

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**



**Université Kasdi Merbah Ouargla**



**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES**

**Département de Génie Civil et Hydraulique**

**Mémoire De Master**

**Filière : Travaux Publics**

**Spécialité : Voie Et Ouvrage D'art**

**Thème**

**ENROBE A MODULE ELEVEE : FORMULATION ET  
UTILISATION CAS DE FORMULATION A 4 NIVEAUX**

**Présenté par :**

❖ **BOUAZZA Mohamed Seyf Eddene**

❖ **MELLAKH Abdelhafid**

<b>BOUAKA Wafaa</b>	<b>Doctorante</b>	<b>UKMO</b>	<b>Présidente</b>
<b>MOUDJAHED Nouredine</b>	<b>Directeur d'unité</b>	<b>LTPS</b>	<b>Examineur</b>
<b>AMIEUR Abdenacer</b>	<b>Directeur Technique</b>	<b>LTPS</b>	<b>Encadreur</b>
<b>BOUCHERBA Mohammed</b>	<b>Ingénieur d'étude / Doctorant</b>	<b>LTPS/UKMO</b>	<b>Co-encadreur</b>

***Année Universitaire: 2017 / 2018***

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# REMERCIEMENT

Nous tenons à remercier en premier lieu et avant tout **ALLAH** le tout puissant, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir notre travail dans les meilleures conditions.

Nous tenons à remercier notre encadreur Mr. **AMIEUR Abdenacer** et Co-encadreur **Mr BOUCHERBA Mohammed**.

Nous remercions vivement et infiniment, toute l'équipe de LTPS-Ghardaïa.

On tient à remercier vivement M<sup>elle</sup> BOUAKA Wafaa qu'elle nous a fait un grand honneur de présider notre jury de mémoire.

On tient à exprimer nos vifs remerciements à Mr MOUDJAHED Noureddine qui nous a fait l'honneur d'être l'examineur de notre travail.

Nous remercions tout le personnel administratif de l'université ainsi, nos enseignants durant toute notre formation, sans oublier les responsables de la bibliothèque qui nous a beaucoup facilité notre recherche bibliographique.

Enfin, nos pensées à tous ceux qui nous ont aidé pour la réalisation de ce modeste travail.



# Dédicace

*Je dédie ce mémoire A mes chers parents ma mère et mon père pour  
leur patience, leur amour,*

*Leur soutien et leurs encouragements.*

*A mes chères sœurs et mes frères Abdelkader, Mohammed et Moussa*

*A tout ma grande famille et tous qu'ont une relation avec elle  
soit proche ou lointain.*

*A mes amies et les collègues de l'université.*

*sans oublier tous les enseignants qui ont contribué à mon soutien  
scolaire.*



*Mellakhi abdehafid*



# Dédicace

*Je dédie ce mémoire A mes chers parents ; ma mère et mon père pour  
leur patience, leur amour,*

*Leur soutien et leurs encouragements.*

*A ma très chère sœur Manal et mes frères Salah Eddine, Alaa Eddine  
et Mansour*

*A tout ma grande famille et tout qu'a une relation avec elle  
soit proche ou lointain.*

*A mes amies et les collègues de l'université.*

*sans oublier tous les enseignants qui ont contribué à mon soutien  
scolaire.*



*Bouazza Mohamed Seyf Eddene*



## Liste des Tableaux

<b>Tableau I. 1. Valeur de fuseau d'un BBME 0/14 .....</b>	<b>11</b>
<b>Tableau II.1. Exemple des Spécifications relatives au pourcentage de vides .....</b>	<b>24</b>
<b>Tableau III.1. Résultat d'essai masses volumiques absolues de graviers. ....</b>	<b>46</b>
<b>Tableau. III.2. Résultat d'essai Micro-Deval.....</b>	<b>46</b>
<b>Tableau III.3 : Résultat d'essai Los Angeles. ....</b>	<b>46</b>
<b>Tableau III.4 : Résultats d'aplatissement des graviers.....</b>	<b>47</b>
<b>Tableau III.5 : Résultats de propreté des graviers. ....</b>	<b>47</b>
<b>Tableau III.6 : Résultat d'essai masses volumiques absolues de sable 0/3. ....</b>	<b>48</b>
<b>Tableau III.7 : Résultats d'équivalent de sable. ....</b>	<b>49</b>
<b>Tableau III.8 : Caractérisations du liant. ....</b>	<b>49</b>
<b>Tableau IV.1 Calcul le Teneur en liant. ....</b>	<b>52</b>
<b>Tableau IV.2. Caractéristiques de l'essai PCG. ....</b>	<b>52</b>
<b>Tableau IV.3. Résultats de l'essai PCG.....</b>	<b>53</b>
<b>Tableau IV.4. Résultats de l'essai Duriez. ....</b>	<b>57</b>
<b>Tableau IV.5. Caractéristiques de la plaque fabriques. ....</b>	<b>58</b>
<b>Tableau IV.6. Resultants de lessee d'orniérage,.....</b>	<b>59</b>
<b>Tableau IV.7. Résultats de l'essai module complexes du dosage 5.6 % (15°C et 10 Hz)..</b>	<b>62</b>
<b>Tableau IV.8. les résultats de l'essai avec ces trois niveaux de chargement.....</b>	<b>65</b>

## Liste des Figures

Figure I.1. Classification des enrobes bitumineux .....	6
Figure I.2. Un exemple d'un courbe de mélange inscrite le fuseau de référence.....	11
Figure I.3. Epreuve de formulation (Essai approche empirique et fondamental) .....	13
Figure II.1. Niveaux de l'épreuve de formulation.....	17
Figure II.3. Mécanisme La Presse à Cisaillement Giratoire de Vicksburg .....	21
Figure II.4. Mécanisme à l'appareil français des Ponts et Chaussées .....	23
Figure II.5. Présentation des résultats d'essai PCG .....	24
Figure II.6. Principe d'essai La tenue à l'eau.....	25
Figure II.7. Principe de l'essai d'orniérage.....	29
Figure II.8. Lustration des différents types d'orniérage .....	30
Figure II.9. Profondeur d'ornière proportionnelle / nombre de cycles.....	33
Figure II.10. Récapitulatif des principaux essais de module complexe existant sur enrobés	36
Figure II.12. Isothermes du module complexe .....	39
Figure II.13. Isochrones du module complexe.....	40
Figure II.14. Définition du critère classique de fatigue et détermination de la durée de vie	41
Figure II.15. Appareil d'essai de flexion 4 points.....	43
Figure II.16. Signal de déplacement symétrique imposé à la petite base de l'éprouvette	43
Figure II.17. Courbe de Wöhler .....	44
Figure III.2 : La courbe granulométrique de sable. ....	47
Figure III.3 : Principe d'essai d'équivalent de sable.....	48
Figure IV.1 Disposition des courbes granulométriques des constituants par rapport la courbe median de fuseau.....	50
Figure IV.2 La composition proposés. ....	51
Figure IV.3 Courbe de mélange s'insere au fuseau de reference. ....	51
Figure IV.4. Evolution de compacité en fonction nombre de girations. ....	54
Figure IV.5. Evolution de nombre de girations en fonction compacité. ....	55
Figure IV.6. Histogramme de RC moyenne chaque mélange. ....	57
Figure IV.7. Les courbes de l'évolution de pourcentage d'orniérage en fonction du nombre de giration .....	60
Figure IV.8. Courbe de force et déplacement en fonction du temps. ....	63
Figure IV.9. Courbe isothermes du module complexe_ .....	64
Figure IV.10. Courbe isochrones du module complexe.....	64
Figure IV.11. Evolution de module de rigidité en fonction le nombre de cycles de chargements à 105 microdéformation.....	65
Figure IV.12. Evolution de module de rigidité en fonction le nombre de cycles de chargements à 108 microdéformation.....	66

## Liste des Photos

<b>Photo II.1. Machine La Presse Cisaillement à Giratoire.....</b>	<b>18</b>
<b>Photo II.2. Malaxage des granulats avec un bitume pur.....</b>	<b>20</b>
<b>Photo II.3. Moules et pistons.....</b>	<b>25</b>
<b>Photo II.4. Machine de compression.....</b>	<b>26</b>
<b>Photo II.5. Compactage des éprouvettes.....</b>	<b>27</b>
<b>Photo II.6. Conservation des échantillon.....</b>	<b>27</b>
<b>Photo II.7. Compression les éprouvettes.....</b>	<b>27</b>
<b>Photo II.8. Machine de l'essai d'orniérage.....</b>	<b>29</b>
<b>Photo II.9. Préparation de plaque sur le table de compactage.....</b>	<b>31</b>
<b>Photo II.10. Ajuster la plaque et l'appareil d'expérimentation l'orniérage.....</b>	<b>32</b>
<b>Photo II.11. Échantillon après procédure de l'essai d'orniérage.....</b>	<b>33</b>
<b>Photo II.12. Machine de flexion deux points.....</b>	<b>34</b>
<b>Photo II.13. Vérification de l'encastrement.....</b>	<b>37</b>
<b>Photo II.14. Compactage des plaques.....</b>	<b>38</b>
<b>Photo II.15. Essai de flexion 2 points sur éprouvette trapézoïdale.....</b>	<b>42</b>
<b>Photo IV.1. Essai de presse cisaillement giratoire.....</b>	<b>53</b>
<b>Photo IV.2. Ecrasement l'éprouvette.....</b>	<b>56</b>
<b>Photo IV.3. Table de compactage (compacteur à roue).....</b>	<b>58</b>
<b>Photo IV.4. Mesure de profondeur d'orniérage.....</b>	<b>59</b>
<b>Photo IV.5. Compactage d'une plaque de module et fatigue.....</b>	<b>61</b>
<b>Photo IV.6. Coupage de plaque au but préparer les trapèzes par une scie mécanique.....</b>	<b>56</b>
<b>Photo IV.7. Etapes de former une éprouvette trapézoïdale à partir une sous plaque de 25 mm d'épaisseur.....</b>	<b>62</b>



# SOMMAIRE

<b>I. GENERALITE SUR LES ENROBES BITUMINEUX ET ETUDE DE FORMULATION</b>	<b>3</b>
I.1.Introduction .....	3
I.2. DEFINITION DE L'ENROBE BITUMINEUX .....	3
I.2.1. COMPOSITION DES ENROBES BITUMINEUX .....	3
a. Liants hydrocarbonés .....	3
b. Granulats .....	4
c. Rôles des granulats dans l'enrobe.....	4
d. Classification des granulats.....	5
I.3.CLASSIFICATION DES ENROBES BITUMINEUX .....	6
I.3.1. Béton bitumineux (BB).....	6
I.3.3. Grave-Bitume (GB) .....	7
I.3.4. Sable bitume (SB) .....	7
I.3.5. Bétons bitumineux à module élevé (BBME) .....	8
I.3.6. Enrobe à module élevé (EME).....	8
I.4. Etude de formulation .....	9
I.5. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX.....	9
I.6. DETERMINATION DU MELANGE MINERAL .....	10
I.7. TENEUR EN LIANT OPTIMALE BITUMINEUX .....	11
I.8. ESSAI SUR GACHET AU LABORATOIRE .....	12
<b>II. METHODE DE MESURE DES PERFORMANCES DES ENROBES BITUMINEUX</b>	<b>14</b>
II.1. INTRODUCTION.....	14
II.2. HISTORIQUES DES CARACTERISATIONS DES ENROBE .....	14
II.3. ESSAIS SUR LES ENROBES BITUMINEUX.....	16
II.3.1. Niveau 1.....	17
II.3.1.1. Essai la presse à cisaillement giratoire (PCG).....	17
II.3.1.2. Principe d'essai PCG .....	18
II.3.1.3. Réalisation d'essai PCG .....	20
II.3.1.4. Type des compacteurs giratoires .....	20
II.3.1.5. Expression des résultats de PCG.....	23
II.3.1.6. Essai tenue à l'eau (Essai Duriez) .....	24
II.3.1.7. Principe d'essai Duriez .....	24
II.3.1.8. Appareillage.....	25
II.3.1.9. Réalisation d'essai Duriez .....	26
II.3.1.10. Expression des résultats tenue à l'eau.....	27
II.3.2. Niveau 2.....	28
II.3.2.1. Essai d'orniéage .....	28
II.3.2.2. Principe d'essai orniéage .....	29
II.3.2.3. Types d'ornières.....	30
II.3.2.4. Type des ornières .....	30
II.3.2.5. Réalisation d'essai d'orniéage .....	31
II.3.2.6. Expression des résultats d'orniéage .....	33
II.3.3. Niveau 3.....	34
II.3.3.1. Définition du module complexe .....	34
II.3.3.2. Principe des essais modules.....	35
II.3.3.3. Essai de flexion en deux points sur des éprouvettes trapézoïdales.....	36

II.3.3.4. Réalisation d'essai deux points .....	37
II.3.3.5. Expression des résultats d'essai module .....	39
II.3.4. Niveau 4.....	40
II.3.4.1. Essai de fatigue .....	40
II.3.4.2. Types d'essai de fatigue .....	41
II.3.4.3. Réalisation d'essai fatigue .....	43
II.4.4.4. Expression des résultats d'essai fatigue .....	44
III. CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX.....	45
III.1. INTRODUCTION .....	45
III.2. CARACTERISTIQUES DE MATERIAUX.....	45
III.2.1. Gravier .....	45
III.2.2. Sable.....	47
III.2.3. Liant hydrocarboné.....	49
IV. DISPOSITIF EXPERIMENTALE ET LES ESSAI REALISEES .....	50
IV.1. INTRODUCTION .....	50
IV.2. ETUDE DE FORMULATION .....	50
IV.2.1. Composition granulaire .....	50
IV.3.2. Teneur en liant.....	51
IV.4. EXPERIENCES EN LABORATOIRE ET RESULTATS DES ESSAIS .....	52
IV.4.1. Essai de presse à cisaillement giratoire (PCG) .....	52
IV.4.2. Résultat d'essai PCG .....	53
IV.4.3. Essai de la tenue à l'eau.....	55
IV.4.4. Résultat d'essai Duriez.....	56
IV.4.5. Essai d'orniérage.....	57
IV.4.6. Résultat d'essai d'orniérage .....	59
IV.4.7. L'essai Module et l'essai de fatigue.....	60
IV.4.8. Résultat d'essai module complexe.....	62
IV.4.9. Résultat d'essai fatigue.....	64

# *Liste des symboles*

<b>F</b>	Filler
<b>s</b>	Sable fin
<b>S</b>	Sable grossier
<b>G</b>	Gravier
<b>K</b>	Module de richesse Surface spécifique
<b>TL</b>	Teneur en liant
<b><math>M_{J+1+k}</math></b>	Masse des éprouvettes après k jours d'immersion dans l'eau, exprimée en grammes
<b>J</b>	Jours
<b>M</b>	Masse des éprouvettes
<b>I</b>	Résistance à la compression avec immersion à 18°C en Kg/cm <sup>2</sup>
<b>C</b>	Résistance à la compression sans immersion à 18°C en Kg/cm <sup>2</sup>
<b>hmin</b>	La hauteur minimale correspondent un pourcentage de vide = 0 %
<b>H</b>	Hauteur des éprouvettes
<b>D</b>	Diamètre
<b>MVR</b>	Masse Volumique Réel
<b>MVA</b>	Masse Volumique Apparente
<b>V</b>	Pourcentage de vide
<b>PCG</b>	Presse Cisaillement Giratoire
<b>m<sub>ij</sub></b>	Déformation local en mm
<b>m<sub>ij0</sub></b>	La mesure initiale à l'emplacement
<b>P<sub>i</sub></b>	le pourcentage de profondeur d'ornièrè mesurée (%),
<b>E*</b>	Module complexe
<b> E* </b>	Module de rigidité
<b>φ</b>	Angle de phase

- E1** Module d'élasticité dynamique
- E2** Module de perte
- E<sub>0</sub>** Module de rigidité initiale avant fatigue
- S** la sollicitation imposée (contrainte ou déformation imposée)
- N** la durée de vie correspondante
- $\epsilon$**  La déformation correspondant une rupture à 1 millions cycles.
- $\epsilon_0$**  La déformation correspondant une rupture à 1 millions cycles.

# INTRODUCTION GENERALE

# INTRODUCTION GENERALE

Les méthodes de formulation des enrobés bitumineux se sont développées au cours des quarante dernières années pour répondre à l'évolution des exigences des donneurs d'ordre. En effet, l'augmentation des sollicitations dues au trafic croissant, la prise en compte de la sécurité, du confort, de la durabilité, de la maintenance, de la gêne à l'utilisateur, dans des conditions climatiques et dans un contexte technique (conception et dimensionnement des couches de chaussées) donnés a conduit à rendre la formulation des matériaux de plus en plus complexe.

Les propriétés recherchées pour un matériau bitumineux dépendent aussi de la couche dans laquelle il est employé. Ainsi pour les couches d'assise, dont le rôle est de répartir les charges sur le sol support sans déformation excessive, l'enrobé doit être plutôt rigide, résistant en fatigue, résistant aux déformations permanentes et relativement compact, et dans ce cas il vient les études de formulation au but de trouver la meilleure recette.

À l'autre part la formulation des mélanges est d'autant plus délicate que souvent, pour les enrobés bitumineux, l'amélioration d'une caractéristique lors d'un changement de composition va influencer défavorablement sur une autre caractéristique. Il est bien connu par exemple que l'augmentation de la teneur en liant est bénéfique pour la résistance en fatigue, mais néfaste à l'égard de la résistance à l'orniérage. Ce qui met les caractéristiques recherchées multiples et parfois contradictoires.

La manière d'aborder de question est variée et dépend fortement du contexte local. Un état de l'art de la formulation dans les divers pays, l'Algérie pendant une longue période utilise des méthodes empiriques dans ces études de formulation basé sur deux essais uniquement, Essai Duriez et Essai Marshall.

Et dans une diversité dans les types enrobés bitumineux, et l'apparition des nouveaux types des enrobés, spécialement avec les enrobés à module élevée, qui sont caractérisés par leur durabilité élevée, et leurs performances mécaniques, la méthode traditionnelle, deviens pauvre en terme des informations techniques nécessaires pour caractériser ce type d'enrobé.



La méthode européenne propose un système d'épreuve, composé de quatre niveaux, avec des conditions de passage entre niveaux et autre, le choix de niveaux de formulation dépend du types d'enrobé et l'importance de projet.

Dans cette étude de recherche, on va essayer de répondre à la question : comment réalise cette méthode de formulation ? Et nous pouvons également aboutir à une réponse plus profonde de la question, es que on peut voir des enrobés à module élevée dans notre région ?

