l'enrobé testé a abouti à la formule optimale suivante :

Tableau V.4 Composition optimale du mélange retenue

Composant	Proportion par rapport aux granulats (%)	Proportion par rapport au mélange (%)
Sable concassé 0/3	42	39,48
Granulat 3/8	34	31,96
Granulat 8/15	24	22,56
Bitume 40/50	-	6,0

Chap VI. ENROBÉ MODIFIÉ À LA POUDRETTE

1. INTRODUCTION

Après avoir déterminé la teneur en liant optimale, on a procédé à la confection des éprouvettes d'enrobés bitumineux modifiés à la poudrette de caoutchouc.

Le but de notre travail est d'effectuer une étude comparative entre les caractéristiques mécaniques (Marshall) des produits bitumineux obtenus à partir de deux modes de modification que sont:

- Mode A : substitution des fractions de bitume par la poudrette de caoutchouc suivant des pourcentages déterminés.
- Mode B : substitution des fractions du sable 0/3 par la poudrette de caoutchouc suivant des pourcentages déterminés.

Donc la question posée est : « lequel de ces deux modes est le plus efficace de point de vue mécanique ? ».

2. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES DEUX MODES

2.1 Mode A

Comme nous l'avons précédemment dit, ce mode consiste à compenser des pourcentages de bitume par d'autres de la poudrette de caoutchouc.

L'ajout de la poudrette s'effectue pendant le malaxage du squelette minéral avec le bitume. L'incorporation se fait progressivement afin d'assurer l'homogénéité du mélange enrobé plus déchets à la température de malaxage.

On a choisi d'effectuer quatre éprouvettes pour chaque teneur, toutes sont destinées à l'essai Marshall et les masses volumiques apparentes sont calculées par des mesures géométriques.

$$MVA = \text{Masse} / \text{Volume}$$

Dans ce qui vient, on va exposer les diagrammes, qui présentent la variation des caractéristiques mécaniques obtenues par les bétons bitumineux modifiés selon le mode A à différentes teneurs en déchets polymériques : « 10%, 12%, 14%, 16% » (Voir Annexe C).

2.1.1 Evolution de la compacité

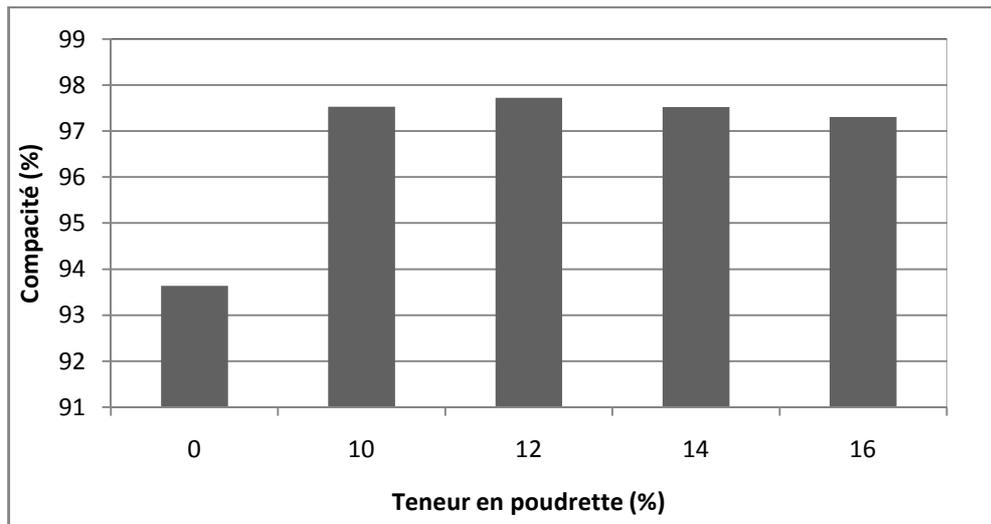


Figure VI.1 Compacités en fonction de la teneur en déchets « Mode A »

Le diagramme ci-dessus montre que la compacité croît avec la teneur en déchets jusqu'à 12% ou elle atteint la valeur 97,72% et diminue pour des teneurs supérieures à 12% tout en restant supérieure à la compacité de référence.

2.1.2 Evolution de la stabilité Marshall

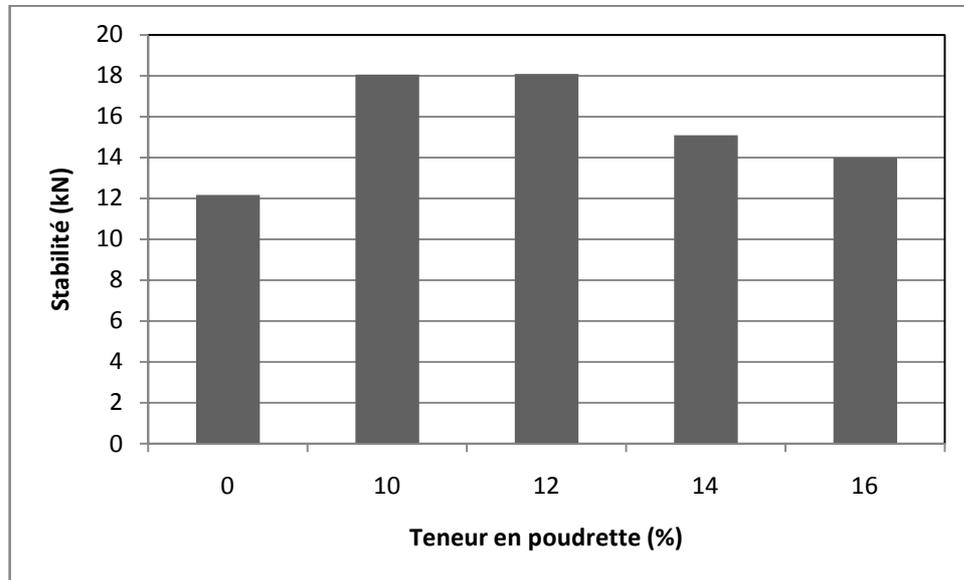


Figure VI.2 Stabilités en fonction de la teneur en déchets « Mode A »

Les bétons bitumineux modifiés présentent une meilleure stabilité comparativement à l'enrobé de référence

- ✓ La stabilité croît jusqu'à une teneur en poudre de 12% ensuite diminue, tout en restant supérieure à celle de l'enrobé de référence.

2.1.3 Evolution du fluage Marshall

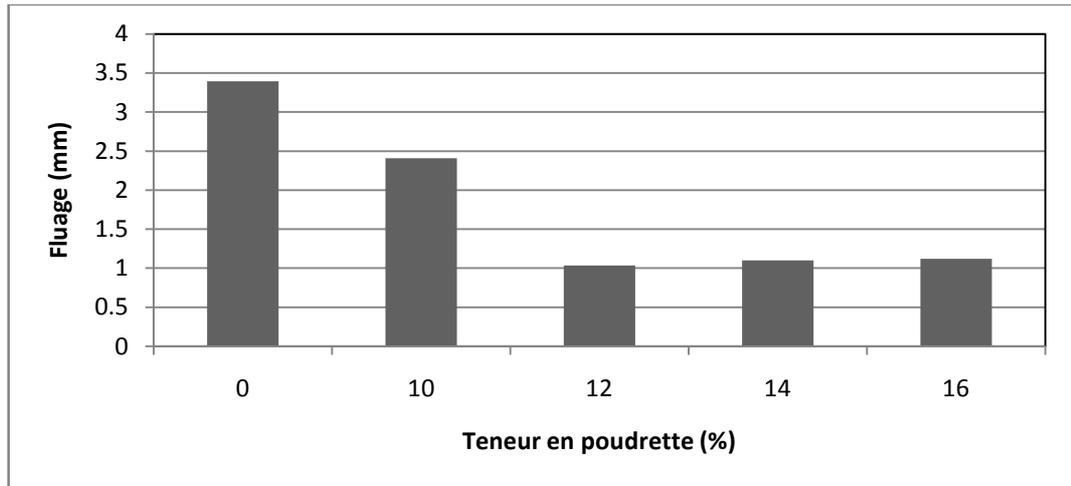


Figure VI.3 Fluage en fonction de la teneur en déchets « Mode A »

- ✓ La figure VI.3 montre que le fluage de l'enrobé s'améliore lorsque la teneur en poudrette augmente.
- ✓ On remarque que le fluage minimale est ce lui du mélange de 12%.
- ✓ Le fluage relatif aux différents teneurs en poudrettes est meilleur que le fluage témoin.

2.1.4 Evolution du quotient Marshall

Le Quotient Marshall «QM» est le rapport entre la stabilité et le fluage, donc il représente le rendement de l'éprouvette.

Les valeurs du QM ont été calculées afin d'évaluer la résistance des éprouvettes d'enrobés modifiés.

Une valeur plus grande du quotient indique que les mélanges sont plus résistants aux déformations permanentes. L'évolution du quotient en fonction des teneurs en poudrette est présentée sur la figure VI.4

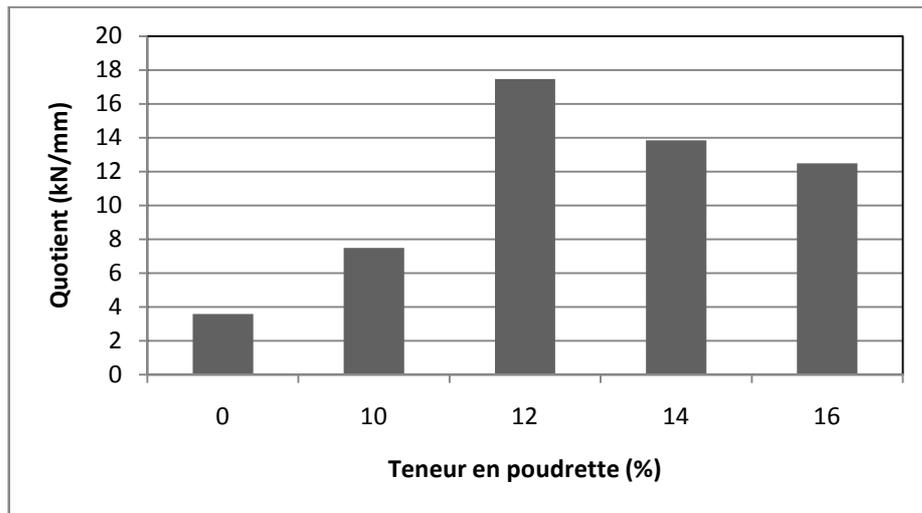


Figure VI.4 Quotients Marshall en fonction de la teneur en déchets « Mode A »

Comme le mélange de 12% de caoutchouc atteint une stabilité élevée et un bas fluage donc le QM lui-même est élevé par rapport aux autres mélanges.

Même si les autres mélanges ont des quotients moins que ce de la teneur 12%, mais ils ont toujours des QM supérieurs à ce du mélange témoin.

2.1.5 Evolution des vitesses soniques

L'essai ultrasonique est l'un des essais non destructif relatif aux bétons hydrauliques. On a réalisé cet essai sur nos éprouvettes pour avoir une idée sur leur comportement phonique.



Photo VI.1 Essai ultrasonique sur éprouvette de béton bitumineux

La figure suivante présente l'évolution de la vitesse ultrasonique selon la teneur en poudrette.

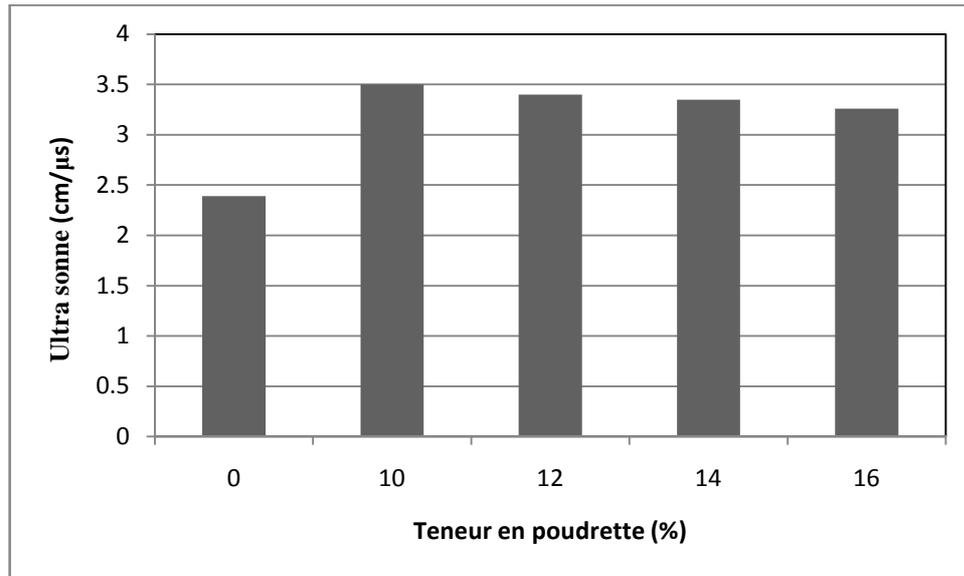


Figure VI.5 Vitesse sonique en fonction de la teneur en déchets « Mode A »

Le mélange témoin a une faible compacité et un pourcentage de vide élevé que les autres mélanges c'est pour ce la que sa vitesse soniques est la plus faible.

Les mélanges modifiés ont des vitesses soniques élevés car ils ont des bonnes compacités.

Les vitesses soniques diminuent dans les pourcentages de 10% jusqu'à 16%. Donc on peut conclure que le caoutchouc joue le rôle d'un isolant phonique.

2.1.6 Synthèse générale (Mode A)

- L'apport de la poudrette de caoutchoucs dans l'enrobé bitumineux selon ce mode a une grande influence sur ses caractéristiques mécaniques.

- La teneur en poudrette de caoutchouc de 12% pour la confection de l'enrobé modifié par le mode de A présente des meilleurs résultats par rapport au mélange témoin avec:

- Une augmentation de la stabilité de près de 49 %
- Une diminution du fluage de près de 69 %
- Une augmentation de la compacité de l'ordre de 5%
- Une augmentation de vitesse d'ultra sonne de près de 50 %

Tous les résultats concernant le mode de modification A sont regroupés dans le tableau VI.1 :

Tableau VI.1 Synthèse des résultats « mode A »

Bitume (%)	Epaisseur (cm)	Stabilité (KN)	Fluage (mm)	Compacité (%)	Quotient (KN/mm)	Vitesse sonique (cm/μs)
0	6,8	12,17	3,40	93,73	3,58	2,39
10	6,55	18,06	2,41	97,53	7,49	3,50
12	6,5	18,09	1,04	97,72	17,47	3,40
14	6,54	15,09	1,09	97,52	13,84	3,35
16	6,56	14,00	1,12	97,31	12,48	3,26

2.2 Mode B

Ce mode consiste à compenser des pourcentages de sable 0/3 par d'autres de la poudrette de caoutchouc.

