

République Algérienne Démocratique et Populaire

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



**Ecole Nationale Supérieure des  
Travaux Publics**

المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية

Code : .....

# Mémoire

Pour l'Obtention du Diplôme  
de MASTER  
Option Infrastructure de Base

## Thème

*Influence de la nature du granulat sur les  
performances d'un enrobé modifié par  
l'ajout de poudre de caoutchouc*

Proposé par:

*Pr. R. KETTAB  
Mr. L.SADOUDI*

Présenté par:

*ZEGHMAR Mohamed*

**-Promotion 2015-**

*Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics. Garidi. Kouba.*

## Remerciements

je tien à remercier en premier lieu et avant tout ALLAH le tout puissant et miséricordieux qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce travail.

En second lieu, mes encadreurs

Pr.R.KETTAB et Mr.L SADOUDI pour leurs appréciations compétentes, les précieux conseils et leur aide durant toute la période du travail.

je tien également à exprimer notre gratitude envers tous les Enseignants et le personnel administratif de l'ENSTP qui ont contribué à notre formation et à l'élaboration de ce présent travail.

Nous tenons à remercier toute l'équipe du LCTP en particulier Mr.SANHADJI, Mr.MOHAMED, Mr.SAIDE Mr.AMINE

Merci également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail. Et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, j'adresse mes remerciements à toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.



# الإهداء

## بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

والصلاة والسلام على اشرف المرسلين محمد بن عبد الله خاتم الأنبياء والمرسلين

اهدي هذا العمل المتواضع.

إلى التي تعبت وربت وسهرت الليالي إلى أعلى شيء في الوجود

إلى أحب شخص في هذه الدنيا بعد الله ورسوله.

الحبيبة.

أسأل الله أن يطيل عمرها لكي أرى جزءاً من خيرها

( الحكيم- سهام- غنية- كريمة )

إلى كل الأهل والأقارب وإلى كل من ارتبط إسمي بهم

والى رفيق الـ **بوزردوم هشام**- وأسأل الله أن يوفقه و يجزيه أحسن جزاء .

:وليد /يوسف/ / هشام/ / /بوعطية/ / /  
/ هيم/حبيب/الباهي/ / /الصديق/شكيب/ونيل/ / /

وإلى كل طلبة المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية و اخص بالذكر دفعة السنة الخامسة-2015

أخوكم ز غمار محمد

## Résumé

هذا العمل يتمثل في إعادة استخدام المطاط الناتج من نعال الاحذية كمادة مضافة في صياغة معدلة الإسفلت. ولهذا فقد قمنا بتقسيم دراستنا هذه إلى ثلاثة أجزاء.

الجزء الأول هو العثور على محتوى الموثق الأمثل في صياغة ن طريقة مارشال و درياز وذلك من خلال اختيار ثلاثة الموثق محتوى مختلف.

الجزء الثاني هو العثور على أفضل نسبة من كمية المطاط المضافة من حيث استقرار مارشال و درياز.

الجزء الثالث يتمثل في المقارنة بين المادتين.

الكلمات الرئيسية: - - - و درياز

## Résumé

Ce travail consiste à valoriser un matériau usagé on utilise comme additif sous forme de poudrette, provenant de semelles de chaussures dans la formulation d'un enrobé bitumineux 0/14 modifié contenant des granulats basaltique et calcaire, Pour cela on va diviser notre étude en trois parties.

La première partie consiste à trouver la teneur en liant optimale pour la formulation de notre enrobé par les deux méthodes MARCHALL et DURIEZ, on choisi entre trois teneur de liant différentes.

En seconde partie consiste à trouver la meilleur teneur en poudrette en termes de stabilité MARCHALL et en terme de tenue à l'eau (DURIEZ).

En troisième partie on fais une comparaison entre les deux types des granulats (basaltiques et calcaires).

**Mots clés :** enrobé modifié, poudrette, caoutchouc, performance, MARCHALL, DURIEZ.

## Abstract

This work involves valuing a used material additive used as a crumb, from shoe soles in the formulation of a modified asphalt 0/14 containing basaltic aggregates and limestone For this we will divide our study into three parts.

The first part is to find the optimum binder content in the formulation of our coated by two MARCHALL and DURIEZ methods, selected from three different content of binder.

The second part is to find the best content in terms of crumb MARCHALL stability and in terms of resistance to water (DURIEZ).

In the third part we make a comparison between the two types of aggregates (basalt and limestone).

**Keywords:** modified asphalt, crumb rubber, performance, MARCHALL, DURIEZ.

## Liste des figures

---

Figure II.1. Les tamis et la machine de tamisage.....	18
Figure II.2. Tamis à fentes [14].....	21
Figure II.3: Définition de l'équivalent de sable.....	23
Figure II.4. Machine de Los Angeles [16].....	24
Figure II.5: Appareillage de l'essai Micro-Deval [17].....	26
Figure II.6: Essai bille et anneau.....	29
Figure II.7: Principe de l'essai Duriez.....	30
Figure II.8. Principe de l'essai Marshall.....	30
Figure II.9 : Principe du compactage .....	31
Figure II.10 : Droite de compactage PCG.....	31
Figure II.11 : Principe de l'essai d'orniérage.....	32
Figure II.12: Exemple d'un essai de fatigue.....	32
Figure IV.1: Courbe granulométrique du notre mélange 0/14.....	40
Figure IV.2 : Variation compacité - teneur en bitume.....	43
Figure IV.3: Variation stabilité - teneur en bitume.....	43
Figure IV.4 : Variation fluage - teneur en bitume.....	44
Figure IV.5: Variation compacité - teneur en bitume.....	45
Figure IV.6: Variation stabilité DURIEZ - teneur en bitume.....	45
Figure IV.7 : Influence de teneur en poudrette sur le volume des vides.....	47
Figure IV.8: Influence de teneur en poudrette sur la compacité.....	47
Figure IV.9: Influence de teneur en poudrette sur le fluage.....	48
Figure IV.10 : Influence de teneur en poudrette sur la stabilité Marshall.....	48
Figure IV.11 : l'influence de la poudrette sur le rapport r/R.....	49
Figure IV.12: Courbe granulométrique du notre mélange 0/14.....	51
Figure IV.13: Variation Stabilité et l'indice des vides-teneur en liant.....	53
Figure IV.14.: Variation du fluage –teneur en liant.....	53
Figure IV.15: Variation stabilité DURIEZ - teneur en bitume.....	54
Figure IV.16: Influence de la teneur en poudrette sur la Stabilité.....	55
Figure IV.17: Influence de la teneur en poudrette sur la Compacité.....	56
Figure IV.18: Variation stabilité DURIEZ - teneur en bitume.....	57
Figure IV.18: Influence de teneur en poudrette sur la Compacité.....	59
Figure IV.19: Influence de teneur en poudrette sur le fluage.....	59
Figure IV.20: Influence de teneur en poudrette sur la Stabilité MARSHALL.....	60
Figure IV.21: Influence de teneur en poudrette sur le Rapport r/R.....	60

## Liste des tableaux

---

Tableau I.1. Les spécifications sur les bitumes routiers (NF EN 12591).....	06
Tableau I.2. Épaisseurs d'utilisation par couche (NF P 98-132).....	08
Tableau I.3. Épaisseurs d'utilisation par couche (NF P98-137) .....	09
Tableau I.4. Épaisseurs d'utilisation par couche (NF P98-134) .....	10
Tableau I.5. Épaisseurs d'utilisation par couche (NF P 98-141).....	11
Tableau I.6: Les avantages et les inconvénients des ECF.....	12
Tableau III.1: Résultats des essais effectués sur le bitume utilisé.....	34
Tableau III.2 : Masse volumique des fractions 0/3, 3/8 et 8/15.....	35
Tableau III.3 : Essai de Los Angeles.....	35
Tableau III.4 : Résultats d'essai micro Deval .....	35
Tableau III. 5: Résultats d'essai d'aplatissement des granulats.....	35
Tableau III. 6 : Résultats d'essai de propreté des granulats.....	35
Tableau III.7 : Résultats d'essai d'Equivalent de sable.....	35
Tableau III.8: Les composants chimique du BASALTE.....	36
Tableau III.9 : Masse volumique des fractions 0/3, 3/8 et 8/15.....	36
Tableau III.10 : Essai de Los Angeles.....	36
Tableau III.11 : Résultats d'essai micro Deval .....	36
Tableau III. 12: Résultats d'essai d'aplatissement des granulats.....	37
Tableau III. 13 : Résultats d'essai de propreté des granulats.....	37
Tableau III.8: Les composants chimique du Calcaire.....	37
Tableau IV.1: Analyse granulométrique pour fraction 0/3.....	38
Tableau IV.2 : Analyse granulométrique pour fraction 3/8.....	39
Tableau IV.3: Analyse granulométrique pour fraction 8/15.....	39
Tableau IV.4: Les pourcentages des fractions.....	40
Tableau IV.5: La surface spécifique du mélange.....	41
Tableau IV.6: Valeur de module de richesse et les teneurs en liants.....	41
Tableau IV.7 : Evaluation de la compacité en fonction des tenures en bitume.....	42
Tableau IV.8 : Résultats d'essai Marshall.....	42
Tableau IV.9: Résultats d'essai Duriez.....	44
Tableau IV.10: Caractéristiques mécaniques de l'enrobé modifiée.....	46
Tableau IV.11: Résultats d'essai Duriez.....	49
Tableau IV.12: Analyse granulométrique pour fraction 0/3.....	50
Tableau IV.13: Analyse granulométrique pour fraction 3/8.....	51
Tableau IV.14: Analyse granulométrique pour fraction 8/15.....	51
Tableau IV.15 : surface spécifique.....	52
Tableau IV.16 : la teneur en liant en fonction du module de richesse.....	52

## Liste des tableaux

---

Tableau IV.17 : Résultats d'essai MARSHALL.....	52
Tableau IV.18 : Caractéristiques mécaniques de l'enrobé modifiée.....	54
Tableau IV.19: Caractéristiques mécaniques de l'enrobé modifiée.....	55
Tableau IV.20: Résultat d'essai DUREIZ.....	56
Tableau IV.21: comparaison entre les deux granulats.....	58

# Table des matières

## SOMMAIRE

1. INTRODUCTION GENERALE .....	01
--------------------------------	----

### CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIE

1-INTRODUCTION .....	03
2-LES ENROBES BITUMINEUX.....	04
2.1. Les Constituants des enrobes .....	04
2.1.1. LES GRANULATS.....	04
2.1.2. LE BITUME.....	04
2.1.2.1. Fabrication du bitume .....	04
1-La distillation atmosphérique.....	04
2-La distillation sous vide.....	04
3-soufflage.....	05
4-Modification par adjonction de polymères.....	05
2.1.2.2. Propriétés.....	05
2.1.2.3. Constitution du bitume.....	06
3. LES DIFFERENTS TYPES D'ENROBES.....	06
3.1. Les enrobe a chaud.....	06
3.1.1. Béton bitumineux souple BBS.....	07
3.1.2. Béton bitumineux semi-grenu BBSG.....	07
3.1.3. Béton bitumineux mince BBM.....	07
3.1.4. Béton bitumineux très mince BBTM.....	08
3.1.5. Béton bitumineux ultra-minces BBUM.....	09
3.1.6. Béton bitumineux drainant BBDr.....	09
3.1.7. Béton bitumineux à module élevé BBME.....	10
3.2. ECF : Les Enrobes Coules A Froid.....	10
3.2.1. Technique de fabrication et de mise en œuvre.....	10
3.2.2. L'utilisation de ECF.....	11
3.2.3. Les avantages et les inconvénients de l'ECF.....	12
3.3. LES ENROBE TIEDES.....	12
3.3.1. Les avantages de l'enrobé tiède.....	12
3.3.2. Mise en œuvre.....	13



## Table des matières

3.4. LES ENROBS A MODULE ELEVE (EME).....	13
3.5. LES BETONS BITUMINEUX A MODULES ELEVE (BBME).....	14
3.5.1. Béton bitumineux à module élevé (BBME).....	14
3.5.2. Pour quoi faire un BBME?.....	14
3.5.3. Les classes de BBME.....	15
3.5.4. Mise en œuvre.....	15
3.5.5. Performances de BBME.....	15
3.6.6. Propriétés recherchées à travers le mélange BBME.....	16

## CHAPITRE II : LES ESSAIS D'IDENTIFICATION DES MATERIAUX

1-Introduction .....	17
2-ESSAIS SUR LES GRANULATS.....	17
2.1. Caractéristiques de fabrication.....	17
2.1.1. Analyse granulométriques (NF P 18-560).....	17
2.1.1.1. Principe.....	18
2.1.1.2. Tracé de la courbe granulométrique.....	19
2.1.1.3. Interprétation des courbes.....	19
2.1.2. Propreté superficielle (NF P 15-591).....	19
2.1.2.1. Procédure de l'essai.....	19
2.1.2.2. Résultats .....	20
2.1.3. Coefficient d'aplatissement (NF P-18-561).....	20
2.1.3.1. Procédure de l'essai.....	21
2.1.3.2. Expression du coefficient d'aplatissement.....	21
2.1.4. Equivalent de sable (NF P18-598).....	22
2.1.4.1. Procédure de l'essai.....	22
2.2. Caractéristiques intrinsèques.....	23
2.2.1. Los Angeles (NF P 18-573).....	23
2.2.1.1. Principe.....	23
2.2.1.2. Matériel utilisé .....	24
2.2.1.3. Procédure de l'essai .....	24
2.2.2. Micro-Deval M.D.E (NF P 18-572).....	25
2.2.2.1. Principe.....	25

## Table des matières

2.2.2.2. Matériel utilisé :.....	25
3. ESSAI SUR BITUME :.....	27
3.1. Pénétrabilité à 25°C (NF EN 1426).....	27
3.1.1. Procédure de l'essai.....	27
3.1.2. Résultats.....	28
3.2. Point de ramollissement (NF EN 1427).....	28
3.3. La densité relative à 25°C (NF EN ISO 2592).....	29
4. LES ESSAIS SUR LES ENROBES BITUMINEUX.....	29
4.1. Essai Duriez (NF P 98-251-4) .....	29
4.2. L'essai Marshall (NF EN 12697-12) .....	30
4.3. La Presse à Cisaillement Giratoire (NF P 98-252) .....	30
4.4. L'essai d'orniérage (EN 12697-22).....	31
4.4. Les essais de fatigue .....	32
5. CONCLUSION.....	33

### CHAPITRE III:CARACTERISTIQUE DES MATERIAUX

1-Le bitume.....	34
2-Poudrette de caoutchouc .....	34
Partie I : 3.LES GRANULATS BASALTIQUES.....	35
I.1.La Masse volumique.....	35
I.2.Los Angeles .....	35
I.3.Coefficients Micro Deval humide.....	35
I.4.Essai d'Aplatissement.....	35
I.5.Essai de propreté .....	35
I.6.Essai d'Equivalent de sable.....	35
I.7.Analyse chimique sommaire.....	36
Partie II : 3.LES GRANULATS CALCAIRES.....	36
II.1.La Masse volumique.....	36
II.2.Los Angeles.....	36
II.3.Coefficients Micro Deval humide.....	36
II.4.Essai d'Aplatissement .....	37
II.5.Essai de propreté .....	37
II.6.Mesure de l'équivalent de sable.....	37

## Table des matières

II.7. Analyse chimique sommaire.....	37
--------------------------------------	----

### CHAPITRE IV: PARTIE EXPERIMENTALE

1. Introduction.....	38
PARTIE I : AGREGATS BASALTIQUE.....	38
2. Identification des matériaux.....	38
1. Analyse granulométrique.....	38
3-Formulation de l'enrobé bitumineuse (BB 0/14).....	39
3.1. Les étapes de travail .....	39
3.2. Choix du mélange granulaire.....	39
3.3. Pourcentages Des Fractions Granulaires Pour le Mélange.....	40
4. Evaluation de la compacité .....	42
5. Résultats de l'essai MARSHALL (NA-5227).....	42
6. Analyse des résultats d'essai MARSHALL:.....	43
a) Variation de la compacité en fonction de la variation de la teneur en bitume.....	43
b) Variation de la stabilité en fonction de la variation de la teneur en bitume.....	43
c) Variation de fluage en fonction de la variation de la teneur en bitume .....	44
7. Résultats d'essai DURIEZ .....	44
8. Analyse des résultats d'essai DURIEZ.....	45
a) Variation de la compacité en fonction de la variation de la teneur en bitume .....	45
b) La Variation de la stabilité DURIEZ en fonction de la variation de la teneur en bitume.....	45
9. Conclusion .....	46
10. Enrobé modifié à la poudrette de caoutchouc :(Agrégats Basaltique).....	46
10.1. Influence de l'ajout de poudrette de caoutchouc sur les caractéristiques de l'enrobé ...	46
10.1.1. Résultats de l'essai MARSHALL.....	46
a) variation du volume des vides avec l'ajout de poudrette.....	47
b) variation de la compacité sous l'ajout de poudrette.....	47
c) variation du fluage sous l'ajout de poudrette.....	48
d) variation du Stabilité Marshall sous l'ajout de poudrette.....	48
10.1.2. Essai DUREIZ.....	49
a) Variation des rapports immersion/sec sous l'ajout des poudrettes.....	49

## Table des matières

---

11. Conclusion .....	50
PARTIE II : CALCAIRE.....	50
1. Identification Des Matériaux.....	50
1.1. Analyse granulométriqu.....	50
2. ESSAIS MARSHALL.....	52
3. Résultats De l'Essai MARSHALL (NA-5227).....	53
a) Variation de la stabilité et de l'indice des vides en fonction de la teneur en liant.....	53
b) Variation du fluage en fonction de teneur en liant.....	53
4. ESSAI DURIEZ.....	54
5. La Variation de la stabilité DURIEZ en fonction de la variation de la teneur en bitume....	54
6. Conclusion.....	55
7. Influence de l'ajout de poudrettes de caoutchouc sur les caractéristiques de l'enrobé (Agréats calcaire).....	55
a) Variation du Stabilité Marchall sous l'ajout de poudrette.....	56
b) Variation de la compacité sous l'ajout de poudrette.....	56
8. Essai DUREIZ.....	56
9. La Variation de la stabilité DURIEZ en fonction de la variation des pourcentages des poudrettes.....	57
10. Conclusion.....	57
11. Comparaison entre les deux types des granulats.....	58
c) Comparaison en termes de Compacité sous l'ajout de poudrette.....	59
d) Comparaison en termes de Fluage sous l'ajout de poudrette.....	59
c) Comparaison en termes de la Stabilité sous l'ajout de poudrette.....	60
d) Comparaison en termes de Rapport immersion-sec sous l'ajout de poudrette.....	60
12. CONCLUSION GENERALE.....	61

# **Introduction générale**

# Introduction générale

---

## Introduction générale

La route est une voie terrestre de communication qui permet de relier les lieux, de favoriser le développement économique d'une région et de faciliter les opportunités d'échanges et d'écoulement des produits. Elle permet en outre de réduire de façon substantielle, les coûts de transport et le temps de parcours. Les routes jouent donc un rôle important dans le développement socioéconomique.