Et dans ce sens, et au but de répondre aux questions précédentes, on a sélectionné des matériaux de bonnes performances et essayé d'adopter la méthode européenne, ici en Algérie. L'approche expérimentale du présent travail consiste à mener des essais de laboratoire sur des mélanges bitumineux, étapes par étapes, et niveaux par niveaux, et après achèvement de chaque niveau on valide la réponse à l'épreuve, pour passer au niveau suivant.

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

Une partie bibliographique, qui renferme les notions de base nécessaires à la compréhension du contenu du mémoire, elle se divise en deux (02) chapitres :

**CHAPITRE I**, Généralité sur les enrobes bitumineux et étude de formulation, présentant les notions de base de enrobés, composition, origine ... etc. et présentation des notions de calcul dans le domaine des enrobés bitumineux,

**CHAPITRE II**, méthodes de mesure des performances des enrobes bitumineux, cette partie regroupe les différentes méthodes et essais qui ont été utilisées dans ce travail au but de mesure les performances de notre composition

La partie expérimentale se divise en deux chapitres

**CHAPITRE III**, caractérisation des matériaux, qui présentent les différents résultats des essais réalisés sur les matériaux utilisés dans ce travail,

**CHAPITRE IV**, Dispositif expérimental et les essais réalisés, sur le mélange bitumineux qui montrent la méthodologie de l'étude et l'interprétation des résultats obtenus

Et enfin une conclusion générale.

# I. GENERALITE SUR LES ENROBES BITUMINEUX ET ETUDE DE FORMULATION

## I.1.INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous allons définir les enrobés bitumineux. Tout d'abord nous présentons brièvement quelques généralités sur l'enrobé bitumineux et ses composants (bitume et granulats) avec les caractéristiques appropriés de chacun d'eux. Ensuite, nous étudions la formulation de l'enrobé en considérant les paramètres suivant: la teneur du bitume, la dureté du bitume et la grosseur des granulats...qui ont des influences sur la compacité, la mise en œuvre et la durabilité..., ainsi que les principaux essais de caractérisation selon les normes pour obtenir un enrobé selon le choix désiré.[KHENGAOUI.S ;2013].

## I.2. DEFINITION DE L'ENROBE BITUMINEUX

L'enrobé bitumineux est un matériau composite constitué d'un mélange de granulats (graviers, sables, fines) et d'un liant hydrocarboné (bitume, éventuellement des additifs) ; Les granulats assurent la structure rigide de l'enrobé et le bitume procure la cohésion de l'ensemble et il est responsable du caractère visqueux [KHENGAOUI.S ;2013].

Chacun de ces deux constituants est défini par ses caractéristiques rhéologiques et mécaniques. La connaissance de ces caractéristiques permet d'obtenir la bonne tenue du mélange bitumineux [KHENGAOUI.S ;2013].

### I.2.1. COMPOSITION DES ENROBES BITUMINEUX

Les enrobés bitumineux à deux composants principales pour formuler, le liant hydrocarbonés et les granulats

#### **Liants hydrocarbonés**

Les liants hydrocarbonés, jouent un rôle important dans la technique routière moderne, sont connus et utilisés depuis longtemps, les propriétés d'adhésivité et l'imperméabilité des bitumes naturels et les asphaltes ont été connus depuis l'apparition de la civilisation dans la vallée de l'Euphrate en Mésopotamie.

Le mot "liant" peut être défini comme substance qui sert à rassembler de façon durable, des particules généralement solides, l'adjectif "hydrocarboné" désigne l'assemblage d'atomes de carbone et d'hydrogène.

La substance additionnée aux particules solides développe au sein d'un mélange des forces d'adhésion et de cohésion, assurant une certaine rigidité et une résistance à la déformation en traction, une résistance à la compression et une résistance au cisaillement.

a) **Les liants naturels**, qui se trouvent dans la nature le plus souvent associés à des matières minérales, et qui sont utilisés depuis très longtemps. C'est la roche *asphaltique* qui se présente dans le gisement et qui après broyage donne *asphalte* ou bitume naturel

b) **Les goudrons**, qui proviennent de la pyrogénéation, à l'abri de l'air, de matières d'origine végétal : houille, tourbe, bois, lignite...etc.

c) **les bitumes**, qui sont obtenus par raffinage des pétroles bruts et des résidus pétroliers

Le bitume présente des propriétés complexes, soit sur le plan de sa composition chimique ou soit sur sa réponse aux sollicitations mécaniques. Il possède un grand pouvoir adhésif pour agglomérer. Les variations importantes de sa viscosité en fonction de la température permettent un mélange adéquat avec les granulats lors dans les différentes étapes de fabrication et de mise en œuvre de l'enrobé et par conséquent une bonne stabilité lors de l'exploitation de la chaussée, sous sollicitation mécaniques, thermiques et climatiques [KHENGAOULS ; 2013].

### **I.2.2. Granulats**

Les granulats utilisés dans les enrobés peuvent être divisés en deux grandes catégories : les granulats naturels en provenance de carrières, sablières et gravières et les granulats d'autres origines tels que des granulats recyclés, des sous-produits d'origine industrielle ou des granulats fabriqués pour un usage spécifique [Bitume Québec ; 2008].

### **I.2.3. Rôles des granulats dans l'enrobe**

Les granulats utilisés dans les enrobés en couche de roulement jouent un rôle de première importance dans le phénomène d'adhérence pneus – chaussée. Sous l'effet de la circulation, les granulats en surface tendent à se polir plus ou moins rapidement selon leur nature et leur composition minéralogique.

À court ou à moyen terme, selon la densité du trafic, la chaussée peut devenir glissante. Cet aspect fait l'objet de recherches en laboratoire et sur la route dans le but de déterminer les textures de surface et les compositions minéralogiques des matériaux granulaires afin d'obtenir des mélanges bitumineux rugueux qui répondent aux conditions exigées.

Ainsi les caractéristiques de surface et de forme des granulats influençant le lien bitume-granulat, la maniabilité et la performance des enrobés bitumineux ; Certains phénomènes d'orniérage ou de désenrobage peuvent s'expliquer par l'interaction entre le bitume et les granulats ou d'après la forme des granulats.

Les granulats utilisés dans la confection des enrobés bitumineux doivent donc répondre à des critères de qualité et à des caractéristiques propres à chaque usage [KETTAB R. B et J.M. FLEUREAU ; 2002]

#### I.2.4. Classification des granulats

Les granulats sont classifiés en différentes classes granulaires selon la taille des éléments. Une classe granulaire (d/D) est répertoriée par la taille du plus petit grain « d » et du plus gros grain « D » ; la taille est exprimée en millimètre. Il est admis qu'une fraction granulaire peut comporter jusqu'à 15% de matériaux excédentaires supérieurs.

On peut distinguer les classes granulaires suivantes :

- Les fines 0/D avec D 0,080 mm
- Les sables 0/D avec D 6,6mm
- Les gravillons d/D avec d 2 mm et D 31,5 mm
- Les cailloux d/D avec d 20 mm et D 80 mm
- Les graves 0/D avec 6,3mm < D 80 mm

Le filler est constitué des éléments très fins, de diamètre inférieur à 63 microns. Il provient du dépoussiérage de granulats ou de production industrielle par mouture de roche, ces fillers a une surface spécifique très élevée et il absorbe une part importante du liant. (CORTE ET DI BENEDETTO 2005)

Le mélange du filler avec le liant constitue le mastic qui confère sa stabilité à l'enrobé, et l'épaisseur du film de mastic est caractérisée par un critère s'appelle le module de richesse.

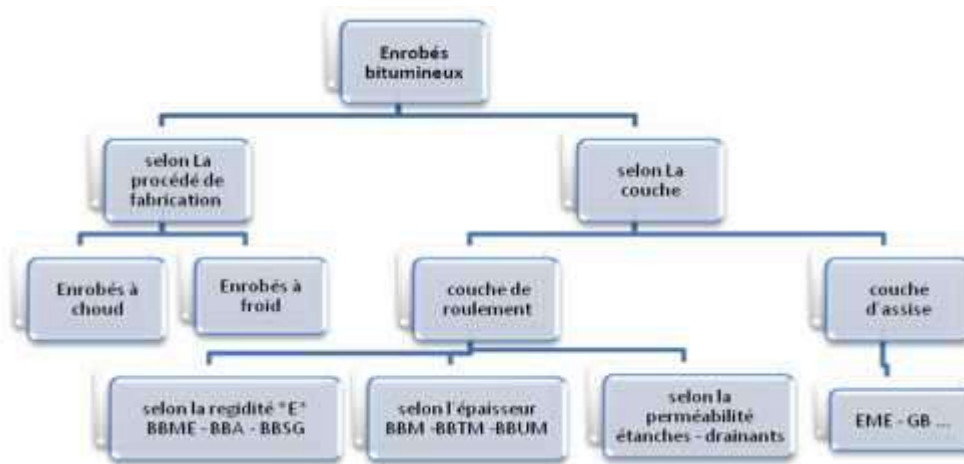
La propreté du filler, en particulier sa faible teneur en argile, est primordiale afin de garantir un bon comportement mécanique (CORTE et DI BENEDETTO ; 2005). L'arrangement des différentes classes granulaires forme la courbe granulométrique d'un mélange bitumineux.(CORTE ET DI BENEDETTO 2005)

### I.3.CLASSIFICATION DES ENROBES BITUMINEUX

Les " Enrobés bitumineux" sont des matériaux résultant d'un mélange des granulats et d'un liant hydrocarboné. Le mélange liant – granulats obtenu est constitué de trois phases [S. LALDJI ; 2015] :

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

Dans le domaine routier on rencontre plusieurs et différent types des enrobés bitumineux, et le schéma suivant nous aide à connaître les principales différences entre ces plusieurs types :



**Figure I.1.** Classification des enrobés bitumineux [HACHANI. M, DAAS. D ; 2013].

Et d'après cette classification on sort avec plusieurs types des enrobés, ci-dessous on présente quelques types et leurs utilisations.

#### I.3.1. Béton bitumineux (BB)

Le béton bitumineux (BB) est un mélange à granularité continue se composant de gravillons, de sable, de filler, de liant bitumineux et d'additifs éventuels.

Les classes granulaires des bétons bitumineux retenues dans le présent cahier des charges sont les suivantes : BB 0/8, BB 0/12, BB 0/14 [CDC-ENR05 ;2005].

Leur domaine d'utilisation diriger vers :

- Ce type de matériau est bien adapté aux couches de surface des chaussées à forts trafics en raison des bonnes caractéristiques mécaniques. Il est aussi bien utilisé pour les chaussées neuves qu'en renforcement.
- Selon le type, il convient pour couche de roulement ou couche de liaison de routes, autoroutes et aérodromes. Il est fabriqué, mis en œuvre et compacté à chaud [CTTP ; 2004].

### **I.3.3. Grave-Bitume (GB)**

La grave-bitume (GB) est un mélange à granularité continue 0/20 se composant de granulats, de sable, de filler, de liant bitumineux et d'additifs éventuels.

Elle est appropriée pour couche de base de routes, autoroutes et aérodromes. Elle est fabriquée, mises en œuvre et compactée à chaud et assure la portance de la chaussée et la répartition des charges du trafic transmis par les couches de surface. Elle sert aussi à établir le profil souhaité de la chaussée respectivement comme couche de reprofilage [CDC-ENR05 ; 2005].

Leur domaine d'utilisation diriger vers :

- La technique des graves bitumes est destinée à la réalisation des assises de chaussée (couche de base et couche de fondation).
- Réseau RP1 : Classes de trafic TPL3 à TPL7 [CTTP ; 2004].

### **I.3.4. Sable bitume (SB)**

Le sable bitume est un mélange d'un ou plusieurs sables avec du bitume pur. Généralement, le mélange nécessite l'ajout de fines provenant soit des matériaux de concassage – broyage (sable fileries, fines calcaires), soit des pulvérulents industriels (chaux, ciment).

Le bitume utilisé doit être assez dur, de classe 40/50 ou 20/30 afin d'assurer une rigidité et une stabilité convenable [CTTP ; 2001].

Leur domaine d'utilisation c'est d'emploi en couche de base pour les chaussées du réseau principal de niveau 2, il aussi utilise comme couche anti – ramant des fissures [CTTP ; 2004].



### I.3.5. Bétons bitumineux à module élevé (BBME)

Le cas de notre étude, les BBME sont obtenus à partir d'un mélange de bitume pur ou modifié, de granulats fabriqués dans une centrale d'enrobage. Ils se caractérisent par un module de rigidité « E » plus élevé que les enrobés classiques et par une bonne tenue à l'orniérage. [CTTP ; 2004].

Ce enrobé est destiné aux couches de roulement des routes nationales et régionales empruntées par un trafic moyen et dense.

Les BBME permettent une meilleure résistance à l'orniérage. Ils s'appliquent sur des épaisseurs de 5 à 7 cm pour les BBME 0/10 et 6 à 9 cm pour les BBME 0/14 [CTTP ; 2004].

### I.3.6. Enrobe à module élevé (EME)

Ce mélange est destiné aux couches de liaison soumises à un trafic lourd (principalement pour diminuer l'orniérage) ; Ce sont des Enrobes 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 [DJABRI. A et HAMMANA. A ; 2016].

On distingue deux classes de performance classe 1 et classe 2. Les granularités utilisées sont 0/10, 0/14 et 0/20 [DJABRI. A et HAMMANA. A ;2016].

Chaque type d'EME comprend deux classes granulaires qui diffèrent entre elles notamment par leur teneur en liant et la dureté. On distingue [DJABRI. A et HAMMANA. A ;2016] :

- **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.

Les types des enrobes mentionnés au-dessus les plus connus et utilisés en Algérie, restent d'autres types des enrobes tels que drainant, aéronautique...etc.

## I.4. ETUDE DE FORMULATION

La qualité des matériaux utilisés influe grandement sur le comportement mécanique des enrobés. Les principaux éléments ayant la plus grande influence sur la résistance mécanique sont [S. KHENGAOUI ; 2013] :

- Les caractéristiques intrinsèques des granulats ;
- La composition minérale ;
- La teneur en liant.

Tous ces éléments doivent être analysés par le concepteur afin de proposer un mélange correspondant aux caractéristiques optimales en terme de résistance mécanique et de susceptibilité thermique.

## I.5. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

Avant d'entamer le calcul d'une étude de formulation une mesure des différentes caractéristiques des composants (physique, mécanique et fabrication) est nécessaires au but de garante ce conformité par rapport les spécifications des normes en vigueur.

Pour les premières compositions ce qui le liant bitumineux, doit vérifier par un ensemble des essais, pour un bitume pur, on doit vérifier :

- Pénétrabilité
- Point de ramollissement (température bille – anneau)
- Essai RTFOT
- Fragilité FRASS

Et concernant le deuxième composants, squelette granulaire, en doit vérifier :

- Analyses granulométrie
- Masses Volumiques absolues
- Assai Micro Deval en présence d'eau
- Essai de Los Angeles
- Essai d'Aplatissement

Sur la base de ces essais et résultats, on peut entamer dans le calcul de la formulation ce qui compose deux étapes, détermination du mélange minéral, et calcul de teneur en liant.

## I.6. DETERMINATION DU MELANGE MINERAL

A partir des courbes granulométriques moyennes des différentes classes granulaires choisies pour la réalisation de l'étude de formulation, on compose un mélange minéral dont la courbe granulométrique est inscrite dans les limites du fuseau défini par les spécifications.

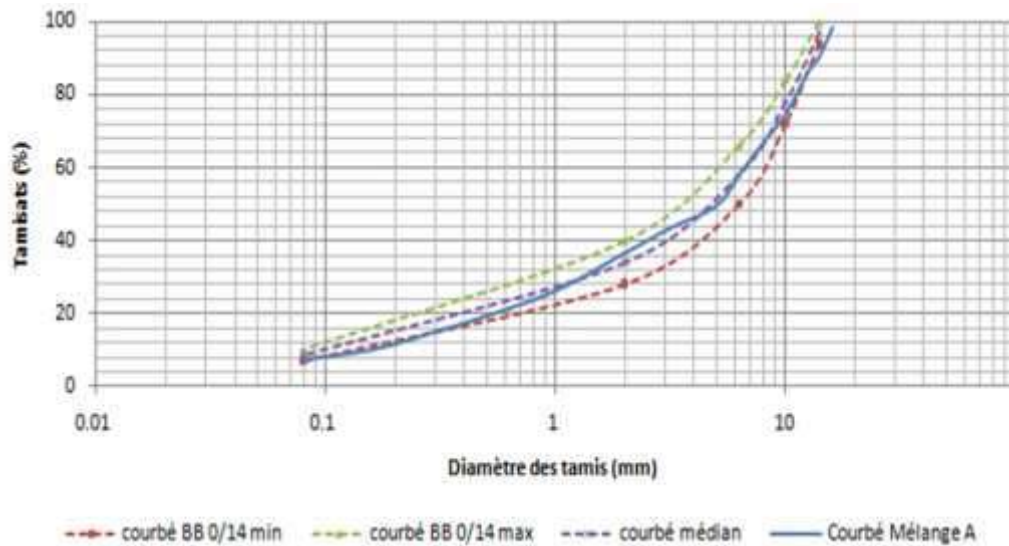
La méthode consiste à [A. BOUMADIANE, 2015] :

- Tracer sur le même graphique les courbes granulométriques moyennes des classes granulaires choisies pour la composition du mélange granulaire, le fuseau granulométrique relatif au mélange minéral de l'enrobé étudié et la courbe médiane de ce fuseau.
- Tracer la droite joignant le point correspondant à 5% de passants sur la courbe de la première gravette, au point correspondant à 95 % de passants sur la courbe de la deuxième gravette (ordre décroissant des Dmax)
- Le point d'intersection de cette droite avec la courbe médiane du fuseau détermine le pourcentage pondéral de la première gravette dans le mélange minéral (Figure II.1).

Les opérations 2 et 3 sont répétées pour l'obtention des proportions des autres classes granulaires.

A partir des courbes moyennes des classes granulaires, on calculera la courbe du mélange minéral le pourcentage de passants à un tamis pour la courbe de mélange est la somme des pourcentages de passants au même tamis des courbes des constituants pondérés par les proportions correspondantes [A. BOUMADIANE, 2015].

La courbe granulométrique du mélange minéral calculée devra ensuite être tracée dans un graphique et être comparée au fuseau de spécifications [A. BOUMADIANE, 2015].