Cette compensation s'effectue avant le malaxage par tamisage de sable et de caoutchouc dans les mêmes tamis ensuite rejeter des quantités de sable de chaque tamis et les remplacer par la quantité de caoutchouc correspondant.

On a évité la compensation aléatoire « rejeter une quantité de sable et la remplacer directement par le caoutchouc » pour éviter la modification de la courbe granulométrie du mélange.

La figure VI.6 présente la méthodologie de compensation adoptée :

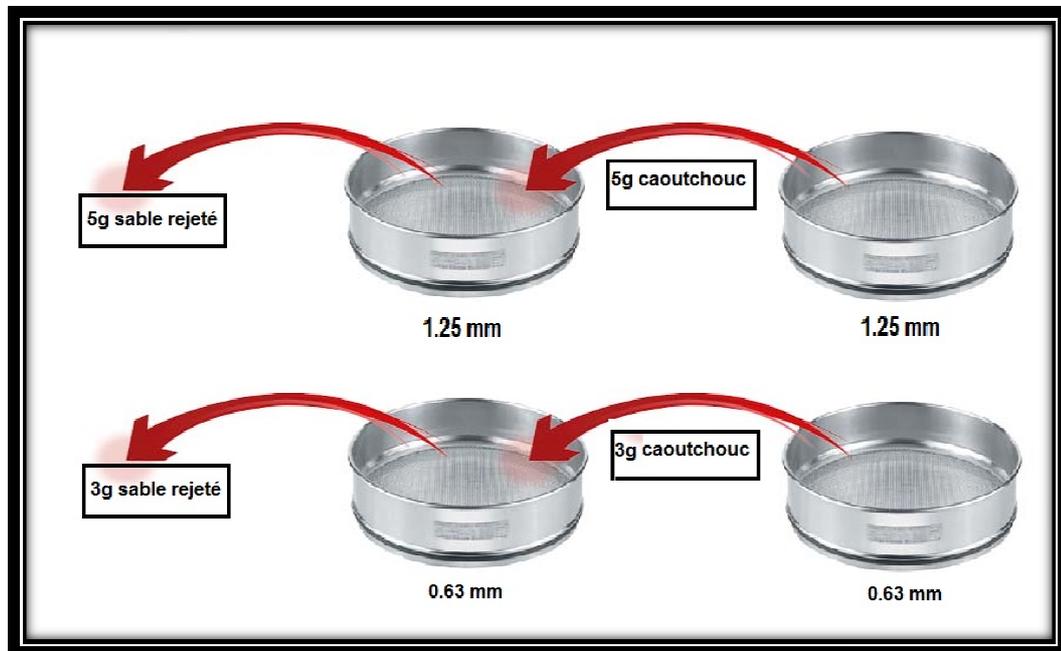


Figure VI.6 Étapes de compensation par la poudrette (Mode B)

Comme dans le mode A on a choisi d'effectuer quatre éprouvettes pour chaque teneur qui sont destinés à l'essai Marshall et les masses volumiques apparentes sont calculées par des mesures géométriques suivant la relation suivante :

$$\text{MVA} = \text{Masse} / \text{Volume}$$

Dans ce qui vient on va exposer les diagrammes que présentent la variation des caractéristiques mécaniques obtenues par les bétons bitumineux modifiés selon le mode B à différentes teneurs en déchets polymériques : « 0,5%, 1%, 1,5%, 2% » (voir Annexe C).

2.1.1 Evolution de la compacité

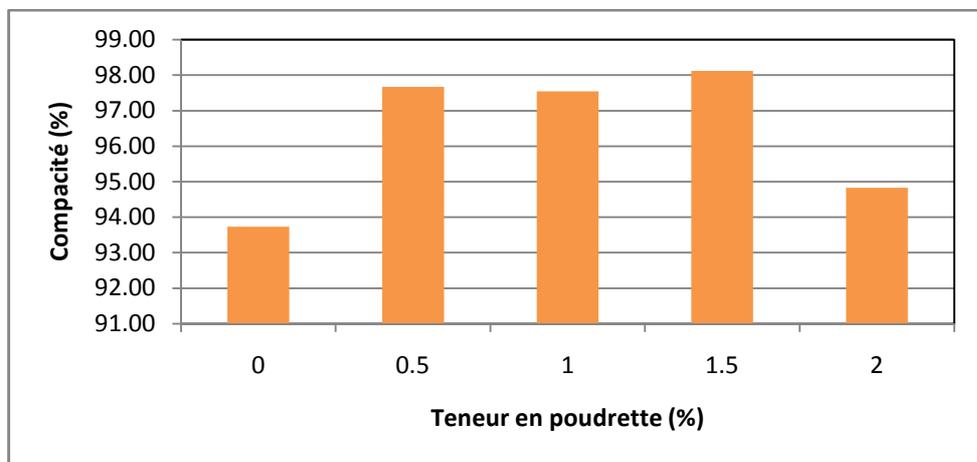


Figure VI.7 Compacités en fonction de la teneur en déchets « Mode B »

Comme pour le mode A la compacité dans les mélanges modifiés est toujours supérieure à celle du mélange témoin.

Le mélange relatif à 0,5% à une bonne compacité « 97,67% » mais diminue vers la valeur « 97,54% » dans le mélange 1% ; la valeur maximale « 98,12% » est atteinte pour une teneur en caoutchouc de 1,5% et enfin elle diminue.

2.2.2 Evolution des stabilités Marshall

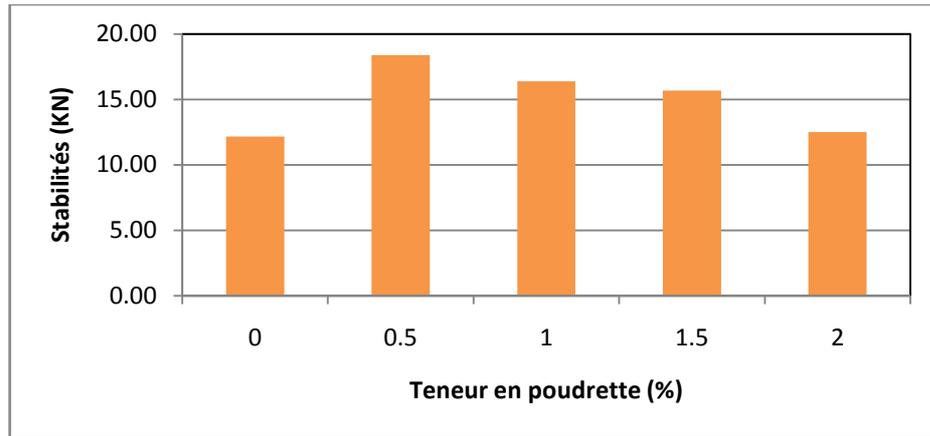


Figure VI.8 Stabilités en fonction de la teneur en déchets « Mode B »

- ✓ Les mélanges modifiés présentent des stabilités supérieures à celles du mélange témoin.
- ✓ La stabilité maximale est 18.39 KN pour le mélange de 0,5% et elle diminue dans les autres teneurs tout en restant supérieure à la stabilité de référence.

2.2.3 Evolution du fluage Marshall

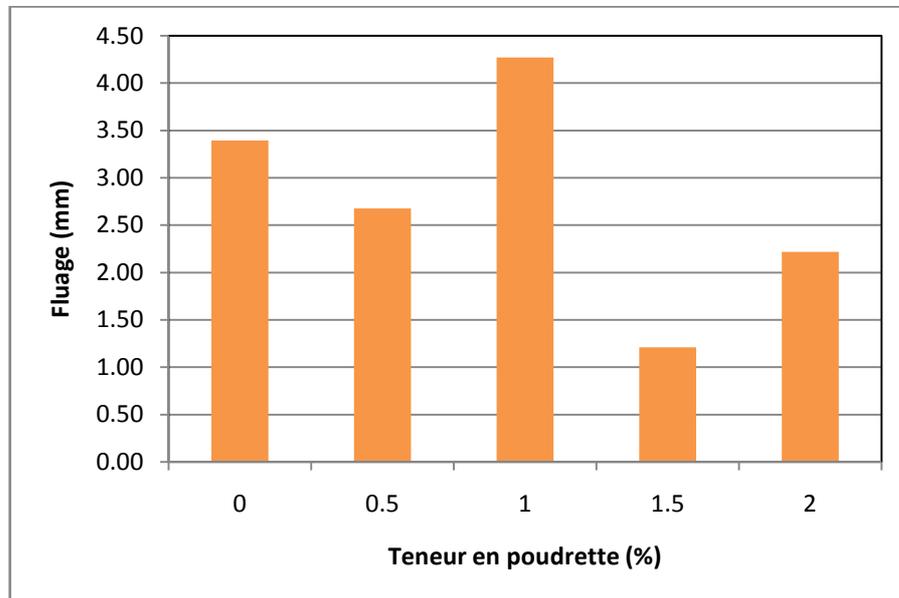


Figure VI.9 Fluage Marshall en fonction de la teneur en déchets « Mode B »

- ✓ On remarque que la variation du fluage en fonction de la teneur en déchet est irrégulière.
- ✓ Le meilleur fluage est ce du mélange de 1,5% ; par contre le fluage obtenu avec le mélange de 1% est le plus élevé il ne répond pas aux spécifications algériennes.

2.2.4 Evolution du quotient Marshall

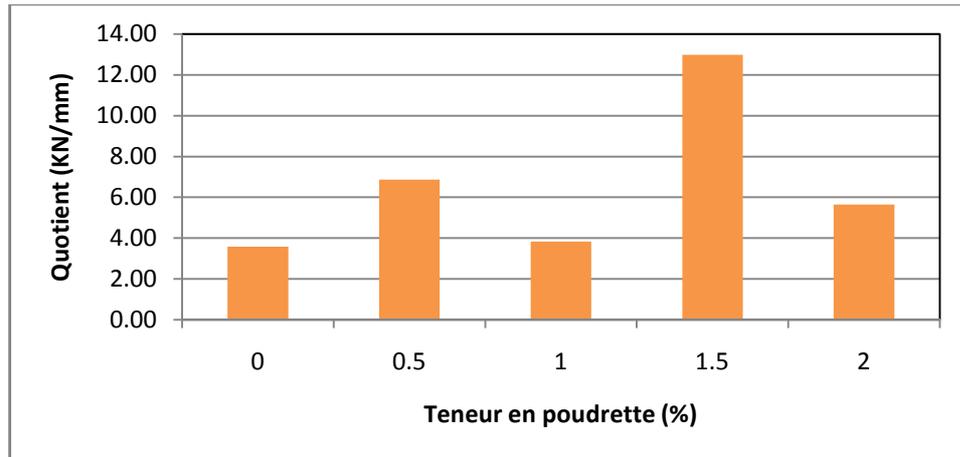


Figure VI.10 Quotient en fonction de la teneur en déchets « Mode B »

Comme on a expliqué précédemment le QM est le rapport entre la stabilité et le fluage.

Car l'évolution de diagramme de fluage est irrégulière donc l'évolution du quotient aussi sera irrégulière.

L'enrobé le plus résistant est celui de 1.5% de caoutchouc.

2.2.5 Evolution des vitesses soniques

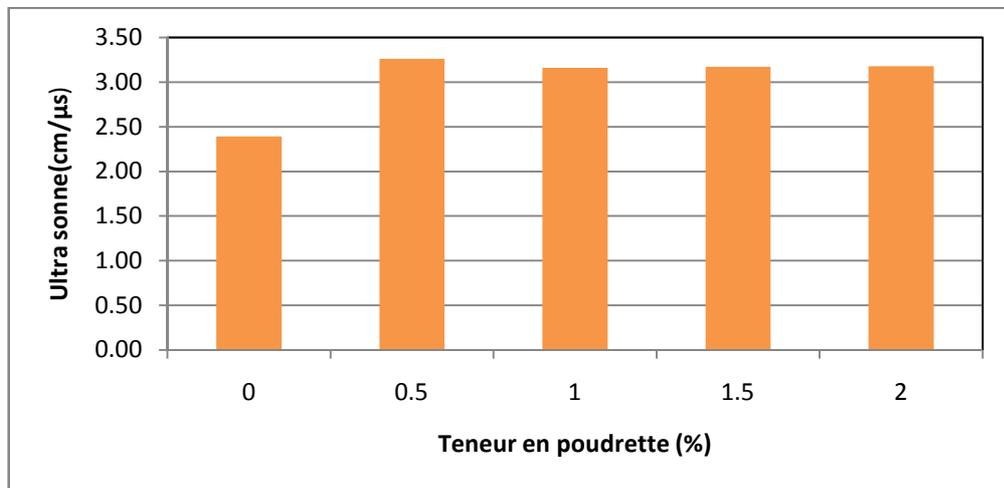


Figure VI.11 Vitesse sonique en fonction de la teneur en déchets « Mode B »

Le mélange témoin a une faible compacité et un pourcentage de vide élevé que les autres mélanges c'est pour cela que sa vitesse d'ultra sonne est la plus faible.

- ✓ Les mélanges modifiés ont des vitesses d'ultra sonne élevées car ils ont des bonnes compacités.
- ✓ La vitesse ultra sonne est diminuée dans les pourcentages de 0,5% jusqu'à 2,0%. Donc on peut conclure que le caoutchouc joue le rôle d'un isolant phonique.