La route se met, elle aussi, à l'heure du développement durable. Ce dernier nécessite de construire des chaussées à longue durée de vie, qui exigent des matériaux performants et requière également de développer des matériaux à basse consommation d'énergie, tout en préservant les matières premières (à base de matériaux recyclés par exemple).

Parmi les matériaux utilisés pour la construction routière, ceux à base de liant bitumineux occupent une place importante. Les principaux modes de dégradation des chaussées bitumineuses sont l'orniérage, la fatigue et la fissuration. Ces dégradations résultent de sollicitations complexes telles que la répétition des contraintes liées à l'application de charges roulantes ou à des conditions climatiques variées. Une meilleure connaissance du comportement thermomécanique des mélanges bitumineux paraît nécessaire pour permettre à terme de fabriquer des enrobés performants susceptibles de résister de manière pérenne aux contraintes externes. En outre, afin de conserver l'intégrité structurelle de la structure de chaussée, il faut éviter que la fissuration des matériaux ne se propage et compromette la fonction d'étanchéité qui pérennise le support de la chaussée fortement sensible à l'eau.

Dans la présente mémoire, le modificateur choisi provient des déchets de caoutchouc (poudrettes des semelles de chaussures) émanant de la Société d'Application d'Elastomère, SAEL Oued-Smar (Alger).

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.

Les travaux entrepris dans ce projet de Master visent à valoriser deux types de granulats: Calcaire et Basalte.

L'étude s'articule autour de six chapitres plus une conclusion.

## Introduction générale

---

- Recherche bibliographique sur les enrobés.
- Les essais d'identification des matériaux constituant d'un enrobé.
- formulation des enrobés bitumineux.
- l'amélioration de béton bitumineuse (calcaire et basalte) par poudrettes de caoutchouc.
- interprétation des résultats.
- Comparaison entre les deux types du granulat (Calcaire et Basalte).

# **Chapitre I**

## **Recherche Bibliographique**



## 1-INTRODUCTION

Dans le domaine des ponts et chaussées, dans le souci de la durabilité, économique et environnementale la conception de couche du plus en plus mince fait l'objet d'études approfondies notamment par l'utilisation des matériaux recyclés.

Ceci permettra de préserver les ressources et réduire les émissions polluantes.

L'enrobé bitumineux dans sa configuration traditionnelle ne permet plus une résistance satisfaisante à l'orniérage sous le trafic lourd et canalisé ainsi que les températures élevées qui sont l'origine des déformations des couches supérieures de la chaussée, donc leur amélioration devient nécessaire. Cette amélioration pourrait s'obtenir en modifiant l'enrobée par ajout des polymères.

Cette thèse s'inscrit dans un programme de valorisation des déchets usagés provenant de semelles de chaussures pour la fabrication de poudrette de caoutchoucs il s'agit d'un plastomère de type EVA (Acétate de Vinyle et d'Éthylène) obtenues par broyage mécanique de ces dernières. Cette poudrette est utilisée dans les mélanges bitumineux comme agent modifiant lors de l'opération de malaxage de l'enrobé lui offrant de meilleures performances en terme de qualité d'usage et de durabilité.

Les enrobés bitumineux constituent un élément majeur dans la construction des routes. Ils doivent répondre à plusieurs exigences :

- Etre maniable, durant la mise en place et la compaction.
- Contribuer à la force de la structure de la route.
- Offrir une bonne résistance à l'orniérage, à la fissuration due à la fatigue et à la fissuration thermique, résister aux effets de l'air et de l'eau (durabilité).
- Etre imperméable, pour protéger la structure de la route de l'eau.
- Assurer une bonne adhérence des pneus dans des conditions climatiques variées.
- Offrir un niveau acceptable de bruit dû au frottement des pneus sur la chaussée.
- Offrir une douceur de roulement acceptable.
- Etre facile entretien et à peu de frais.

## **2-LES ENROBES BITUMINEUX**

On appelle enrobé tout mélange constitué de granulats agglomérés entre eux par un liant hydrocarboné, ce mélange peut être enrichi par des fines et éventuellement contenir des additifs en vue d'améliorer certaines propriétés. Ce terme est plus général que celui de "béton bitumineux", car englobant des mélanges dont le liant n'est pas forcément un bitume (goudron, asphalte...). [1]

### **2.1. Les constituants des enrobés**

#### **2.1.1. LES GRANULATS**

Le granulats, est un fragment de roche, d'une taille inférieure à 125 mm, destiné à entrer dans la composition des matériaux destinés à la fabrication d'ouvrages de travaux publics, de génie civil et de bâtiment.

#### **2.1.2. LE BITUME.**

##### **2.1.2.1. Fabrication du bitume [2]**

En fonction des origines géographiques, certains pétroles permettent d'obtenir une grande quantité de bitume et sont qualifiés de bruts à bitumes.

Les différents types de bitumes sont obtenus à l'issue du processus de raffinage qui est composé de plusieurs étapes:

##### **1-La distillation atmosphérique**

Dans un premier temps, après avoir effectué les opérations de décantation et de dessalage, le pétrole brut est porté à une température d'environ 300°C. La phase vapeur est éliminée et condensée pour séparer les différents hydrocarbures (kérosène, gaz essences.....)

La fraction lourde restant en fond de colonne constitue le résidu de distillation directe et sert à l'élaboration du bitume.

##### **2-La distillation sous vide**

Ce résidu est ensuite injecté dans une tour de distillation sous vide où la séparation des différents constituants se poursuit en jouant sur les paramètres débit, pression et temps.

### **3-Soufflage**

Une opération de soufflage peut être pratiquée sur le résidu de distillation sous vide pour des colonnes peu performantes ou selon d'autre procès de fabrication des essences et huiles minérales sur les résidus pour les amener à la dureté souhaitée.

### **4-Modification par adjonction de polymères**

Afin d'améliorer les propriétés d'un bitume d'origine, des polymères élastomères peuvent lui être ajoutés.

Pour les applications routières, l'apport des polymères modifie la viscoélasticité du liant et réduit ainsi sa susceptibilité thermique

#### **2.1.2.2. Propriétés**

Le bitume sous l'influence de la chaleur se ramollit, se liquéfie et entre les températures de 125 à 225°C il devient suffisamment fluide pour permettre sa mise en œuvre dans la construction routière. Dès qu'il est à la température ambiante, il reprend ses caractéristiques originales.

Le bitume est particulièrement résistant à l'action des acides, des sels et à l'oxygène de l'air. Dans l'eau, il est complètement insoluble. Tout ceci lui donne une grande résistance aux influences climatiques. Dans certains cas, il est nécessaire de faire baisser la température et de les utiliser à froid. Cette nécessité peut être satisfaite en ajoutant des solvants aux bitumes ou bien en les émulsionnant. Ces solvants ou l'eau des émulsions n'ont d'autre but que de rendre les bitumes utilisables à froid ou à faible température. Après la mise en œuvre, le solvant ou l'eau s'évapore et il ne reste qu'une couche de bitume pur. Les émulsions servent traditionnellement à la réalisation des enduits superficiels. Le bitume est aussi souvent rendu fluide non par la chaleur ou l'eau, mais par un solvant hydrocarboné. Si ce solvant est le pétrole, on parle de cut-back ou de bitume fluidifié. [3]

Les spécifications des bitumes purs sont données dans le tableau I.1.

## Recherche bibliographique

Tableau I.1. Les spécifications sur les bitumes routiers. La norme NF EN 12591

Spécifications des bitumes routiers	Unité	Désignation des classes appropriées				
		20/30	40/50	50/70	70/100	160/220
Pénétrabilité à 25 °C	×0.1mm	20-30	35-50	50-70	70-100	160-220
Point de ramollissement	°C	55-63	50-58	46-54	43-51	35-43

### 2.1.2.3. Constitution du bitume:

Le bitume est un mélange complexe d'hydrocarbures et d'une petite quantité d'hétérocycles avec des groupes fonctionnels contenant du soufre, de l'azote et de l'oxygène. Le bitume contient aussi des quantités infimes de métaux tels que le vanadium, le nickel, le fer, le magnésium et le calcium, sous forme de sels ou d'oxydes. L'analyse élémentaire du bitume provenant de différentes origines montre la composition suivante

Carbone: 82-88%

Hydrogène: 8-11%

Soufre: 0,9-6%

Oxygène: 0,4-1,5%

Azote: 0,2-1%

La composition exacte du bitume est extrêmement complexe et change d'un lot de production à l'autre. De manière générale, le bitume est divisé en deux grands groupes de composant chimiques: les asphaltées et les maltènes. [4].

## 3. LES DIFFERENTS TYPES D'ENROBES

### 3.1. Les enrobe a chaud

### 3.1.1. Béton bitumineux souple BBS

Ces enrobés sont constitués le plus souvent à partir de sables roulés ou alluvionnaires semi concassés, et d'une bitume plutôt mou 70/100 plus rarement 50/70 et au dosage élevé afin d'obtenir un enrobé déformable qui soit adaptable au support.

Ces enrobés présentent une très faible résistance à l'orniérage.

Leur domaine d'emploi est réservé aux chaussées souples qui sont circulées par des trafics réduits ( 1500 véhicules/jour) et à faible vitesse [5].

### 3.1.2. Béton bitumineux semi-grenu BBSG

Les BBSG peuvent être utilisés en couche de roulement et de liaison, selon l'épaisseur de mise en œuvre de 5 à 7 cm ou de 6 à 9 cm, Ils sont de granularité 0/10 ou 0/14, généralement de type continu.

Les épaisseurs minimales en tous points correspondantes sont de 4 ou 5 cm. en général on utilise un bitume dur ou spécial [5]

### 3.1.3. Béton bitumineux mince BBM

Les liants utilisés sont essentiellement des bitumes purs. Toutefois, pour améliorer le comportement sous fort trafic, des liants spéciaux ou modifiés sont aussi utilisés.

Les performances des BBM sont jugées pour l'ensemble des critères que sont : l'orniérage, l'adhérence, l'imperméabilisation. Cette technique est fréquemment utilisée sur route nationale [5]

On distingue cinq types de bétons bitumineux minces en fonction de leur granulométrie :

- Béton bitumineux mince A 0/10 mm (BBM A 0/10) ;
- Béton bitumineux mince A 0/14 mm (BBM A 0/14) ;
- Béton bitumineux mince B 0/10 mm (BBM B 0/10) ;
- Béton bitumineux mince B 0/14 mm (BBM B 0/14) ;
- Béton bitumineux mince C 0/10 mm (BBM C 0/10).

Les types A se caractérisent par une courbe granulométrique discontinue entre 2

## Recherche bibliographique

mm et 6,3 mm.

Les types **B** se caractérisent par une courbe granulométrique discontinue entre 4 mm et 6,3 mm.

Le type **C** se caractérise par une courbe granulométrique continue.

### **Épaisseur d'utilisation:**

Les épaisseurs moyennes d'utilisation et les épaisseurs minimales en tout point sont représentées dans le tableau I.2.

Tableau I.2. Épaisseurs d'utilisation par couche (NF P 98-132).

Type de BBM	Épaisseur totale en tout point (cm)	Épaisseur moyenne d'utilisation (cm)
BBM A, B ou C 0/10	3 à 4	2.5
BBM A ou B 0/14	3.5 à 5	3

### **Domaine d'emploi**

Les bétons bitumineux minces sont principalement utilisables en voiries urbaines, ils sont parfaitement adaptés aux chargements des tapis vieillissant pour rétablir la rugosité de la chaussée et pour des contraintes de gabarit [6]

#### **3.1.4. Béton bitumineux très mince BBTM**

Les BBTM sont des enrobés 0/10 ou 0/6 présentant une discontinuité bien marquée et un dosage en sable 0/2 assez faible (de 20 à 30 %). Le liant est généralement un bitume pur modifié dosé de 5,2 à 5,8 %.

L'épaisseur moyenne est de 2,0 à 3,0 cm.

Les **BBTM** sont employés dans les routes à vitesse élevée pour l'entretien ou chaussée neuve. Ils ont pour objectifs essentiels de contact à la surface de la chaussée des propriétés d'adhérence, de drainabilité mais également, si nécessaire, de propriétés acoustiques ou photométriques.

La technique des **BBTM** tend à devenir la plus utilisée pour l'entretien des chaussées à trafic important et rapide [5]

## Recherche bibliographique

---

On distingue deux types de bétons bitumineux très minces en fonction de leur granulométrie :

- Béton bitumineux très mince 0/6 mm (BBTM 0/6) ;
- Béton bitumineux très mince 0/10 mm (BBTM0/10).

Les épaisseurs d'utilisation sont mentionnées dans le tableau I.3.

Tableau I.3. Épaisseurs d'utilisation par couche (NF P98-137)

Type de BBTM	Epaisseur totale en tout point (cm)	Epaisseur moyenne d'utilisation (cm)
BBTM 0/6 et 0/10	2 à 3	2.5

### 3.1.5. Béton bitumineux ultra-minces BBUM

Ce sont les derniers-nés de la famille des enrobés à chaud.

Les formulations de granularité 0/10 ou 0/6 sont discontinues 2/6 ou 2/4 et comportent du bitume généralement modifié, avec un dosage en sable de 20 à 25%. Cette couche est appliquée en épaisseur de 1 à 1,5cm.

Le domaine d'emploi privilégié de BBUM 0/6 est celui des revêtements urbains et des BBUM 0/10 concerne l'entretien des routes secondaires [5]

### 3.1.6. Béton bitumineux drainant BBDr

Il s'agit d'un matériau utilisé dans les couches de roulement. Il est caractérisé par une teneur en vide comprise entre 20 et 25% ce qui le rend perméable. Cette perméabilité est obtenue par l'utilisation de granularité discontinue. Le rôle de cet enrobé est d'évacuer les eaux par temps de pluie et ainsi d'éviter les projections d'eau. Il présente aussi l'avantage de réduire le bruit de roulement du au trafic routier.

On distingue deux types de bétons bitumineux drainants en fonction de leur granulométrie :

- Béton bitumineux drainant 0/6 mm (BBDr 0/6) ;
- Béton bitumineux drainant 0/10 mm (BBDr 0/10).

# Recherche bibliographique

## Avantage :

Par chaussée mouillée l'enrobé drainant présente les avantages suivants :

- Diminution de la réflexion de la lumière des phares sur chaussée mouillée, d'où une meilleure visibilité ;
- Amélioration de l'adhérence pour des vitesses supérieures à 90 km/h.

Par chaussée sèche, l'enrobé drainant présente les avantages suivants par rapport aux enrobés conventionnels de surface :

- Réduction du bruit : un enrobé drainant en bon état réduit le niveau sonore.
- Bonne résistance aux déformations permanentes.

Tableau I.4. Épaisseurs d'utilisation par couche (NF P 98134)

Type de BBDr	Épaisseur totale en tout point (cm)	Épaisseur moyenne d'utilisation (cm)
BBDr 0/10	3 à 4	2.5
BBDr 0/14	3.5 à 5	3

### 3.1.7. Béton bitumineux à module élevé BBME

Ils sont utilisés dans les couches d'assise de chaussées et la couche de liaison. Pour obtenir cet enrobé, il est nécessaire d'utiliser un bitume très dur (20/30) voire hyper dur (10/20) afin d'augmenter le module de rigidité de l'enrobé, ce qui permettra de minimiser le problème de l'orniérage.

### 3.2. ECF : Les enrobés coulés à froid

Le mélange est entièrement fabriqué et mis en œuvre à la température ambiante et destiné aux couches de roulement des routes à faible trafic.

#### 3.2.1. Technique de fabrication et de mise en œuvre

L'enrobé à froid est un mélange de granulats, de sable et de bitume utilisé comme liant. L'enrobé à froid, contrairement à l'enrobé chaud qui nécessite une température de 130 °C environ, se met en œuvre à température ambiante (entre 10 et 20°C).



## Recherche bibliographique

---

Certains enrobés sont fabriqués avec des granulats ayant déjà été enrobés : il s'agit alors d'un enrobé à froid à double enrobage.

La technique de mise en œuvre nécessite un finisseur si l'enrobé à froid a été complété avec de la résine ou s'applique directement dans les trous pour les réparations :

Nettoyer le trou ou nid de poule : ôter les gravillons, déchets de végétaux, etc.

Remplir le trou généreusement en faisant déborder de la surface initiale.

Compacter l'enrobé à froid à l'aide :

- D'un rouleau, - D'une « dame », - D'une plaque vibrante, etc.

Le durcissement s'effectue après le compactage et se renforce dans le temps.

L'épaisseur d'application est de 1 à 5 cm par couche : au-delà, elle doit être réalisée en deux couches.

### 3.2.2. L'utilisation de ECF :

Tableau I.5:L'utilisation de ECF

L'utilisation de ECF	Limites d'utilisation
-Couche de roulement en entretien	-Ne suppriment pas la remontée des fissures
-Revêtements colorés	-Ne permettent pas de rectifier le profil du support
-Couche d'accrochage (0/4)	-Ne renforcent pas

### 3.2.3. Les avantages et les inconvénients de l'ECF

Tableau I.6: Les avantages et les inconvénients des ECF

Avantages par rapport à un enrobé	Inconvénients
-Le prix (avec un aspect "noir" assez comparable)	-Qualité souvent médiocre.
-Mois de travaux préparatoires	-Peu de résistance.
-Pas de couche d'accrochage.	-Marque facilement.
-Durée de chantier réduite.	-Mauvaise élasticité.
-Remise en circulation plus rapide(30à60 min).	-Faible cohésion de surface.