**Figure I. 2.** Un exemple d'un courbe de mélange inscrite le fuseau de référence.

La composition granulométrique du mélange devra être, selon le type d'enrobé, [J.L. DELORME et al. ; 2007], à l'intérieur des fourchettes données dans le tableau suivant :

**Tableau I. 1.** Valeur de fuseau d'un BBME 0/14 [I. HACHANI, D. DAAS ; 2013].

Tamis (mm)	Pourcentage des passants (%)	
	min	Max
14	94	100
10	72	84
6.3	50	66
4	40	54
2	28	40
0,063	7	10

## I.7. TENEUR EN LIANT OPTIMALE BITUMINEUX

La teneur en liant à retenir est définie à partir d'une étude de laboratoire qui consiste à choisir à partir d'un granulat simple ou composé entrant dans le fuseau recommandé. Elle sera fonction de la surface spécifique des granulats selon la formule [J.L. DELORME et al., 2007] suivante :

$$\text{Teneur en liant} = K. \alpha. \sqrt[5]{\Sigma}$$

Avec :

- **K**: module de richesse pouvant prendre les valeurs suivantes:

2 à 2,6 pour les graves bitumes

3,3 à 3,9 pour un béton bitumineux

- : coefficient correcteur destiné à tenir compte de la masse volumique des granulats.

= 2,65 / masse volumique des granulats

- : Surface spécifique du granulat.

La surface spécifique du granulat est calculée par la formule [J.L.DELORME et al., 2007]

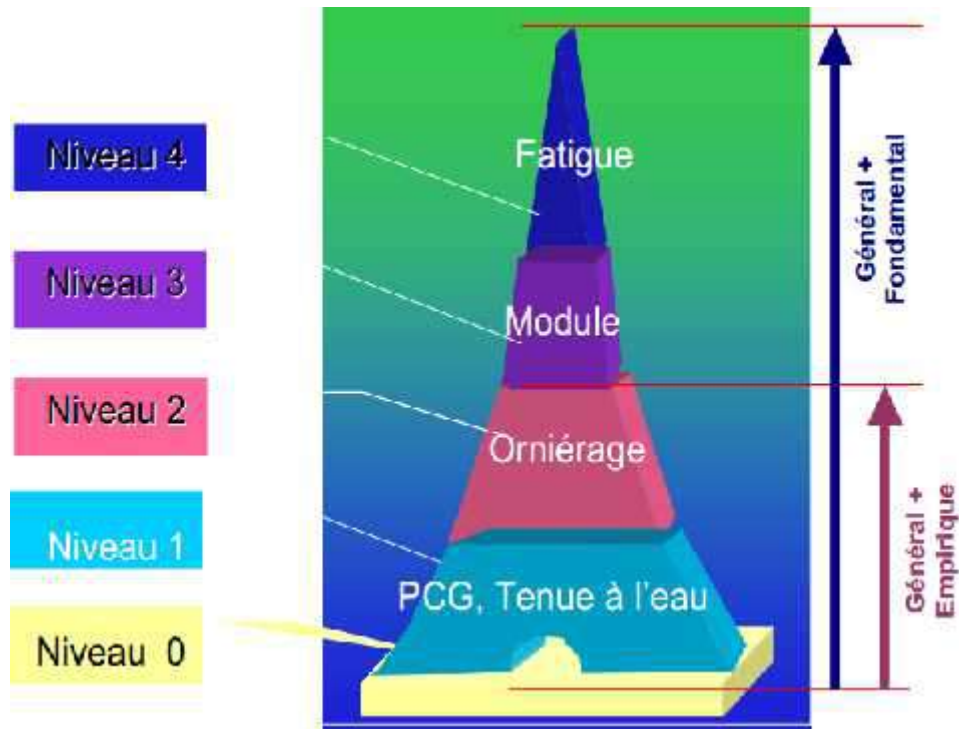
$$100. = 0,25.G + 2,3.S + 12.s + 150.f \text{ en m}^2/\text{kg}$$

Avec :

- **G** : pourcentage des éléments supérieurs à 6,3 mm ;
- **S**, pourcentage des éléments compris entre 6,3 mm et 0,250 mm ;
- **s**, pourcentage des éléments compris entre 0,250 mm et 0,063 m ;
- **f**, pourcentage des éléments inférieurs à 0.063 mm .

## I.8. ESSAI SUR GACHET AU LABORATOIRE

Des mélanges préparés au laboratoire a différents dosages en liant (autour des dosages calculés), seront soumis aux différents essais au but de déterminer leurs performances mécaniques selon les quatre niveaux d'étude de formulation [J.L. DELORME et al., 2007] :



**Figure I. 3.** Epreuve de formulation (Essai approche empirique et fondamental) [J.L. DELORME et al., 2007].

## CONCLUSION

Comme nous avons vu précédemment le béton bitumineux est constitué de deux éléments principaux ; les granulats et le bitume.

La liaison entre ces deux composants est très complexe et pour formuler un enrobé convenable plusieurs critères sont à prendre en considération telle que le trafic, les conditions climatiques et les matériaux existants...etc.

Le mélange bitume-agrégat obtenu doit avoir:

1. suffisamment de bitume pour donner un pavage durable
2. une stabilité suffisante pour satisfaire les exigences de trafic
3. suffisamment de vides pour pallier aux phénomènes d'expansion liés aux propriétés spécifiques du bitume (dilatation thermique)
4. une maniabilité suffisante pour permettre une mise en place efficace du mélange



## II. METHODE DE MESURE DES PERFORMANCES DES ENROBES BITUMINEUX

### II.1. INTRODUCTION

La décision de construire ou de rénover une route et/ou une autoroute est liée bien souvent à un ensemble de facteurs technico-économiques qui porteront, d'une part sur le coût de l'investissement, d'autre part sur son coût d'usage et d'entretien dans le temps. Aussi, le choix des matériaux de structure revêt une grande importance.

En Algérie et en faveur du développement durable, le choix à passer à l'utilisation des enrobés à hautes performances à savoir le béton bitumineux à module Elevé (BBME).

Dans ce chapitre, un contrôle des travaux de revêtement en béton bitumineux à module élevé a été effectué d'où une importante étude expérimentale de niveaux4au laboratoire a permis de mettre en place une formulation d'un béton bitumineux

### II.2. HISTORIQUES DES CARACTERISATIONS DES ENROBES

Les méthodes de formulation des enrobés bitumineux se sont développées au cours des quarante dernières années pour répondre à l'évolution des exigences des donneurs d'ordre. En effet, l'augmentation des sollicitations dues au trafic croissant, la prise en compte de la sécurité, du confort, de la durabilité, de la maintenance, de la gêne à l'usager, dans des conditions climatiques et dans un contexte technique (conception et dimensionnement des couches de chaussées) donnés a conduit à rendre la formulation des matériaux de plus en plus complexe.

La formulation des mélanges est d'autant plus délicate que souvent, pour les enrobés bitumineux, l'amélioration d'une caractéristique lors d'un changement de composition va influencer défavorablement sur une autre caractéristique. Il est bien connu par exemple que l'augmentation de la teneur en liant est bénéfique pour la résistance en fatigue, mais néfaste à l'égard de la résistance à l'orniérage.

Les propriétés recherchées pour un matériau bitumineux dépendent de la couche dans laquelle il est employé. Ainsi pour les couches d'assise, dont le rôle est de répartir les charges sur le sol support sans déformation excessive, l'enrobé doit être plutôt rigide, résistant en fatigue, résistant aux déformations permanentes et relativement compact.

Pour une couche de roulement, directement en contact avec le trafic et les agressions climatiques, l'accent est mis sur la durabilité avec une bonne résistance à l'action de l'eau, sur la résistance aux déformations

permanentes mais surtout sur la recherche de caractéristiques de surface (rugosité, bruit de roulement, photométrie, etc.). En outre, selon les cas, l'enrobé de couche de roulement doit être suffisamment compact pour protéger les couches inférieures des infiltrations d'eau, ou bien suffisamment ouvert pour permettre le drainage de l'eau [J.L. DELORME et al., 2007].

Les caractéristiques recherchées sont multiples et parfois contradictoires. La manière d'aborder cette question est variée et dépend fortement du contexte local. Un état de l'art de la formulation dans les divers pays, a été établi dans le cadre du comité technique RILEM [Rilem 17, 1998] et a permis de distinguer six méthodes de formulation :

1. Par recette,
2. Par des essais empiriques,
3. Par des calculs analytiques,
4. Volumétriques,
5. Par des essais reliés aux propriétés,
6. Par des essais fondamentaux.

**La méthode par recette** s'appuie sur l'expérience locale. Une composition connue, qui a donné satisfaction dans des conditions d'utilisation données sur des longues périodes est reproduite. L'application de ces recettes est parfois complétée par quelques essais provenant des méthodes empiriques. La méthode utilisant des essais empiriques la plus répandue est la méthode Marshall [ASTM DI-559-60T] [J.L. DELORME et al., 2007].

**La méthode analytique** se fonde sur les propriétés des constituants et la modélisation du mélange pour calculer le pourcentage de vides et estimer les performances du matériau. Cette méthode est principalement développée en Belgique.

**La méthode volumétrique** consiste à déduire des proportions respectives, exprimées en volume, du squelette granulaire, du bitume et du volume disponible (pourcentage de vide) d'une éprouvette compactée dans des conditions fixées, le comportement de l'enrobé sans réaliser nécessairement des essais mécaniques complémentaires.

**La méthode par essais reliés aux propriétés** fait appel à des essais de simulation, en relation directe avec la propriété recherchée, c'est le cas par exemple de l'essai d'orniérage réalisé comme une simulation du trafic.

**La méthode dite "fondamentale"** comprend des essais dont les résultats sont directement utilisables comme donnée d'entrée dans des modèles de dimensionnement. Il s'agit en particulier des valeurs de module dynamique ou de résistance en fatigue.

La normalisation européenne des enrobés à chaud a formalisé et synthétisé les principes de cette classification en distinguant deux approches, l'approche empirique et l'approche fondamentale [J.L. DELORME et al., 2007] :

- **L'approche empirique** comprend la phase recette ou prescription (plus ou moins développée), la phase volumétrique, la phase essais empiriques et le cas échéant des essais "reliés".
- **L'approche fondamentale** comporte une phase recette (prescription) réduite, une phase volumétrique, des essais reliés et des essais fondamentaux.

### II.3. ESSAIS SUR LES ENROBES BITUMINEUX

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

Le niveau d'étude de formulation dépend en général du type d'enrobé, du niveau de sollicitation de la chaussée et de l'importance du chantier.

La plupart des enrobés nécessitent au minimal une étude de deux niveaux excepté les enrobés à module élevé que la norme EN 13108-1 oriente vers une étude de niveau 4. Les différents essais présentés ci-dessous permettent de vérifier les caractéristiques de l'enrobé formulé vis-à-vis des normes en vigueur [I. HACHANI, D. DAAS ; 2013].

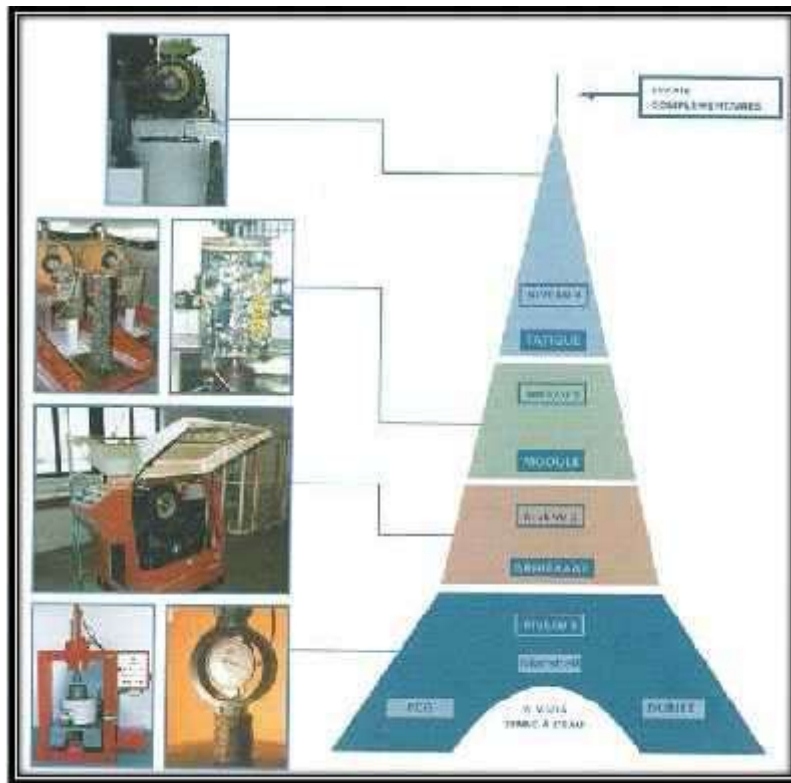


Figure II.1. Niveaux de l'épreuve de formulation [I. HACHANI, D. DAAS ; 2013].

### II.3.1. Niveau 1

Le mélange doit satisfaire une fenêtre de pourcentages de vides à l'essai de Presse à Cisaillement Giratoire ainsi que le seuil de tenue à l'eau [J.L. DELORME et al. 2007].

À l'exception du niveau 0, ce niveau est commun à toutes les épreuves. Dans le cas d'applications à faible niveau de sollicitation, le niveau 1 peut être suffisant sans essai complémentaire. La tenue à l'eau est mesurée selon EN 12697-12.

**Note :** pour certains matériaux, il existe une exigence sur le pourcentage de vides à 10 girations pour l'essai PCG. Cette exigence est reprise dans les normes européennes, mais en tant que spécification « empirique » relative à la résistance à l'orniérage. Il n'est donc pas possible de spécifier à la fois une exigence avec l'essai d'orniérage et le pourcentage de vides à 10 girations, il s'agit d'une sur-spécification [J.L. DELORME et al. 2007].

#### II.3.1.1. Essai la presse à cisaillement giratoire (PCG)

Le compactage des mélanges bitumineux est une opération importante en technologie routière, car elle assure la durabilité du revêtement et influence ses caractéristiques mécaniques et sa résistance aux agents physiques extérieurs. Au laboratoire, cependant, les méthodes de compactage les plus usuelles et les plus simples ne sont que de médiocres simulations de ce qui se passe en chantier. Le compactage par chocs suivant la

méthode Marshall se fonde sur un principe différent du travail effectuée sur le chantier, les éprouvettes obtenues ont un squelette minéral, qui le plus souvent, se bloque en cours de compactage par arc-boutement des particules granulaires [J.L. DELORME et al., 2007].



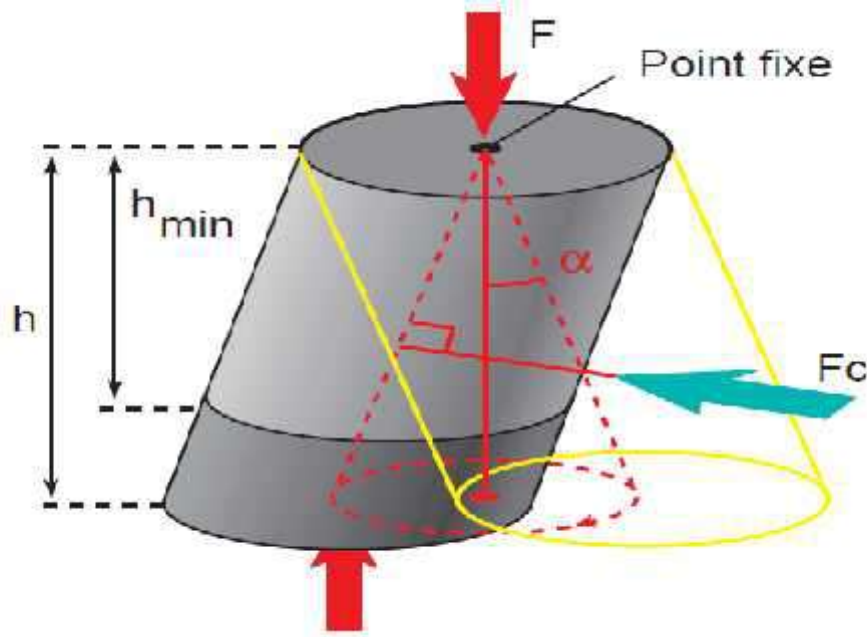
**Photo II.1.** Machine La Presse Cisaillement à Giratoire.

### II.3.1.2. Principe d'essai PCG

Un mélange hydrocarboné préparé en laboratoire, est placé, foisonné et à la température d'essai (130 °C à 160 °C environ) dans un moule cylindrique de 100, 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 0,82° et soumise à un mouvement circulaire. Ces différentes actions exercent un compactage par pétrissage.

On observe l'augmentation de compacité (diminution du pourcentage de vides) en fonction du nombre de rotations [J.L. DELORME et al., 2007].

Pour mesurer la compactibilité, un critère signifie la capacité de compactage des matériaux, deux méthodes peuvent être utilisées. La première, au moins deux éprouvettes sont compactées à différents niveaux d'énergie de compactage avant le mesurage de leur masse volumique apparente. La seconde, une seule éprouvette est utilisée dont on détermine l'accroissement de masse volumique à chaque étape de compactage en fonction de la diminution d'épaisseur (Figure II.2) [NF EN 12697-10, 2003].



**Figure II .2.** Principe de Cisaillement Giratoire [CST COLAS ; 2006]

- $H_{min}$  : hauteur minimale pour 0 % de vide ;
- $H$  : hauteur apparente pour N girations ;
- $F$  : force axiale ;
- $F_c$  : force de cisaillement ;
- $\alpha$  : angle d'inclinaison.

**Note :** Les deux méthodes peuvent être utilisées au but de déterminer la compactabilité pour le cas compactage par impact comme dans l'essai Marshall.

Seule la seconde est utilisée pour le compactage giratoire et seule la première est utilisée pour le compactage par vibration.

Une courbe pourcentage de vides en fonction de l'énergie de compactage est établie. L'énergie de compactage se caractérise, dans le cas du damage, par le nombre de coups, dans le cas du compactage giratoire, par le nombre de girations et, dans le cas du compactage par vibration, par le temps de vibration en secondes.

Une équation mathématique est déduite des résultats expérimentaux et les paramètres de cette équation caractérisent la compactabilité du mélange [NF EN 12697-10 ;2003], l'équation pour le cas de la presse cisaillement giratoire est mentionnée dans le titre, expression de résultats de cette partie.

### II.3.1.3. Réalisation d'essai PCG

- Les matériaux sont préchauffés dans une étuve ainsi les accessoires de malaxage et le moule de compactage ;
- Le technicien place les granulats préchauffés dans la une boule ou un bac sur le balance ;
- Puis en ajout la masse de bitume chaud a le mélange (granulat sec chaud + bitume chaud) ;
- Un malaxage est effectué (Photo II.2) jusqu'à dis que les granulats sont bien enrobe de bitume.



**Photo II.2.** Malaxage des granulats avec un bitume pur

- Le mélange confectionné à chaud est alors prêt à être compacté, puis technicien le verse dans le moule préchauffé ;
- Le compactage doit débiter à une température qui diffère tout au plus de 5°C par rapport à la température de compactage pré-scripte dépend de la température du mélange ;
- L'appareil applique une pression de 0.6 MPa, et une inclinaison de 0.82 ° de moule pour exercer un compactage par pétrissage, au moment de chaque rotation un nombre de mesures de hauteur sont effectuées.