2.2.6 Synthèse générale (Mode B)

- L'apport de la poudrette de caoutchouc dans l'enrobé bitumineux selon ce mode a une grande influence sur ses caractéristiques mécaniques.
- La teneur en poudrette de caoutchouc de 1,5% pour la confection de l'enrobé modifié par le mode de modification B présente des meilleurs résultats avec:
 - o Une augmentation de la stabilité de près de 48.4%
 - o Une diminution du fluage de près de 64.4%
 - o Une augmentation de la compacité de l'ordre de 5%
 - o Une augmentation de vitesse d'ultra sonne de près de 33%

Tous les résultats concernant le mode B de modification sont présentés sous forme de tableau :

Tableau VI.2 Synthèse des résultats « mode B »

0/3 (%)	Epaisseur (cm)	Stabilité (KN)	Fluage (mm)	Compacité (%)	Quotient (KN/mm)	Vitesse sonique (cm/μs)
0	6,80	12,17	3,40	93,73	3,58	2,39
0,5	6,46	18,39	2,68	97,67	6,87	3,26
1	6,54	16,39	4,27	97,54	3,84	3,16
1,5	6,50	15,69	1,21	98,12	12,98	3,17
2	6,77	12,51	2,22	94,83	5,65	3,18

3. SYNTHÈSE GLOBALE ET COMPARAISON

D'après les résultats obtenus on voit clairement que les enrobés modifiés par les deux modes de modification sont plus performants que les enrobés ordinaires.

Les diagrammes obtenus par le mode A ont des formes régulières et les bons résultats sont ceux du mélange de 12% de déchets.

Les diagrammes obtenus par le mode B sont irréguliers :

- La bonne compacité est celle du mélange de 1,5%
 - La bonne stabilité est celle du mélange 0,5%
 - Le bon fluage est celui de 1,5%
- Mais comme le mélange 1,5% a un QM élevé alors on peut dire qu'il est le meilleur mélange selon le mode B. La cause de cette irrégularité est certainement l'hétérogénéité entre les éprouvettes ; car l'une par exemple a une forte teneur en caoutchouc de 0,63 mm et l'autre non.

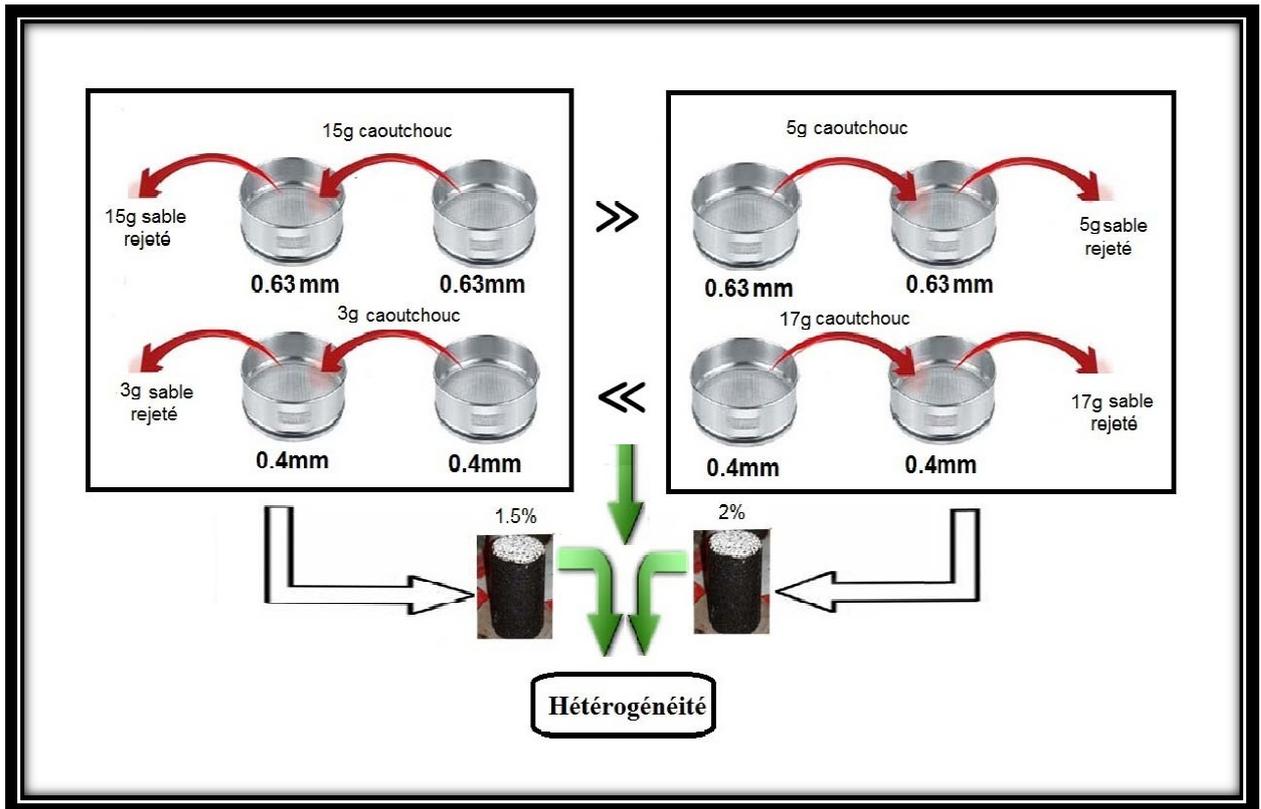


Figure VI.12 Schéma explicatif d'hétérogénéité en mode B

L'obtention des bonnes performances mécaniques passe par l'optimisation de la compacité des enrobés bitumineux. Ces résultats montrent que l'ajout de caoutchouc donne des meilleures compacités. Ceci trouve son explication dans le fait que le déchet additif joue le rôle de réducteur des vides.

Les enrobes modifiées ont des épaisseurs moindres que les enrobés ordinaire, alors ce caoutchouc améliore l'opération de compactage.

Le caoutchouc joue également un rôle principal dans l'isolation phonique.

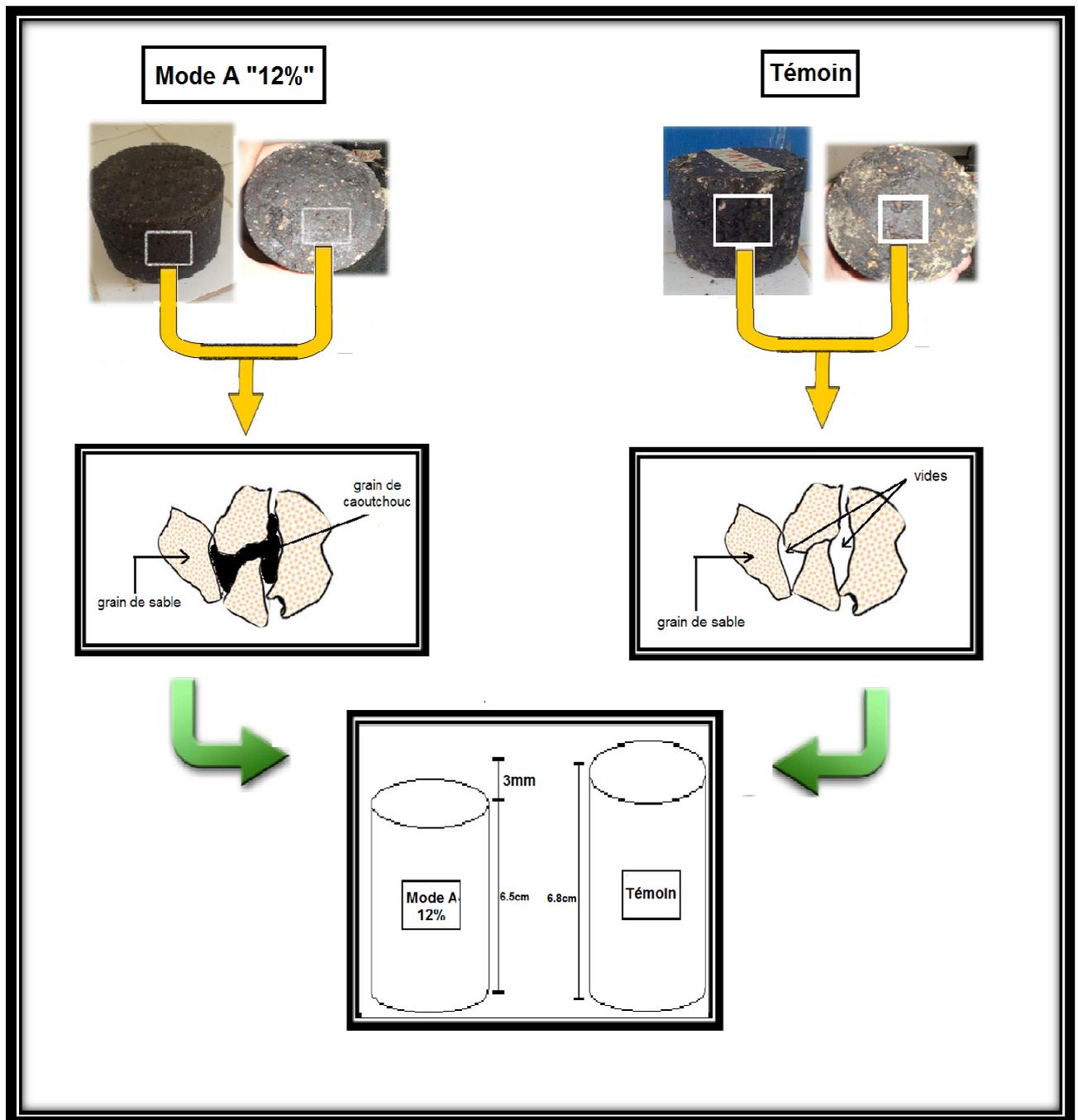


Figure VI.13 Comparaison entre éprouvette modifiée (12%) et l'éprouvette témoin

Voici un tableau qui présente une évaluation générale entre les enrobés ordinaires et les enrobés réalisées selon les deux modes A et B.

Tableau VI.3 Évaluation générale entre les trois types d'enrobés

	Enrobé ordinaire	Enrobé modifié Selon le Mode A	Enrobé modifié Selon le Mode B
Caractéristiques Mécaniques	✘	✓ ✓	✓
Isolation Phonique (*)	✓ ✓	✓	✓
Compactage	✘	✓ ✓	✓ ✓
Simplicité à la mise en œuvre	✓ ✓	✓ ✓	✘
Avantage économique	✘	✓ ✓	✘
Avantage environnemental	✘	✓ ✓	✓
✘ : mauvais ✓ : bon ✓✓ : très bon			
(*) : l'enrobé ordinaire est milieu que l'enrobé modifier dans l'isolation phonique car son pourcentage de vide est élevé mais si ils auront le même pourcentage de vides donc les enrobé modifier seront les plus isolant.			

4. CONCLUSION

Dans ce chapitre on a étudié les performances des enrobés modifiés par la poudre de caoutchouc selon deux modes. Les résultats obtenus ont montrés que les enrobés modifiés sont plus performant que les enrobés ordinaires ; et les meilleure résultats obtenus pour les deux modes sont ceux du :

- Mélange de 12% pour le mode A
- Mélange de 1,5% pour le mode B.

D'après les résultats obtenus on a conclu que l'incorporation du caoutchouc influe sur plusieurs paramètres, que ce soient mécaniques, phoniques, compactages même économiques et environnementaux car on compense un matériau coûteux par d'autre moins coûteux « Bitume par déchets de caoutchouc suivant le mode A ».

CONCLUSION GÉNÉRALE

À la lumière des résultats obtenus sur la caractérisation rhéologique et physiques des enrobés bitumineux modifiés à la poudrette de caoutchouc issues des déchets caoutchouteux en fin de cycle, il est possible de tirer les conclusions suivantes :

- les enrobés bitumineux ordinaires, présentent des caractéristiques mécaniques moyennes ce qui incite à élever leurs performances surtout de résistance pour leur éventuel utilisation dans les sections sollicitées.
- les enrobés bitumineux modifiés par adjonction de poudrette présentent des performances mécaniques supérieures quelque soit le mode de modification adopté.

Résultats du Mode A

- la compacité croît avec la teneur en déchets jusqu'à 12% ensuite elle diminue.
- La stabilité croît jusqu'à une teneur en poudrette de 12% ensuite elle se diminue.
- Le fluage est bien amélioré entre les teneurs de 10% à 12% ensuite il augmente légèrement mais il reste très acceptable.
- L'évolution du quotient Marshall est parabolique. Le meilleur QM est celui enregistré à la teneur de 12%.
- La vitesse sonique est maximale dans le mélange de 10% après elle diminue jusqu'à une vitesse minimale celle du mélange de 16%.

Résultats du Mode B

- La variation de la compacité en fonction des teneurs en déchet prend une forme irrégulière; une compacité maximale pour la teneur de 1,5% et une compacité minimale pour la teneur de 2%.
- La stabilité est maximale dans le mélange de 0,5% après elle diminue jusqu'à une stabilité minimale celle du mélange de 2%.
- La variation du fluage en fonction des teneurs en déchet prend une forme irrégulière ; le fluage minimal est celui de 1,5% et un fluage excessif pour la teneur de 1%.
- L'évolution du quotient Marshall est irrégulière. Le meilleur QM est celui obtenu à la teneur de 1,5% et le faible à 1%.
- Comme c'était le cas dans le mode A, la vitesse ultrasonique est optimale pour le mélange de 0,5% ensuite elle diminue.

Donc on peut dire que Les meilleurs résultats sont ceux du :

- Mélange de 12% pour le mode A
- Mélange de 1,5% pour le mode B.

- D'après les quotients de ces deux mélanges on peut dire que le premier mélange est le plus performant car un bon quotient veut dire une bonne stabilité avec le moindre fluage.
- Dans la pratique ou bien aux niveaux des postes d'enrobages le mode A est le plus efficace car il suffit juste de déterminer la masse nécessaire du caoutchouc sans prendre en considération les diamètres des grains de caoutchouc et leur influence sur la courbe granulométrie du mélange.
- La réalisation d'un enrobé selon le mode A est moins couteuse car dans ce mode on compense le bitume par des déchets de caoutchouc.
- Comme les matériaux caoutchouteux ne se décomposent dans la nature qu'après des centaines d'années donc l'incorporation de ces déchets polymériques dans les travaux routiers possède un gain appréciable sur le plan environnemental.
- D'après les résultats d'ultra sonne, on conclue que le caoutchouc joue également un rôle principal dans l'isolation phonique.
- Les enrobés modifiés sont mieux compactés que les enrobés ordinaires car dans l'opération de compactage le graine de caoutchouc situé entre deux graines de sable se dilate pour remplir les vides voisins.