### 3.3. LES ENROBE TIEDES

On tente d'obtenir une diminution des températures de production de 30 à 50 °C; L'enrobé tiède rencontre toutes les spécifications de l'enrobé à chaud, mais il est produit et mis en œuvre à une température inférieure de 30° à 60°C par rapport à l'enrobé à chaud.

- L'enrobé tiède est produit en centrale d'enrobage à une température inférieure de 30° à 60°C, par moussage du bitume ou par l'ajout d'additif.

Il est recommandé de vérifier l'ajustement du régime thermique de la centrale lors de la production de l'enrobé tiède.

#### 3.3.1. Les avantages de l'enrobé tiède sont

- augmentation de la durée de vie du revêtement grâce à la diminution des températures de production.
- diminution des émissions de gaz à effet de serre.
- réduction de la consommation énergétique.
- diminution des odeurs et des émissions de bitume lors de la production en centrale et de la mise en œuvre.

## Recherche bibliographique

---

- augmentation potentielle du taux de granulats bitumineux recyclés (GBR) en centrale.

L'enrobé tiède est utilisé en couche de roulement et de liaison, soit en construction ou en entretien. Il répond à tous les types de trafic, au même titre que les enrobés à chaud.

### **-Limites d'emploi**

Les limites d'emploi pour l'enrobé tiède sont les mêmes que les enrobés à chaud.

### **3.3.2. Mise en œuvre**

L'enrobé tiède se pose de la même manière que l'enrobé à chaud. Voici quelques particularités :

- La température minimale de compaction est généralement autour de 90°C ;
- La température du mélange étant plus basse, celui-ci devient donc potentiellement plus raide. Il est plus difficile d'effectuer du travail manuel (râtelage) pour un grade de bitume élevé, par exemple. [7]

### **3.4. LES ENROBE A MODULE ELEVE (EME)**

Le mélange est destiné aux couches de liaison soumises à un trafic lourd (principalement pour diminuer l'orniérage); Ce sont des Enrobés préparés à partir d'un mélange de liant hydrocarboné, de granulats et/ou d'additifs minéraux ou organiques, dosés, chauffés et malaxés dans une installation appelée centrale d'enrobage. Ils sont destinés à la réalisation des assises dans le cadre de travaux neufs ou de renforcement de chaussées.

Ils se caractérisent par un module de rigidité élevé atteignant 17000MPa et une plus grande résistance à la fatigue que les enrobés classiques.

On distingue deux classes de performance classe 1 et classe 2. Les granularités utilisées sont 0/10, 0/14 et 0/20.

Chaque type d'EME comprend deux classes granulaires qui diffèrent entre elles notamment par leur teneur en liant et la dureté. On distingue :

**EME Classe 1** : correspond à des graves bitumes à module élevé obtenues par l'emploi d'un bitume dur, aux dosages voisins de ceux des graves bitumes (GB).

**EME Classe 2** : correspond à un enrobé à module élevé comportant, de plus, un très bon comportement en fatigue, du fait du dosage élevé en bitume dur, généralement parlant de l'EME. [8]

### **3.5. LES BETONS BITUMINEUX A MODULES ELEVE (BBME)**

Les BBME sont généralement employés dans les couches de surface ou on fait appel aux enrobés qui ont une épaisseur moyenne de mise en œuvre comprise entre 5 à 10 cm.

On distingue trois familles des enrobés employés dans les couches de surface:

- Les bétons bitumineux semi grenus (BBSG),
- Les bétons bitumineux à module élevé (BBME),
- Les bétons bitumineux souples (BBS).

#### **3.5.1. Béton bitumineux à module élevé (BBME)**

Le BBME est un enrobé hydrocarboné à chaud caractérisé par un module de rigidité plus élevé que celui du béton bitumineux, et destiné à la réalisation des couches de surface (roulement ou liaison). L'épaisseur moyenne d'utilisation est d'au moins 5 cm. [9]

Il existe deux types de BBME :

- Béton bitumineux à module élevé 0/10 mm (BBME 0/10) ;
- Béton bitumineux à module élevé 0/14 mm (BBME 0/14).

Selon **NF P 98-141**

L'épaisseur varie entre 5 et 7 cm pour BBME 0/10

Et 6 à 9 cm pour BBME 0/14.

#### **3.5.2. Pour quoi faire un BBME?**

Les BBME constituent une évolution des enrobés épais permettant de mieux répondre aux attentes en matière de résistance à l'orniérage et de comportement mécanique face à l'accroissement des sollicitations lourdes. L'augmentation des performances s'est faite par l'emploi de bitume de grade plus dur, d'ajouts de

## Recherche bibliographique

---

polymères, d'additifs spéciaux tels que poudre d'asphalte ou fibre. Les granularités sont identiques à celles de BB. La teneur en bitume des BBME est généralement plus élevée que celle des BBSG.

### 3.5.3. Les classes de BBME

Les BBME comportent trois classes selon leur comportement mécanique : [9]

- Classe 1 : E 9000MPA
- Classe 2 : E 11000MPA
- Classe 3 : E 17000MPA

### 3.5.4. Mise en œuvre

La mise en œuvre des enrobés intervient pour une part importante dans les qualités requises pour une couche de chaussée [10].Après réception du matériel de mise en œuvre et de transport des enrobés, la réalisation des planches d'essai et de référence, les caractéristiques à contrôler sont comme suit :

- Préparation du support.
- Ré-profilage ou fraisage préalable.
- Exécution d'une couche d'accrochage.
- Température des enrobés.

### 3.5.5. Performances de BBME

Dans le cas de la couche de roulement, un béton bitumineux à module élevé (BBME) utilisé en remplacement d'un béton bitumineux semi-grenu (BBSG), présente des performances supérieures en termes de résistance en fatigue et de module de rigidité.

Il participe plus activement au pouvoir structurant en réduisant notablement l'endommagement par fatigue des couches liées de la chaussée

En conséquence, il est possible de réduire les épaisseurs de renforcement lors du calcul du dimensionnement. L'intérêt économique et environnemental de cette structure de chaussée est également largement avéré.

### **3.6.6. Propriétés recherchées à travers le mélange BBME**

- Amélioration de la cohésion
- Diminution de la susceptibilité thermique
- Augmentation des capacités d'allongement (sans fissurations)
- Amélioration des caractéristiques viscoélastiques
- Amélioration de l'adhésivité passive (meilleure résistance aux dés enrobage sur la chaussée)

**Chapitre II**  
**Les Essais d'identification  
des matériaux**

## 1-Introduction

La fabrication d'un enrobé bitumineux passe par une identification de ses constituants (granulats, bitume, additifs s'il y'a lieu) et par des essais de performance sur l'enrobé.

Un essai de laboratoire sur un matériau permet de mesurer un ou plusieurs paramètres caractéristiques de son comportement dans des conditions très précises. Cela paraît évident et pourtant, en matière de granulats, le paramètre étudié dans certains essais n'a pas toujours été clairement défini, ou du moins les techniques routières évoluant, on a peu à peu oublié la portée réelle de l'essai.

Dans le cas des granulats, l'identification portera sur des essais destinés à mesurer certains paramètres géométriques tels que la granularité, la forme, l'angularité, l'attrition, la résistance et la propreté.

Pour le bitume, il s'agit de vérifier la classe du bitume par des essais de pénétrabilité et de ramollissement.

Pour le produit final, ce sont les essais relatifs à la formulation par la méthode Marshall, et Duriez pour la tenue à l'eau.

## 2-ESSAIS SUR LES GRANULATS

### 2.1. Caractéristiques de fabrication

Elles résultent en général des conditions de fabrication. Entrent dans ce type de Caractéristiques: granularité, aplatissement, propreté des sables, propreté superficielle des gravillons, teneur en chlore, absorption, etc

#### 2.1.1. Analyse granulométriques (NF P 18-560)

**But** : L'analyse granulométrique consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulat dont les dimensions sont comprises entre **0.063** et **125 mm**.

On appelle:

**Refus sur un tamis** : la quantité de matériau qui est retenue sur le tamis.

**Tamisat (ou passant)**: la quantité de matériau qui passe à travers le tamis.



# Les Essais d'identification des matériaux

---

## 2.1.1.1. Principe

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les masses des différents refus et tamisats sont rapportées à la masse initiale du matériau, les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme graphique.

### Matériel utilisé :

Les dimensions de mailles et le nombre de tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue.

La norme actuelle (**EN 933-2**) préconise, pour l'analyse granulométrique, la série de tamis suivante en (mm): 0.063, 0.125, 0.25, 0.50, 1, 2, 4, 8, 16, 31.5, 63, 125.



Figure II.1. Les tamis et la machine de tamisage.

### Résultats :

- Peser le refus du tamis ayant la plus grande maille : soit  $R_1$  la masse de ce refus.
- Poursuivre la même opération avec tous les tamis de la colonne pour obtenir les masses des différents refus cumulés ...
- Les masses des différents refus cumulés  $R_i$  sont rapportées à la masse totale de l'échantillon  $m_1$ .
- Les pourcentages de refus cumulés ainsi obtenus, sont inscrits sur la feuille d'essai. Le pourcentage des tamisats cumulés sera déduit.

## 2.1.1.2. Tracé de la courbe granulométrique

Il suffit de porter les divers pourcentages des tamisât cumulés sur une feuille semi logarithmique

-**en abscisse**: les dimensions des mailles, échelle logarithmique.

-**en ordonnée**: les pourcentages sur une échelle arithmétique.

-la courbe doit être tracée de manière continue.

## 2.1.1.3. Interprétation des courbes

La courbe granulométrique nous donne les informations sur:

-les dimensions **d** et **D** du granulat.

-la plus ou moins grande proportion d'éléments fins.

-la continuité ou la discontinuité de la granularité.

## 2.1.2. Propreté superficielle (NF P 15-591)

### Principe

La propreté superficielle (**p**) est définie comme étant le pourcentage pondéral de particules de dimensions inférieures à 0.5 mm adhérentes à la surface ou mélangées à un granulat de dimension supérieure à 2 mm

Les éléments fins contenus dans les granulats à tester sont séparés par lavage sur un tamis d'ouverture 0.5 mm. Leur pourcentage est déterminé par pesée après séchage du refus.

### Matériel utilisé:

- un tamis de mailles de 0,5 mm.
- une étuve réglée à une température de  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .
- une balance de portée 5 kg, précision 0,1g.

### 2.1.2.1. Procédure de l'essai

-Echantillonner le granulat en deux (02) fractions égales de masse M1 et M2 comprises entre 200 D et 600 D (D la dimension maximale des grains en mm, M en g)

-Déterminer la teneur en eau w sur la fraction M1 de l'échantillon.

$$w = \frac{\text{Masse d'eau}}{\text{Masse sèche}} \text{ en \%}$$

-En déduire la masse sèche contenue dans la fraction M2

$$\text{Masse sèche : } M_{2s} = \frac{\text{Masse humide}}{(1+w)} = \frac{M_2}{(1+w)} \text{ en g}$$

-Procéder au lavage de la fraction M2 sur le tamis de 0.5 mm jusqu'à ce que l'eau qui s'écoule au travers du tamis soit claire.

-Sécher la fraction lavée jusqu'à une masse constante et déterminer M3

### 2.1.2.2. Résultats

-Masse sèche des éléments inférieurs à 0.5 mm:  $M_4 = M_{2s} - M_3$

$$\text{-Propreté superficielle : } P = \frac{M_4}{M_{2s}} \text{ en \%}$$

### 2.1.3. Coefficient d'aplatissement (NF P-18-561)

**But :** La réalisation des corps de chaussées et de couche de roulement, nécessitent de n'utiliser que des granulats ayant une forme assez ramassée, à l'exclusion des granulats plats. En effet, en technique routière, ils ne peuvent être utilisés car ils conduisent à des couches de roulement trop glissantes. La détermination du coefficient d'aplatissement est l'un des tests permettant de caractériser la forme plus au moins massive des granulats.

#### Matériel nécessaire :

Le coefficient d'aplatissement s'obtient en faisant une double analyse granulométrique, en utilisant successivement, et pour le même échantillon de granulat.

- une série de tamis normalisés à mailles (essai analyse granulométrique).
- une série de tamis à fentes de largeurs normalisées.



Figure II.2. Tamis à fentes [14].

### 2.1.3.1. Procédure de l'essai

L'essai consiste en un double tamisage:

- peser et éliminer tous les grains de la fraction inférieure à 4 mm et supérieure à 80 mm
- peser et retenir séparément tous les grains de fraction  $d_i/D_i$  comprise entre 4 mm et 80 mm
- tamiser chaque classe granulaire  $d_i/D_i$  à l'aide d'une grille à fentes parallèles d'écartement  $E=D_i/24$
- peser les passants à travers chaque fente.

### 2.1.3.1. Expression du coefficient d'aplatissement

Pour une classe granulaire  $d_i/D_i$  donnée, on peut définir un coefficient d'aplatissement partiel comme suite:

$$CA_i = 100m_i/M_i$$

Avec :  $M_i = R_i$  =somme des masses des classes granulaires  $d_i/D_i$

$m_i$  =masse passant à travers le tamis à fente d'écartement  $E=D_i/2$

Le coefficient d'aplatissement global  $CA$  s'exprime en intégrant les valeurs partielles déterminées sur chaque classe granulaire:

$$CA = 100 \times \sum m_i / \sum M_i$$

Vérifiant la relation  $G/E > 1.58$

### 2.1.4. Equivalent de sable (NF P18-598)

**But :** L'essai d'équivalent de sable à 10 % de fines, permettant de mesurer la propreté d'un sable, est effectuée sur la fraction d'un granulat passant au tamis à maille carrées de 2 mm et dont la proportion des éléments passant au tamis à mailles carrées de 0.08 mm a été ramenée à 10 % à l'aide d'un sable correcteur (si cette teneur en fines est supérieure à 11 %)

Il rend compte globalement de la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport conventionnelle volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent, Cet essai permet de déduire la nature et la qualité d'un sable.

#### **Matériel utilisé :**

- solution lavante.
- spatule et cuillère.
- cylindre.
- entonnoir, régle de 500 mm, gradué en millimètres.
- chronomètre donnant la seconde.

#### **2.1.4.1. Procédure de l'essai**

La Procédure d'essai est la suivante:-la solution lavant ayant été siphonnée dans l'éprouvette cylindrique, jusqu'au trait repère, on verse soigneusement à l'aide de l'entonnoir dans l'éprouvette posée verticalement.

-Frapper fortement à plusieurs reprises la base de l'éprouvette sur la paume de la main pour déloger les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon

-Laisser reposer dix minutes ; à la fin de cette période de dix minute boucher l'éprouvette à l'aide du bouchon de caoutchouc, puis fixer l'éprouvette sur la machine d'agitation, faire subir à l'éprouvette 90 cycles  $\pm 1$  cycle en 30 s  $\pm 1$  s , remettre l'éprouvette en position verticale sur la table d'essais

- Laisser reposer pendant 20 mm  $\pm 10$ s au bout de ces 20 mm

-Mesurer la hauteur  $h_2$  du sable sédimenté au fond de l'éprouvette

# Les Essais d'identification des matériaux

-Mesurer également la hauteur totale  $h_1$  (sable sédimenté + flocculat).

L'équivalent de sable est donnée par la formule  $ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100$

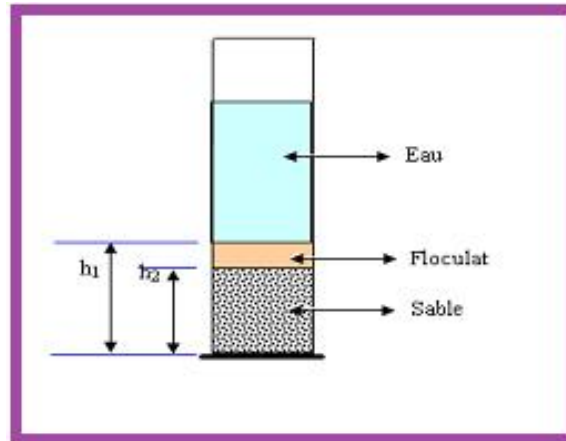


Figure II.3: Définition de l'équivalent de sable

## 2.2. Caractéristiques intrinsèques

Elles sont liées en général à la qualité de la roche exploitée. Entrent dans ce type de caractéristiques: Los Angeles, Micro-Deval, résistance au polissage, friabilité des sables, etc....

### 2.2.1. Los Angeles (NF P 18-573)

**But :** L'essai permet de mesurer les résistances combinées à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat.

Il s'applique aux granulats utilisés pour la constitution des assises de chaussée, y compris les couches de roulement.

Le matériau évolue pendant l'essai, d'une part par suite du choc des boulets sur le granulat (rupture fragile des éléments), d'autre part par frottement des éléments les uns sur les autres, sur le cylindre de la machine et sur les boulets.

#### 2.2.1.1. Principe

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés et aux frottements réciproques dans la machine Los Angeles.

### 2.2.1.2. Matériel utilisé :

La machine Los Angeles, comporte :

- un cylindre creux en acier de 12 mm d'épaisseur, fermé à ses deux extrémités ayant un diamètre intérieur de 711 mm et une longueur intérieure de 508 mm. le cylindre est porté par deux axes horizontaux fixés à ses deux parois latérales, mais ils n'entrent pas à l'intérieur du cylindre. Sur toute la longueur du cylindre, on trouve une ouverture de 150 mm de largeur qui permet d'introduire l'échantillon. au cours de l'essai, cette ouverture est bouchée hermétiquement aux poussières par un couvercle immobile tel que la surface intérieure reste cylindrique.
- une tablette en saillie placée à 40 cm du rebord du couvercle. elle est démontable, en acier dur et de section rectangulaire. elle repose suivant un plan diamétral, le long d'une génératrice et est fixée par des boulons sur les parois latérales ;
- un moteur assurant au tambour de la machine une vitesse de rotation comprise entre 30 et 33 tours par minute.
- un bac destiné à ramasser les matériaux après l'essai.
- un compte-tours de type rotatif, arrêtant au nombre de tours voulu.
- une charge qui est constituée par des boulets sphériques de 47 mm de diamètre et pesant 420 et 445 g. ces boulets ne doivent pas s'user de façon asymétrique.