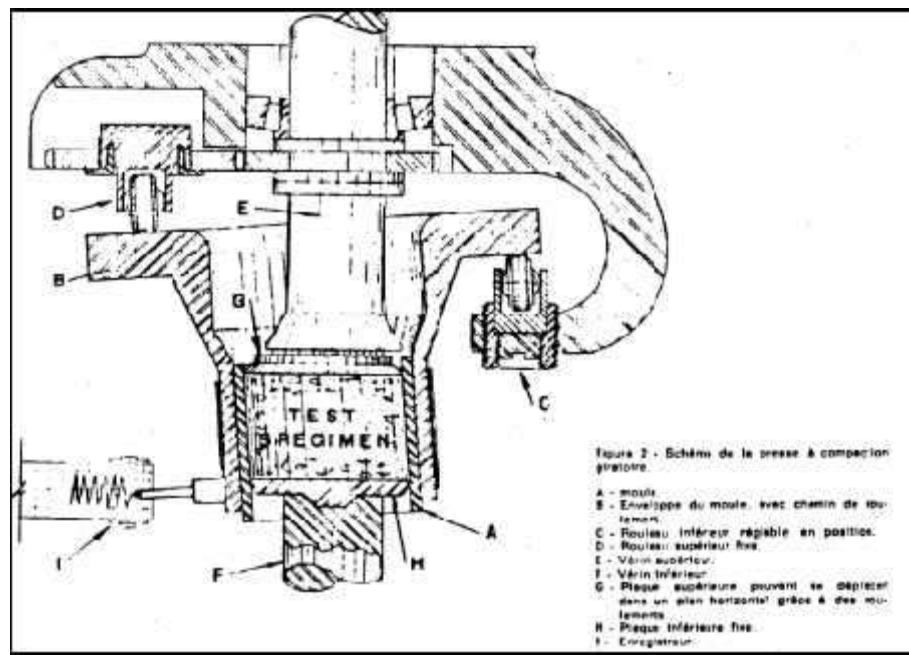
### II.3.1.4. Type des compacteurs giratoires

- a) **La presse à compactage giratoire de Vicksburg** : Cet appareil, dont le prototype date de la fin des années cinquante, est le premier qui a été commercialisé, la figure II.3 montre la vue en coupe de ce compacteur.
  - Le moule A est rempli d'enrobe chaud qui est maintenu à sa température, à l'aide d'une enceinte chauffante avec des résistances électriques. Le moule est placé dans un mandrin dont la bride sert de piste de roulement à deux galets C et D.



- Le vérin E, fixe, et le vérin F, mû hydrauliquement, sont appliqués respectivement sur les faces supérieures et inférieures du moule, ils soumettent le mélange à une pression statique qui est maintenue constante pendant tout l'essai.
- Un moteur électrique fait tourner la partie supérieure autour de son axe vertical à la vitesse de 10 RPM.
- Les galets C et D entraînés à cette vitesse par la partie supérieure de l'appareil, avec laquelle ils sont solidaires, exercent en circulant sur la bride des forces de contact, créant un couple dont les points d'application se déplacent avec l'attelage mobile.
  - L'axe du mandrin prend alors une inclinaison par rapport à la verticale et la valeur de cet angle peut être choisie en agissant sur la position du galet inférieure.
  - Ce mouvement est rendu possible grâce à la plaque métallique G qui est séparée du vérin supérieur E par une butée à billes. Cette plaque peut se déplacer légèrement dans le plan horizontal tout en transmettant à l'enrobe des pressions verticales. Grâce à ce degré de liberté l'échantillon d'enrobe reste solidaire des mouvements du mandrin et pourra subir des déformations en cisaillement.

Cet appareil enregistre la compacité de l'échantillon par sa variation de hauteur durant le compactage, l'angle d'inclinaison, et le nombre de girations. La lecture du manomètre est visuelle [J.C. MOREUX ; 1987].



**Figure II.3.** Mécanisme La Presse à Cisaillement Giratoire de Vicksburg [J.C. MOREUX ; 1987].



**b) L'appareil français des Ponts et Chaussées**

Cet appareil a été commercialisé vers 1974 et le schéma le représentant se trouve à la figure II.4. Le corps de l'appareil est constitué par un moule contenant l'enrobe dans une enceinte chauffante thermostat. Cette enceinte est régulée par un système de thermocouples

Les organes suivants complètent la presse :

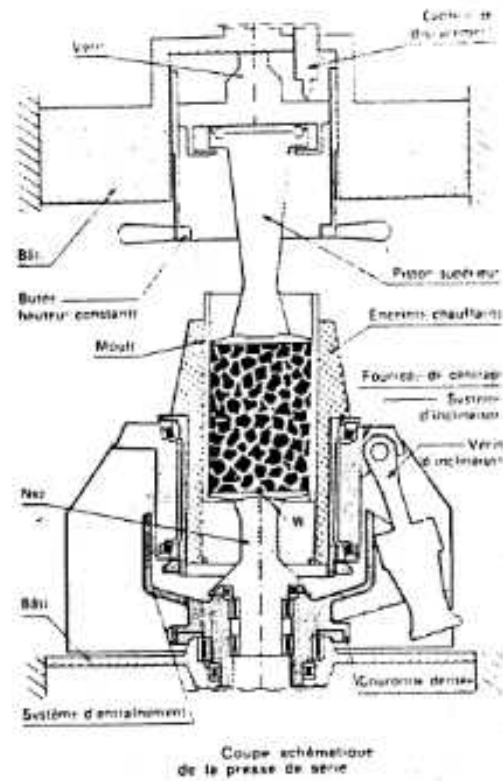
- Le vérin d'inclinaison provoquant une inclinaison de l'éprouvette autour de l'axe perpendiculaire à la coupe de la figure, et passant par le centre de la section de la face inférieure du moule ;
- Le système d'entraînement de l'appareil qui est une couronne dente ;
- Le piston supérieur fixe et le nez du second vérin appliquant la pression statique de compactage

Si on applique, à l'aide du vérin d'inclinaison une force  $F$  dirigée vers le haut, on provoque une rotation de l'éprouvette dans le plan vertical passant par cet axe et plaignant l'angle d'inclinaison dans ce plan.

Cet appareil peut fonctionner à angle fixe constant (angle fixe), ou bien à pression d'inclinaison constante (angle variable).

Dans le premier cas le vérin d'inclinaison est utilisé comme un organe de longueur constante provoquant un angle constant dans le plan de l'axe de l'éprouvette et celui de l'axe du vérin d'inclinaison. Cet angle se trouve libre et donc variable dans les autres plans verticaux.

Dans le second cas, le vérin d'inclinaison exerce une force constante et provoque un angle d'inclinaison variable dans le plan décrit [J.C. MOREUX ; 1987].



**Figure II.4.** Mécanisme à l'appareil français des Ponts et Chaussées [J.C. MOREUX ; 1987].

### II.3.1.5. Expression des résultats de PCG

La variation du pourcentage de vides de l'éprouvette compactée en fonction de l'énergie de compactage [NF EN 12697- 10 ; 2003] est déterminée à l'aide de la formule suivante :

$$v(n) = v_1 - k \cdot \ln(n)$$

Avec :

$v(n)$  : est le pourcentage de vides pour un nombre de girations,  $ng$ , exprimé en pour cent (%) ;

$v_1$  : est le pourcentage de vides calculé pour une giration ;

$k$  : est la compactibilité (pour la méthode utilisant un compacteur giratoire) ;

$n$  : est le nombre de girations.

Calculer les 2 paramètres de l'équation, et  $K$ , par la méthode des moindres carrés sur les données expérimentales et pour un nombre de girations supérieur ou égal à 20 avec une régression linéaire dans laquelle  $n$  et  $v(n)$  sont respectivement les variables indépendante et dépendante.

Exprimer le pourcentage de vides, à un chiffre après la virgule et la compactibilité,  $K$ , à deux chiffres après la virgule, [12697 – 31, 2003] et le résultat serre présente sous forme on courbe

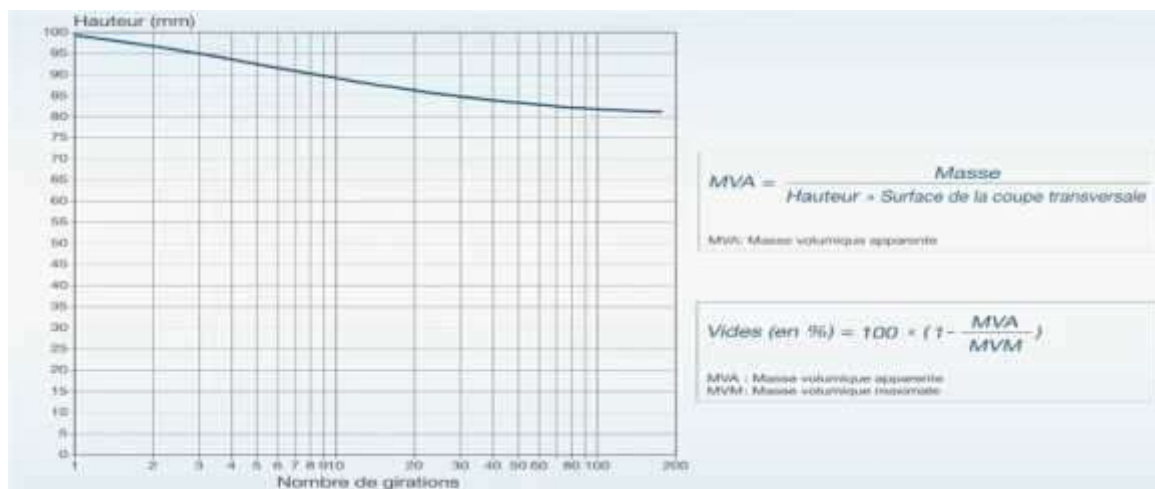


Figure II.5. Présentation des résultats d'essai PCG

Tableau II.1. Exemple des Spécifications relatives au pourcentage de vides [EN 13108-1]

Type d'enrobés	Spécification PCG à 'n' giration		Spécification à 10 girations (%)
	Nombre de giration « n »	Pourcentage de vide (%)	
EB 10 – BBME	60	5 à 10	11
EB 14 – BBME	80	4 à 9	

### II.3.1.6. Essai tenue à l'eau (Essai Duriez)

La tenue à l'eau est habituellement mesurée au moyen de l'essai Duriez dans le cadre de la normalisation française. La normalisation européenne a retenu deux modalités d'essai, la compression diamétrale et la compression simple qui est dérivée de l'essai Duriez.

Ces deux modalités sont censées donner des résultats équivalents, cependant la respectabilité et la reproductibilité de l'essai en compression simple (Essai Duriez) sont pratiquement deux fois meilleures que celles de l'essai en compression diamétrale [J.L. DELORME et al., 2007].

### II.3.1.7. Principe d'essai Duriez

Les éprouvettes nécessaires à la réalisation de l'essai sont fabriquées par compactage statique à double effet.

Les éprouvettes sont soumises à l'essai de compression après conservation à 18 °C dans des conditions définies, à l'air pour certaines éprouvettes, en immersion pour d'autres durant 7 jours La tenue à l'eau est caractérisée par le rapport des résistances avant ou après immersion (Figure. II.6) [NF P 98-251-1 ; 2002].

## CONSERVATION DES ÉPROUVETTES CYLINDRIQUES

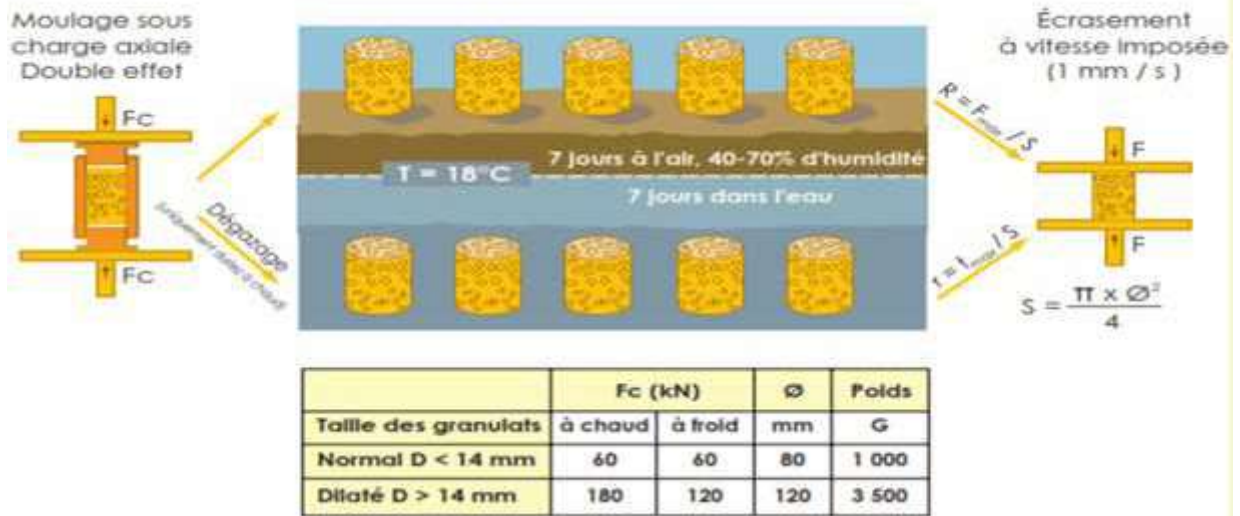


Figure II.6. Principe d'essai La tenue à l'eau.

## II.3.1.8. Appareillage

Les appareillages du l'essai duriez compose deux partie, l'un qu'est les moules et les piste ce derniers varie selon la granulométrie du mélange devra tester ( $D_{\text{max}}$ ) (Photo II.3)

- 80 mm par  $D_{\text{max}} < 14 \text{ mm}$
- 120 mm par  $D_{\text{max}} \geq 14 \text{ mm}$



Photo II.3. Moules et pistons.

Une deuxième partie c'est la presse avec une vitesse de 1mm/s qui presse permettant le compactage à double effet (Photo II.4) [NF P 98-251-1, 2002]



**Photo II.4.** Machine de compression.

#### **II.3.1.9. Réalisation d'essai Duriez**

Le mélange hydrocarboné préparé en laboratoire, est placé, dans un moule cylindrique

- 1 000 g  $\pm$  1 g dans le cas des mélanges hydrocarbonés de D < 14 mm ;
- 3 500 g  $\pm$  3,5 g dans le cas des mélanges hydrocarbonés de D = 14 mm.

Le compactage des éprouvettes doit être réalisé par double effet :

- D'une charge de 60 KN pendant 5 min sur chaque éprouvette pour les mélanges hydrocarbonés de D < 14 mm (Photo II.4) ;
- D'une charge de 180 KN pendant 5 min sur chaque éprouvette pour les mélanges hydrocarbonés de D = 14 mm ;

Les échantillons d'essai doivent être placés après l'enlèvement du moule à 18 ° C pendant une période de 07 jours, de sorte que certains échantillons doivent être de l'eau ( 95 % humidité) tandis que d'autres doivent être des échantillons d'air (50% humidité) (Photo II.5).



**Photo II.5.** Compactage des éprouvettes



**Photo II.6.** Conservation des échantillon

- Extraire les échantillons après 07 jours et appliquer une force de compression à l'effondrement (figure III.14).



**Photo II.7.** Compression des éprouvettes

#### II.3.1.10. Expression des résultats tenue à l'eau

Les résultats de l'essai sont la résistance à la compression simple à une température de 18 °C, avec ou sans immersion, est le rapport de la charge maximale à la section circulaire des éprouvettes. Il est exprimé en méga pascals et représente la moyenne de quatre ou cinq mesures suivant la dimension  $D$  du mélange hydrocarboné soumis à l'essai.



On établit également le rapport de la résistance avec immersion ( $i$ ) à la résistance sans immersion ( $C$ ) ; le rapport ( $i/C$ ) est exprimé avec deux chiffres significatifs [NF P 98 – 256 -1, 2002]

Une autre paramètre présente dans les résultats c'est le pourcentage d'imbibition après nombre jour, noté  $k$  sa formule c'est :

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

- $M$  : Masse des éprouvettes après démoulage, exprimée en grammes.
- $M_{J+1+k}$  : Masse des éprouvettes après  $k$  jours d'immersion dans l'eau, exprimée en grammes

### II.3.2. Niveau 2

Ce niveau comporte les essais du niveau 1 (Presse à Cisaillement Giratoire et tenue à l'eau), auxquels on ajoute un essai d'orniérage [J.L. DELORME et al., 2007].

#### II.3.2.1. Essai d'orniérage

Le phénomène d'orniérage est une dégradation de la chaussée facilement mesurable et visible en surface, des traces permanentes et creusées dans la chaussée font leur apparition suite aux passages répétés des véhicules lourds (Photo II.8).

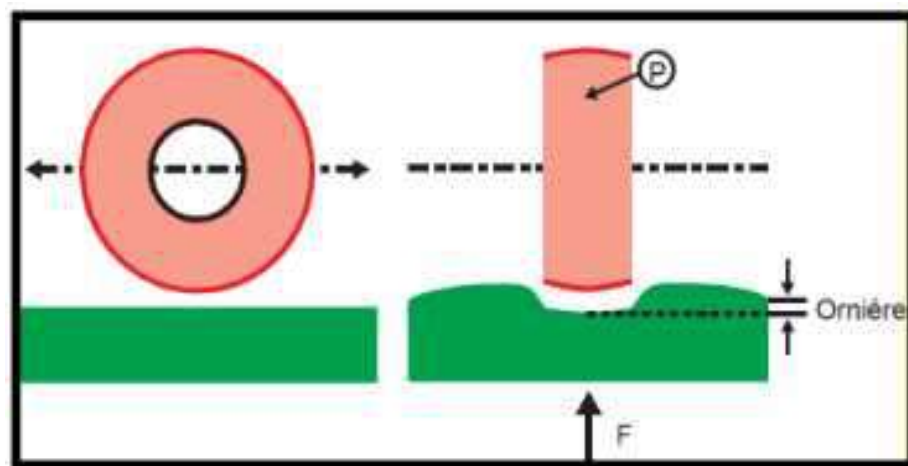
Il s'agit d'un des problèmes majeurs de dégradation des chaussées flexibles. Cette section vise dans un premier temps à définir la nature et l'origine des ornières, dans un second temps les trois principaux types d'ornières et dans un troisième temps elle cherche à illustrer le phénomène et le comportement à l'orniérage des matériaux bitumineux [M. Meunier ; 2012].



**Photo II.8.** Machine de l'essai d'orniérage.

### II.3.2.2. Principe d'essai orniérage

Le corps d'épreuve est une plaque parallélépipédique de 5 cm ou de 10 cm d'épaisseur, selon que l'épaisseur de mise en œuvre de l'enrobé 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 °C) (Figure II.7 [J.L. DELORME et al., 2007]).