D'après tous ça on peut maintenant répondre à la question préalablement posée « **lequel des deux modes de modification A ou B est le plus efficace ?** ». La réponse sera : « les enrobés modifiés selon les deux modes ont des bonnes caractéristiques mécaniques mais, compte tenu l'aspect économique, environnementale et la mise en œuvre, on trouve que le mode A est le plus efficace ».

Références bibliographiques

- [1] M. BOUTLIKHT, cours de MDC, chapitre 3 : Liants hydrocarbonés ; Université FERHAT ABBAS/ SETIF ; PP 01-02.
- [2] F. GABRYSIK ; 2008 ; – Matériaux – les granulats / chapitre 02.
- [3] Conseiller technique : Union Nationale des Producteurs de Granulats ; « la Convention Générale de Coopération signée entre le Ministère de l'Education Nationale» ; formation 1997.
- [4] fascicule 2 ; 2004 ; « Recommandations sur l'utilisation des bitumes et des enrobés bitumineux chaud : la formulation » ; ministère des travaux publics ; PP 20-23
- [5] Michel FAURE, « Cours de routes, tome 2 » les cours de l'ENTPE ALÉAS, chapitre 16 : les enrobés bitumineux. P 90.
- [6] PY Florian ; Mémoire de PFE Génie Civil; Juin 2010 ; « Etude de la sensibilité du module des enrobés à module élevé, influence de la teneur en liant, de la compacité et du pourcentage d'agrégats d'enrobé du matériau » ; CETE de l'Est; PP 13.
- [7] POLYCOMPOSITES ; Polymères et Composites [En ligne]. Site disponible sur « <http://fr.scribd.com/doc/73297332/polycomposites> » (Page consulter le 28/03/2013).
- [8] Pr. J. LECOMTE-BECKERS ; janvier 2010 ; physique des matériaux : partie polymères « Chapitre 2 : Distinction des polymères » ; PP 02-05.
- [9] Emploi des liants bitumineux modifiés, Mars 1999 ; des bitumes spéciaux et des bitumes avec additifs en techniques routières - Guide technique ; Association mondiale de la Route (AIPCR), comité technique des routes souples (c8) ; N° 303, 200; PP 44-62-93-98.
- [10] CENTRECO (Cécile HERVIER) et la DIRECCTE CENTRE (Carole RABUSSEAU) avec le soutien du pôle de compétitivité Elastopole ; « la filière caoutchouc en région centre » décembre 2010.
- [11] Recyclage Pneu ; Processus de fabrication de granulés et poudrette de pneus usés [En ligne]. Site disponible sur : <http://www.golden-trade.com/cnt/gt/unite-de-recyclage-de-pneus-3916-48257-cat.html> (Page consultée le 17/04/2013).
- [12] Demande de brevet européen;17/03/1995 ; « Enrobé bitumineux à chaud contenant du caoutchouc de récupération » ; Office de la propriété intellectuelle du canada : un organisme d'industrie canada ; Numéro de publication : 0 672 791 A1.

Annexe -A-

A- DETAILS DES ESSAIS

Dans nos expériences, on a utilisé réalisé les essais suivants :

A-1- SUR LE BITUME :

Le bitume pur utilisé dans notre étude provient des fondoirs de la centrale d'enrobage de la **TOTAL** à OUARGLA.

Les essais de caractérisation ont été effectués sur celui-ci ; Il s'agit des essais de pénétrabilité à l'aiguille à 25°C , de ramollissement bille et anneau et la densité relative .

Tableau A-1: Résultats de l'essai de pénétrabilité

Essai	Pénétrabilité 1/10 mm à 25°C			Moyenne	Recommandations
Résultat	45	44	46	45	40 à 50

Tableau A-2: Résultats de l'essai point de ramollissement

Essai	ramollissement BA (°C)		Moyenne	Recommandations
Résultat	57	55	56	47 à 60

Tableau A-3 : Résultats de l'essai densité relative

Essai	densité relative « méthode du pycnomètre »				$\rho = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)} \times \rho_T$	Recommandations
	A	B	C	D		
Résultat	35.259	62.933	59.95	64.95	1,089	1,088 1.00 à 1.10
	35.259	62.933	60.47	64.95	1,087	

A-2. SUR LES AGREGATS :

A-2-1) Analyses granulométriques selon (NF EN 933-1)

Les résultats de l'analyse granulométrique des différentes fractions granulaires sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau A-4 : Résultats d'analyse granulométrique 0/3

Ouverture Tamis	Refus Partiel(g)	Refus Cumulé(g)	Pourcentage Refus (%)	Pourcentage passant (%)
5	3.8	3.8	0,19	99,81
4	7.8	11.6	0.58	99,42
2,5	192.2	200	10.00	90
2	108	300.2	15.01	85
1,25	472	580	29.00	71
1	328.2	800.2	40.01	60
0,63	491.8	820	41.00	59
0,315	709.2	1201	60.05	40
0,16	611	1320.2	66.01	34
0,08	949.2	1560.02	78.01	22

Tableau A-5 : Résultats d'analyse granulométrique 3/8

Ouverture Tamis	Refus Partiel(g)	Refus Cumulé (g)	Pourcentage Refus (%)	Pourcentage passant (%)
12,5	0.00	0.00	0.00	100
10	2.40	2.40	0.06	99.94
8	398	400.4	10.01	90
6,3	1121.99	1520	38.00	62
5	1398.41	2520.4	63.01	37
4	1841.6	3240.01	81.00	19
2,5	1918.4	3760	94.00	6
2	2077.59	3995.99	99.90	0.10

Tableau A-6 : Résultats d'analyse granulométrique 8/15

Ouverture Tamis	Refus Partiel(g)	Refus Cumulé (g)	Pourcentage Refus (%)	Pourcentage passant (%)
20	0.00	0.00	0.00	100
16	1020.6	1020.6	17.01	83
14	1258.8	2279.4	37.99	62
12,5	2341.8	3600.6	60.01	40
10	2998.2	5340	89.00	11
8	2582.4	5580.6	93.01	7
6,3	3237.6	5820	97.00	3

A-2-2) Essai d'aplatissement selon (NF EN 933-3)

Plus les gravillons sont plats, moins leur mise en place dans la route ou dans les bétons est facile et plus ils sont fragiles.

Il est donc important de contrôler le coefficient d'aplatissement des granulats dont les dimensions sont comprises entre 4 et 50 mm

Tableau A-7 : Résultat d'essai d'aplatissement 3/8

TAMISAGE SUR TAMIS		TAMISAGE SUR GRILLES	
Classes granulaires d/D (mm)	Mg (g)	Ecartement des grilles (mm)	Passant Me (g)
10	00	6.3	00
8	63,52	5	5,73
6.3	486,59	4	40,47
5	745,05	3.15	68.36
4	840,25	2.5	52.44
$\Sigma M_g = 2214,51$		$\Sigma M_e = 167$	
$A = \frac{\Sigma M_e}{\Sigma M_g} \times 100 = 7.54 \%$			

Tableau A-8 : Résultat d'essai d'aplatissement 8/15

TAMISAGE SUR TAMIS		TAMISAGE SUR GRILLES	
Classes granulaires d/D (mm)	Mg (g)	Ecartement des grilles (mm)	Passant Me (g)
20	00	12,5	00
16	251,43	10	65,96
12,5	1855,9	8	210,75
10	2703,08	6,3	187,84
8	806,86	5	87,08
6,3	305,13	4	57,99
5	38,76	3,15	20,98
4	26,94	2,5	9,8
$\Sigma M_g = 5988,1$		$\Sigma M_e = 640,40$	
$A = \frac{\Sigma Me}{\Sigma Mg} \times 100 = 10,69 \%$			

A-2-3) Propreté des granulats selon (NF P 18-591 septembre 1990)

Pour les granulats de classes 3/8 et 8/15, provenant des Carrière d'El Atteuf, Wilaya Ghardaïa, nous avons effectué l'essai de propreté superficielle et les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant:

Tableau A-9 : Propreté superficielle des granulats.

	Classe 3/8	Classe 8/15
Poids humide échantillon P1 (g)	400	500
Poids sec échantillon P2 (g)	397.7	499.1
Propreté $p(\%) = \frac{(p_1 - p_2)}{p_2} \times 100$ (%)	0.575%	0.18%
Recommandations	Inférieur 1%	

A-2-4) Essai d'équivalent de sable à 10 % de fines selon (NF P18-597)

L'essai pour la détermination de l'équivalent de sable est un essai qui nous permet d'estimer la qualité des sols sablonneux.

Tableau A-10 : Résultats de l'essai d'Equivalent de sable.

	Hauteur totale H1	Hauteur de sable H2	ES = $(H_2/H_1) \times 100$	ES moyen (%)	recommandations
ES à vus	12,2	9,2	75.4	76.125 %	Supérieur à 45 %
	12.1	9.3	76.85		
ES à piston	12,2	7.3	59.83	61.32 %	
	12.1	7.6	62.81		

A-2-5) Essais de résistance à l'usure (micro Deval) selon (NF P18-572)

L'essai micro-Deval permet de mesurer la résistance à l'usure des roches. Cette résistance à l'usure pour certaines roches n'est pas la même à sec ou en présence d'eau.

Tableau A-11 : Résultats de l'essai micro Deval

Classe granulaire	Masse abrasive	Poids d'éléments > 1.6 mm m' (g)	Poids d'éléments < 1.6 mm m = M-m' (g)	MDE = $100 \cdot \frac{m}{M}$	Recommandations
10/14	500	408	73.25	14,65	Inferieur à 20 %

A-2-6) Essais de résistance au choc (Los Angeles) selon (NF P18-573)

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés dans la machine Los Angeles.

Tableau A-12 : Coefficients Los Angeles.

Classe granulaire	Nombre de boulets	Poids d'éléments > 1.6 mm m' (g)	Poids d'éléments < 1.6 mm m = M-m' (g)	LA = $100 \cdot \frac{m}{M}$	Observation
10/14	11	4080	920	18,40	Inferieur à 25%

A- 2-7) Les masse volumique absolue des matériaux

C'est le rapport de la masse du matériau M sur son volume apparent V

Tableau A-13 : Densités des fractions 0/3, 3/8, 8/15 et caoutchouc

matériaux	Poids des agrégats secs P_1 (g)	Poids du récipient plein d'eau P_2	$P_3=P_1+P_2$	Poids récipient +agrégats +eau P_4	Volume des agrégats $V= P_3-P_4$	masse volumique absolue $\frac{p_1}{v}$
Sable 0/3	100	1017.75	1117.57	1078.811	38.759	2.58
Gravier 3/8	120.5	1017.75	1138.25	1092.258	45.992	2.62
Gravier 8/15	190	1017.75	1207.75	1135.231	72.519	2.62
Caoutchouc	10	1017.75	1027.75	1007.75	20	0.5

Annexe -B-

B-1 LES DETAILS DE LA FORMULATION :

1) Etude du béton bitumineux 0/14

Nous avons choisi d'étudier un béton bitumineux semi grenu de classe "0/14. Il s'agit d'un mélange composé des trois classes granulaires: 0/3, 3/8 et 8/15.

La méthode utilisée dans notre étude consiste à ajuster la courbe du mélange granulaire dans le fuseau de spécification d'un béton bitumineux semi grenu 0/14.

Les pourcentages obtenus sont déterminés d'après la courbe granulométrique de chaque agrégat.

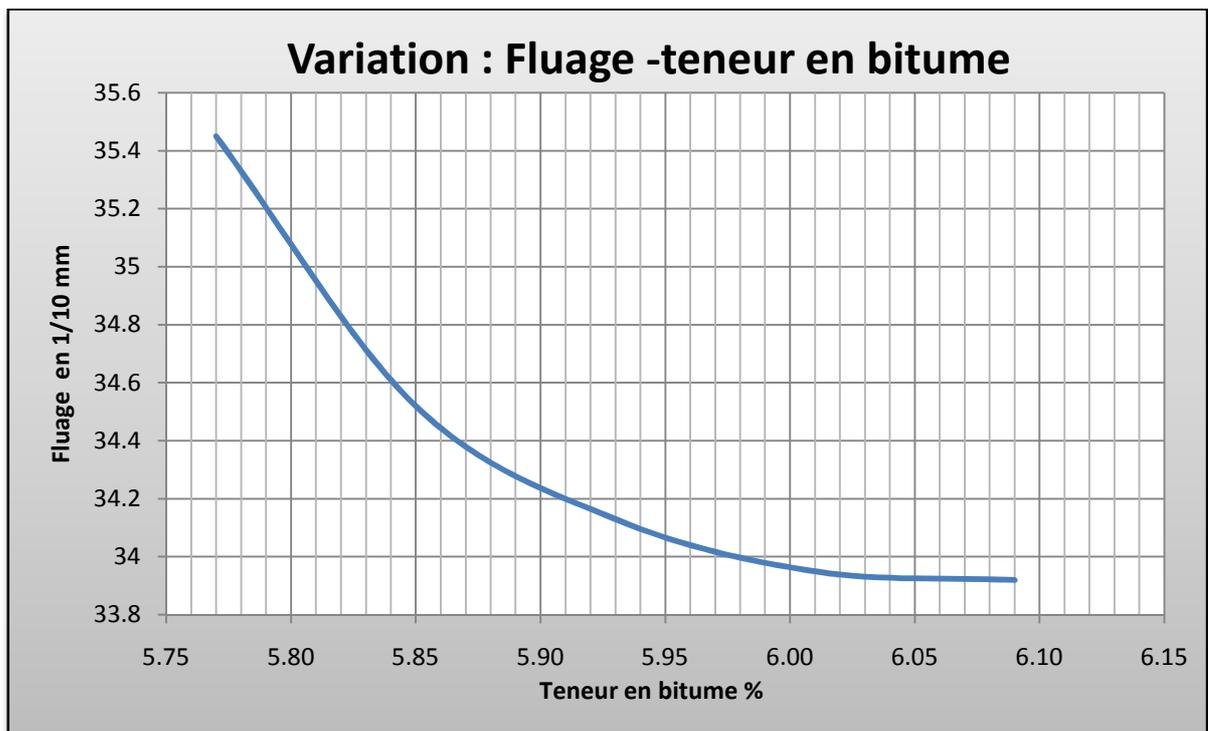
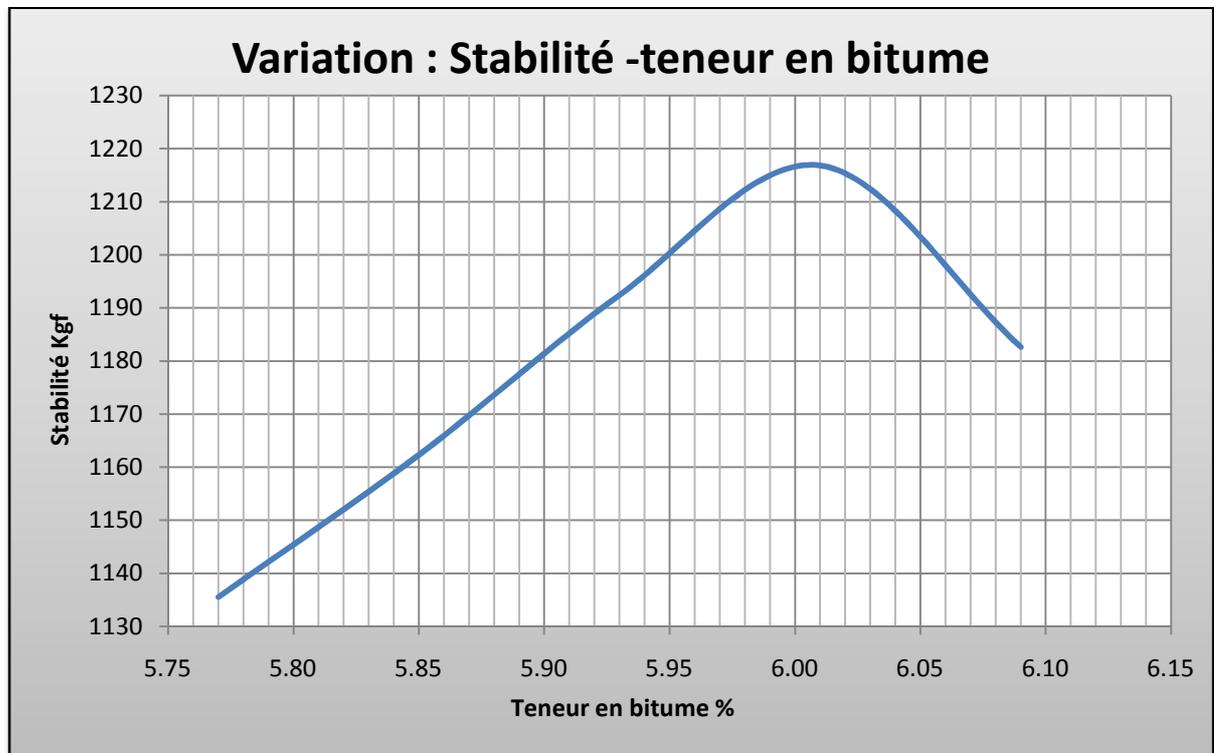
- Nous obtenons les résultats suivants :