Figure II.4. Machine de Los Angeles [16].

### 2.2.1.3. Procédure de l'essai

L'essai est mis en route en exécutant à la machine 500 rotations à une vitesse comprise entre 30 et 35 tr/min pour toutes les classes sauf la classe 25-50 mm ou le

## Les Essais d'identification des matériaux

---

nombre de rotation est de 1000, après l'essai on emporte les granulats et on les ramasse dans le bac placé sous l'appareil pour éviter les pertes des granulats , Il faut apporter l'ouverture au-dessus de ce bac.

On blute le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1.6 mm puis on lave le refus à 1.6 mm dans un autre bac et on le verse dans le bac troué. Dès que le refus est séché à l'étuve alors on détermine les poids de la pesée M1, et on calcule alors le coefficient Los Angeles :

$$LA=100 \times (M1-M2)/M$$

### 2.2.2. Micro-Deval M.D.E (NF P 18-572)

**But** : Cet essai permet de mesurer la résistance à l'usure d'un échantillon de granulats.

En règle générale, l'échantillon est soumis à l'essai en présence d'eau, mais il peut aussi être à sec.

#### 2.2.2.1. Principe

Il mesure la résistance à l'usure par frottement des matériaux.

La prise d'essai, constituée par 500 g d'une classe granulaire (4/6-6/10 ou 10/14 mm), est placée avec une charge constituée de billes d'acier de 10 mm de diamètre, dans un cylindre métallique.

La rotation du cylindre autour de son axe placé horizontalement entraîne une usure par frottement granulats-billes et la formation d'une proportion de fines d'autant plus grande que le matériau est plus tendre. Le pourcentage de ces éléments fins produits au cours de l'essai constitue le coefficient Micro-Deval.

#### 2.2.2.2. Matériel utilisé :

- Balance, contrôle de pesée mensuel.
- Jeu de tamis, contrôle annuel.
- Enceinte thermique, contrôle thermique mensuel.
- Moyens nécessaire au lavage de l'échantillon tamisé.
- Equipement nécessaire à la réduction de l'échantillon.
- Eprouvette graduée pour la mesure du volume d'eau.



## Les Essais d'identification des matériaux

L'appareil Micro-Deval (quatre cylindres creux en acier inox, couvercles des cylindres avec leurs joints, des billes sphériques pour la charge, moteur pour la rotation des cylindres et un compteur).



Figure II.5. Appareillage de l'essai Micro-Deval [17].

### Procédure de l'essai :

-L'échantillon doit être réduit afin que le granulat soit passant au tamis 14mm et retenu sur celui de 10 mm tout en respectant une certaine proportion de passant au tamis 12.5 mm (60 % à 70 %).

-Chaque fraction est lavée séparément et ensuite séchée pour la pesée.

-L'échantillon est ensuite placé dans le tambour de la machine ainsi que les onze boulets d'acier et on met ensuite en route la rotation de la machine.

-Enfin on termine par le lavage, tamisage à 1,6 mm et séchage du granulat récupéré.

Le coefficient Micro-Deval est par définition égal au rapport:

$$CMD=100 \times \frac{m}{M}$$

**M** : masse de l'échantillon 500 ou 10000 g selon la classe choisie.

**m** : masse du tamisat au tamis de 1.6 mm

Le résultat sera arrondi à l'unité.

Le coefficient mesure l, pourcentage d'usure plus il est petit et plus la résistance à l'usure est grande.

## 3. ESSAI SUR BITUME

Afin de préparer de grandes quantités de bitumes dont les propriétés mécaniques variées doivent répondre aux spécifications routières et industrielles.

Pour caractériser ces qualités et pour vérifier si un bitume donné répond aux spécifications d'une certaine qualité, différentes méthodes d'essais ont été mises au point. Au début, elles ne visaient qu'à mesurer une propriété mécanique arbitraire permettant de sélectionner les bitumes:

-La pénétration, dans le domaine quasi solide.

-La température de ramollissement Bille et Anneau, au début du domaine fluide.

### 3.1. Pénétrabilité à 25°C (NF EN 1426)

On mesure la pénétration d'une aiguille de référence dans l'échantillon d'essai conditionné.

Les conditions opératoires qui s'appliquent aux pénétrations inférieures ou égales à  $500 \times 0.1$  mm sont : température 25°C, charge appliquée 100 g , durée d'application de la charge 5 s.

Plus la valeur de pénétration est grande et plus le bitume est mou ; c'est une mesure de dureté, elle sert de base à la classification des bitumes.

#### 3.1.1. Procédure de l'essai.

-Dans le cas d'un produit bitumineux, l'échantillon à tester est porté à une température de 25°C.

-Les échantillons sont ensuite placés dans un bain-marie à température constante (25°C).

-L'aiguille est abaissée lentement jusqu'à ce que sa pointe coïncide avec son image réfléchiée par la surface de l'échantillon, puis le porte-aiguille est libéré pendant le laps de temps prescrit et descend par gravité. L'aiguille s'enfonce alors dans l'échantillon de bitume, on mesure la profondeur d'enfoncement à l'issue du temps prescrit.

### 3.1.2. Résultats

Les profondeurs de pénétration sont exprimées en dixièmes de millimètre.

Neufs classes sont déterminées en Europe pour les bitumes routiers à la température 25°C: **20-30, 30-45, 35-50, 40-60, 50-70, 70-100, 100-150, 160-220, et 250-330.**

### 3.2. Point de ramollissement (NF EN 1427)

Le point de ramollissement est la température à laquelle un bitume atteint un certain degré de ramollissement dans des conditions normalisées.

Pour réaliser la méthode bille anneau EN 1427 (ou équivalent), un anneau en laiton de dimensions définies diamètre intérieur = $16\pm 0.1$  mm, hauteur= $6.4\pm 0.1$  mm est rempli du matériau bitumeux à tester.

Cet anneau ainsi préparé est placé sur son support.

Une bille en acier (diamètre= $9.53$ mm, masse=  $3.5\pm 0.05$ g) est placée sur la pastille de la prise d'essai au milieu de l'anneau.

Le cadre support est ensuite immergé dans un bain thermostaté. Le liquide du bécher (en pyrex) normalisé est l'eau déminéralisée pour un essai de 30 à 80°C, du glycérol ou de l'huile silicone pour des températures supérieures.

Le bain est chauffé pour obtenir une élévation régulière de la température de  $5^{\circ}\text{C min}^{-1} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ .

On note la température à l'instant où la matière entourant la bille qui s'est détachée de l'anneau touche la plaque inférieure du support.

Cette température est appelée le point de ramollissement bille et anneau.

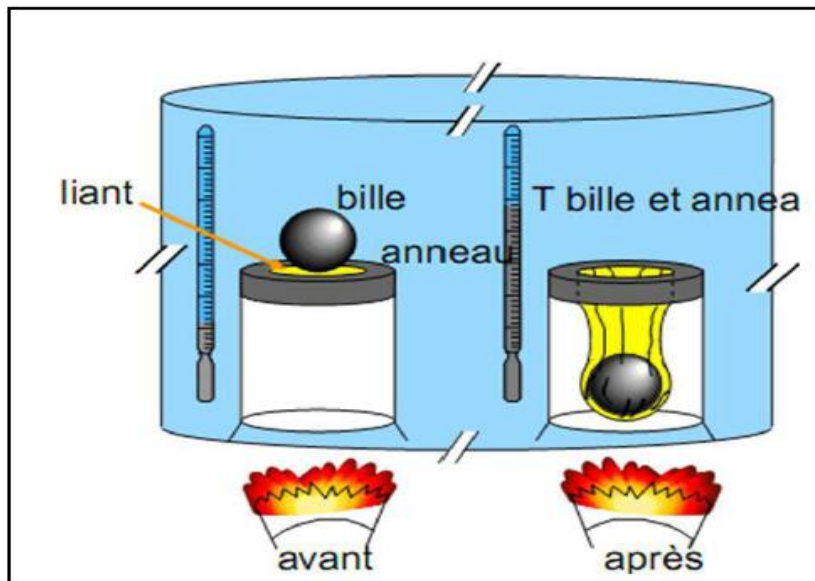


Figure II.6. Essai bille et anneau.

### 3.3. La densité relative à 25°C (NF EN ISO 2592)

#### Méthode au pycnomètre

On pèse un pycnomètre de 24 à 30 ml rempli d'eau distillée à 25°C et maintenu dans un bain d'eau à cette température. On remplit ensuite le pycnomètre de bitume à 25°C et on calcule le rapport de sa masse à celle de l'eau.

## 4-LES ESSAIS SUR LES ENROBES BITUMINEUX

Parmi les essais de laboratoire utilisés sur les mélanges bitumineux on cite :

### 4.1. Essai Duriez (NF P 98-251-4)

Cet essai consiste à compacter l'enrobé dans un moule cylindrique par une pression statique à double effet. Une partie des éprouvettes est conservée sans immersion à une température de 19°C et une hygrométrie contrôlée, l'autre partie est conservée immergée. Chaque groupe d'éprouvettes est écrasé en compression simple.

Le rapport de la résistance après immersion à la résistance à sec donne la tenue à l'eau du mélange.

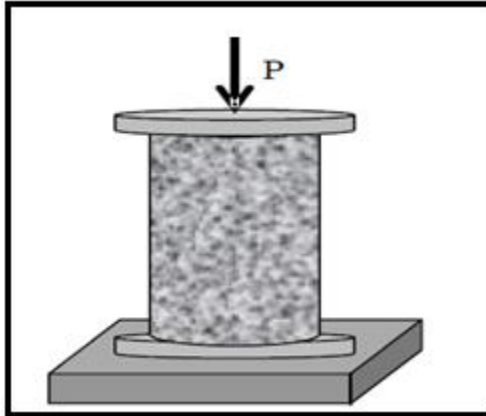


Figure II.7. Principe de l'essai Duriez

### 4.2. L'essai Marshall (NF EN 12697-12)

Les enrobés bitumineux sont compactés dans des moules à l'aide d'une dame en vue de réaliser des éprouvettes cylindriques.

Ces éprouvettes (température : 60°C) sont placées entre les deux mâchoires semi-cylindriques d'une presse qui se rapprochent l'une de l'autre à une vitesse constante.

Au cours de l'essai, la charge et la déformation sont enregistrées jusqu'à la rupture.

Il conduit à la détermination directe de deux grandeurs : le fluage (mm) et la stabilité Marshall (KN).

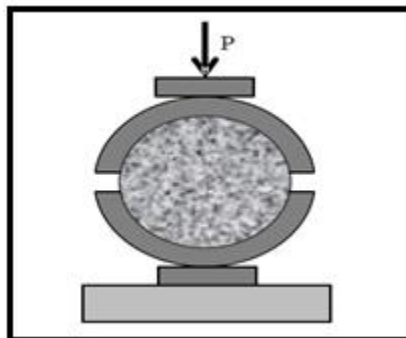


Figure II.8. Principe de l'essai Marshall

### 4.3. La Presse à cisaillement giratoire (NF P 98-252) :

La presse à cisaillement giratoire permet d'étudier l'aptitude au compactage des enrobés hydrocarbonés par l'estimation du pourcentage de vides en fonction de l'épaisseur de la couche d'enrobé.

## Les Essais d'identification des matériaux

Le mélange hydrocarboné préparé en laboratoire, est placé dans un moule cylindrique de 150 mm ou 160 mm de diamètre.

On applique sur le sommet de l'éprouvette une pression, verticale de 0,6 MPa. En même temps, l'éprouvette est inclinée d'un angle faible de l'ordre de  $1^\circ$  (externe) ou  $0,82^\circ$  (interne) et soumise à un mouvement circulaire.

Ces différentes actions exercent un compactage. On observe l'augmentation de compacité en fonction du nombre de tours.

La méthode Marshall ne permet la mesure d'un pourcentage de vides que pour un effort de compactage unique, l'essai à la PCG permet de mesurer l'évolution du pourcentage de vides dans le mélange en fonction du nombre de girations.

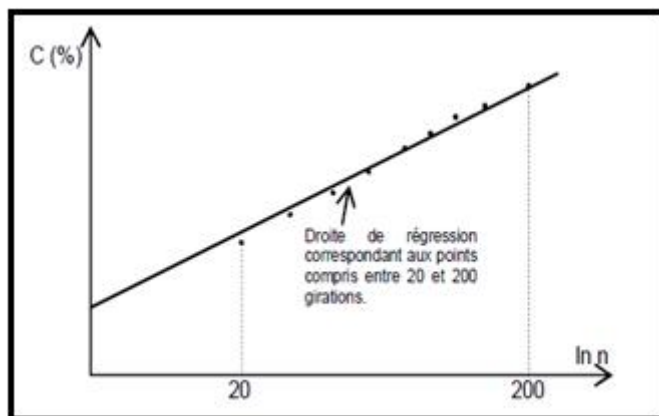
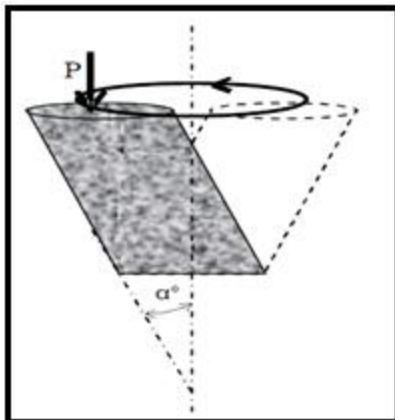


Figure II.9 : Principe du compactage      Figure II.10 : Droite de compactage PCG

### 4.4. L'essai d'orniérage (EN 12697-22)

Le corps d'épreuve est une plaque parallélépipédique de 5 cm ou de 10 cm d'épaisseur, selon que l'épaisseur de mise en œuvre de l'enrobé est inférieure ou supérieure à 5 cm. Cette plaque est soumise au trafic d'une roue équipée d'un pneumatique (fréquence : 1 Hz, charge : 5 kN, pression : 6 bars), dans des conditions sévères de température ( $60^\circ\text{C}$ ).

La profondeur de la déformation produite dans le passage de la roue, est notée en fonction du nombre de cycles. Les spécifications portent sur un pourcentage d'ornière à un nombre de cycles donné, qui dépend du type de matériau, et de sa classe.

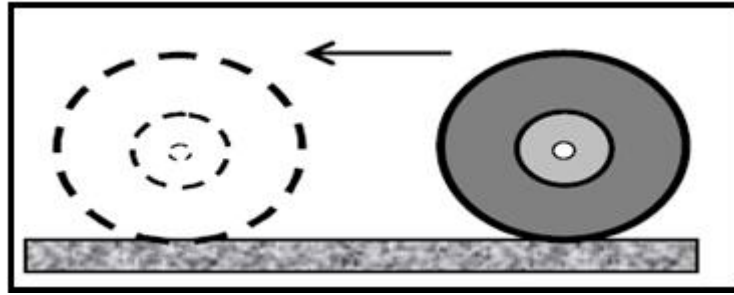


Figure II.11 : Principe de l'essai d'orniérage

## 4.4. Les essais de fatigue

Une éprouvette trapézoïdale est soumise, à une température et pour une fréquence de chargement fixées, à une déformation imposée. Lorsque la contrainte appliquée pour maintenir la déformation constante est diminuée de moitié, l'éprouvette est considérée comme endommagée au nombre de cycles considéré.

Sur un graphique, les différents couples (niveau de chargement, nombre de cycles jusqu'à l'endommagement), se placent sur une droite de fatigue (figure II.6).

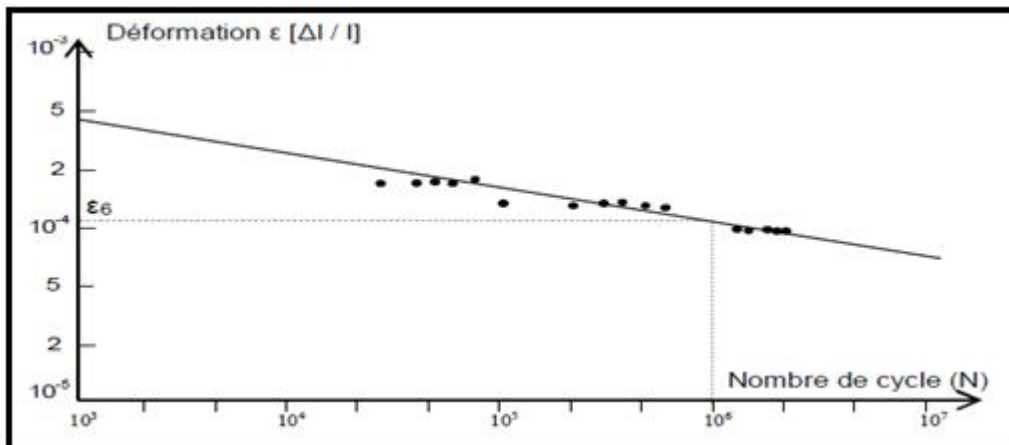


Figure II.12: Exemple d'un essai de fatigue.

A  $10^6$  cycles, le seuil de chargement relevé sur la droite est la valeur caractéristique de la résistance en fatigue dite : «  $\epsilon_6$  ».

### Remarque

Pour ce qui est de notre pays, seuls les essais classiques (Marshall et Duriez) sont utilisés pour la formulation des enrobés bitumineux

### **5. CONCLUSION**

On pourrait s'efforcer de définir des essais qui simuleraient des conditions d'évolution plus ou moins bien connues et certainement complexes comme celles existant dans une couche de chaussée. Une telle démarche ne peut que conduire à des essais difficiles à définir, et à se heurter aussi à la difficulté d'accélérer suffisamment l'évolution afin d'obtenir des résultats dans un temps raisonnable.

Les résultats des essais décrits ci-dessus restent déterminants dans le choix des matériaux en comparaison avec les valeurs fixées par spécifications et normes.