**Figure II.7.** Principe de l'essai d'orniérage [CST COLAS ; 2006]



### II.3.2.3. Types d'ornières

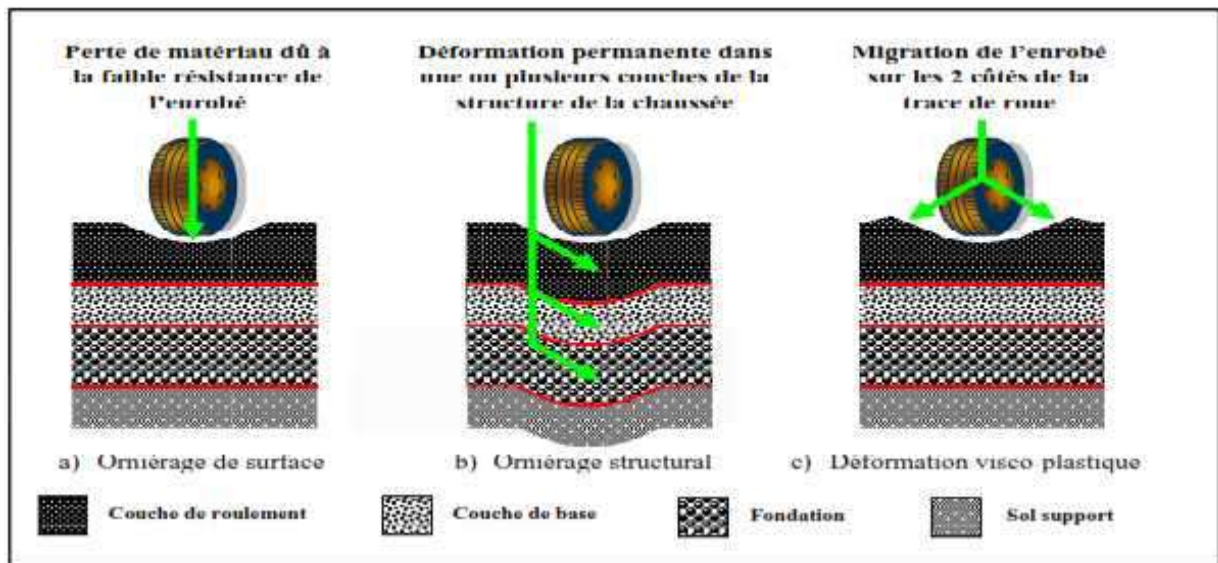
Des essais à grandes déformations sur enrobés bitumineux révèlent la présence de déformation permanente irréversible, une déformation viscoplastique d'un point de vue microstructure, la déformation viscoplastique est reliée au mouvement (glissement et rotation) des granulats les uns par rapport aux autres et liés entre eux grâce au bitume [M Meunier, 2012].

Le comportement rhéologique du bitume a une grande influence sur le mouvement relatif des granulats.

A basse température, la déformation viscoplastique est de faible amplitude ou pratiquement absente due à la rigidité du bitume. Cependant, lors d'une augmentation de la température, l'effet lubrifiant généré par le bitume devient de plus en plus important et favorise l'accroissement de la déformation viscoplastique de l'enrobé [Prato et Coll ; 2011].

On considère généralement trois types d'ornières comme le montre a Figure II.8:

- L'orniérage de surface, associé à des déformations ou à l'usure dans les traces de roues ;
- L'orniérage structural, associé généralement à un affaissement des couches de fondation ou de sous-fondation.
- La déformation viscoplastique, reliée à la densification (compaction) et/ou au cisaillement de l'enrobé bitumineux dans les traces de roues.



**Figure II.8.** Lustration des différents types d'orniérage [M Meunier, 2012].

### II.3.2.4. Type des ornières

Dans les matériels de laboratoire, on définit deux types d'orniéreur, suivant de leur dimensions et capacité, qui sont :

**❖ Dispositif de grandes dimensions**

Une roue équipée d'un pneumatique sans sculpture  $400 \times 8$  et ayant une largeur de trace de  $(80 \pm 5)$  mm.

La pression du pneumatique doit être de  $(600 \pm 30)$  kPa au début de l'essai et Moules Un ou plusieurs moules de dimensions intérieures  $(500 \times 180 \times 50)$  mm<sup>3</sup> ou  $(500 \times 180 \times 100)$  mm<sup>3</sup>, à  $\pm 2$  mm<sup>3</sup> près, capables de résister sans gauchissement aux conditions de l'essai [NF EN 12697-22 ; 2004].

**❖ Dispositif extra-large**

Une roue équipée d'un pneumatique sans sculpture 6.00-R9 et ayant une largeur de trace de  $(110 \pm 5)$  mm et un ou plusieurs moules de dimensions intérieures  $(700 \times 500)$  mm, à  $\pm 5$  mm près, capables de résister sans gauchissement aux conditions de l'essai.

La hauteur des moules correspond à l'épaisseur nominale des éprouvettes aux extrémités ou la dépasse au maximum de 20 mm

Des capteurs laser pour mesurer la déformation locale à  $\pm 0,2$  mm près. Les capteurs laser doivent être capables de mesurer la profondeur d'ornièrre avec un pas maximum de 2 mm et sur au moins 3 profils en travers [NF EN 12697-22 ; 2004].

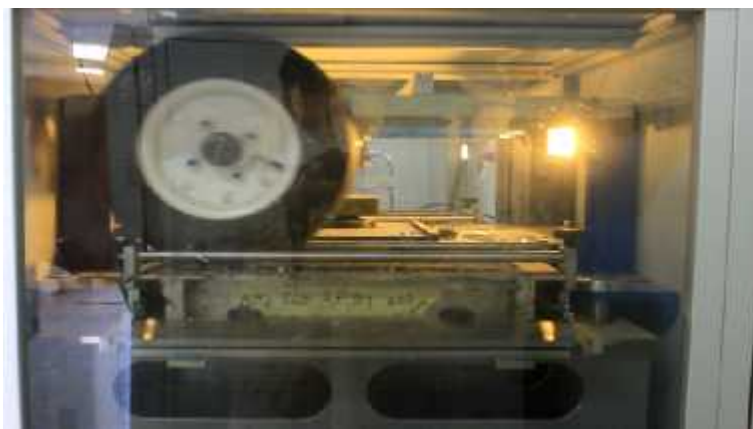
**II.3.2.5. Réalisation d'essai d'ornièrage**

Préparation des moules son fait par un compacteur spécification (Photo II.9) pour prendre de plaque d'enrobes avec un travail de compacité bien dater miner.



**Photo II.9.** Préparation de plaque sur le table de compactage.

Vérifier que le pneumatique est propre et que les matériaux de l'éprouvette n'adhèrent pas au pneumatique pendant l'essai pour éviter tout chauffage parasite. Maintenir la pression du pneu à  $(600 \pm 30)$  kPa pendant l'essai, soit par un dispositif approprié, soit par contrôle et réglage à chaque arrêt (Photo II.10).



**Photo II.10.** Ajuster la plaque et l'appareil d'expérimentation l'orniérage.

L'enceinte étant maintenue à une température comprise entre  $15\text{ °C}$  et  $25\text{ °C}$ , mettre la machine en mouvement jusqu'à ce que l'éprouvette ait subi 1 000 cycles de charge. Pour mesurer le profondeur dernier sous cette charge a des conditions ambiantes [NF EN 12697-22 ; 2004].

Régler la température de l'enceinte à la température d'essai et contrôler la température de l'air à l'aide de la sonde installée sur la paroi latérale du moule. La température de l'air ne doit pas dépasser  $75\text{ °C}$  si la température d'essai est inférieure ou égale à  $60\text{ °C}$ , et ne doit pas dépasser de plus de  $15\text{ °C}$  la température d'essai si celle-ci est supérieure à  $60\text{ °C}$ . L'éprouvette doit être conditionnée à ces températures pendant 12 h à 16 h avant d'être soumise à l'essai. [NF EN 12697-22 ; 2004].

Mettre la machine en mouvement. Arrêter la machine et mesurer la profondeur d'ornière aux 15 emplacements prédéterminés, après que l'éprouvette a subi le nombre de cycles spécifié 1000, 3000, 10000 et 30000 et, le cas échéant, à 30, 100, 300 et 100000 cycles de charge [NF EN 12697-22 ; 2004] sans compter les cycles de conditionnement.

Maintenir la température au sein de l'éprouvette à la valeur spécifiée à  $\pm 2\text{ °C}$  pendant toute la durée de d'essai. L'essai sur cette éprouvette est achevé une fois le nombre requis de cycles de charge atteint ou lorsque la profondeur d'ornière moyen (Photo II.11).



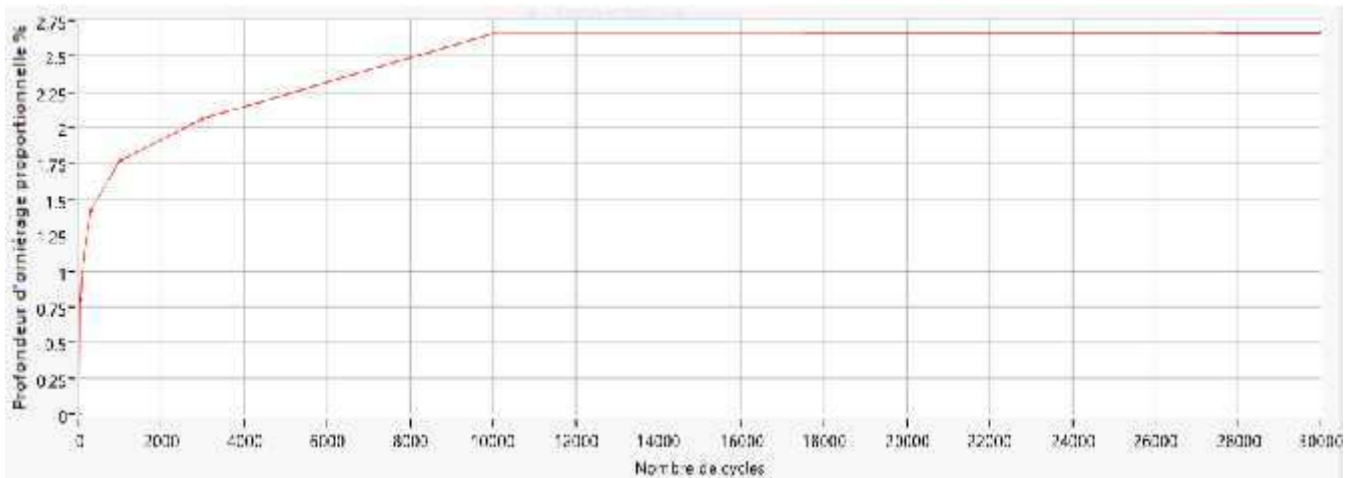
**Photo II.11.** Échantillon après procédure de l'essai d'orniérage.

### II.3.2.6. Expression des résultats d'orniérage

Evolution de la profondeur d'ornière en fonction du nombre de cycles ; forme de la régression appliquée Figure II.9:

$$P_i \% = 100 - \sum_{j=1}^{15} \frac{(m_{ij} - m_{0j})}{(15 \times h)}$$

- $P_i$  : est le pourcentage de profondeur d'ornière mesurée (%) ,
- $m_{ij}$  : est la déformation locale, en millimètres (mm) ,
- $m_{0j}$  : est la mesure initiale à l'emplacement  $j$  ,
- $h$  : est l'épaisseur de l'éprouvette, en millimètres (mm).



**Figure II.9.** Profondeur d'ornière proportionnelle / nombre de cycles.

### II.3.3. Niveau 3

Ce niveau comporte les essais Presse à Cisaillement Giratoire et de tenue à l'eau du niveau 1, l'essai d'orniérage du niveau 2 et la caractérisation du module du mélange. L'essai de module est spécifié dans le cas de chantiers importants et lorsque la couche concernée intervient dans le fonctionnement structurel de la chaussée.

Ce niveau implique que le produit est considéré appartenir à l'approche Fondamentale au sens des normes EN. Les valeurs de module à 15°C, 10 Hz ou 0,02s sont directement utilisées dans les modèles de calcul de dimensionnement. Par définition dans les normes produites, les épreuves de formulation des EB-GB classe 4, EB-BBME et des EB-EME doivent obligatoirement comprendre un essai de module. Pour les autres produits qui peuvent appartenir à l'approche empirique ou fondamentale, la détermination du module doit être mentionnée. Pour certaines applications, des valeurs maximales peuvent être prescrites [J.L. DELORME et al., 2007].



**Photo II.12.** Machine de flexion deux points.

#### II.3.3.1. Définition du module complexe

La mesure du module complexe,  $E^*$ , est réalisée pour des sollicitations sinusoïdales de fréquences variées, dans le domaine des petites déformations. Dans ces conditions l'enrobé se comporte principalement de façon viscoélastique linéaire, si bien que la réponse du matériau à la sollicitation sinusoïdale est sinusoïdale [Mandel, 1955].

L'écriture complexe associée à ce type d'essai simplifie l'écriture de la loi de comportement viscoélastique linéaire, qui devient alors semblable à une loi de comportement en élasticité. Considérons une sollicitation du type contrainte imposée de pulsation :

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t).$$

Dans la théorie d'un comportement viscoélastique linéaire la réponse en déformation est alors :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(t - \varphi).$$

Où  $\varphi$  est le déphasage de retard de la déformation sur la contrainte.

Le passage par une écriture complexe permet alors d'utiliser une écriture simple entre la contrainte et la déformation uni axiales et de définir le module complexe  $E^*$  de la façon suivante :

$$E^* = \sigma^* / \varepsilon^* = \sigma_0 \cdot e^{i\omega t} / \varepsilon_0 \cdot e^{i(\omega t - \varphi)} = \sigma_0 / \varepsilon_0 \cdot e^{i\varphi} = |E^*| \cdot e^{i\varphi}$$

$|E^*|$  est appelé **module de rigidité**.

$\varphi$  est appelé **angle de déphasage** du matériau (il permet l'estimation de l'énergie dissipée dans la matière).

L'analyse du module complexe se fait aussi au travers de l'analyse de sa partie réelle et de sa partie imaginaire et de sa partie imaginaire :

$$E^* = E_1 + iE_2$$

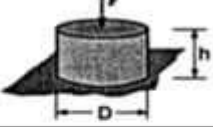
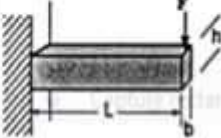
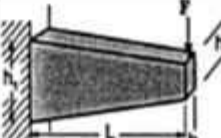
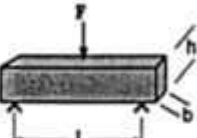
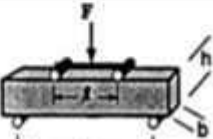
Où  $E_1$  est appelé module d'élasticité dynamique et  $E_2$  est appelé module de perte [Y.LEFEUVRE ,2001].

### II.3.3.2. Principe des essais modules

Des corps d'épreuve d'une forme adaptée sont soumis à déformation dans le domaine linéaire, par des chargements Répétés ou à des vitesses de déformation contrôlées. Les amplitudes de contrainte et de déformation sont mesurées, simultanément avec le déphasage entre la contrainte et la déformation [J.L. DELORME et al., 2007].

Le Figure II.10. regroupe les différents essais existants avec leur schéma de principe, leurs facteurs de forme et de masse le cas échéant, et les principales références bibliographiques associées. Les références indiquées peuvent concerner à la fois la description faite par les auteurs du principe de l'essai et les résultats obtenus avec le type d'essai cité.



	<i>Schéma de principe</i>	<i>Facteur de forme <math>\gamma(l)</math></i>	<i>Facteur de masse</i>	<i>Références</i>
traction compression (avec ou sans confinement)		$\frac{h}{\pi D^2}$	-	[Charif, 1991] [Doubbanch, 1995]
Flexion 2 points		$\frac{4 L^3}{b h^3}$	$\frac{M}{4} + m$	[Francken et al, 1994]
		$\frac{12 L^3}{b (h_1 + h_2)^2} \left[ \frac{z_1 - h_1}{z_1 - h_1} \frac{h_1}{h_2} \frac{z_2 - h_2}{z_2 - h_2} \right]$	$0,135M + m$	[Huet, 1963] [Chauvin, 1990]
Flexion 3 points		$\frac{24 L^3}{\pi^4 b h^3}$	$0,5 M + m$	[Myre, 1992]
Flexion 4 points		$\frac{2 L^3 - 3L_1^2 + l^2}{8 b h^3}$	$0,5M + m$	[Pronk, 1996]

Avec :  $M$ , masse de l'éprouvette,  $m$ , masse de l'équipage mobile

**Figure II.10.** Récapitulatif des principaux essais de module complexe existant sur enrobés [De La Roche, 1996].

### II.3.3.3. Essai de flexion en deux points sur des éprouvettes trapézoïdales

#### - Principe

Cette partie décrit une méthode de mesure du module de rigidité des mélanges hydrocarbonés au moyen d'un essai de flexion en tête sur une éprouvette console. Une force sinusoïdale,  $F = F_0 \times \sin(\omega \times t)$ , ou une déflexion sinusoïdale,  $Z = Z_0 \times \sin(\omega \times t)$ , est appliquée en tête d'une

Éprouvette collée à sa base à un support fixé sur un châssis rigide. Il est recommandé que la force,  $F_0$ , ou la déflexion,  $Z_0$ , soit telle quelle provoque une déformation  $\epsilon \leq 50 \times 10^{-6}$  mm dans la partie soumise à la contrainte la plus forte et dans un domaine supposé linéaire pour le mélange hydrocarboné. Le module complexe est calculé à des températures et à des fréquences variées en fonction de  $F_0 \cdot Z_0$  et l'angle de phase,  $\varphi$ . [NF EN 12697-26 ; 2004].

### - Appareillage

Machine d'essai permettant d'appliquer une déflexion dynamique sinusoïdale à la partie supérieure de l'éprouvette, au moins avec une étendue de fréquences comprise entre 3 Hz et 30 Hz. Photo II.13.



**Photo II.13.** Vérification de l'encastrement.

Et pour réaliser des mures l'appareille compose de :

- Capteurs : capables de mesurer la force en dynamique entre 0,1 N et 100 N avec une exactitude de 0,5 N jusqu'à 10 N et  $\pm 5\%$  ;
- Capteurs : capables de mesurer la flèche jusqu'à 0,2 mm à une exactitude de  $1\mu\text{m}$  ;
- Appareil de mesure de l'angle de déphasage à une exactitude de  $\pm 1^\circ$ .