Tableau B-1 : Etude de composition

Tamis (mm)	agrégat 8/15		agrégat 3/8		sable 0/3		mélange étudié (%)
	refus (%)	24%	refus (%)	34%	refus (%)	42%	
20	100	24	100	34	100	42	100
16	83	19.92	100	34	100	42	95.92
14	62	14.88	100	34	100	42	90,88
12,5	40	9.60	100	34	100	42	85,60
10	11	2.64	99.94	33.98	100	42	78,62
8	7	1.68	90	30.60	100	42	74,28
6,3	3	0.72	62	21.08	100	42	63,80
5	0	0	37	12.58	99.81	41.92	54,50
4	0	0	19	6.46	99.42	41.76	48,22
2,5	0	0	6	2.04	90	37.80	39,84
2	0	0	0.10	0.03	85	35.70	35,73
1,25	0	0	1	0	71	29.82	29,82
1	0	0	0	0	60	25.20	25,20
0,63	0	0	0	0	59	24.78	24,78
0,315	0	0	0	0	40	16.80	16,80
0,16	0	0	0	0	34	14.28	14,28
0.08	0	0	0	0	22	9.24	9,24

B-2 DETERMINATION DE LA TENEUR EN BITUME OPTIMALE

La variation des paramètres de l'enrobé en fonction de la teneur en bitume est traduite par les représentations graphiques suivantes :



Annexe -C-

La compensation dans le bitume

	0%		10%		12%		14%		16%	
	pourcentage dans le mélange	densité	% dans le mélange	densité						
0/3	39,48	2,58	39,48	2,58	39,48	2,58	39,48	2,58	39,48	2,58
3/8	31,96	2,62	31,96	2,62	31,96	2,62	31,96	2,62	31,96	2,62
8/15	22,56	2,62	22,56	2,62	22,56	2,62	22,56	2,62	22,56	2,62
bitume	6,00	1,09	5,40	1,09	5,28	1,09	5,16	1,09	5,04	1,09
caoutchouc	0,00	0,50	0,60	0,50	0,72	0,50	0,84	0,50	0,96	0,50
MVR(g/cm3)	2,40		2,37		2,36		2,35		2,34	

	0%				10%				12%					
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	moyenne	
	moyenne				moyenne				moyenne					
épaisseur (cm)	6,9	6,82	6,77	6,71	6,56	6,57	6,54	6,53	6,55	6,5	6,52	6,5	6,5	6,5
MVA (g/cm3)	2,23	2,21	2,28	2,28	2,31	2,32	2,3	2,31	2,31	2,31	2,33	2,31	2,31	2,31
MVR (g/cm3)	2,4				2,37				2,37				2,36	
Compacité %	92,92	92,08	95,00	95,00	93,73	97,47	97,05	97,47	97,47	97,88	98,73	97,03	97,88	97,88
Vv%	7,08	7,92	5	5	6,27	2,53	2,95	2,53	2,53	2,12	1,27	2,97	2,12	2,12
Ultra Sonne(cm/µs)	2,40	2,38	2,41	2,37	2,39	3,51	3,49	3,48	3,5	3,41	3,44	3,39	3,36	3,4
Fluage(mm)	3,45	3,42	3,38	3,35	3,4	2,41	2,43	2,39	2,41	1,04	1,04	1,03	1,05	1,04
Stabilité (kN)	12,2	12,15	12,14	12,19	12,17	18,1	18,7	18,5	18,06	18,1	18,09	18,09	18,08	18,09
Quotient (kN/mm)	3,54	3,55	3,59	3,64	3,58	7,51	7,70	7,74	7,49	17,40	17,39	17,56	17,22	17,47
	14%				16%									
	1	2	3	4	moyenne				1	2	3	4	moyenne	
épaisseur (cm)	6,5	6,52	6,56	6,58	6,54	6,56	6,53	6,59	6,56	6,56	6,56	6,56	6,56	6,56
MVA	2,28	2,27	2,31	2,3	2,29	2,28	2,27	2,29	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28
MVR	2,35				2,35				2,34				2,34	
Compacité %	97,02	96,60	98,30	97,87	97,45	97,44	97,01	97,86	97,44	97,44	97,44	97,44	97,44	97,44
Vv%	2,98	3,40	1,70	2,13	2,55	2,56	2,99	2,14	2,14	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56
Ultra Sonne (cm/µs)	3,34	3,35	3,35	3,36	3,35	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26
Fluage (mm)	1,08	1,09	1,09	1,1	1,09	1,1	1,12	1,12	1,12	1,14	1,14	1,12	1,12	1,12
Stabilité (kN)	15,08	15,09	15,09	15,1	15,09	14,05	14,02	13,98	13,98	13,95	13,95	14	14	14
Quotient (kN/mm)	13,96	13,84	13,84	13,73	13,84	12,77	12,52	12,48	12,48	12,24	12,24	12,50	12,50	12,50



La compensation dans le sable 0/3

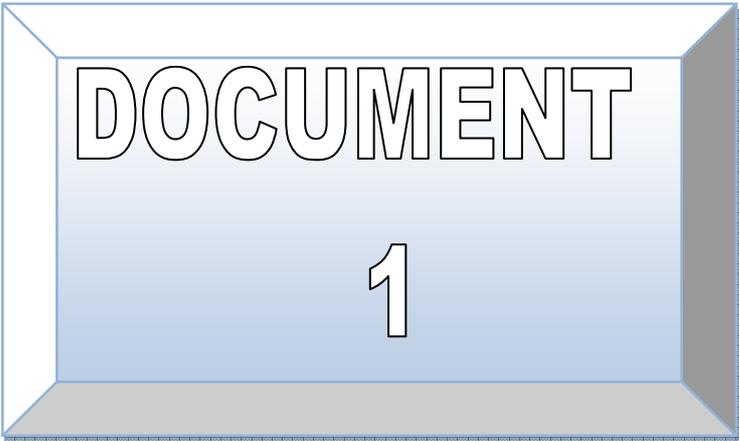
	0%		0,5%		1%		1,5%		2%	
	pourcentage dans le mélange	densité	% dans le mélange	densité						
0/3	39,48	2,58	39,28	2,58	39,08	2,58	38,88	2,58	38,68	2,58
3/8	31,96	2,62	31,96	2,62	31,96	2,62	31,96	2,62	31,96	2,62
8/15	22,56	2,62	22,56	2,62	22,56	2,62	22,56	2,62	22,56	2,62
bitume	6,00	1,09	6,00	1,09	6,00	1,09	6,00	1,09	6,00	1,09
caoutchouc	0,00	0,50	0,20	0,50	0,40	0,50	0,60	0,50	0,80	0,50
MVR(g/cm3)	2,40		2,38		2,37		2,35		2,33	

	0%				0,5%				1%						
	1	2	3	4	moyenne	1	2	3	4	moyenne	1	2	3	4	moyenne
	épaisseur (cm)	6,9	6,82	6,77	6,71	6,8	6,45	6,47	6,45	6,47	6,46	6,5	6,52	6,48	6,5
MVA (g/cm3)	2,23	2,21	2,28	2,28	2,25	2,31	2,32	2,32	2,33	2,32	2,31	2,33	2,29	2,31	2,31
MVR (g/cm3)	2,4				2,4	2,38				2,38	2,37				
Compacité %	92,92	92,08	95,00	95,00	93,73	97,06	97,48	97,48	97,90	97,48	97,47	98,31	96,62	97,47	97,47
Vv%	7,08	7,92	5	5	6,27	2,94	2,52	2,52	2,10	2,52	2,53	1,69	3,38	2,53	2,53
Ultra Sonne (cm/µs)	2,40	2,38	2,41	2,37	2,39	3,27	3,26	3,26	3,25	3,26	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16
Fluage (mm)	3,45	3,42	3,38	3,35	3,4	2,68	2,68	2,67	2,69	2,68	4,27	4,28	4,27	4,26	4,27
Stabilité (kN)	12,2	12,15	12,14	12,19	12,17	18,38	18,38	18,41	18,37	18,39	16,3	16,35	16,43	16,48	16,39
Quotient (kN/mm)	3,54	3,55	3,59	3,64	3,58	6,86	6,86	6,90	6,83	6,86	3,82	3,82	3,85	3,87	3,84

	1,5%				2%					
	1	2	3	4	moyenne	1	2	3	4	moyenne
	épaisseur (cm)	6,5	6,55	6,45	6,5	6,5	6,75	6,74	6,8	6,79
MVA (g/cm3)	2,31	2,32	2,3	2,31	2,31	2,2	2,21	2,21	2,22	2,21
MVR (g/cm3)	2,35				2,35	2,33				2,33
Compacité %	98,30	98,72	97,87	98,30	98,30	94,02	94,44	94,44	94,87	94,44
Vv%	1,70	1,28	2,13	1,70	1,70	5,98	5,56	5,56	5,13	5,56
Ultra Sonne (cm/µs)	3,16	3,14	3,2	3,18	3,17	3,18	3,15	3,21	3,18	3,18
Fluage (mm)	1,12	1,32	1,3	1,1	1,21	2,21	2,23	2,25	2,19	2,22
Stabilité (kN)	15,65	15,73	15,7	15,68	15,69	12,5	12,55	12,47	12,52	12,51
Quotient (kN/mm)	13,97	11,92	12,08	14,25	12,97	5,66	5,63	5,54	5,72	5,64



DOCUMENTS HORS TEXTE



3 Références normatives

- P 18-101 Granulats — Vocabulaire, définitions et classifications.
- NF P 98-250-1 Essais relatifs aux chaussées — Préparation des mélanges hydrocarbonés — Partie 1 : Fabrication d'un enrobé en laboratoire.
- NF P 98-250-6 Essais relatifs aux chaussées — Préparation des mélanges hydrocarbonés — Partie 6 : Mesure de la masse volumique apparente d'une éprouvette par pesée hydrostatique.

4 Définitions — Abréviations

- MVa est la masse volumique apparente de l'éprouvette par mesures géométriques, en grammes par centimètre cube.
- MVA est la masse volumique apparente de l'éprouvette par pesée hydrostatique, en grammes par centimètre cube.
- ρ_r est la masse volumique réelle des granulats, en grammes par centimètre cube.
- MVR est la masse volumique réelle du mélange hydrocarboné, en grammes par centimètre cube.
- v est le pourcentage des vides.
- t est la température de l'essai, en degrés Celsius.
- m est la masse de l'éprouvette témoin pour une hauteur théorique de 63,5 mm, en grammes.
- m_i est la masse d'une éprouvette, en grammes.
- Stabilité Marshall est la charge maximale en décanewtons obtenue par un essai de compression suivant une génératrice d'une éprouvette semi-frettée dans des conditions déterminées.
- Fluage Marshall est la valeur, exprimée en dixièmes de millimètre, de l'affaissement de l'éprouvette au moment de la rupture.

5 Principe de l'essai

L'essai consiste à compacter des éprouvettes par damage selon un processus déterminé, puis à les soumettre à un essai de compression suivant une génératrice dans des conditions définies (figure 1).