**Chapitre III**  
**Identification des**  
**matériaux**

## Caractéristiques des matériaux utilisés:

### 1-Le bitume

Le bitume utilisé est de classe 40/50 provenant de l'entreprise NAFTAL dont les caractéristiques sont résumées dans le tableau III.1 ci-après :

Tableau III.1: Résultats des essais effectués sur le bitume utilisé.

Caractéristique	Résultat	Recommandations CTTTP
Pénétrabilité à 25°C (1/10 mm)	42	40 à 50
Température de ramollissement (°C)	54.4	47 à 60
Densité relative à 25°C (g/cm <sup>3</sup> )	1.042	1,00 à 1,10

### 2-Poudrette de caoutchouc

#### ➤ L'avantage de la poudrette [11]

L'introduction de caoutchouc dans les bitumes permet d'améliorer les propriétés des enrobés, de donner une grande souplesse aux revêtements réalisées d'améliorer leur résistance à la fatigue aux basses températures, et de diminuer les phénomènes de bruit et de réflexions de sources lumineuses. L'utilisation de caoutchouc de récupération à cet effet permet de plus, de contribuer à l'élimination des pneus usés d'origines divers

Les poudrettes de caoutchouc peuvent être utilisées soit comme poudres ajoutées au mélange granulaire, on parle alors d'incorporation par voie "sèche", soit incorporées à chaud directement dans le liant on parle alors d'incorporation par voie "humide". Toutefois, l'une des contraintes auxquelles on doit faire face en Algérie est l'absence d'unités de fabrication des liants modifiés. Il est donc nécessaire de développer des enrobés fabriqués par le procédé sec

La poudrette de caoutchouc utilisée est celle en provenance de la société SAEL D'Oued Smar à Alger, qui est spécialisée dans la transformation du caoutchouc par la dévulcanisation de ce dernière.

La poudrette de caoutchouc présente une granularité assez fine de diamètre inférieure à 2 mm, sa température de fusion est de 200 à 220°C et sa densité de 0.8 à température ambiante.

## Caractéristiques des matériaux utilisées:

### Partie I : 3.LES AGREGATS BASALTIQUES (carrière de Janette)

#### I.1.La Masse volumique

Tableau III.2 : Masse volumique des fractions 0/3, 3/8 et 8/15.

	Fractions		
	0/3	3/8	8/15
Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	<b>2.70</b>	<b>2.85</b>	<b>2.90</b>

#### I.2.Los Angeles

Tableau III.3 : Essai de Los Angeles .

	Fractions		Recommandation
	8/15	3/8	
LA (%)	11.14	12.3	25

#### I.3.Coefficients Micro Deval humide

Tableau III.4 : Résultats d'essai micro Deval.

	Fractions		Recommandation
	8/15	3/8	
MDE (%)	11	10	20

#### I.4.Essai d'Aplatissement

Tableau III. 5: Résultats d'essai d'aplatissement des granulats.

	Fractions		Recommandation
	8/15	3/8	
A %	11	10	20

#### I.5.Essai de propreté

Tableau III. 6 : Résultats d'essai de propreté des granulats.

	Fractions		Recommandation
	8/15	3/8	
P (%)	1.10	1.25	2

#### I.6.Essai d'Equivalent de sable

Tableau III.7 : Résultats d'essai d'Equivalent de sable.

	Fractions		Recommandation
	0/3		
ES %	63		60

## Caractéristiques des matériaux utilisées:

### I.7. Analyse chimique sommaire

Tableau III.8: Les composants chimique du BASALTE.

DESIGNATIONS	COMPOSITION CHIMIQUE %
-INSOLUBLES	80.55
-CARBONATES (CaCO <sub>3</sub> )	13.79
- PERTE AU FEU A 1050°C (PF)	7.81
- OXYDE DE FER D'ALUMINE (R <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3.55
- SULFATES (CaSO <sub>4</sub> , 2H <sub>2</sub> O)	TRACES
ANHYDRIDE CARBONIQUE (CO <sub>2</sub> )	6.07
- CHLORURES (NaCL)	0.18
- EAU DE CONSTITUTION (H <sub>2</sub> O)	1.71

## Partie II : 3.LES AGREGATS CALCAIRE (carrière AZROU)

### II.1.La Masse volumique

Tableau III.9 : Masse volumique des fractions 0/3, 3/8 et 8/15.

	Fractions		
	0/3	3/8	8/15
Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	2.64	2.67	2.69

### II.2.Los Angeles

Tableau III.10 : Essai de Los Angeles

	Fractions		Recommandation
	8/15	3/8	
LA (%)	23 %	24.7 %	25

### II.3.Coefficients Micro Deval humide

Tableau III.11 : Résultats d'essai micro Deval .

	Fractions		Recommandation
	8/15	3/8	
MDE (%)	16 %	14 %	20

## Caractéristiques des matériaux utilisés:

### II.4.Essai d'Aplatissement

Tableau III. 12: Résultats d'essai d'aplatissement des granulats.

	Fractions		Recommandation
	8/15	3/8	
A (%)	12 %	17 %	20

### II.5.Essai de propreté

Tableau III. 13 : Résultats d'essai de propreté des granulats.

	Fractions		Recommandation
	8/15	3/8	
Propreté P (%)	0.90	1.10	2

### II.6.Mesure de l'équivalent de sable :

Un essai d'équivalent de sable à 10 % de fines a été réalisé sur la fraction sable 0/3.La valeur de propreté donnée par cet essai 61.00 % cette dernière est jugée conforme à la valeur spécifiée qui est 60 %.

### II.7.Analyse chimique sommaire

Tableau III.8: Les composants chimique du Calcaire

DESIGNATIONS	COMPOSITION CHIMIQUE %
-INSOLUBLES	4.48
-CARBONATES (CaCO <sub>3</sub> )	94.83%
- PERTE AU FEU A 1050°C (PF)	42%
- OXYDE DE FER D'ALUMINE (R <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1.98%
- SULFATES (CaSO <sub>4</sub> , 2H <sub>2</sub> O)	TRACES
ANHYDRIDE CARBONIQUE (CO <sub>2</sub> )	41.72
- CHLORURES (NaCL)	0.18
- EAU DE CONSTITUTION (H <sub>2</sub> O)	0.28

# **Chapitre IV**

## **Partie expérimentale**

### 1. Introduction

Ce chapitre regroupe les différents essais d'identification réalisés sur l'enrobé de référence et modifié dans le but d'évaluer l'influence de la poudrette de caoutchouc sur les performances mécaniques de l'enrobée.

Nous allons procéder à la formulation d'un enrobé bitumineux 0/14 en utilisant deux types de granulats (basaltiques et calcaires) modifié par poudrette des semelles des chaussures.

Pour ce là, on va suivre les étapes suivantes:

- Rechercher la teneur en liant optimale pour la formulation de notre enrobé et cela en choisissant entre trois mélange.
- Sur l'enrobé de référence, faire varier la teneur en poudrette de caoutchouc de 0 à 3 par une pas de 1%.
- Trouver la teneur optimale sur la base des résultats des essais DURIEZ et MARSHALL.
- Interprétation les résultats.

#### Remarque

La même procédure pour les deux types de granulats (Basalte et Calcaire), est appliquée.

## PARTIE I : AGREGATS BASALTIQUES

### 2. Identification des matériaux

#### 1. Analyse granulométrique:

L'analyse granulométrique qui faite sur les trois fractions granulaires (Tableaux IV.1-2-3) qui s'insérer dans le fuseau de référence de BB 0/14 (Figure IV.1)

#### Fraction 0/3

Poids sec: Pds=1458 g

Tableau IV.1: Analyse granulométrique de la fraction 0/3

Tamis (mm)	4	2	1	0.500	0.400	0.315	0.200	0.100	0.080
Tamisat (%)	99.66	80.66	51.78	32.3	29.01	26.27	21.4	14.20	13.72

## Partie expérimentale

### Fraction 3/8

Poids sec : Pds=1600g

Tableau IV.2 : Analyse granulométrique de la fraction 3/8

Tamis (mm)	10	8	6.3	5	4	2	1	0.500	0.400	0.315	0.200	0.100	0.080
Tamisat (%)	99.71	99.11	88.28	91.49	77.08	11.875	7.56	5.06	4.58	4.02	3.21	2.19	1.88

### Fraction 8/15

Poids sec : Pds=3000g

Tableau IV.3: Analyse granulométrique de la fraction 8/15

Tamis (mm)	16	12.5	10	8	6.3	5	4	2	1	0.500		0.080
Tamisat (%)	97.65	66.48	36.63	16.68	3.47	2.03	1.53	1.38	1.37	1.33		1.33

## 3-Formulation de l'enrobé bitumineuse (BB 0/14)

### 3-1- Les étapes de travail :

a-Choix du mélange granulaire.

b-Calcul des teneurs en bitume.

c-Détermination des performances mécaniques des différents mélanges (MARSHALL et DURIEZ)

d-Choix de la formule optimale.

### 3-2-Choix du mélange granulaire:

L'objectif visé est la disposition de squelette granulaire par rapport au fuseau de référence d'un BB 0/14 pour avoir la meilleure aptitude de compactage et qui pourrait donner une stabilité du mélange.



**3-3-Pourcentages des fractions granulaires pour le mélange:**

Notre mélange est composé par les fractions granulaires suivantes (Tableau IV.4) :

Tableau IV.4: Les pourcentages des fractions

Fractions	Pourcentage(%)	Tamis	Passants (%)	Tamis (mm)	Passants (%)
8/15	38	20	100	2	37.16
		16	99.11	1	24.74
3/8	20	12.5	87.26	0	16.44
		10	75.86	0.4	15.02
0/3	40	8	68.16	0.315	13.81
		5	61.62	0.2	11.71
Chaux	2	4	58.19	0.1	8.62
		4	52.27	0.080	8.37

Note : En ajoute 2 % de la chaux pour l'amélioration de l'adhésivité.

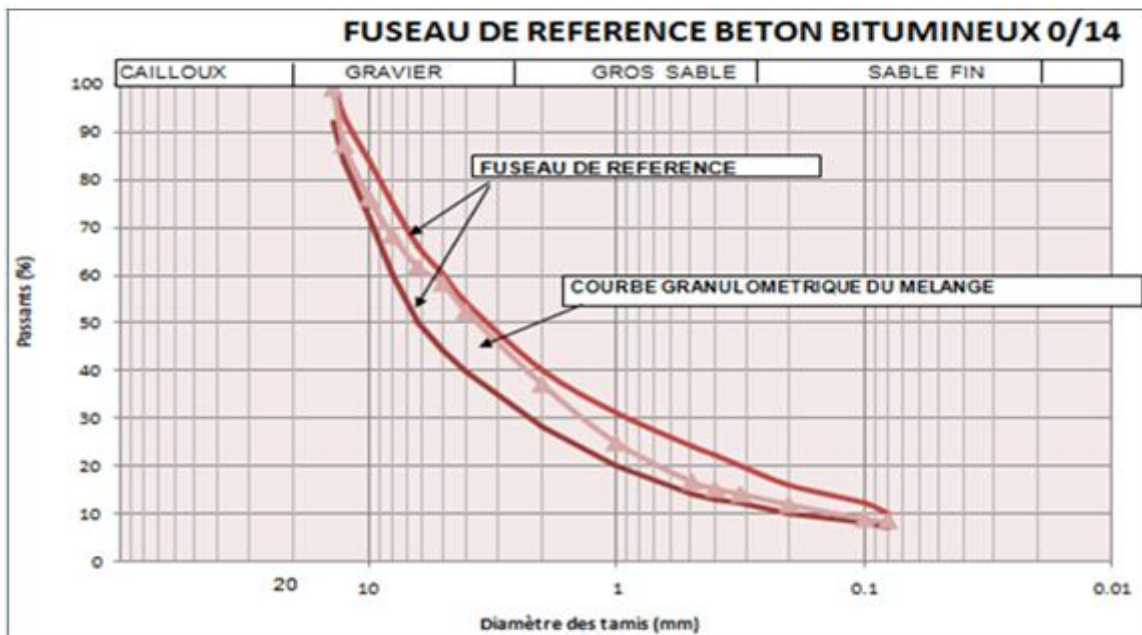


Figure IV.1: Courbe granulométrique du notre mélange 0/14.

## Partie expérimentale

### ➤ Calcul de la teneur en bitume TL :

La teneur en liant est déterminée en pourcentage du poids des agrégats selon la méthode de calcul suivante :  $TL = k \cdot \sqrt[5]{\Sigma}$ .

### ➤ La Surface spécifique des granulats :

La surface spécifique c'est-à-dire la surface développée qu'auraient les granulats assimilés à des sphères est calculé par l'équation suivante:

$$: 0.25 G + 2.3 S + 12s + 135 f \text{ en m}^2/\text{kg}.$$

Avec : G: La proportion pondérale des éléments supérieurs à 6.3 mm.

S: La proportion pondérale des éléments compris entre 6.3 et 0.315 mm.

s: La proportion pondérale des éléments compris entre 0.315 et 0.08 mm.

f: La proportion pondérale des éléments inférieurs à 0.08 mm.

On obtient une valeur de la surface spécifique.

### ➤ Coefficient correcteur :

Le coefficient de correction destiné à tenir compte de la masse volumique  $M_v$  des granulats si cette masse volumique est égale à  $2,65 \text{ g/cm}^3$ ,  $= 1$ .

Dans le cas contraire,  $= 2,65 / M_v$ .

Dans notre cas  $M_v = 2.752 \text{ g/cm}^3$  alors  $= 0.963$ .

Tableau IV.5: La surface spécifique du mélange.

G+S+s+f	$\frac{\Sigma L_i}{\sqrt[5]{\Sigma}}$		S (m <sup>2</sup> /kg)
100	1.674	0.963	13.143

### ➤ Détermination de la teneur en liant en fonction du module de richesse (k) :

Le module de richesse k caractérise l'épaisseur moyenne du film autour des granulats peut prendre les valeurs comprises entre 3 et 3,9 dans le cas d'un béton bitumineux (Tableau IV.6).

Tableau IV.6: Valeurs du module de richesse et les teneurs en liants.

Module de Richesse (k)	3.30	3.45	3.60
Teneur en bitume (%)	5.32	5.56	5.80

#### 4. Evaluation de la compacité

A partir des résultats des densités trouvés au laboratoire on calcule la compacité de chaque éprouvette de la manière suivante:  $(\text{Compacité } (\%) = \text{Densité apparente} / \text{Densité Vrai} \times 100)$

Les compacités sont données dans le tableau IV.7:

Tableau IV.7 : Evaluation de la compacité en fonction des tenures en bitume.

	Spécifications CTPP			
	Mélange A	Mélange B	Mélange C	Recommandation
Teneur en liant (%)	5.32	5.56	5.80	---
Densité vrai (g/cm <sup>3</sup> )	2.58	2.57	2.56	---
Densité apparente (g/cm <sup>3</sup> )	2.40	2.43	2.435	---
Compacité en %	93.02	94.55	95.11	92 à 96 %
Indice de vide %	6.98	5.45	4.89	4 à 8

#### 5. Résultats De l'Essai MARSHALL (NA-5227)

Nous avons confectionné des éprouvettes d'enrobés bitumineux pour les différents modules de richesse et pour une masse en granulats de 1200 g.

Nous avons soumis nos éprouvettes à l'essai Marshall dont les résultats sont indiqués dans le tableau IV.8:

Tableau IV.8 : Résultats d'essais Marshall.

	Mélange A	Mélange B	Mélange C	Recommandations
Teneur en bitume (%)	5.32	5.56	5.80	---
Stabilité Marshall (KN)	10.81	12.28	9.80	≥10.5 KN
Fluage (mm)	3.9	3.6	4.2	≤ 4 mm

## 6. Analyse Des Résultats D'essai MARSHALL

La variation des caractéristiques de l'enrobé en fonction de la teneur en bitume est traduite par les représentations graphiques dites courbes de propriétés (Figure IV.2-3-4-5):

On remarque que le pourcentage des vides décroît avec la progression de la teneur en bitume, ce qui conduit à un mélange moins poreux et plus consistante.

### a) Variation de la compacité en fonction de la variation de la teneur en bitume

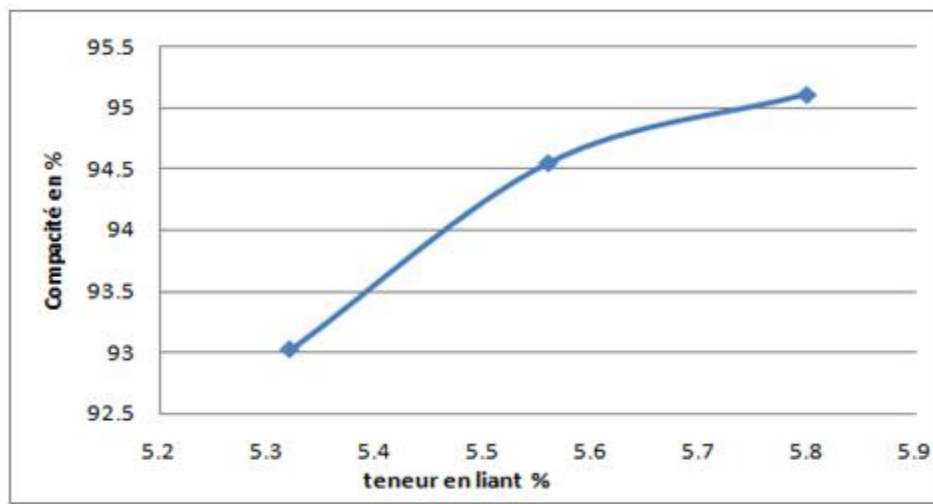


Figure IV.2 : Variation compacité - teneur en bitume.

On remarque que la compacité augmente avec l'accroissement de dosage de bitume ce que conduit à une résistance mécanique de l'enrobé plus importante.