#### **II.3.3.4. Réalisation d'essai deux points**

Une préparation des plaques avec les dimensions  $600 \times 400 \times 10 \text{ mm}^3$ , par un compacteur à roue suivant la norme EN 12697 – 33, soit par profile de compactage légers (1 bar, 3 bars) ou lourds (1 bar, 6 bars) (Figure II.11), puis en coupant la plaque après refroidissement à des éprouvettes d'une forme trapézoïdale dans les étapes montre la (Photo II.14.)





Photo II.14. Compactage des plaques.

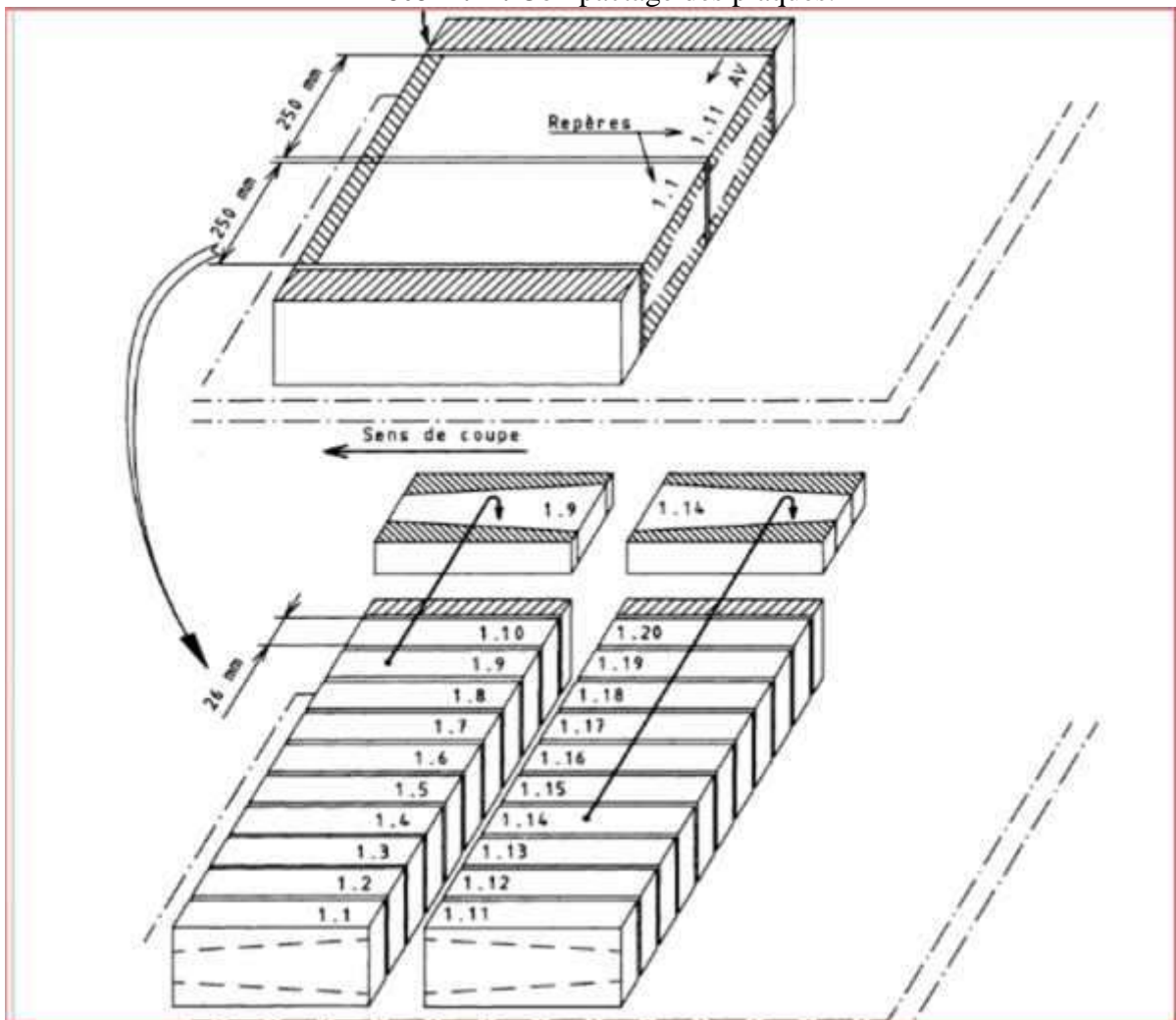


Figure. II.11. Les étapes de l'acquisition trapézoïdale

L'éprouvette doit être soumise par une force sinusoïdale appliquée en tête pendant une durée minimale de 30 s et une durée maximale de 2 min à une flèche imposée correspondant à une déformation,  $\epsilon$ , inférieure à 50 microdéformations

La force,  $F_0$ , la déflexion,  $Z$ , et l'angle de phase,  $\varphi$ , doivent être mesurés au cours des 10 dernières secondes de l'essai.

Le module complexe doit être déterminé avec au minimum 4 températures séparées au maximum de 10 °C, et pour chaque température à au moins 3 fréquences espacées de manière égale sur une échelle logarithmique, avec un rapport minimal de 10 entre les fréquences extrêmes [NF EN 12697-26 ; 2004].

### II.3.3.5. Expression des résultats d'essai module

Les différentes composantes du module complexe varient avec la température et la fréquence de sollicitation, fixées pour chaque essai élémentaire. Les résultats expérimentaux  $|E^*|$ ,  $\varphi$ ,  $E_1$ ,  $E_2$ , sont usuellement exprimés à l'aide des représentations classiques décrites dans ce qui suit :

#### a) Courbes isothermes

Elles sont obtenues en traçant le module du module complexe  $|E^*|$  en fonction de la fréquence pour chacune des températures d'essais  $T$ , généralement en coordonnées bi logarithmiques- (figure II.12) [Y. LEFEUVRE ; 2001].

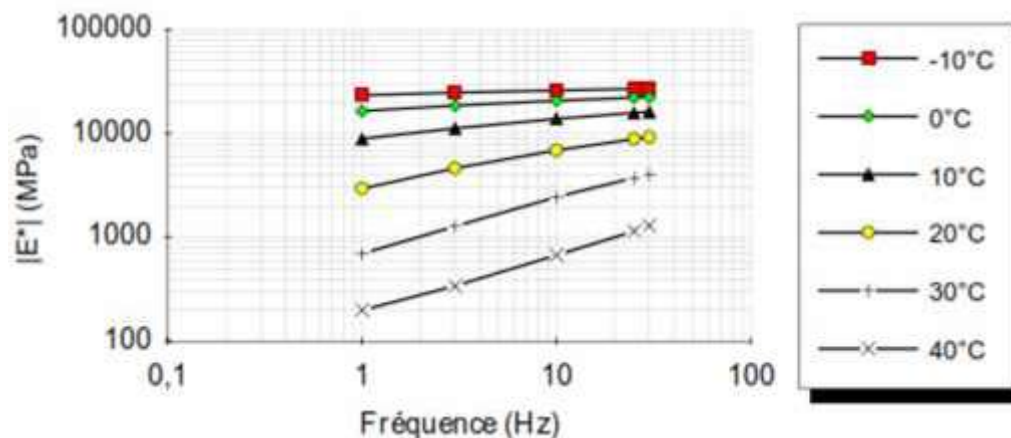
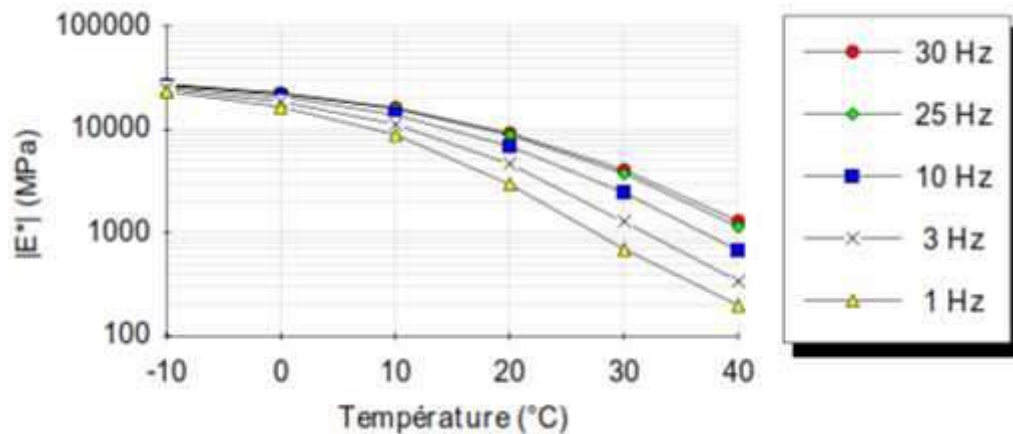


Figure II.12. Isothermes du module complexe [De la Roche ; 1996].

Outre les valeurs de module directement utilisables pour les calculs de dimensionnement, la pente des isothermes permet d'estimer la susceptibilité cinétique du matériau bitumineux (c'est-à-dire la variation de module avec la vitesse de la sollicitation) [Y. LEFEUVRE ,2001].

### b) Courbes isochrones

Il s'agit du même type de représentation que précédemment toujours exprimée en coordonnées semi-logarithmiques en inversant les paramètres fréquence et température (figure II.13).



**Figure II.13.** Isochrones du module complexe [De la Roche ; 1996].

A l'instar des courbes isothermes, cette représentation permet cette fois d'estimer la susceptibilité thermique de l'enrobé bitumineux (variation du module pour une variation de température) [Y. LEFEUVRE ,2001].

### II.3.4. Niveau 4

Ce niveau comporte les essais Presse à Cisaillement Giratoire et tenue à l'eau du niveau 1, l'essai d'orniérage du niveau 2, la caractérisation du module du mélange du niveau 3. Il est complété par la détermination de la résistance en fatigue.

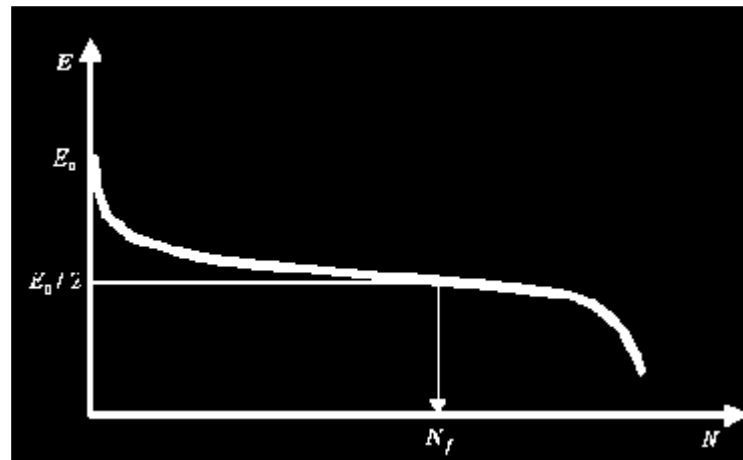
L'essai de fatigue est à spécifier dans le cas de chantiers très importants et dès que la couche concernée travaille en fatigue. [J.L. DELORME et al., 2007].

#### II.3.4.1. Essai de fatigue

Le phénomène de fatigue d'un matériau se caractérise par sa rupture après application répétée d'un grand nombre de sollicitations (en pratique supérieur à  $10^4$ ) dont l'amplitude est inférieure à la résistance à la rupture instantanée du matériau.

Par définition, une éprouvette est dite fatiguée lorsque son module atteint la moitié de sa valeur initiale mesurée au premier cycle de chargement dans les mêmes conditions d'essai (même température et même fréquence).

La durée de vie  $N_f$  d'une éprouvette est donc le nombre de cycles correspondant à un module de rigidité égal à la moitié du module initial de cette même éprouvette (figure II.14) [M. AFECHKAR,]



**Figure II.14.** Définition du critère classique de fatigue et détermination de la durée de vie  $N_f$

Ce critère classique est l'un des critères de fatigue les plus répandus. La durée de vie  $N_f$  déterminée à partir de ce critère est utilisée pour le dimensionnement de chaussées.

#### - Principe

On peut considérer la chaussée comme un massif multicouche. Dans la méthode française de dimensionnement, elle est modélisée sous la forme d'une superposition de couches élastiques, linéaires, homogènes, isotropes, infinies en plan. Chaque couche est caractérisée par un module d'élasticité  $E$ , un coefficient de Poisson, et son épaisseur.

Après modélisation de la charge appliquée, les calculs des déformations et contraintes dans ce modèle multicouches sont effectués à l'aide du modèle de Brumisateur [M.L. NGUYEN, 2009].

En France, l'essai de fatigue s'effectue sur une éprouvette de forme trapézoïdale qui est testée en flexion deux points. La déformation considérée est la déformation maximale subie par la fibre extrême de l'éprouvette lors d'une sollicitation sinusoïdale à amplitude de flèche constante. Cette déformation est calculée à partir de la flèche en tête en supposant le matériau linéaire et homogène.

L'essai de fatigue en laboratoire permet de déterminer la déformation  $\epsilon_6$  conduisant à la rupture d'une éprouvette par fatigue sous certaines conditions d'essai (fréquence, température) pour  $10^6$  chargements.

### II.3.4.2. Types d'essai de fatigue

#### II.3.4.2.1. Essai de flexion 2 points

C'est le type d'essai de fatigue normalisé en France (NF P 98 – 261 – 1). Il est utilisé pour le dimensionnement des chaussées en France. Et comme tous les essais de flexion, il s'agit d'un essai non-homogène.

L'éprouvette trapézoïdale est encastrée à sa grande base et sollicitée à son sommet. Les Sollicitations peuvent être exercées en force ou en déplacement.

La forme trapézoïdale de l'éprouvette est choisie pour obtenir une déformation maximale en dehors de la zone d'encastrement de l'échantillon sollicité en poutre console. La rupture s'effectue généralement au voisinage de  $1/5$  de la hauteur totale ( $h$ ) de l'éprouvette.

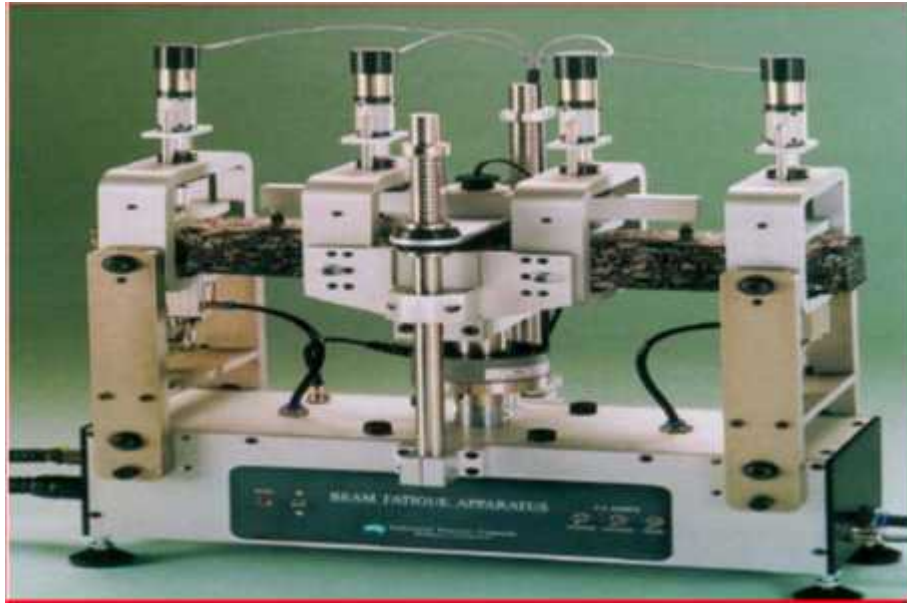


**Photo II.15.** Essai de flexion 2 points sur éprouvette trapézoïdale.

#### II.3.4.2.2. Essai de flexion 4 points

Cet essai est largement utilisé aux Etats Unis. Il a été choisi suite au programme SHRP pour l'étude de la fatigue des enrobés bitumineux. Cet essai a été conçu pour éviter la concentration des dommages au centre de la poutre observée lors de l'essai de flexion trois points.

La sollicitation est exercée sur deux points symétriques, partageant l'éprouvette en trois travées. La zone de sollicitation maximale s'étend sur la zone entre les points de chargement. L'avantage de l'appareil présenté dans la Figure III.30 est qu'il permet d'appliquer des efforts de compression ou de traction [ML NGUYEN 2009].

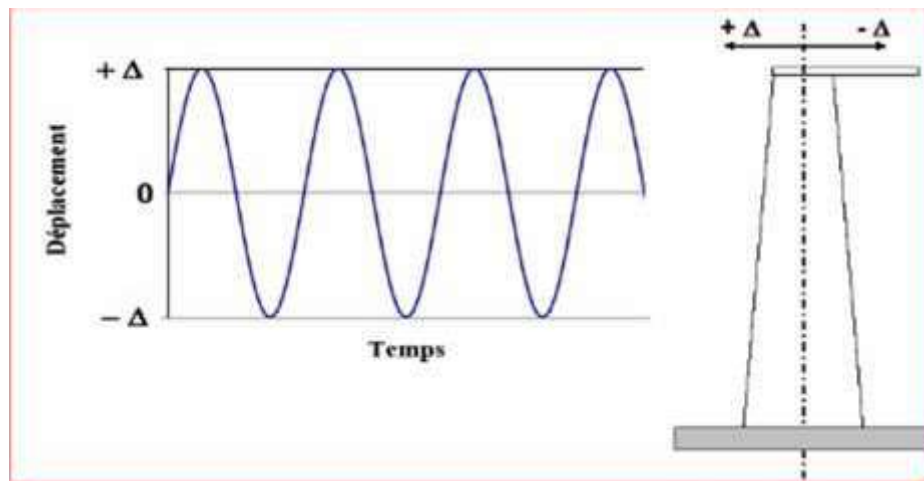


**Figure II.15.**Appareil d'essai de flexion 4 points [H. BAAJ ; 2000].

### II.3.4.3. Réalisation d'essai fatigue

L'essai doit au moins s'étendre sur une plage de niveau de déformation d'environ  $100 \mu\epsilon$  à  $400 \mu\epsilon$ .

Les éprouvettes doivent être soumises à essai à trois niveaux de contrainte avec au moins trois éprouvettes à chaque niveau, à une température de  $10^\circ\text{C}$  et à la petite base de l'éprouvette est appliqué un signal de déplacement sinusoïdal à une fréquence de 25 Hz souvent (Figure II.16). Le déplacement moyen sur une période est nul [M. AFECHKAR,].



**Figure II.16.** Signal de déplacement symétrique imposé à la petite base de l'éprouvette [M. AFECHKAR]



#### II.4.4.4. Expression des résultats d'essai fatigue

L'essai classique, permettant de caractériser le phénomène de fatigue consiste à soumettre une éprouvette de matériau à des sollicitations répétées et à noter le nombre de cycles entraînant la rupture de l'éprouvette, appelé « durée de vie ».