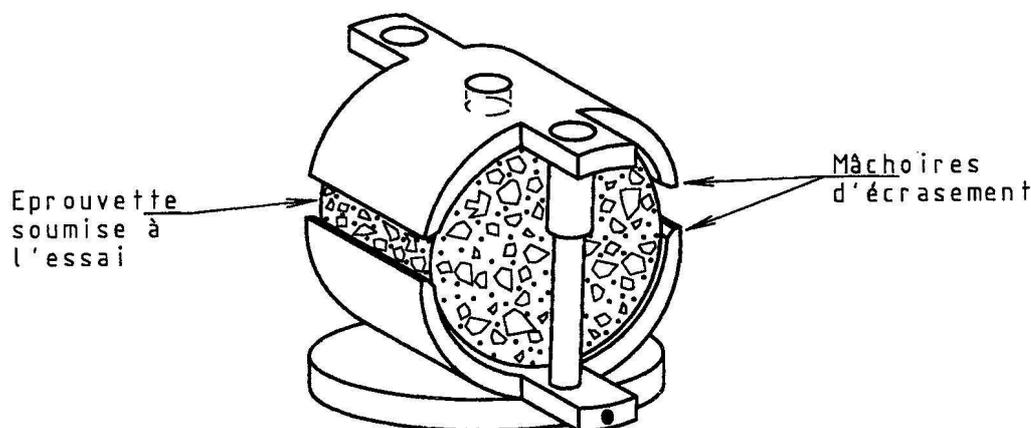


Figure 1 : principe de l'essai de compression

6 Appareillage

6.1 Appareillage spécifique

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 de moule. Le diamètre intérieur du moule doit être de $101,6 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ (figure 2).

Deux pistons extracteurs de diamètre légèrement inférieur au diamètre intérieur du moule (figure 3).

Dimensions en millimètres

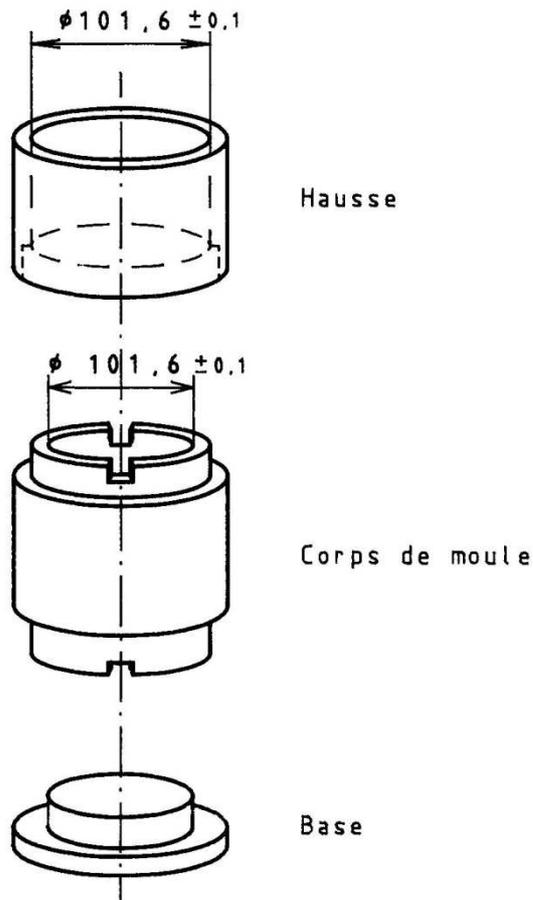


Figure 2 : corps de moule, hausse, base

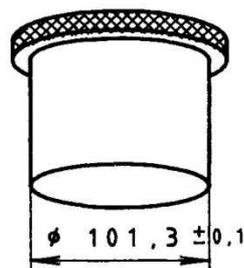


Figure 3 : exemple de piston extracteur

Une dame de compactage comportant un marteau pesant $4\,536\text{ g} \pm 5\text{ g}$. 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 4).

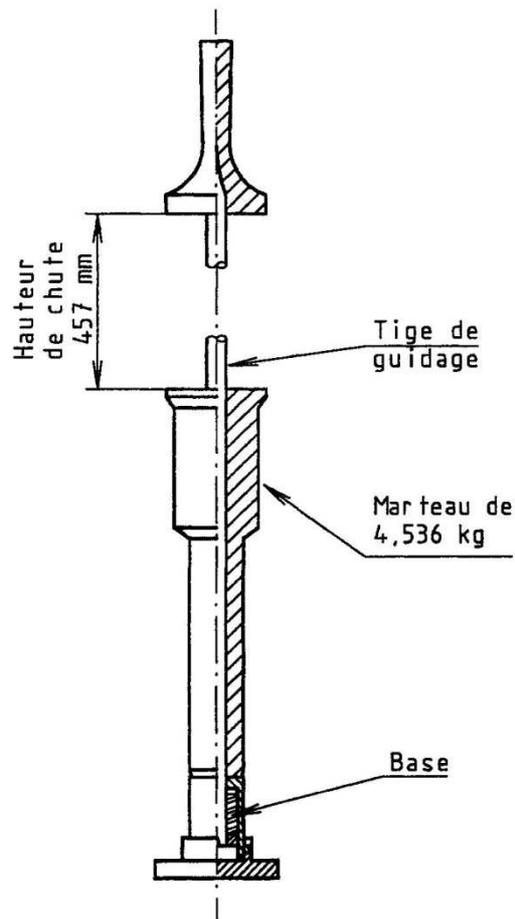


Figure 4 : exemple de dame de compactage

Un bloc support de moule en chêne de dimensions suivantes : largeur 300 mm, longueur 300 mm, hauteur 450 mm. Ce bloc est 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 50,9 mm et 51 mm (figure 5).

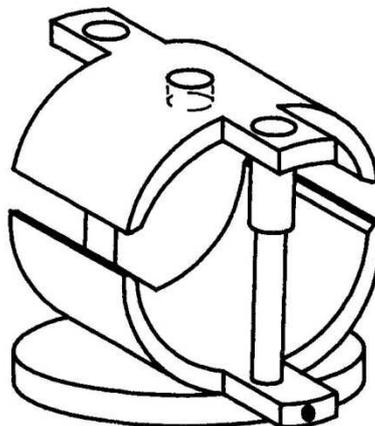
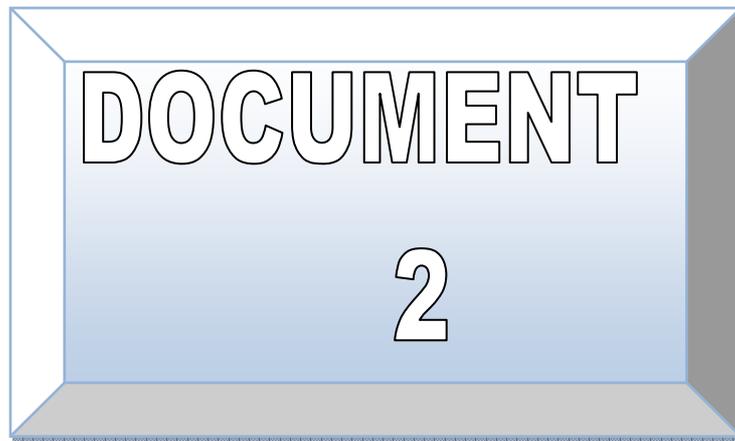


Figure 5 : mâchoires d'écrasement

Un dispositif de mesure du fluage à 0,1 mm près.



**Rubber, vulcanized or thermoplastic —
Determination of density**

*Caoutchouc vulcanisé ou thermoplastique — Détermination de la
masse volumique*



Reference number
ISO 2781:2008(E)

© ISO 2008

PDF disclaimer

This PDF file may contain embedded typefaces. In accordance with Adobe's licensing policy, this file may be printed or viewed but shall not be edited unless the typefaces which are embedded are licensed to and installed on the computer performing the editing. In downloading this file, parties accept therein the responsibility of not infringing Adobe's licensing policy. The ISO Central Secretariat accepts no liability in this area.

Adobe is a trademark of Adobe Systems Incorporated.

Details of the software products used to create this PDF file can be found in the General Info relative to the file; the PDF-creation parameters were optimized for printing. Every care has been taken to ensure that the file is suitable for use by ISO member bodies. In the unlikely event that a problem relating to it is found, please inform the Central Secretariat at the address given below.



COPYRIGHT PROTECTED DOCUMENT

© ISO 2008

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either ISO at the address below or ISO's member body in the country of the requester.

ISO copyright office
Case postale 56 • CH-1211 Geneva 20
Tel. + 41 22 749 01 11
Fax + 41 22 749 09 47
E-mail copyright@iso.org
Web www.iso.org

Published in Switzerland

Contents

Page

Foreword.....	iv
1 Scope	1
2 Normative references	1
3 Terms and definitions.....	1
4 Principle	2
5 Apparatus	2
6 Test piece	2
7 Time-interval between forming and testing	2
8 Conditioning of test pieces.....	2
9 Temperature of test	3
10 Procedure	3
10.1 Preparation of sample	3
10.2 Method A.....	3
10.3 Method B.....	4
11 Expression of results	4
11.1 Method A.....	4
11.2 Method B.....	5
12 Test report	5

Foreword

ISO (the International Organization for Standardization) is a worldwide federation of national standards bodies (ISO member bodies). The work of preparing International Standards is normally carried out through ISO technical committees. Each member body interested in a subject for which a technical committee has been established has the right to be represented on that committee. International organizations, governmental and non-governmental, in liaison with ISO, also take part in the work. ISO collaborates closely with the International Electrotechnical Commission (IEC) on all matters of electrotechnical standardization.

International Standards are drafted in accordance with the rules given in the ISO/IEC Directives, Part 2.

The main task of technical committees is to prepare International Standards. Draft International Standards adopted by the technical committees are circulated to the member bodies for voting. Publication as an International Standard requires approval by at least 75 % of the member bodies casting a vote.

Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this document may be the subject of patent rights. ISO shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

ISO 2781 was prepared by Technical Committee ISO/TC 45, *Rubber and rubber products*, Subcommittee SC 2, *Testing and analysis*.

This fourth edition cancels and replaces the third edition (ISO 2781:1988), which has been technically revised. It also incorporates the Technical Corrigendum ISO 2781:1988/Cor.1:1996.

Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of density

WARNING — Persons using this International Standard should be familiar with normal laboratory practice. This standard does not purport to address all of the safety problems, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user to establish appropriate safety and health practices and to ensure compliance with any national regulatory conditions.

CAUTION — Certain procedures specified in this International Standard may involve the use or generation of substances, or the generation of waste, that could constitute a local environmental hazard. Reference should be made to appropriate documentation on safe handling and disposal after use.

1 Scope

This International Standard specifies two methods of test for the determination of the density of solid vulcanized and thermoplastic rubbers.

Such determinations are of importance in the control of the quality of a rubber compound and in the calculation of the mass of rubber required to produce a given volume of material.

This International Standard does not cover the determination of the relative density of rubber, which is the ratio of the mass of a given volume of rubber to the mass of an equal volume of pure water at a given temperature.

2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

ISO 23529, *Rubber — General procedures for preparing and conditioning test pieces for physical test methods*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the following terms and definitions apply.

3.1

density

mass of unit volume of the rubber at a stated temperature

NOTE It is expressed in megagrams per cubic metre (Mg/m^3).

4 Principle

Two methods, A and B, are given.

In method A, the mass of the test piece and the mass of water equal in volume to the volume of the test piece are determined using a balance equipped with a pan straddle. The apparent mass of the test piece when immersed in water is less than that in air by the mass of water displaced, the volume of water displaced being equal to that of the test piece.

Method B is intended to be used only when it is necessary to cut up the test piece into small pieces to eliminate air spaces, as in the case of narrow-bore tubing and electric-cable insulation. Measurements are made using a balance and a density bottle.

5 Apparatus

Ordinary laboratory apparatus and the following:

- 5.1 **Analytical balance**, accurate to ± 1 mg.
- 5.2 **Balance pan straddle**, of convenient size to support the beaker and permit determination of the mass of the test piece in water (for method A).
- 5.3 **Beaker**, 250 cm³ capacity (or smaller if necessitated by the design of the balance) (for method A).
- 5.4 **Density bottle** (for method B).

6 Test piece

- 6.1 The test piece shall consist of a piece of the rubber with smooth surfaces, free from cracks and dust, and having a mass of at least 2,5 g. For method B, the shape of the test piece shall be such as to permit cutting into suitable pieces (see 10.3).
- 6.2 A minimum of two test pieces shall be made.

7 Time-interval between forming and testing

- 7.1 Unless otherwise specified for technical reasons, the following requirements for time-intervals shall be observed.
- 7.2 For all test purposes, the minimum time between forming and testing shall be 16 h.
- 7.3 For non-product tests, the maximum time between forming and testing shall be 4 weeks and, for evaluations intended to be comparable, the tests, as far as possible, shall be carried out after the same time-interval.
- 7.4 For product tests, whenever possible, the time between forming and testing shall not exceed 3 months. In other cases, tests shall be made within 2 months of the date of receipt by the customer of the product.

8 Conditioning of test pieces

- 8.1 Samples and test pieces shall be protected from direct sunlight during the interval between vulcanization and testing.

8.2 Samples, after such preparation as is necessary, shall be conditioned at a standard laboratory temperature (that is, $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ or $27\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$) for at least 3 h before the test pieces are cut from them.

These test pieces may be tested immediately but, if not, they shall be kept at the standard laboratory temperature until tested. If the preparation involves buffing, the interval between buffing and testing shall not exceed 72 h.

9 Temperature of test

The test shall normally be carried out at a standard laboratory temperature ($23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ or $27\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$), the same temperature being used throughout one test or series of tests intended to be comparable.

10 Procedure

10.1 Preparation of sample

If fabric is attached to, or embedded in, the sample, it shall be removed before cutting out the test pieces. The method of removal shall preferably avoid the use of a swelling liquid, but, if necessary, a suitable non-toxic liquid of low boiling point may be used to wet the contacting surfaces. Care shall be taken to avoid stretching the rubber during the separation from the fabric, and the liquid, if used, shall be allowed to evaporate completely from the rubber surfaces after separation. Cloth-marked surfaces shall be made smooth by buffing (see ISO 23529).

10.2 Method A

10.2.1 Suspend the test piece (see Clause 6) from the hook on the balance (5.1) using a suitable length of filament so that the bottom of the test piece is about 25 mm above the straddle (5.2). The filament shall be made from a material which is insoluble in water and which does not absorb a significant amount of water. It shall either be counterbalanced or be weighed and, if weighed, its mass shall be deducted from subsequent weighings of the test piece (see 10.2.3).

10.2.2 Weigh the test piece to the nearest milligram in air. Repeat the weighing with the test piece (and sinker, if required, see 10.2.4) immersed in freshly boiled and cooled distilled water or deionized water at a standard laboratory temperature ($23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ or $27\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$) contained in the beaker (5.3), placed on the straddle. Remove air bubbles adhering to the test piece (see 10.2.5 and 10.2.6) and weigh to the nearest milligram, watching for a few seconds to make sure that the reading does not drift gradually as a result of convection currents.