### b) Variation de la stabilité en fonction de la variation de la teneur en bitume :

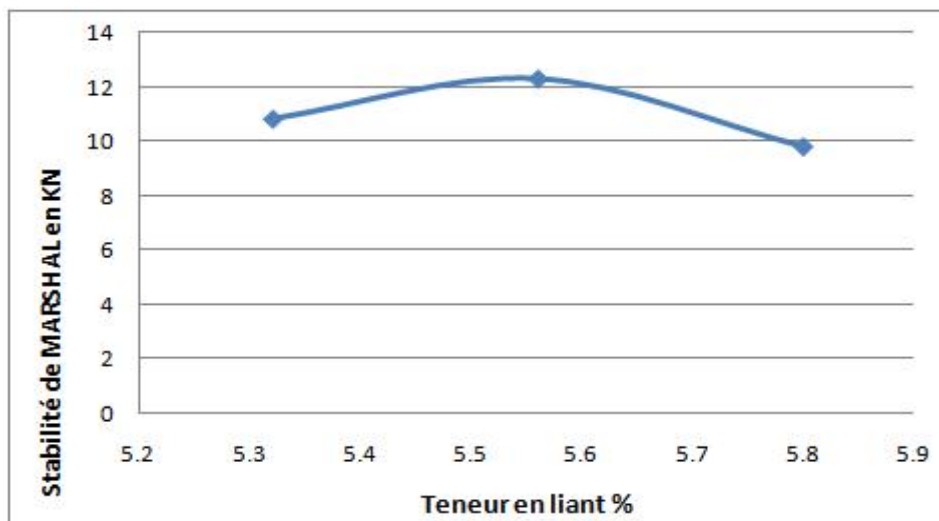


Figure IV.3: Variation stabilité - teneur en bitume.

## Partie expérimentale

On constate que la stabilité croît en fonction de dosage de bitume à une teneur en liant de 5.56 qui représente un maximum , au delà on observe une chute remarquable de la résistance aux déformations dans cet intervalle.

### c) Variation de fluage en fonction de la variation de la teneur en bitume :

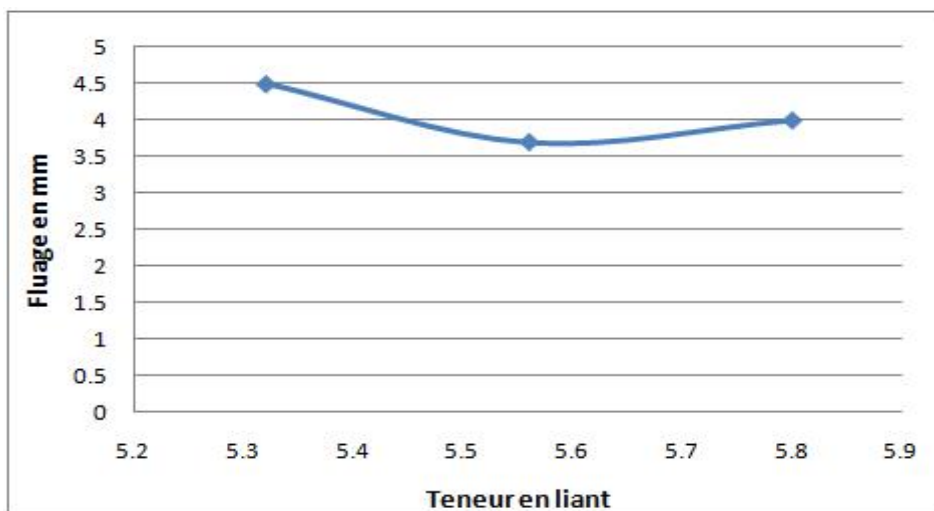


Figure IV.4 : Variation fluage - teneur en bitume.

La variation des valeurs du fluage en fonction de la teneur en bitume est admissible dans les deux pourcentages (5.56 et 5.80) et dépasse la limite admissible dans le premier pourcentage

## 7. Résultats d'essai DURIEZ

Afin de mieux cerner le comportement du enrobés bitumineux en présence d'eau, nous avons confectionné des éprouvettes avec les trois modules de richesse, soumises à l'essai Duriez afin d'évaluer les résistances à la compression à sec et en immersion ainsi que le rapport immersion -compression.

Tableau IV.9: Résultats d'essai Duriez.

	Mélange A	Mélange B	Mélange C	Recommandation
Densité apparente (g/cm <sup>3</sup> )	2.44	2.46	2.7	--
Compacité en %	94.5	95.7	96.4	92.0 à 96.0
RC à l'air (bar) R	76.00	84.00	70.00	>70.00
RC après immersion (bar) r	60.00	71.00	50.00	--
Rapport (r/R)	78	83	71	≥75

## 8. Analyse des résultats d'essai DURIEZ

a) Variation de la compacité en fonction de la variation de la teneur en bitume :

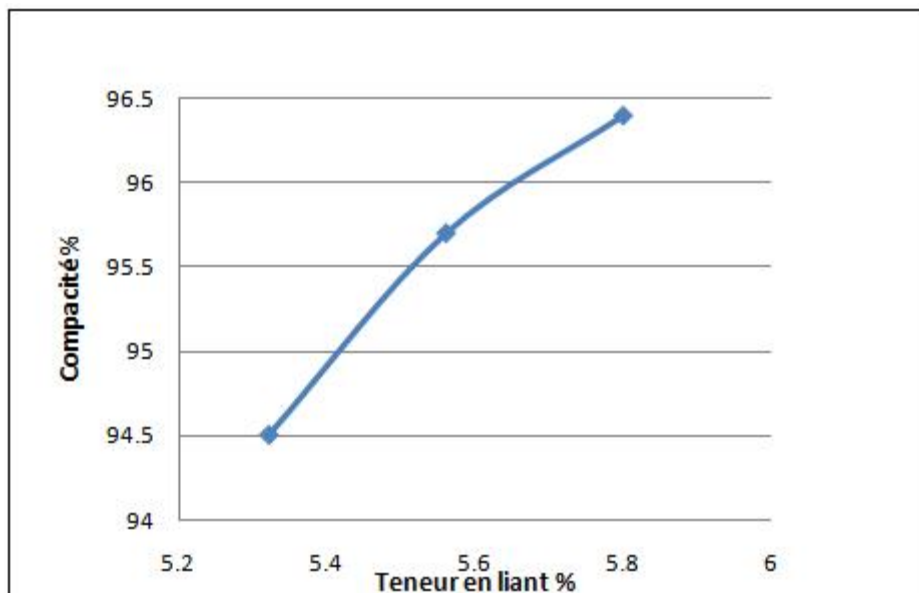


Figure IV.5: Variation compacité - teneur en bitume.

La variation de la courbe de Compacité est accroissant en fonction de la teneur en bitume est atteint son maximum à 5.8 % de dosage du bitume.

b) La Variation de la stabilité DURIEZ en fonction de la variation de la teneur en bitume :

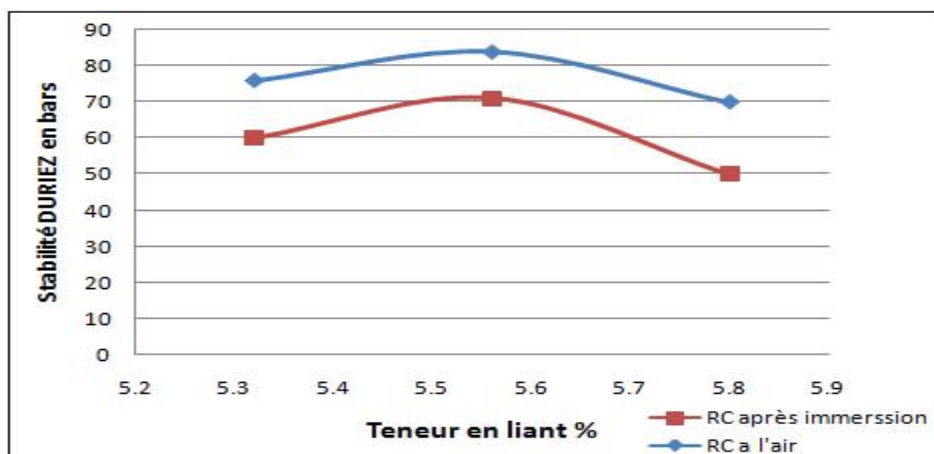


Figure IV.6: Variation stabilité DURIEZ - teneur en bitume.

La résistance à la compression à sec et après immersion sont augmente parallèlement et atteindre leur maximum au niveau de pourcentage de bitume de 5.56

## Partie expérimentale

Le rapport ( $r/R$ ) qui avoisine habituellement la valeur (0,75), se retrouve ici variant de 0.71 à 0.83.

### 9. Conclusion

D'après les études précédentes effectuées, on adopte une teneur en bitume de 5.56 % Pour l'enrobé de référence.

D'après cette analyse, la formule de 40 % de sable 0/3, 20 % de gravier 3/8, 38% de gravier 8/15, 2 % de chaux avec une teneur en bitume optimale de 5.56 % de classe (40/50) présente de bonnes caractéristiques mécaniques vis-à-vis de la stabilité et la tenue à l'eau (risque de désenrobage).

### 10. Enrobé modifié à la poudrette de caoutchouc :(Agrégats Basaltique)

A l'enrobé de référence adopté offrir on a ajoute de la poudrette de caoutchouc à différentes teneurs 1 ,2 et 3 % on étudie la variation des différentes performances et caractéristiques de l'enrobé en fonction du pourcentage de poudrette.

#### 10.1. Influence de poudrette de caoutchouc sur les caractéristiques de l'enrobé

On étudié en premier lieu les différentes caractéristiques de l'enrobé modifié et on comparera ces caractéristiques avec celles de l'enrobé de référence.

##### 10.1.1. Résultats de l'essai MARSHALL

Les résultats obtenus par l'essai MARSHALL pour les trois pourcentages des poudrettes sont résumées dans le tableau IV.10.

Tableau IV.10: Caractéristiques mécaniques de l'enrobé modifiée.

Teneur en poudrette de caoutchouc (%)	00	01	02	03
Densité Apparente (g/cm <sup>3</sup> )	2.46	2.48	2.485	2.49
Compacité (%)	94.55	96.18	96.3	96.8
Volume des vides (%)	5.45	3.82	3.7	3.2
Stabilité Marshall (KN)	12.28	13.56	12.54	12.32
Fluage (mm)	3.6	3.7	4.3	4.4

### a) variation du volume des vides avec l'ajout de poudre

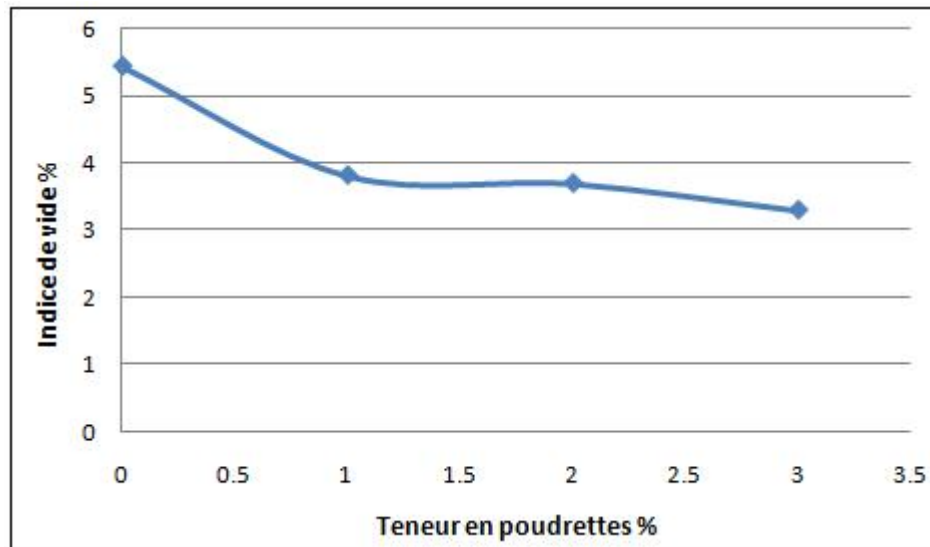


Figure IV.7 : Influence de teneur en poudre sur le volume des vides.

Le volume de vide est diminué en fonction de dosage de la poudre.

### b) variation de la compacité sous l'ajout de poudre:

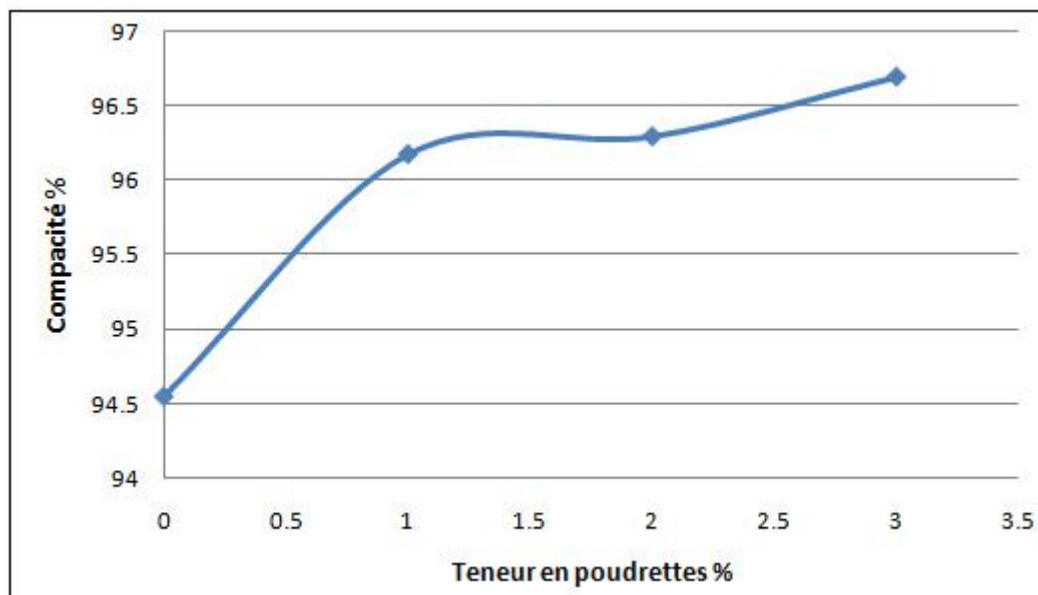


Figure IV.8: Influence de la teneur en poudre sur la compacité.

On remarque, par rapport à l'enrobé de référence que la compacité augmente avec l'accroissement de la teneur en poudre, c-à-d la compacité de l'enrobé modifié reste toujours supérieure à celle de l'enrobé de référence.



### c) variation du fluage sous l'ajout de poudrette:

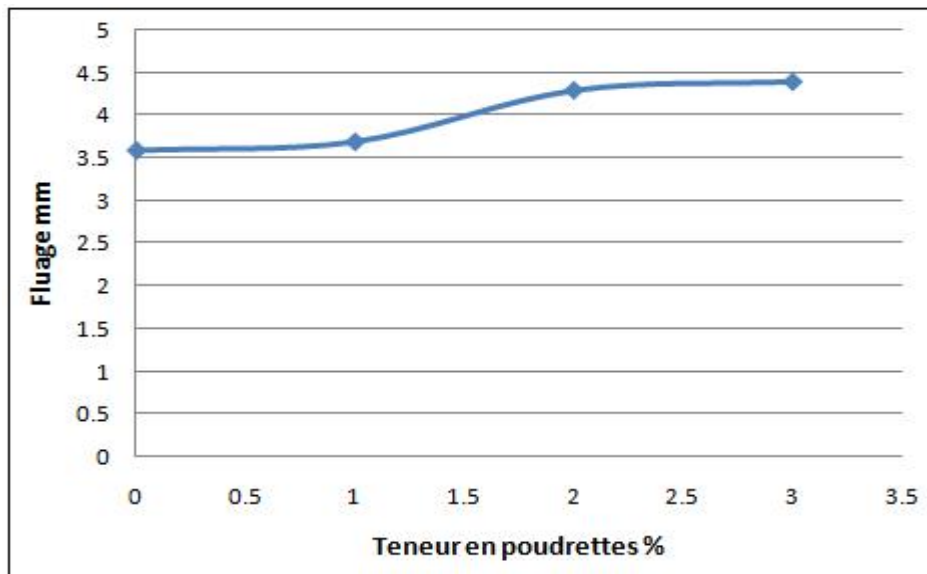


Figure IV.9: Influence de la teneur en poudrette sur le fluage.

Le fluage reste dans la limite admissible jus que 1.5 %, Au-delà, cette valeur est dépassée.

### d) variation du Stabilité Marshall sous l'ajout de poudrette:

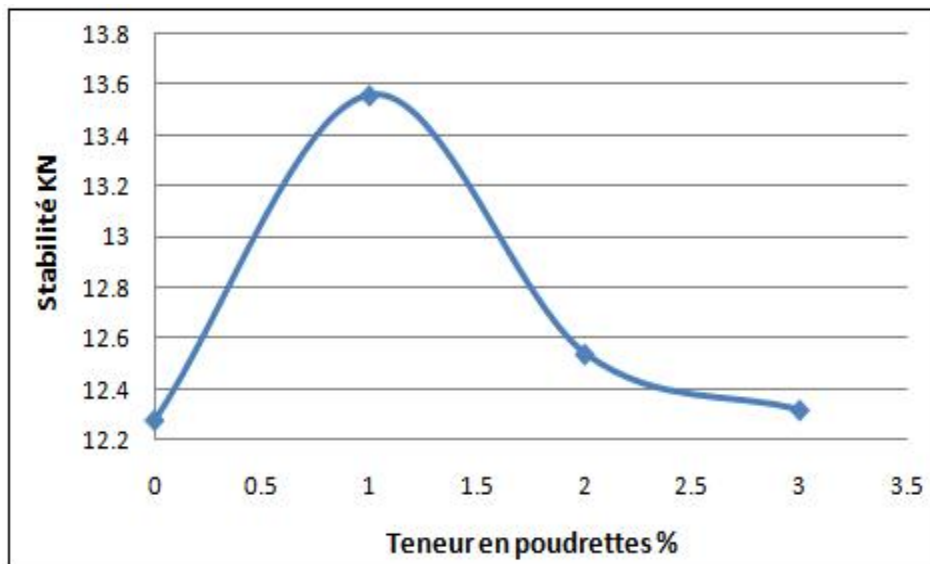


Figure IV.10 : Influence de la teneur en poudrette sur la stabilité Marshall.