La représentation classique des résultats de l'essai de fatigue est la courbe de fatigue ou courbe de Wöhler (Figure II.17). Cette courbe fait correspondre une durée de vie à la sollicitation exercée, qui peut être une contrainte ou une déformation imposée [M.L. NGUYEN ; 2009].

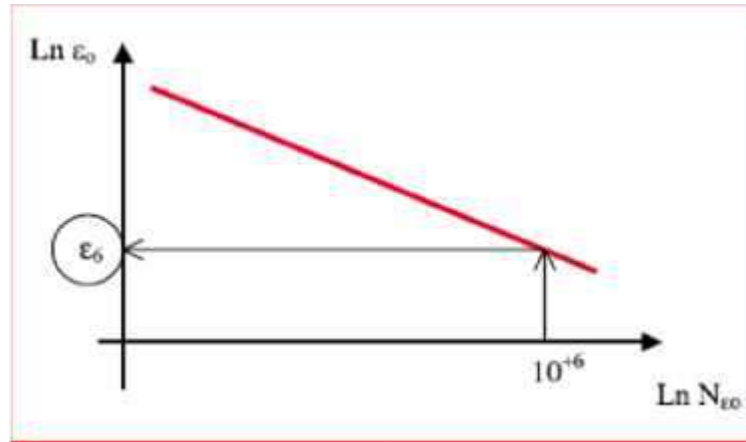


Figure II.17. Courbe de Wöhler [M.L. NGUYEN ; 2009].

Cette courbe est habituellement caractérisée par l'une ou l'autre des relations suivantes :

- $S = a.N^{-b}$  : la courbe est alors une droite en coordonnées logarithmique
- $S = - \log(N)$  : la courbe est alors une droite en repère semi-logarithmique.

Avec :

- $S$  : la sollicitation imposée (contrainte ou déformation imposée).
- $N$  : la durée de vie correspondante.
- $(a, b)$  et  $( , )$  : les constantes de la relation.

## CONCLUSION

L'étude de formulation d'enrobé à (04) niveaux, nous permet d'évaluer l'ensemble des performances d'un enrobé bitumineux pour nous permette de se prononcer sur la qualité d'enrobé et sa durabilité .

## III. CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX

### III.1. INTRODUCTION

Ce chapitre a pour objectif de présenter les matériaux utilisés dans le cadre de cette étude, et de déterminer leurs caractéristiques physico-mécaniques et chimiques pour formuler les bétons bitumineux à module élevé.

Donc dans ce chapitre, nous allons exposer les caractéristiques des différents matériaux utilisés dans la composition de l'enrobé, à savoir :

- Sable de classe 0/3 de la région Ghardaïa (SARL ALCOGAZ) .
- Gravier de classe 3/8 de la carrière Taicha à Djelfa.
- Gravier de classe 8/15 de la carrière Taicha à Djelfa.
- Liant bitumine pur de classe 40/50 de l'entreprise NAFTAL de Ghardaïa.

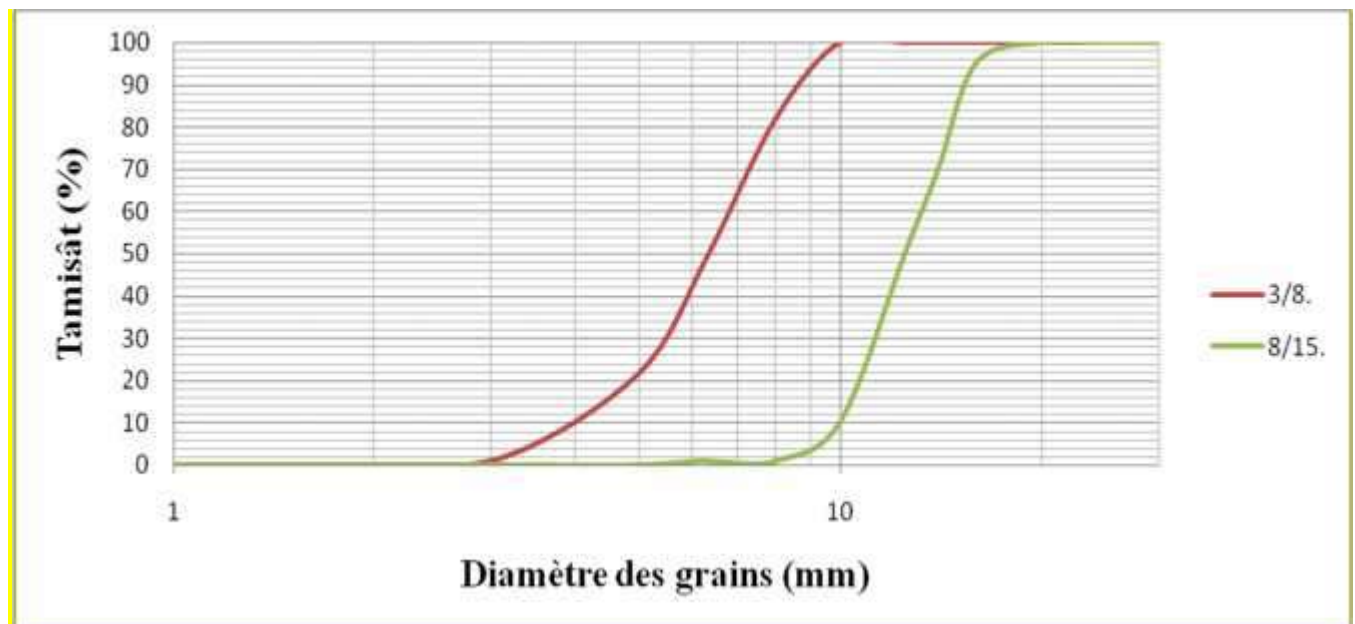
### III.2. CARACTERISTIQUES DE MATERIAUX

#### III.2.1. Gravier

Les échantillons des deux classes de gravier 3/8 et 8/15 de carrière de Taicha à Djelfa, ont été soumis aux essais et analyses au laboratoire pour déterminer leurs caractéristiques physiques et mécaniques.

##### a) Analyse granulométrie [NF P 18-560]

L'analyse granulométrie effectuée sur les deux classes de gravier a permis d'obtenir les courbes suivantes :





**b) Masses Volumiques absolues**

La masse volumique absolue  $\rho_v$  est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains. Les résultats résumés dans le tableau ci après

**Tableau. III.1.** Résultat d'essai masses volumiques absolues de graviers.

Classe des graviers (d/D)	3/8	8/15
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2.664	2.664

**c) Essai Micro Deval en présence d'eau / MDE (NF P 18 – 572)**

Cet essai permet de déterminer l'usure d'une chaussée sous l'effet de frottements (pneus des véhicules). L'essai consiste à introduire des granulats dans le cylindre de la machine MDE, avec de l'eau et des billes de taille normalisée équivalente à celle des gravillons. Lors de la rotation du cylindre, les gravillons frottent sur les billes. La masse des éléments inférieurs à 1,6mm à la fin de l'essai donne la résistance à l'usure du granulat. Plus le résultat est faible, plus le granulat est résistant à l'usure.

Les résultats trouvés sont mentionnés dans le tableau suivant :

**Tableau. III.2.** Résultat d'essai Micro-Deval.

Classe des graviers (d/D)	4/6.3	10/14	Spécification
MDE(%)	18	20	20 %

**d) Essai de Los Angeles (NF P 18 – 573)**

L'essai LOS ANGELES est destiné à évaluer la résistance des granulats à la fragmentation et aux chocs. Pour tester la dureté d'un matériau, on le soumet à une épreuve de chocs dans un tambour. Les essais sont effectués sur la classe de référence 10 / 14 et les valeurs sont présentés dans le tableau suivant :

**Tableau. III.3 :** Résultat d'essai Los Angeles.

Classe des graviers (d/D)	10/14	Spécification
LA(%)	25.7	20 %

Les résultats d'essai Los Angeles sont au-dessus aux spécifications.

### e) Essai d'Aplatissement (NF 18 – 561)

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

**Tableau. III.4 :** Résultats d'aplatissement des graviers.

Classe des graviers	3/8	8/15	Spécifications
Essai d'aplatissement	22	18	20 %

La valeur de coefficient d'Aplatissement pour la classe 3/8 est supérieure à la la valeur recommandée par les spécifications.

### f) Essai de propreté

**Tableau.III.5 :** Résultats de propreté des graviers.

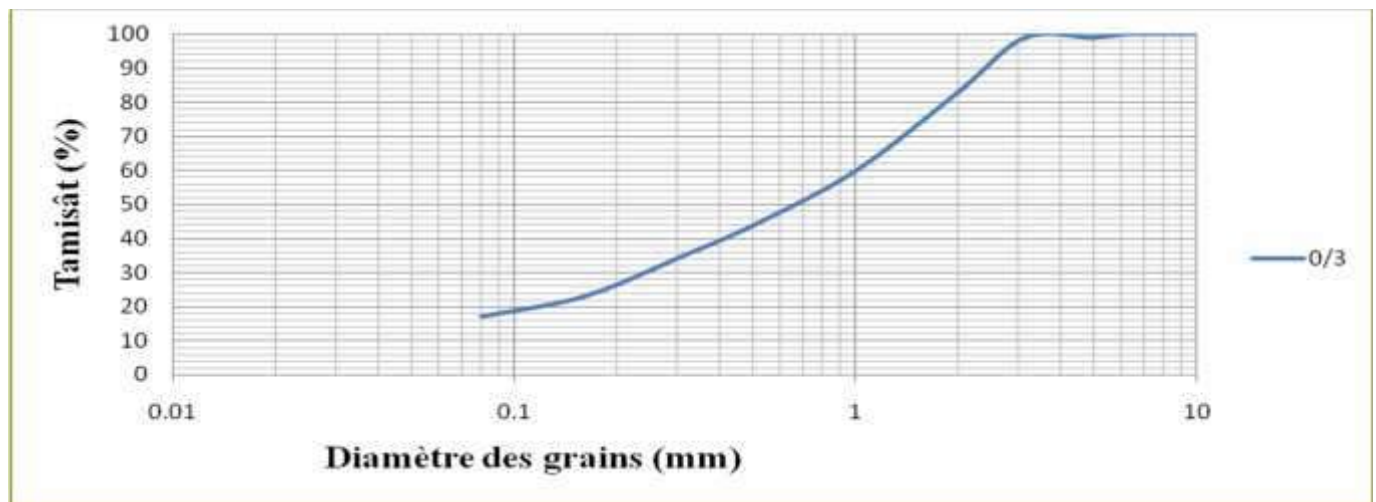
Classe des graviers	3/8	8/15	Spécification
propreté (%)	1.08	0.46	2 %

Pour l'essai de propreté les résultats sont conformes.

## III.2.2. Sable

### a) Analyse granulométrique [NF P 18-560]

Présentation les résultats par une courbe granulométrique de sable 0/3 :



**Figure. III.2 :** Le courbe granulométrique de sable.

### b) Masses Volumiques absolues

Résultats de sable 0/3 dans le tableau suivant :

**Tableau. III.6** : Résultat d'essai masses volumiques absolues de sable 0/3.

Classe des Sable (d/D)	0/3
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2.711

### c) Essai D'équivalent De Sable à 10% De Fines (NF P 18 – 597)

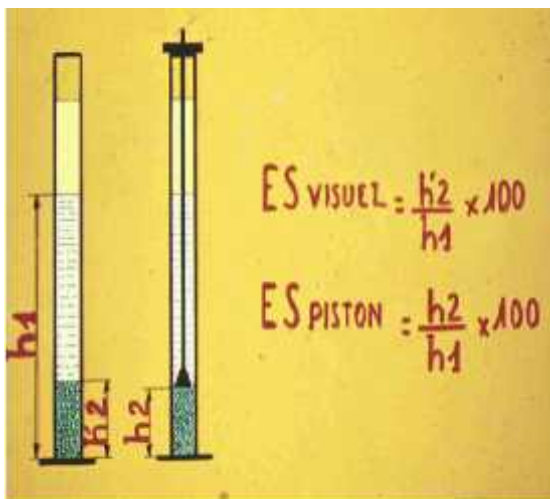
Cet essai utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable effectué sur une fraction 0/5 mm du matériau à étudier.

On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout au bout de 20 minutes on mesure les éléments suivants :

- **Hauteur h1** : sable propre + éléments fine (floculant).
- **Hauteur h2** : sable propre seulement.

On déduit l'équivalent de sable où on peut utiliser un piston comme la figure ci-dessous montre :

$$ES = 100. H2 / H1$$



**Figure. III.3** : Principe d'essai d'équivalent de sable.

Les résultats trouvés sont mentionnés dans le tableau suivant :

**Tableau III.7** : Résultats d'équivalent de sable.

sable	0/3	Spécification
ES (%)	70	ES 45%

### III.2.3. Liant hydrocarboné

Le liant hydrocarboné utilisé dans cette étude provient de l'unité de l'entreprise NAFTAL de Ghardaïa. On a procédé à la détermination de la classe du liant à partir des essais de caractérisation. Il s'agit des essais de pénétrabilité à l'aiguille à 25°C (NF EN 1426) et d'essai de point de ramollissement ou comme s'appelle la température bille et anneau (NF EN 1427) et densité relative (NA 5224).

Ces essais ont été réalisés au niveau de la salle des produits bitumineux du LTP.Sud Ghardaïa. Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau suivant.

**Tableau. III.8** : Caractérisations du liant.

Essai	Résultats	Spécification
Pénétrabilité à 25°C (1/10 mm)	43 1	40 à 50
Point de ramollissement (°C)	54	47 à 60
Densité relative à 25°C	1.041	1.0 à 1.10

À partir des essais de caractérisation effectués on peut dire que notre liant correspond à un bitume pur de classe 40/50.

### Conclusion

Les matériaux de qualité l'un des facteurs les plus importants qui assurent la durabilité des routes, qui est principalement liés aux caractéristiques de chaque matériau et qui nécessite l'approbation par rapport aux normes. Pour déterminer les propriétés et les caractéristiques d'un matériau il faut faire quelques essais par type de matériau, que ce soit en laboratoire ou sur le terrain et ensuite faire la comparaison des résultats obtenus par rapport aux valeurs recommandées par les normes, pour se prononcer sur la qualité de la construction.

## IV. DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET LES ESSAI REALISEES

### IV.1. INTRODUCTION

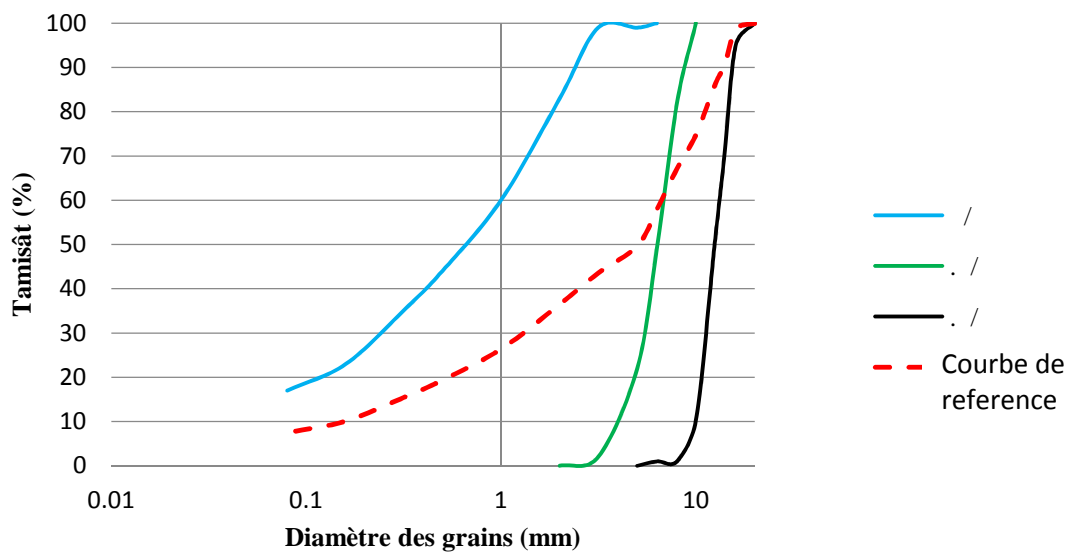
Dans ce chapitre on présente le dispositif expérimental réalisé dans notre étude, ce qui résume les différentes étapes et les essais réalisés dans ce projet de recherche, ainsi que la présentation des résultats de chaque essai et la méthode de quatre (04) niveaux.

### IV.2. ETUDE DE FORMULATION

#### IV.2.1. Composition granulaire

Nous avons choisi d'étudier un béton bitumineux à module élevé de classe granulaire 0/14 ; Il s'agit d'un mélange composé des trois classes granulaires : 0/3, 3/8 et 8/15.

À partir des courbes granulométriques moyennes des différentes classes granulaires choisies pour la réalisation de l'étude de formulation, on compose un mélange minéral dont la courbe granulométrique est inscrite dans les limites du fuseau défini par les spécifications (Figure IV.1).



**Figure IV.1** Disposition des courbes granulométriques des constituants par rapport la courbe médiane de fuseau.

À partir des courbes moyennes des classes granulaires, on calculera la courbe du mélange minéral, le pourcentage de passants à un tamis pour la courbe de mélange est la somme des pourcentages de passants au même tamis des courbes des constituants pondérés par les proportions correspondantes, la figure suivante présente la composition granulaire proposés dans ce projet d'étude.

■ Gravier de classe 8/15    ■ Gravier de classe 3/8    ■ Sable de classe 0/3

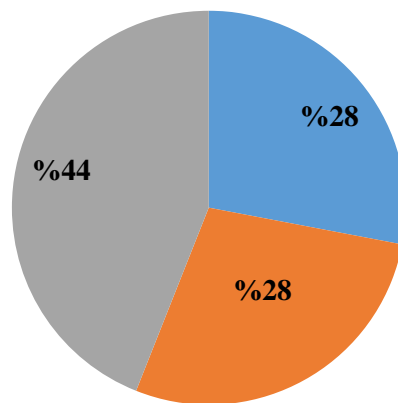


Figure IV.2 La composition proposée.