10.2.3 Where the filament used has a mass less than 0,010 g, such as is the case with thin nylon filament, the correction to account for its mass is not necessary to ensure the stated accuracy of the final result. However, when the test piece is smaller than the one specified (e.g. when the density of small O-rings is to be measured), this can lead to inaccuracies and the mass of the filament needs to be taken into account in the final calculation. If a means of suspension other than a filament is used, the volume and mass of the suspension shall be taken into account in making the final calculation.

10.2.4 When this procedure is used for rubber having a density less than 1 Mg/m^3 , a sinker is necessary; a further weighing of the sinker alone in water is required. Alternatively, a liquid of different density to water, which does not have any interaction with the rubber, may be used in place of the water, in which case the formulae given in 11.1 shall be modified to replace the density of water with the density of the liquid used.

10.2.5 The main sources of error are

- a) air bubbles adhering to the surfaces of the test piece during weighing in water;
- b) surface tension effects on the filament;

- c) convection currents in the water in which the test piece is suspended, to minimize which the temperature of the water and of the air in the balance case shall be the same.

10.2.6 In order to minimize the adherence of air bubbles to the test piece, it is permissible either to add a trace (say 1 part in 10 000) of surface-active material such as a detergent to the distilled water or to dip the test piece momentarily into a suitable liquid, such as methyl alcohol or denatured spirit, miscible with water and having a negligible swelling or leaching action on rubber. If the latter method is adopted, precautions shall be taken to minimize the carry-over of alcohol.

10.3 Method B

10.3.1 Weigh the clean, dry density bottle and its stopper (5.4) before and after the insertion of the test piece (see Clause 6) cut into suitable pieces. The exact size and shape of the pieces will depend on the thickness of the original test piece. They should be such that no two dimensions are greater than 4 mm and the third not greater than 6 mm. Within these limitations, the pieces should be as large as possible. All cut edges shall be smooth. Fill the bottle, containing the rubber, completely with freshly boiled and cooled distilled water or deionized water at a standard laboratory temperature ($23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ or $27\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$). Remove air bubbles adhering to the rubber or to the walls of the bottle (see 10.2.6 above and 10.3.2 below). Insert the stopper, taking care that there is no air in the bottle or the capillary. Dry the outside of the bottle carefully. Weigh the bottle and contents. Empty the bottle completely and refill with freshly boiled and cooled distilled water or deionized water. After removing the air bubbles, inserting the stopper and drying, weigh the bottle and water. All the above weighings shall be made to the nearest milligram.

10.3.2 The main source of error is air bubbles inside the bottle. It may be necessary to heat the bottle and contents to approximately 50 °C to dislodge bubbles, but in this case the bottle and contents shall be cooled before weighing. Alternatively, the bottle may be placed in a vacuum desiccator and the vacuum applied and released several times until no more air is extracted.

11 Expression of results

11.1 Method A

The density ρ , expressed in megagrams per cubic metre, is given by the formula:

$$\rho = \rho_w \frac{m_1}{m_1 - m_2}$$

where

ρ_w is the density of water;

m_1 is the mass of the rubber, determined by weighing in air;

m_2 is the mass of the rubber less the mass of an equal volume of water, determined by weighing in water, both at standard laboratory temperature.

This method is accurate to the nearest $0,01\text{ Mg/m}^3$.

For most purposes, the density of water at standard laboratory temperature may be taken as $1,00\text{ Mg/m}^3$. However, for precise work, a factor to take account of the density of water at the test temperature shall be used.

When a sinker has been used, the calculation shall be modified as follows:

$$\rho = \rho_w \frac{m_1}{m_1 + m_2 - m_3}$$

where

- ρ_w is the density of water;
- m_1 is the mass of the rubber, determined by weighing in air;
- m_2 is the mass of the sinker less the mass of an equal volume of water, determined by weighing in water, both at standard laboratory temperature;
- m_3 is the mass of the sinker and rubber less the mass of a volume of water equal to their combined volumes, determined by weighing in water, both at standard laboratory temperature.

Report the mean value.

11.2 Method B

The density ρ , expressed in megagrams per cubic metre, is given by the formula:

$$\rho = \rho_w \frac{m_2 - m_1}{m_4 - m_3 + m_2 - m_1}$$

where

- ρ_w is the density of water;
- m_1 is the mass of the density bottle;
- m_2 is the mass of the density bottle plus test piece;
- m_3 is the mass of the bottle plus test piece plus water;
- m_4 is the mass of the density bottle filled with water.

For most purposes, the density of water at standard laboratory temperature may be taken as 1,00 Mg/m³. However, for precise work, a factor to take account of the density of water at the test temperature shall be used.

Report the mean value.

12 Test report

The test report shall include the following particulars:

- a) sample details:
 - 1) a full description of the sample and its origin,
 - 2) compound details and cure details, where appropriate,
 - 3) the method of preparation of the test pieces from the sample, for example moulded or cut;

ISO 2781:2008(E)

b) test method:

- 1) a full reference to the test method used, i.e. the number of this International Standard,
- 2) the test procedure used (method A or method B),
- 3) the type of test piece used.

c) test details:

- 1) the standard laboratory temperature used,
- 2) the time and temperature of conditioning prior to the test,
- 3) the temperature of the test,
- 4) details of any procedures not specified in this International Standard;

d) test results:

- 1) the number of test pieces used,
- 2) the individual test results,
- 3) the mean density;

e) the date of the test.

.....

www.iso.org

ICS 83.060

Price based on 6 pages

Essais relatifs aux chaussées

Essais statiques sur mélanges hydrocarbonés**Partie 1 : Essai DURIEZ sur mélanges hydrocarbonés à chaud**

E : Test relating to pavements — Static test on bituminous mixtures —
Part 1: DURIEZ test on hot-mix

D : Prüfungen für Fahrbahnen — Statische Prüfungen auf bituminöse
Mischungen — Teil 1: DURIEZ Versuch auf warme bituminöse Mischungen

Norme française homologuée

par décision du Directeur Général d'AFNOR le 5 août 2002 pour prendre effet le 5 septembre 2002.

Remplace la norme homologuée NF P 98-251-1, de juillet 1991.

Correspondance

À la date de publication du présent document, il n'existe pas de travaux européens ou internationaux traitant du même sujet.

Analyse

Le présent document spécifie les essais à chargement statique sur mélanges hydrocarbonés. Il décrit une méthode d'essai ayant pour but de déterminer, pour une température et un compactage donnés, 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.

Descripteurs

Thésaurus International Technique : chaussée, produit hydrocarboné, mélange, compactage, essai, essai statique, résistance à la compression, résistance à l'eau, préparation d'éprouvette.

Modifications

Par rapport au document remplacé, les tolérances concernant les dimensions des moules et pistons ont été revues. Le contrôle de la température avant écrasement a été amélioré. L'essai à 18 °C a été privilégié.

Corrections

Membres de la commission de normalisation

Président : M GOURDON

Secrétariat : M DELORME — LABORATOIRE REGIONAL DES PONTS ET CHAUSSEES
DE L'EST PARISIEN

M	ABDO	SYNDICAT NATIONAL DES FABRICANTS DE CIMENT ET DE CHAUX
M	BERTAU	HGD S.A
M	BOULET	LCPC NANTES
M	CHARONNAT	LCPC NANTES
M	EXBRAYAT	APPIA
M	GOTHIE	LRPC LYON
M	HAMEURY	LRPC SAINT-BRIEUC
M	HIERNAUX	LABORATOIRE REGIONAL DES PONTS ET CHAUSSEES DE SAINT-QUENTIN
M	JAMOIS	TOTAL RAFFINAGE DISTRIBUTION — DIVISION DES BITUMES — SERVICE DEVELOPPEMENT ET ASSISTANCE TECHNIQUE
M	JOLY	UNION DES SYNDICATS DE L'INDUSTRIE ROUTIERE FRANÇAISE
M	KOBISCH	LABORATOIRE REGIONAL DES PONTS ET CHAUSSEES DE SAINT-BRIEUC
M	LENFANT	COLAS
M	MALOT	CERT TOTAL
M	MAZÉ	ENTREPRISE EUROVIA
M	MONTPEYROUX	CENTRE DE RECHERCHE ELF SOLAIZE
M	MOUTIER	LCPC NANTES
M	PANNETIER	OFFICE DES ASPHALTES
M	PERDEREAU	EUROVIA SERVICES
M	SMERECKI	AFNOR
M	TRIGUIGNEAUX	APPIA
M	VERHEE	USIRF

Sommaire

		Page
1	Domaine d'application	4
2	Références normatives	4
3	Symboles et abréviations	4
4	Termes et définitions	5
5	Principe	5
6	Appareillage	5
6.1	Appareillage spécifique	5
6.2	Appareillage non spécifique	6
7	Préparation des éprouvettes	6
7.1	Remplissage des moules	6
7.2	Compactage des éprouvettes	7
8	Mode opératoire	7
8.1	Vérification des éprouvettes	7
8.2	Conservation à température ambiante	7
8.2.1	Répartition des éprouvettes	7
8.2.2	Mesure de la masse volumique apparente par pesée hydrostatique	7
8.2.3	Conservation des éprouvettes	8
8.3	Essai de compression simple	8
9	Expression des résultats	8
9.1	Résistance en compression	8
9.2	Calcul du pourcentage d'imbibition	8
9.3	Calcul du pourcentage de vides	9
10	Rapport d'essai	9
11	Exactitude des résultats	10
	Annexe A (informative) Exemple de dessin du moule	12

1 Domaine d'application

Le présent document spécifie une méthode d'essai ayant pour but de déterminer, à 18 °C pour un compactage donné, la tenue à l'eau d'un mélange hydrocarboné à chaud à partir du rapport des résistances à la compression avec et sans immersion des éprouvettes.

NOTE L'essai se pratique à 18 °C. Il peut être pratiqué à d'autres températures, en particulier à 0 °C et à 50 °C pour permettre d'appréhender une forme de susceptibilité thermique du mélange hydrocarboné.

Le présent document s'applique aux mélanges hydrocarbonés à chaud fabriqués en laboratoire ou prélevés sur chantier (grave bitume, bétons bitumineux, autres enrobés) utilisés dans le domaine des travaux publics.

2 Références normatives

Le présent document comporte par référence datée ou non datée des dispositions d'autres publications. Ces références normatives sont citées aux endroits appropriés dans le texte et les publications sont énumérées ci-après. Pour les références datées, les amendements ou révisions ultérieurs de l'une quelconque de ces publications ne s'appliquent à ce document que s'ils y ont été incorporés par amendement ou révision. Pour les références non datées, la dernière édition de la publication à laquelle il est fait référence s'applique.

XP P 18-540, *Granulats — Définitions, conformité, spécifications*.

NF P 98-250-1, *Essais relatifs aux chaussées — Préparation des mélanges hydrocarbonés — Partie 1 : Fabrication d'un enrobé en laboratoire*.

NF P 98-250-6, *Essais relatifs aux chaussées — Préparation des mélanges hydrocarbonés — Partie 6 : Mesure de la masse volumique apparente d'une éprouvette par pesée hydrostatique*.

3 Symboles et abréviations

TL	Teneur en liant constituée par le rapport de la masse du liant à la masse de granulats secs, exprimée en pourcentage.
M	Masse des éprouvettes après démoulage, exprimée en grammes.
M_{J+1}	Masse des éprouvettes après dégazage et imbibition dans l'eau, exprimée en grammes.
M_{J+1+k}	Masse des éprouvettes après k jours d'immersion dans l'eau, exprimée en grammes.
MVA	Masse volumique apparente de l'éprouvette par mesures géométriques, exprimée en grammes par centimètre cube.
MVA	Masse volumique apparente de l'éprouvette par pesée hydrostatique, exprimée en grammes par centimètre cube.
MVA_g	Masse volumique apparente des granulats, exprimée en grammes par centimètre cube.
MVR_g	Masse volumique réelle des granulats, exprimée en grammes par centimètre cube.
MVR	Masse volumique réelle du mélange hydrocarboné, exprimée en grammes par centimètre cube.
$v \%$	Pourcentage des vides, exprimé en pourcentage.
v_{MA}	Pourcentage des vides occupés par l'air et le liant, exprimé en pourcentage.
v_L	Pourcentage des vides comblés par le liant, exprimé en pourcentage.
R	Résistance à la compression à 18 °C à la vitesse 1 mm/s, 8 j après confection des éprouvettes, exprimée en mégapascals.

r	Résistance à la compression à 18 °C à la vitesse 1 mm/s, 8 j après confection des éprouvettes dont 7 j d'immersion dans l'eau, exprimée en mégapascals.
D	Dimension d'une fraction granulaire selon la norme XP P 18-540, exprimée en millimètres.
φ	Diamètre extérieur minimal des pistons pouvant coulisser librement par rapport au moule, exprimé en millimètres.

4 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent.

4.1

pourcentage d'imbibition

le pourcentage d'imbibition est la quantité d'eau absorbée par l'éprouvette après k jours d'immersion dans l'eau

L'expression mathématique du pourcentage d'imbibition après k jours d'immersion dans l'eau est la suivante :

$$W_k = \frac{M_{J+1+k} - M}{M} \times 100$$

4.2

tenue à l'eau

rapport r/R entre la résistance à la compression après immersion (r) et celle après conservation sans immersion (R) à 18 °C

5 Principe

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 de 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.

6 Appareillage

6.1 Appareillage spécifique

Moules et pistons :

— mélanges hydrocarbonés de $D < 14$ mm.

Un minimum de 12 moules métalliques cylindriques de diamètre intérieur compris entre [80,0 – 0,1] mm et [80,0 + 0,3] mm et de hauteur minimale 190 mm et des pistons de diamètre extérieur minimal de 79,75 mm et pouvant coulisser librement par rapport au moule.

Exemple de schéma de moule et piston en annexe A ;

— mélanges hydrocarbonés de $D \geq 14$ mm.

Un minimum de 10 moules métalliques cylindriques de diamètre intérieur compris entre [120,0 – 0,1] mm et [120,0 + 0,3] mm et de hauteur minimale 270 mm.

Des pistons de diamètre extérieur minimal de 119,75 mm et pouvant coulisser librement par rapport au moule.

Exemple de schéma de moule et piston en annexe A.