Les bétons bitumineux modifiés présentent une meilleure stabilité comparativement à l'enrobé de référence elle passe par le maximum au 01% de teneur en poudrette, la poudrette a joué le rôle de correcteur en remplissant les vides jusque 1%, ce qui traduit aussi par une augmentation de la stabilité, Elle jouait aussi le rôle de liant.

### 10.1.2. Essai DUREIZ

Le tableau IV.11, récapitule les résultats de l'essai DURIEZ pour les trois teneurs en poudrettes de caoutchouc, en comparaison du mélange témoin.

Tableau IV.11: Résultats d'essai Duriez.

Poudrettes de caoutchouc %	00	01	02	03
Compacité en %	95.7	95.8	96	96.4
RC à l'air (bar)	84	76	76	72
RC après immersion (bar)	71	70	69	58
Rapport (r/R) %	83	92.1	90.7	80

#### a) Variation des rapports immersion/sec sous l'ajout des poudrettes:

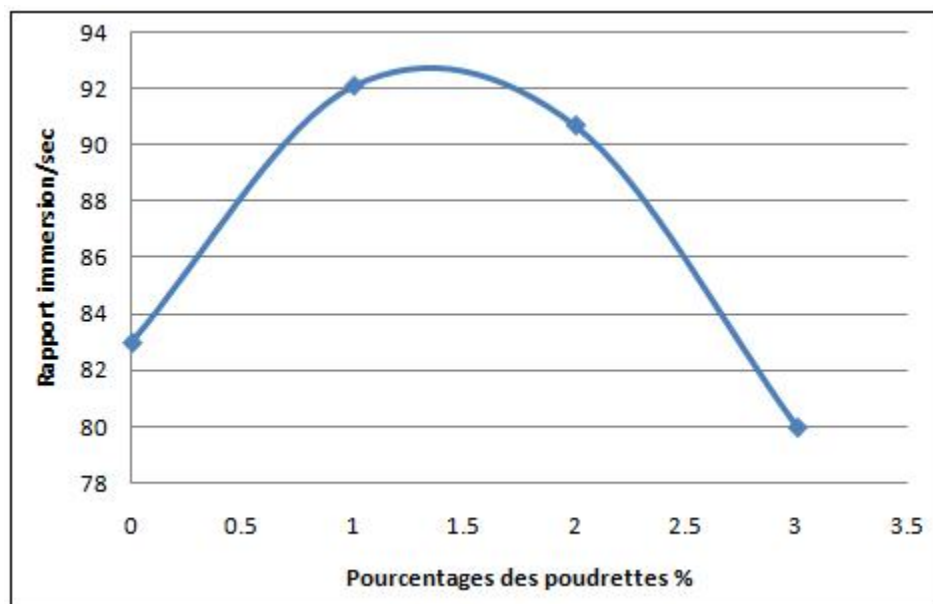


Figure IV.11 : l'influence de la poudrette sur le rapport r/R

La tenue à l'eau est satisfaisante pour des teneurs de 0 à 3%, Elle présente un maximum aux environs de 1.4 % de poudrette de caoutchouc.

### 11. Conclusion :

Au vu de ces résultats, on conclut que l'incorporation de la poudrette de caoutchouc dans le squelette granulaire d'un béton bitumineux amélioré certaines caractéristiques mécaniques, néanmoins, il améliore de façon significative sa résistance (stabilité).

Cette amélioration est mieux remarquable à 01 % de teneur en poudrette de caoutchouc pour les raisons suivantes :

La compacité qui représente un paramètre à la résistance à l'orniérage est acceptable elle offre à l'enrobé recherché une forme plus résistante. Ce qui explique que l'ajout de poudrette joue le rôle de réducteur de vides (correcteur granulaire).

L'amélioration de stabilité à ce dosage est adéquat et estimé à 1.10 % par rapport à l'enrobé témoin.

La tenue à l'eau se trouve améliorée à l'exception de 3% par rapport au témoin, Néanmoins, elle satisfait les recommandations, A 1% d'ajout,  $r/R$  est proche de l'unité(01), la poudrette a joué le rôle de dope d'adhésivité en plus de la chaux.

## PARTIE II : CALCAIRE

### 1. Identification Des Matériaux

#### 1.1. Analyse granulométrique:

##### Fraction 0/3:

Poids sec :  $P_{ds} = 1027$  g

Tableau IV.12: Analyse granulométrique pour fraction 0/3

Tamis (mm)	6.3	5	4	2	1	0.500	0.400	0.315	0.200	0.100	0.080
Tamisat (%)	97.6	94.26	85.59	64.57	47.05	32.93	29.72	26.41	21.35	15.90	15.31

## Partie expérimentale

### Fraction 3/8:

Poids sec : Pds = 1628.59 g

Tableau IV.13: Analyse granulométrique pour fraction 3/8

Tamis (mm)	10	8	6.3	5	4	2	1	0.500	0.400	0.315	0.200	0.100	0.080
Tamisat (%)	99.82	91.28	42.77	9.49	1.51	0.77	0.71	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65

### Fraction /15:

Poids sec : Pds = 3000 g

Tableau IV.14: Analyse granulométrique pour fraction 8/15

Tamis (mm)	16	12.5	10	8	6.3	5	4	2	1	0.500	0.080
Tamisat (%)	93.07	61.67	29.77	11.23	3.33	1.87	1.30	1.23	1.17	1.10	1.03

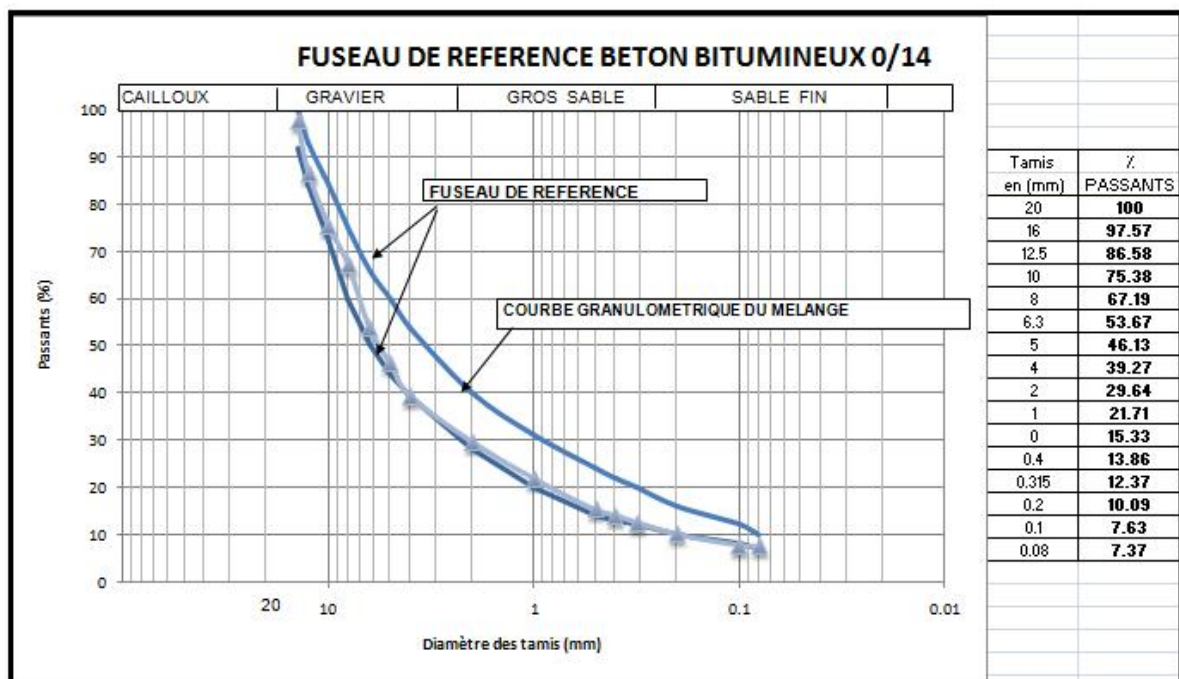


Figure IV.12: Courbe granulométrique du notre mélange 0/14.

- Calcul de la surface spécifique:

On a introduit nos données dans un fichier Excel (LCTP) on obtient les valeurs suivantes.

## Partie expérimentale

Tableau IV.15 : surface spécifique

G+S+s+f	$\frac{100}{\sqrt{S}}$		S (m <sup>2</sup> /kg)
100	1.633	0.987	11.616

Les teneurs en liant sont calculés à partir des modules de richesses (tableaux IV.16):

Tableau IV.16 : Teneurs en liant en fonction du module de richesse

Fraction	Pourcentage %	variantes	K	Liant %
8/15	35	A	3.45	5.61
3/8	20	B	3.60	5.85
0/3	45	C	3.75	6.09

### 2. ESSAIS MARSHALL:

Les caractéristiques obtenues par ces mélanges sont présentées dans le tableau IV.17:

Tableau IV.17 : Résultats d'essai MARSHALL

ESSAIS	RESULTATS OBTENUS			RECOMMANDATION
	A	B	C	
Teneur en liant en %	5.61	5.85	6.09	/
Densité vraie	2.32	2.33	2.34	/
Densité apparente	2.45	2.44	2.43	/
Compacité (C) en %	94.69	95.89	96.29	92 à 96 %
Stabilité Marshall en KN	11.80	11.00	9.90	≥10.50
Fluage 1/10 mm	3.10	03.30	4.20	≤ à 4

### 3. Résultats De l'Essai MARSHALL (NA-5227):

#### a) Variation de la stabilité et l'indice des vides en fonction de la teneur en liant

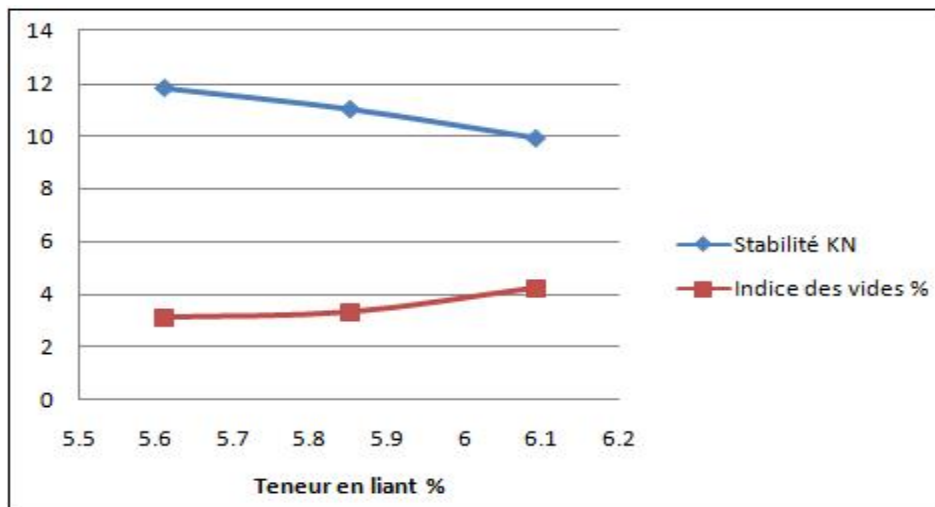


Figure IV.13: Variation Stabilité et l'indice des vides-teneur en liant

Les deux performances évoluent dans le sens inverse (Augmentation de vides entraîne une diminution de la stabilité), l'optimum est obtenu pour un teneur en liant de 5.61%.

#### b) Variation du fluage en fonction de teneur en liant

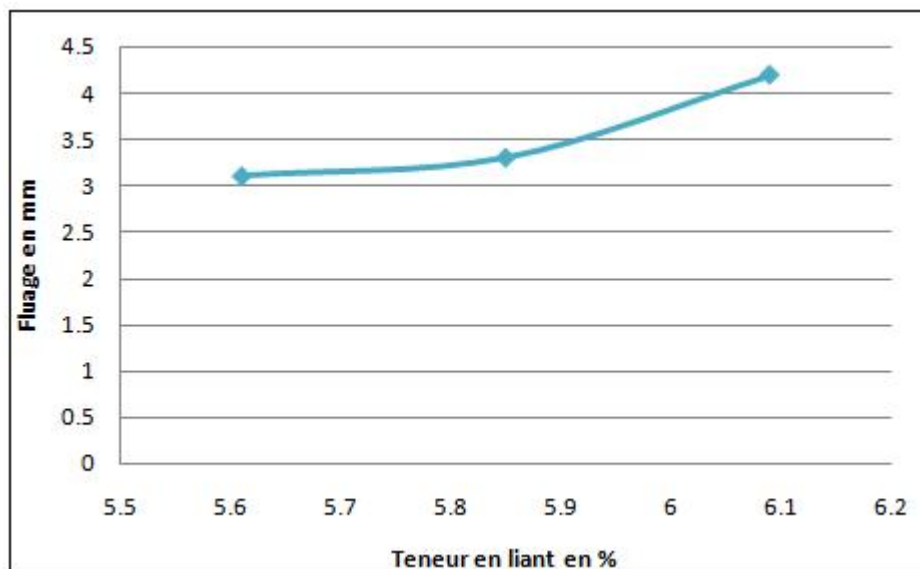


Figure IV.14.: Variation du fluage –teneur en liant

Le fluage augmente en sens inverse de la stabilité, ce qui était prévisible.

#### 4. ESSAI DURIEZ:

Les caractéristiques obtenues par ces mélanges sont présentées dans le tableau IV.18:

Tableau IV.18 : Caractéristiques mécaniques de l'enrobé modifiée.

ESSAIS	RESULTATS OBTENUS			RECOMMANDATION
	A	B	C	
Teneur en liant en %	5.61	5.85	6.09	--
Densité vraie	2.45	2.44	2.43	--
Densité apparente	2.28	2.29	2.30	--
Compacité (C) en %	93.06	93.85	94.65	92 % à 96 %
Résistance à la compression à sec à 7 j (R)	78	72	65	≥ 70 bars
Résistance à la compression en immersion à 7 j (r)	64	62	52	/
Rapport Immersion/compression (r/R) %	82	86	80	≥ 75

#### 5. La Variation de la stabilité DURIEZ en fonction de la variation de la teneur en bitume :

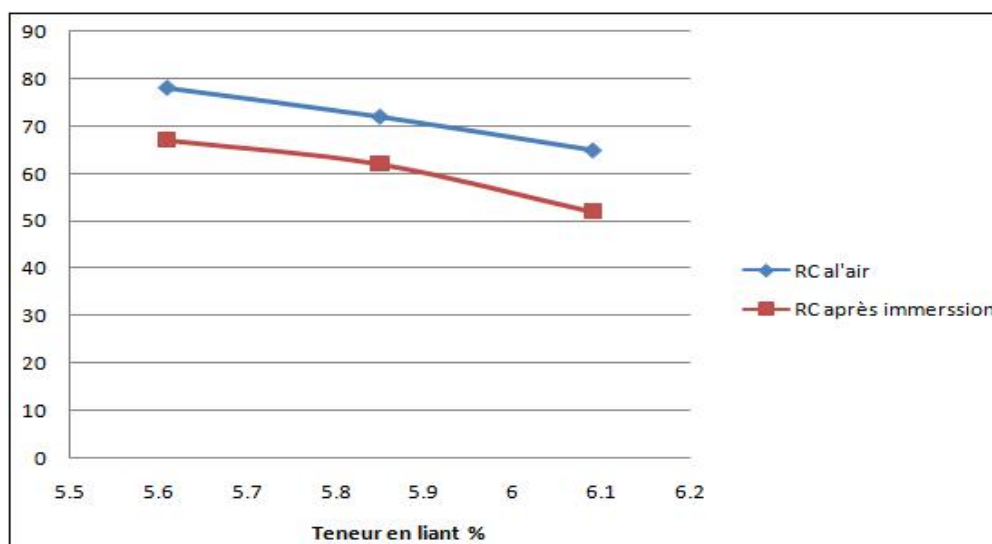


Figure IV.15: Variation stabilité DURIEZ - teneur en bitume.

## 6. Conclusion

D'après les études précédentes effectuées, on adopte une teneur en bitume de 5.61 % Pour l'enrobée de référence.

D'après cette analyse, la formule de 40 % de sable 0/3, 25 % de gravier 3/8, 35% de gravier 8/15, avec une teneur en bitume optimale de 5.61 % de bitume (40/50) présente bonnes caractéristiques mécaniques vis-à-vis la stabilité et de la tenue à l'eau.

## 7. Influence de l'ajout de poudrettes de caoutchouc sur les caractéristiques de l'enrobé : (Agrégats calcaire)

Le tableau IV.19 Récapitule les principaux résultats de l'enrobé à base d'agrégats calcaires modifié à différentes teneurs de poudrette de caoutchouc

Tableau IV.19: Caractéristiques mécaniques de l'enrobé modifiée.

Teneur en poudrette de caoutchouc (%)	00	01	02	03
Stabilité en MARSHALL (KN)	11.80	13.03	11.00	10.50
Compacité (%)	94.69	94.85	95.9	96.3
Volume des vides (%)	5.31	5.15	4.1	3.7
Fluage (mm)	3.1	3.2	3.4	4

### a) Variation du Stabilité Marshall sous l'ajout de poudrette:

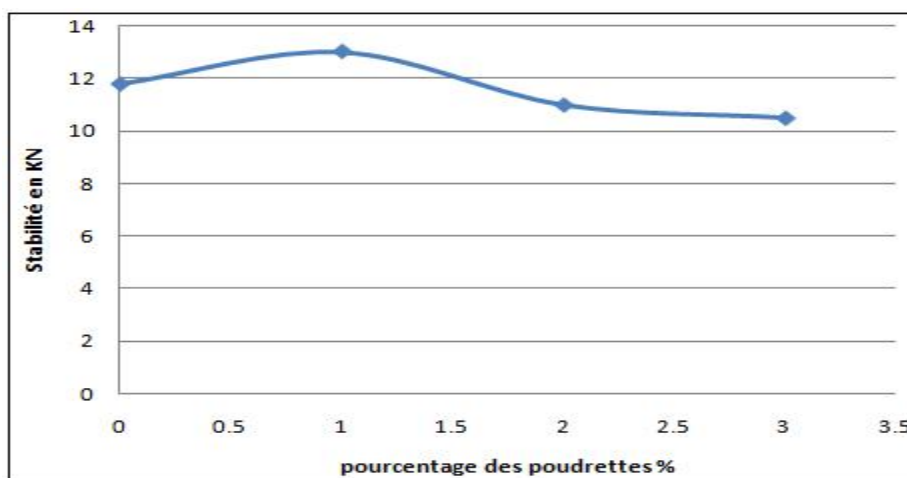


Figure IV.16: Influence de teneur en poudrette sur la Stabilité



## Partie expérimentale

De même que pour les agrégats basaltiques, la stabilité MARSHALL atteint un extrémum à 1% d'ajout.

### b) Variation de la compacité sous l'ajout de poudrette:

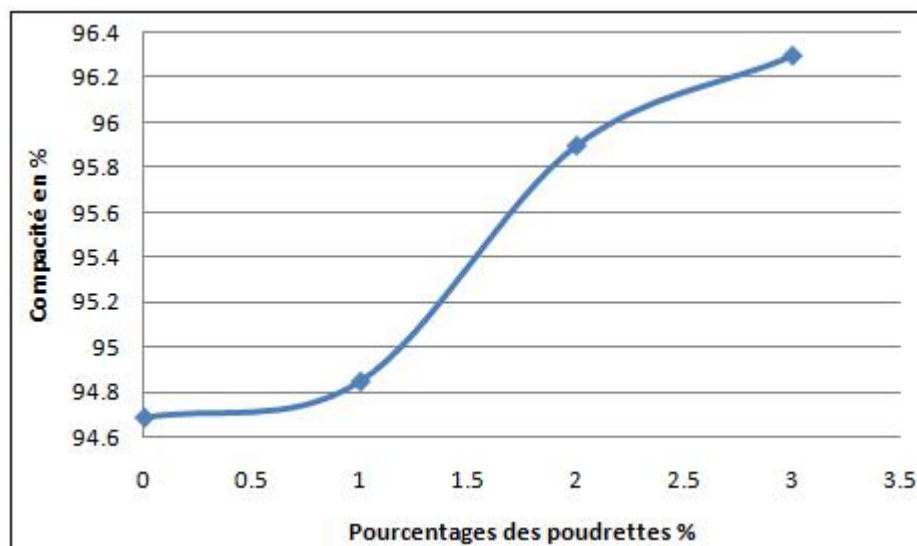


Figure IV.17: Influence de teneur en poudrette sur la Compacité

Pour la compacité, 1% la teneur maximum (densification du squelette granulaire-corréction) Au-delà trop de fines ce fait chuter la résistance car les gros granulats donnant la résistance sont séparés par une couche importante de fines.

## 8. Essai DUREIZ

Les résultats d'essai URIEZ récapitule dans le tableau IV.20

Tableau IV.20: Résultat d'essai DUREIZ

Poudrettes de caoutchouc %	00	01	02	03
Compacité en %	94.5	94.8	95.7	95.9
RC à l'air (bar)	78	89	70	62
RC après immersion (bar)	64	70	54	46
Rapport (r/R)	85.9	78.65	77.15	74.2

## 9. La Variation de la stabilité DURIEZ en fonction de la variation des pourcentages des poudrettes:

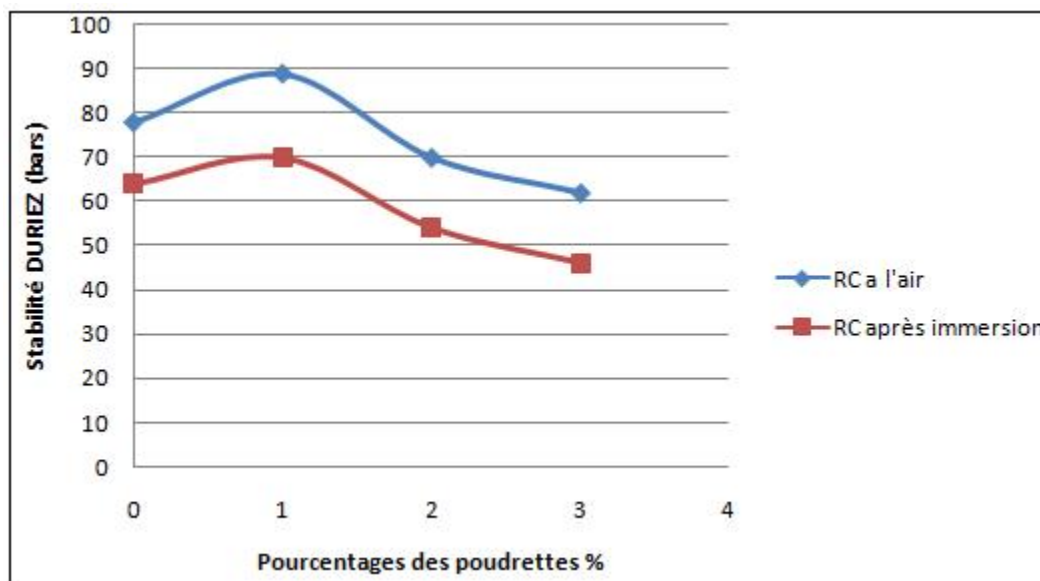


Figure IV.18: Variation stabilité DURIEZ - teneur en bitume.

## 10. Conclusion

Au vu de ces résultats, on conclut que l'incorporation de la poudrette de caoutchouc dans le squelette granulaire d'un béton bitumineux améliore certaines caractéristiques mécaniques, notamment, il améliore de façon significative sa résistance (stabilité).

Cette amélioration est mieux remarquable à 01 % de teneur en poudrette de caoutchouc pour les raisons suivantes :

La compacité qui représente un paramètre à la résistance à l'orniérage est acceptable elle offre à l'enrobé recherché une forme plus résistante. Ce qui explique que l'ajout de poudrette joue le rôle de réducteur de vides (correcteur granulaire).

L'amélioration de stabilité à ce dosage est adéquat et estimé à 1.10 % par rapport à l'enrobé témoin.

## 11. Comparaison entre les deux types des granulats

Tableau IV.21: comparaison entre les deux granulats

Agrégats	Basaltique				Calcaire			
	00	01	02	03	00	01	02	03
Poudrette%	00	01	02	03	00	01	02	03
Densité Apparente (g/cm <sup>3</sup> )	2.46	2.48	2.485	2.49	2.45	2.46	2.47	2.475
Compacité %	94.55	96.18	96.3	96.7	94.69	94.85	95.9	96.3
Indice des vides%	5.45	3.82	3.7	3.3	5.31	5.15	4.1	3.7
Fluage (mm)	3.6	3.7	4.3	4.4	3.1	3.2	3.4	4
Stabilité MARSHALL (KN)	12.28	13.56	12.54	12.32	11.8	13.03	11.00	10.50
RC a l'air (bars) R	84	76	76	72	78	89	70	62
RC immersion (bars) r	71	70	69	58	64	70	54	46
Rapport r/R %	83	92	90	80	82	78	77	74

a) Comparaison en termes de compacité sous l'ajout de poudrette:

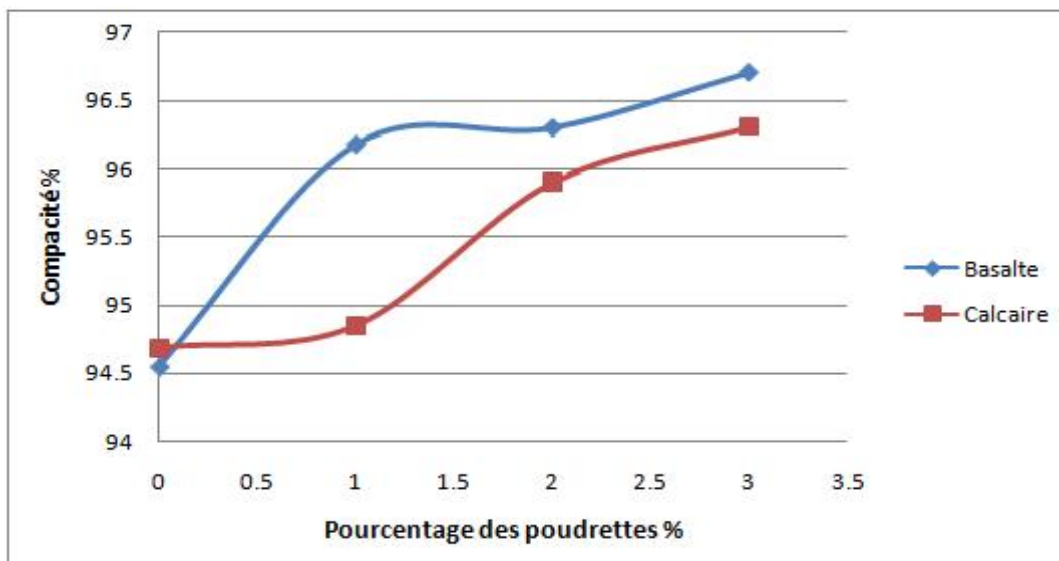


Figure IV.18: Influence de teneur en poudrette sur la Compacité

b) Comparaison en termes de Fluage sous l'ajout de poudrette:

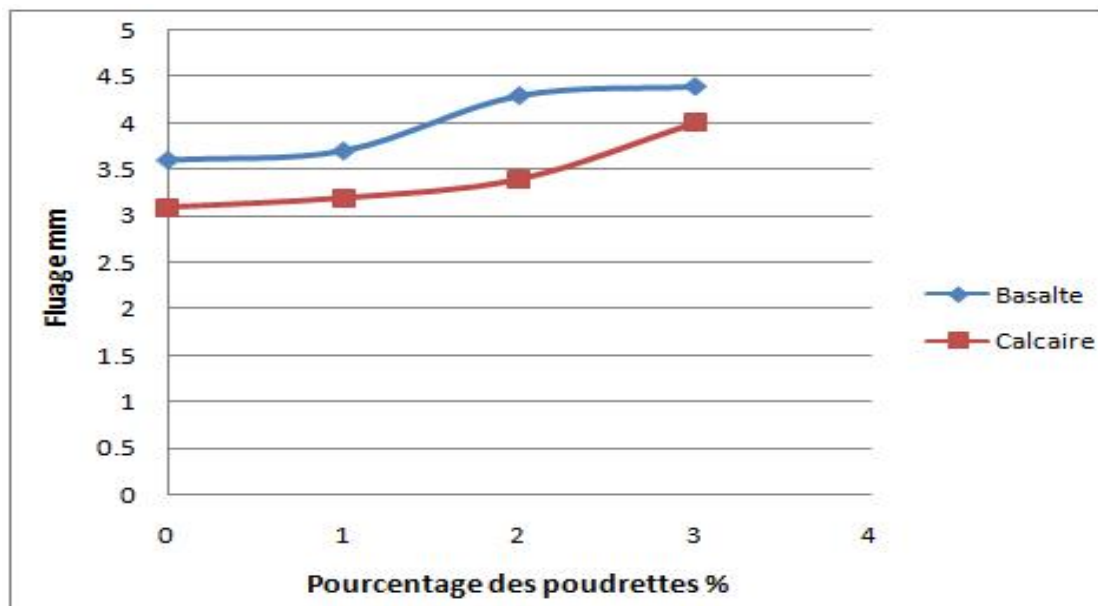


Figure IV.19: Influence de teneur en poudrette sur le fluage

c) Comparaison en termes de la Stabilité sous l'ajout de poudrette:

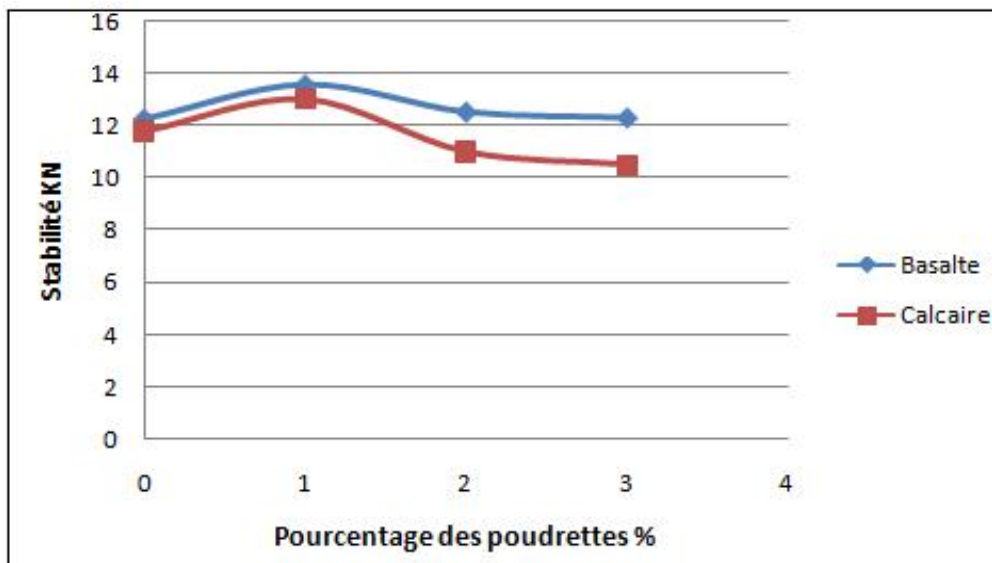


Figure IV.20: Influence de teneur en poudrette sur la Stabilité MARSHALL

d) Comparaison en termes de Rapport immersion-sec sous l'ajout de poudrette:

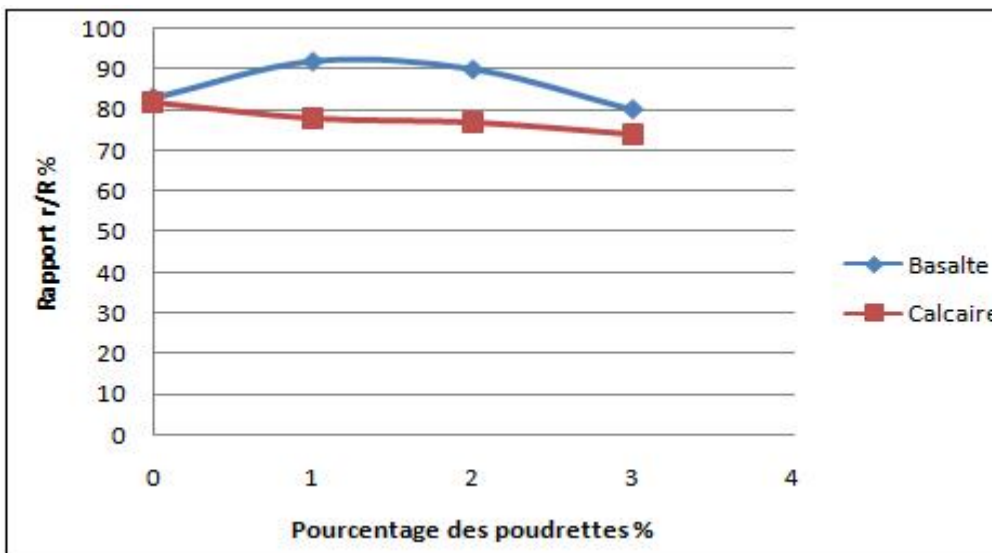


Figure IV.21: Influence de teneur en poudrette sur le Rapport r/R

### 12. CONCLUSION GENERALE

Nous nous sommes intéressés dans ce travail expérimental à la possibilité d'utilisation d'agrégats basaltique et calcaire dans un BB 0/14 et à la valorisation d'un déchet en provenance, de semelles de chaussures,

Pour ce là, nous avons pris pour pouvoir comparer les performances, des agrégats calcaires et dopés les agrégats basaltique (vue leur incompatibilité avec les liantes hydrocarbonés) avec de la chaux à 2%

Les conclusions aux quelles nous sommes constate parvenus sont:

L'incorporation de la poudrette de caoutchouc dans le squelette granulaire d'un béton bitumineux amélioré certaines caractéristiques mécaniques, néanmoins, il améliore de façon significative sa résistance (stabilité) pour les deux agrégats.

-On constat que pour les deux granulats le meilleur pourcentage est de 1 % de la poudrette.

- La poudrette des caoutchoucs permet de minimisé l'indice de vide donc elle jouée le rôle d'un correcteur granulaire.

-Par contre le fluage est augment avec l'ajout de la poudrette (l'enrobé devient élastique)

-Le rapporte  $r/R$  augmente dans les agrégats basaltiques et diminuer pour les agrégats calcaires.

Par cette étude, nous avons voulu modifiée un enrobée pur par l'ajout de poudrette de caoutchouc, directement aux cours de l'opération de malaxage sachant que leur utilisation nécessite aucun changement a la central de fabrication des enrobés bitumineuse.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [1]: S. MAILLARD, [2000], thèse de doctorat caractérisation des déformations d'orniérage des chaussées bitumineuse.
- [2] : FRANÇOIS OLARD, [2003], thèse de doctorat caractérisation déformations d'orniérage des chaussées bitumineuse.
- [3]: <http://www.eurobitume.eu/fr/national/benelux/types-de-bitume-preparations-et-liants-bitumineux>.
- [4]: CARDONA MISAEL, mémoire pour maîtrisées sciences appliquées, université de montréal caractérisation des propriétés du bitume oxydé afin d'évaluer ses risques d'ignition, école polytechnique de montréal, 2004.
- [5]:MADANI,T:"Caractérisation du fonctionnement des tambours sécheurs enrobeurs en vue de leur commande", Thèse de doctorat l'Université de Versailles Saint-Quentin en Yvelines,2005.
- [6]: S. NAHI, H. LATEF : « Application avec les Enrobés à Module Elevé. Etude technico-économique », Projet fin d'étude à Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics, Garidi, Kouba. 2011].
- [7]: Fiche Technique enrobé bitumineux (JUILLET 2013), Bitume Québec, CANADA, 1 p, 978-2-923714-22-6.
- [8]: Observatoire des Techniques de Chaussées (Avril 1997), Note d'information : les enrobes à module élevé, SETRA.
- [9]: NF P 98-141 1999.
- [10]: NF P 98-150-1 de janv. 2008.
- [11]: GODARD, E: "Enrobé bitumineux à chaud comportant du caoutchouc "Colas,Octobre 2002.