6.2 Appareillage non spécifique

Presse :

- une presse permettant le compactage à double effet ¹⁾ et le maintien :
 - d'une charge de $60 \text{ kN} \pm 0,5 \%$ pendant 5 min sur chaque éprouvette pour les mélanges hydrocarbonés de $D < 14 \text{ mm}$;
 - d'une charge de $180 \text{ kN} \pm 0,5 \%$ pendant 5 min sur chaque éprouvette pour les mélanges hydrocarbonés de $D \geq 14 \text{ mm}$;
- un système d'application de la charge comportant au moins une rotule permettant un avancement moyen à vide de 1 mm/s, équipé d'un dispositif permettant de mesurer l'effort au cours de l'essai d'exactitude relative $\pm 1 \%$.

7 Préparation des éprouvettes

Le mélange hydrocarboné doit être fabriqué en une seule fois ²⁾ selon la NF P 98-250-1.

Les modalités pratiques (type de malaxeur, températures, temps de malaxage) de préparation du mélange hydrocarboné doivent être indiquées sur la feuille d'essai.

Les températures de référence de préparation des éprouvettes de mélanges à base de bitume pur sont définies comme suit :

- bitume 70/100 : $140 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$;
- bitume 50/70 : $150 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$;
- bitume 35/50 : $160 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$;
- bitume 20/30 : $180 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$.

Pour les autres liants hydrocarbonés, les températures de fabrication des mélanges sont celles définies par le fournisseur.

Les moules sont portés à la température de référence de préparation des éprouvettes (2 h au minimum).

7.1 Remplissage des moules

Les prélèvements ont les masses suivantes :

- $1\,000 \text{ g} \pm 2 \text{ g}$ dans le cas des mélanges hydrocarbonés de $D < 14 \text{ mm}$;
- $3\,500 \text{ g} \pm 4 \text{ g}$ dans le cas des mélanges hydrocarbonés de $D \geq 14 \text{ mm}$.

Un piston est placé à la partie inférieure du moule. Le prélèvement est introduit en une seule fois dans le moule très légèrement enduit d'oléate de soude glycérolé.

Les moules pleins sont ensuite introduits dans une étuve dont la température à proximité est à la température de référence ; ils doivent y séjourner entre $\frac{1}{2}$ h et 2 h.

1) *Sur certains modèles de presse, des entretoises placées entre la partie inférieure du moule et l'épaulement du piston sont nécessaires lors du remplissage du moule pour que, après les avoir retirées au moment du compactage, celui-ci puisse être à double effet.*

2) *Si la capacité du malaxeur est insuffisante, il est admis de procéder au malaxage en deux fois dans des conditions de répétabilité (même technicien, même matériel, faible intervalle de temps).*

7.2 Compactage des éprouvettes

Un piston est placé à la partie supérieure du moule. Le compactage des éprouvettes doit être réalisé par double effet. Les opérations doivent être menées de manière à éviter au maximum les déperditions de température. Le délai séparant la fin du malaxage et le début du compactage doit être noté sur la feuille d'essai.

Charge appliquée :

- pour les mélanges hydrocarbonés de $D < 14$ mm, $60 \text{ kN} \pm 0,5 \%$;
- pour les mélanges hydrocarbonés de $D \geq 14$ mm, $180 \text{ kN} \pm 0,5 \%$.

La charge doit être atteinte entre 5 s et 60 s maximum et maintenue entre 300 s et 305 s. Au bout de ce temps, la mise en charge est interrompue.

Les éprouvettes sont conservées couchées dans leur moule au minimum 4 h jusqu'à retour à la température ambiante, puis elles sont démoulées.

8 Mode opératoire

8.1 Vérification des éprouvettes

Après démoulage, les éprouvettes numérotées sont pesées à 1 g près, soit M . La hauteur h et le diamètre \varnothing sont mesurés à 0,1 mm près, sur trois zones différentes.

On calcule ensuite la masse volumique apparente MVa à partir des mesures géométriques :

$$MVa = \frac{4 \times M}{\pi \varnothing^2 h}$$

Si la MVa d'une éprouvette s'éloigne de la moyenne de $\pm 1 \%$, elle est rejetée. Si la MVa de plusieurs éprouvettes s'en éloigne, la série complète est rejetée.

8.2 Conservation à température ambiante

Jusqu'au jour $J + 1$, les éprouvettes sont conservées debout à température ambiante ($15 \text{ }^\circ\text{C}$ à $25 \text{ }^\circ\text{C}$) sur une surface plane.

8.2.1 Répartition des éprouvettes

À partir des masses volumiques apparentes géométriques mesurées, les éprouvettes sont réparties en trois lots homogènes d'éprouvettes. La MVa moyenne de chaque lot doit être la plus proche de la MVa moyenne de la totalité des éprouvettes.

- deux éprouvettes sont destinées à la mesure des masses volumiques apparentes hydrostatiques ;
- cinq éprouvettes sont destinées à la conservation sans immersion dans le cas des mélanges hydrocarbonés de $D < 14$ mm, quatre dans le cas de ceux de $D \geq 14$ mm ;
- les éprouvettes restantes sont destinées à la conservation en immersion.

8.2.2 Mesure de la masse volumique apparente par pesée hydrostatique

Pour les mélanges hydrocarbonés dont le pourcentage de vides géométriques est inférieur à 15 %, la mesure est réalisée suivant la NF P 98-250-6.

Pour les mélanges hydrocarbonés dont le pourcentage de vides est supérieur à 15 %, on utilise la masse volumique apparente géométrique ou toute autre méthode qui doit être notée sur le rapport d'essai.

8.2.3 Conservation des éprouvettes

8.2.3.1 Conservation sans immersion

J étant le jour de confection des éprouvettes, on commence la conservation sans immersion au jour $J + 1$.

Les éprouvettes sont conservées à $18\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ et dans une ambiance à $50\% \pm 10\%$ d'humidité relative pendant 7 j.

8.2.3.2 Conservation avec immersion

Pour les essais réalisés à 18 °C , les éprouvettes sont soumises à un traitement de dégazage à $J + 1$. Pendant $1\text{ h} \pm 5\text{ min}$, les éprouvettes, lavées rapidement, sont soumises à une pression résiduelle de $47\text{ kPa} \pm 5\%$. Ensuite, l'eau est introduite jusqu'à immersion complète des éprouvettes tout en maintenant la pression résiduelle de $47\text{ kPa} \pm 5\%$. Les éprouvettes sont maintenues immergées pendant 2 h sous la même pression.

À la fin de cette opération, les éprouvettes sont essuyées légèrement et pesées, soit M_{J+1} .

Après la pesée précédente, les éprouvettes sont immergées dans de l'eau à $18\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ jusqu'à $J + 8$.

— Masse des éprouvettes après imbibition :

Les éprouvettes sont pesées, après essuyage rapide à $J + 8$ et éventuellement à $J + 3$ ou $J + 5$, soit M_{J+8} , M_{J+3} et M_{J+5} . Les éprouvettes sont remises en conservation au moins deux heures avant de subir les essais mécaniques.

8.3 Essai de compression simple

Pour deux lots d'éprouvettes destinés à la détermination de la tenue à l'eau, l'un conservé à sec, l'autre conservé dans l'eau, les températures moyennes mesurées à proximité des éprouvettes ne doivent pas différer de plus de 1 °C pendant les deux heures qui précèdent l'essai de compression simple.

NOTE Pour respecter l'écart, il est possible de conditionner les éprouvettes en immersion dans un sac étanche placé dans l'enceinte de conservation

À jour $J + 8$, les éprouvettes sont soumises à l'essai de compression, qu'elles aient été conservées avec ou sans immersion. Pour chaque éprouvette, le délai entre la sortie du dispositif de maintien en température et le début de l'écrasement est inférieur à 2 min.

La vitesse du plateau de la presse est réglée à $1\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$. La résistance à la compression simple est déterminée à partir de la charge maximale à la rupture de l'éprouvette d'essai.

9 Expression des résultats

9.1 Résistance en compression

La résistance à la compression simple à une température donnée, avec ou sans immersion, est le rapport de la charge maximale à la section circulaire des éprouvettes. Il est exprimé en mégapascals et représente la moyenne de quatre ou cinq mesures suivant la dimension D du mélange hydrocarboné soumis à l'essai.

On établit également le rapport de la résistance avec immersion r à la résistance sans immersion R ; le rapport r/R est exprimé avec deux chiffres significatifs.

9.2 Calcul du pourcentage d'imbibition

Après k jours d'immersion

$$W_{J+1+k} = \frac{M_{J+1+k} - M}{M} \times 100$$

9.3 Calcul du pourcentage de vides

— Pourcentage de vides :

$$v\% = 100 \left(1 - \frac{MVA}{MVR} \right)$$

— Masse volumique apparente du granulat dans l'éprouvette, soit MVA_g :

$$MVA_g = MVA \left[1 - \frac{TL}{100 + TL} \right]$$

— Pourcentage des vides occupés par l'air et le liant, soit $v_{MA}\%$:

$$v_{MA} = \frac{MVR_g - MVA_g}{MVR_g} \times 100$$

— Pourcentage des vides comblés par le liant, soit v_L :

$$v_L = \frac{v_{MA}\% - v\%}{v_{MA}\%} \times 100$$

10 Rapport d'essai

Le rapport d'essai doit faire référence au présent document et indiquer :

— l'identification de la formule ;

— le mode de préparation du mélange hydrocarboné (en particulier le type de malaxeur), la température de référence de préparation des éprouvettes, le délai séparant la fin du malaxage et le début du compactage des éprouvettes ;

— les résultats :

- la masse volumique apparente des éprouvettes par :
 - mesures géométriques MVA ;
 - pesée hydrostatique MVA ;
- la masse volumique réelle du mélange hydrocarboné MVR ;
- le pourcentage des vides $v\%$;
- la résistance moyenne à la compression R ;
- la résistance moyenne à la compression r ;
- le rapport r/R ;

— les détails opératoires non prévus dans le présent document et les incidents éventuels susceptibles d'avoir influencé les résultats ;

— outre les résultats précédents, le rapport d'essai peut comporter l'identification des constituants et la masse volumique réelle des granulats MVR_g , ainsi que le pourcentage d'imbibition à $J + 8$, à $J + 1$ et $J + 3$ ou $J + 5$, $v_{MA}\%$ et $v_L\%$.

11 Exactitude des résultats

Une expérience d'exactitude de la tenue à l'eau a été réalisée en 2000 sur un BBSG 0/10 avec 18 laboratoires participants sur une base de quatre répliques.

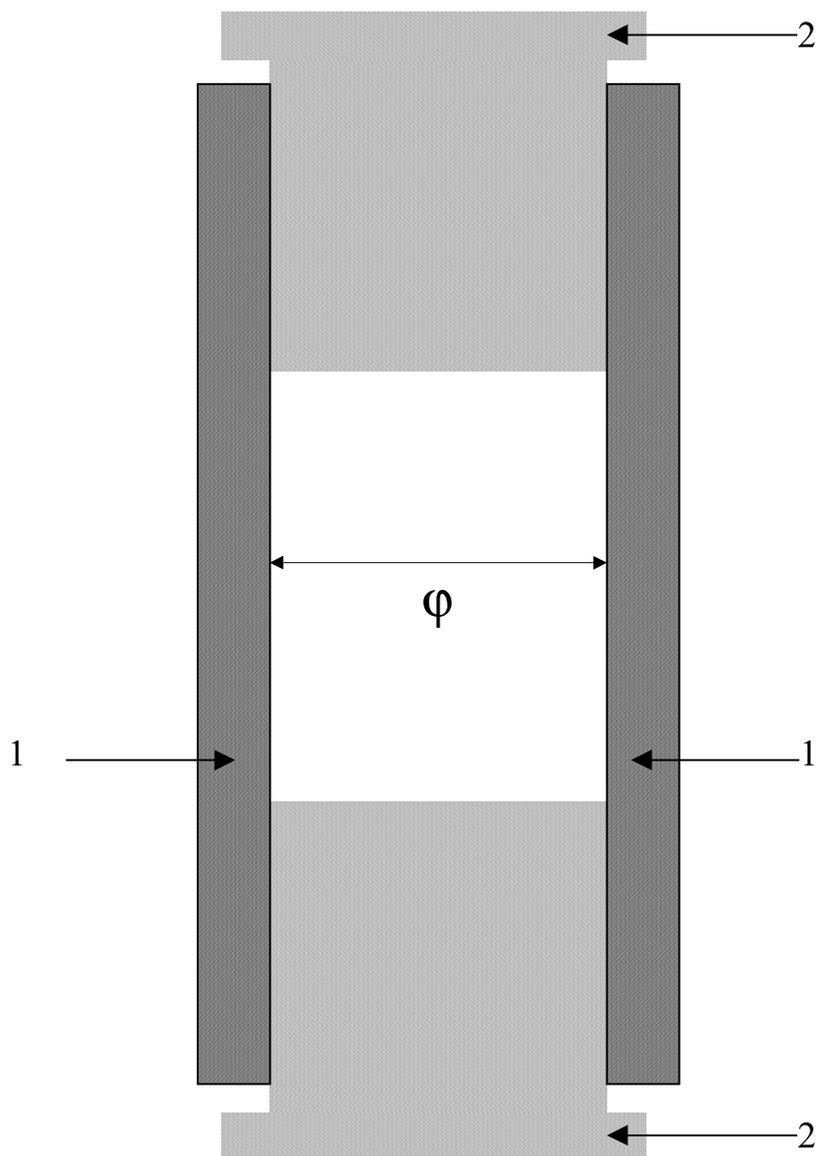
L'exploitation selon l'ISO 5725 a conduit aux résultats suivants :

- nombre de laboratoires retenus : 14 ;
- r/R moyen : 0,73 ;
- écart-type de répétabilité σ_r : 0,028 ;
- écart-type de reproductibilité σ_R : 0,047 ;
- limite de répétabilité à 95 % r : 0,078 ;
- limite de reproductibilité à 95 % R : 0,134.

Bibliographie

- [1] *Essai de compression simple sur enrobés hydrocarbonés, essai DURIEZ LPC. Méthode d'essai n° 14 (Novembre 85). Ministère de l'Urbanisme, du Logement et des Transports — Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.*
- [2] ISO 5725 (toutes les parties), *Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure.*

Annexe A
(informative)
Exemple de dessin du moule



Légende

- 1 Moule
- 2 Piston

Figure A.1