Les pourcentages obtenus sont déterminés d'après la courbe granulométrique de chaque agrégat en tenant compte du fuseau de référence 0/14, et la courbe est présentée dans la figure suivante :

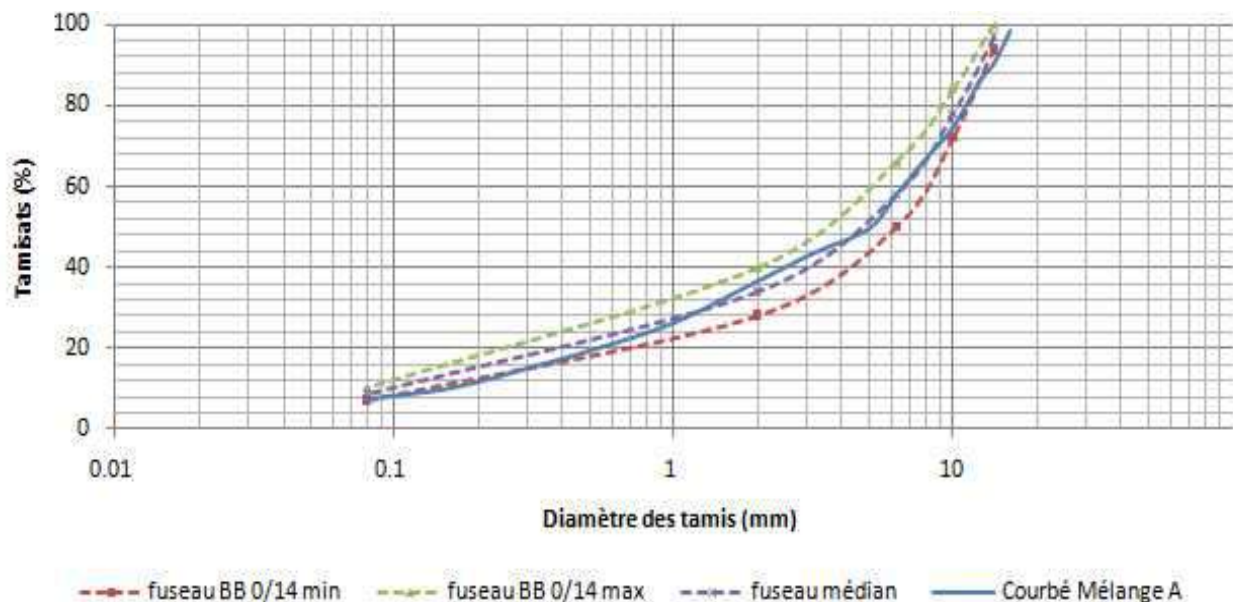


Figure IV.3 Courbe de mélange s'insère au fuseau de référence.

### IV.3.2. Teneur en liant

- Calcul de Coefficient Correcteur :

$$= 2,65 / MVRg \quad \text{avec} \quad MVRg = 100 \div \left[ \frac{4}{2,7} + \frac{2}{2,6} + \frac{2}{2,6} \right] = 2.682 \Rightarrow = 0.988$$

- Calcul la Surface Spécifique des Agrégats :

$$= 0.25G + 2.3S + 12s + 135f = 0.25 (42) + 2.3 (43) + 12 (8) + 135 (7) \Rightarrow \Sigma = 12.133 \text{ m}^2/\text{kg}$$

- Calcul le Teneur en liant

Dans le but de calculer le module de richesse  $K$ , on prend des valeurs qui s'insèrent dans la fourchette 3,3 à 3,9 pour le béton bitumineux, le tableau IV.1 présente la valeur de module de richesse et la teneur en liant obtenus.

**Tableau IV.1** Calcul le Teneur en liant.

la formule de teneur en liant : $k \cdot ( )^{0,2}$				
<b>Module de richesse</b>	<b>3.44</b>	<b>3.56</b>	<b>3.75</b>	<b>3.93</b>
Coefficient correcteur	0.988			
Surface Spécifique (m <sup>2</sup> /kg)	12.133			
<b>Teneur en liant (%)</b>	<b>5.6</b>	<b>5.8</b>	<b>6.10</b>	<b>6.40</b>

#### IV.4. EXPERIENCES EN LABORATOIRE ET RESULTATS DES ESSAIS

La méthode de quatre niveaux recommande toujours d'examiner la composition granulaire par essai PCG, avant passe aux essais mécaniques, cet essai évalue la composition granulaire à travers la mesure de pourcentage de vide. D'où il spécifie un taux de vide spécifique à un nombre de giration bien déterminé.

##### IV.4.1. Essai de presse à cisaillement giratoire (PCG)

Au but de réaliser l'essai, nous prenons 10 kg d'agrégats et nous les mélangeons avec du bitume avec des concentrations différentes. Les agrégats sont chauffés à 180°C, et une température de 160°C pour le bitume.

On verse le mélange dans des moules avec un poids déterminé. Pour ce dernier on considère une hauteur minimale de 115 mm sur un moule d'un diamètre de 150 mm, ce qui est compatible avec la condition  $h_{\min}/D$ .

$$0.66 \leq h_m / D = 0.76 \leq 1.05$$

Mettre le moule dans la presse et commence à expérimenter avec 200 girations et notez les résultats

**Tableau IV.2.** Caractéristiques de l'essai PCG.

Teneur en liant (%)	5.6	5.8	6.1	6.4
Masse volumique réel (g/cm <sup>3</sup> ) MVR	2.47	2.46	2.45	2.44
Masse de mélange pour une éprouvette (g)	5020.2	5013.3	4993.9	4974.7





Photo IV.1. Essai de presse cisaillement giratoire.

#### IV.4.2. Résultat d'essai PCG

Le tableau ci-dessous résume les principaux résultats de l'essai de presse cisaillement giratoire

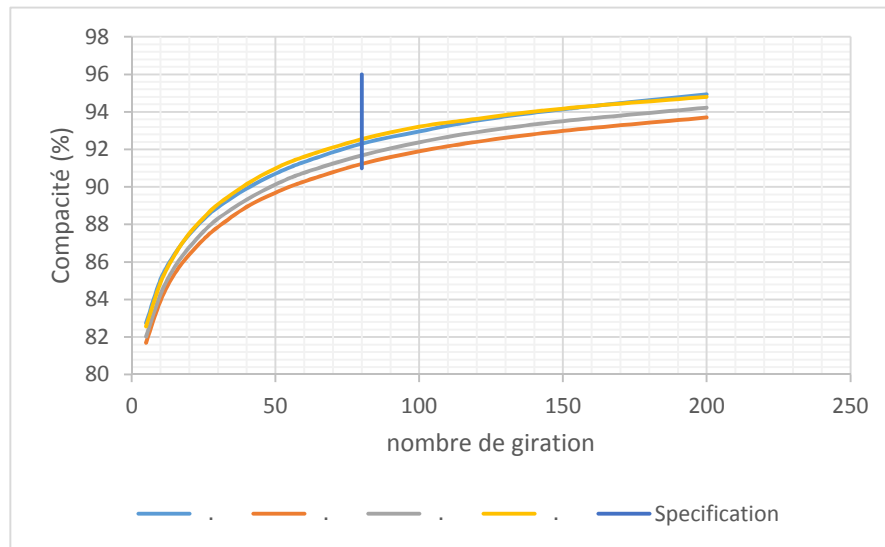
**Tableau IV.3.** Résultats de l'essai PCG.

Teneur en liant	5.6 %		5.8 %		6.1 %		6.4 %		Spécification
	MVA	% de vide	MVA	% de vide	MVA	% de vide	MVA	% de vide	
5	2042.5	<b>17.25</b>	2009.8	<b>18.30</b>	2009.8	<b>17.9</b>	2031.2	<b>17.43</b>	
10	2099.7	<b>14.93</b>	2064.9	<b>16.06</b>	2064.9	<b>15.7</b>	2088.6	<b>15.10</b>	V ≥ 10 %
15	2133.8	<b>13.55</b>	2100.9	<b>14.60</b>	2100.9	<b>14.2</b>	2125.3	<b>13.61</b>	
20	2158.9	<b>12.53</b>	2125.3	<b>13.61</b>	2125.3	<b>13.2</b>	2153.0	<b>12.48</b>	
25	2179.0	<b>11.72</b>	2145.4	<b>12.79</b>	2145.4	<b>12.3</b>	2173.6	<b>11.64</b>	
30	2194.9	<b>11.08</b>	2161.6	<b>12.13</b>	2161.6	<b>11.6</b>	2191.3	<b>10.92</b>	
40	2219.6	<b>10.08</b>	2187.9	<b>11.06</b>	2187.9	<b>10.6</b>	2217.8	<b>9.85</b>	
50	2238.9	<b>9.29</b>	2206.4	<b>10.31</b>	2206.4	<b>9.8</b>	2238.5	<b>9.01</b>	
60	2254.4	<b>8.67</b>	2221.2	<b>9.71</b>	2221.2	<b>9.2</b>	2253.7	<b>8.39</b>	
80	2278.5	<b>7.69</b>	2244.3	<b>8.77</b>	2244.3	<b>8.3</b>	2276.7	<b>7.45</b>	Vide: 4 à 9 %
100	2294.5	<b>7.04</b>	2260.7	<b>8.10</b>	2260.7	<b>7.6</b>	2293.0	<b>6.79</b>	
120	2308.7	<b>6.46</b>	2273.2	<b>7.60</b>	2273.2	<b>7.0</b>	2303.3	<b>6.37</b>	
150	2323.7	<b>5.86</b>	2287.6	<b>7.01</b>	2287.6	<b>6.4</b>	2316.8	<b>5.82</b>	
200	2343.4	<b>5.06</b>	2305.2	<b>6.30</b>	2305.2	<b>5.7</b>	2332.3	<b>5.19</b>	
<b>K</b>	<b>3.22</b>		<b>3.21</b>		<b>3.26</b>		<b>3.22</b>		

On évalue la composition granulaire proposée (figure IV.1) en différents dosages et on a trouvé que cette composition répond aux spécifications de la norme EN 13108 – 1 qui prend le nombre de giration 80 de BB de classe granulaire 0/14 comme référence.

Les différents dosages répondent aussi aux spécifications européennes qui ajoutent le pourcentage de vide à 10 girations comme indicateur aux présences de risques de présence d'orniérages.

Ci-dessous (Figure IV.4) les courbes de l'évolution de la compacité en fonction du nombre de girations pour chaque dosage :

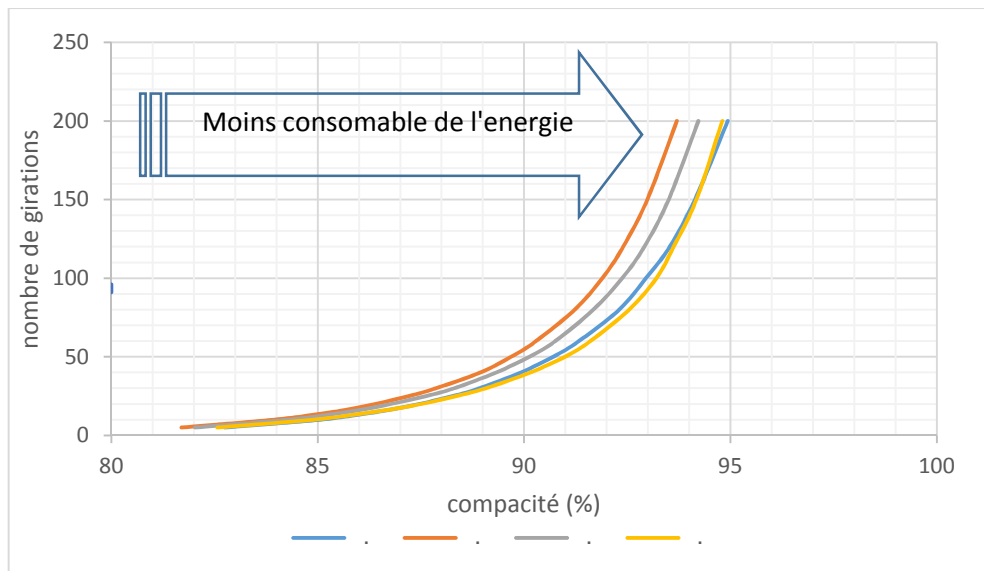


**Figure IV.4.** Evolution de compacité en fonction nombre de girations.

D'après les courbes d'évolution de pourcentage de vide en fonction de nombre de girations on peut dire:

- ✓ le dosage 5.8 présente l'évolution la plus faible, et le dosage 6.4 présente l'évolution la plus élevée, ce dernier revient au phénomène de lubrification de mélange, ce qui offre aux squelettes granulaires une maniabilité, donc ils peuvent diminuer plus de vide entre eux.
- ✓ plus la valeur de K est grande plus la compacité sera élevée après quelques passes de compacteur seulement dans la mise en œuvre [J.C. Moreux, 1987].

Ci-dessous (Figure IV.5) montre les courbes de l'évolution de nombre de giration en fonction de la compacité pour chaque dosage :



**Figure IV.5.** Evolution de nombre de rotations en fonction de la compacité.

D'après la figure ci-dessus on peut dire :

- ✓ La superposition des courbes au début des essais montre que la variation du dosage en liant n'a pas un impact important sur le taux d'énergie pour compacter nos mélanges.
- ✓ Mais progressivement cette influence devient importante et impact le taux de compactage on peut trouver en fin d'essai l'énergie à appliquer site pour atteindre la compacité voulue.
- ✓ On note aussi que les courbes des mélanges avec 5.6 et 6.40 % de bitume sont les plus proches à la compacité 100 % tandis que les dosages 6.1 et 5.8 % ont donné des compacités moins.
- ✓ Les mélanges avec 5.6 et 6.4% % nécessitent moins d'énergie de compactage pour avoir des compacités acceptables sur site.

Etant donné que la composition granulatoire proposée avec les différents dosages répond aux spécifications de PCG, donc on peut accéder aux essais mécaniques de niveau 01 qui est l'essai de tenue à l'eau, on adopte les deux dosages, minimal et maximal uniquement pour examiner la sensibilité de l'enrobé à l'eau, si ces deux dosages donnent des résultats acceptables, on peut juger que les dosages intermédiaires répondent aussi.

#### **IV.4.3. Essai de la tenue à l'eau (NF P 98 – 256 – 1)**

Cet essai permet de quantifier la tenue à l'eau d'un enrobé à chaud exprimé par un rapport des résistances à la compression avec immersion dans l'eau et à sec.

Pour chaque concentration de bitume nous prenons 6.5 kg d'agrégat et les mélanger avec du bitume, pour deux dosages 5.6 et 6.4%, et on les utilise pour confectionner de chaque dosage, 6 éprouvettes de masse de 1 kg.

Le mode opératoire de cet essai consiste à préparer 6 moules d'un diamètre de 80 mm, mettre les mélanges dans des moules et compacter dans la presse hydraulique pendant 5 minutes par une pression équivalente à 60 kN puis laisser refroidir les moules (pendant 24 heures dans notre cas).

Après démoulage, on sépare les 6 éprouvettes selon leurs masses volumiques apparente, en deux lots, l'un contient trois (3) éprouvettes conservées pendant 7 jours dans l'eau à une température de 18 °C et 3 autres conservés pendant 7 jours à l'air dans une chambre humide à la même température mais avec taux d'humidité de 50 %.

Après ce temps les éprouvettes sont écrasées dans une presse hydraulique commandée par un PC à une vitesse 60 mm/min (Photo IV.2).



**Photo IV.2.** Ecrasement l'éprouvette.

Après l'écrasement on obtient, la résistance des éprouvettes conservées en immersion notée ( $i$ ) et la résistance de ces éprouvettes conservées à l'air noté ( $C$ ), on définit la résistance de compression comme le rapport entre la charge d'écrasement maximal et la section de l'éprouvette.

Et d'après ces résistances on peut calculer, le rapport  $i/C$  qui exprime la tenue à l'eau de l'enrobé et qui sera comparé à la norme en vigueur.

#### **IV.4.4. Résultat d'essai Duriez**

Le tableau ci-dessous résume les principaux résultats de l'essai Duriez, qui sont la masse volumique apparente des éprouvettes et résistance à la compression :

Tableau IV.4. Résultats de l'essai Duriez.

	dosage	5,60 %		6,40 %	
		MVA (g/cm)	Résistance à la compression (bar)	MVA (g/cm)	Résistance à la compression (bar)
l'air	EP 01	2,237	104,21	2,174	109,91
	EP 02	2,235	101,17	2,214	106,2
	EP 03	2,201	98,58	2,108	86,12
	<b>Moyenne</b>	<b>2,224</b>	<b>102,7</b>	<b>2,165</b>	<b>108,1</b>
l'eau	EP 04	2,241	94,76	2,235	69,03
	EP 05	2,247	94,1	2,223	89,72
	EP 06	2,245	94,36	2,22	94,53
	<b>Moyenne</b>	<b>2,2443</b>	<b>94,407</b>	<b>2,226</b>	<b>92,1</b>
	<b>i/C</b>	<b>0,932</b>		<b>0,838</b>	
	<b>Spécifications</b>	<b>i/C 0,8</b>		<b>i/C 0,8</b>	

Et ci-après une présentation de la résistance moyenne à l'eau et l'air de chaque dosage.

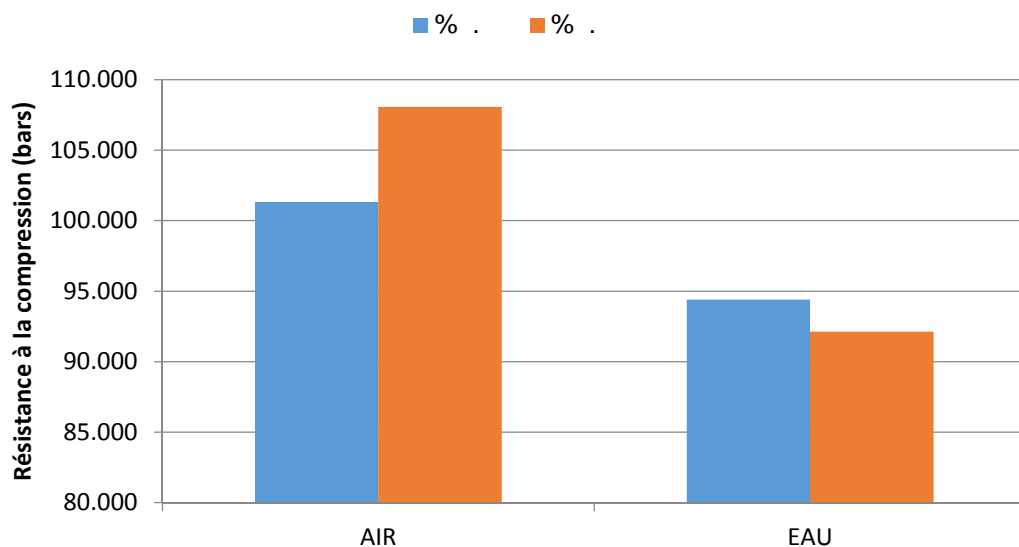


Figure IV.6. Histogramme de RC moyenne chaque mélange.

- ✓ Les deux dosages présentent des résultats acceptables pour le rapport (spécification européenne  $i/C = 0,8$ ),
- ✓ On remarque que la résistance à la compression du dosage 6.40 à l'air est la plus élevée ceci peut être expliqué par le taux élevé de bitume qui offre plus des efforts de cohésion, mais en contact de l'eau sa résistance diminue plus par rapport au dosage 5.6%.

#### IV.4.5. Essai d'orniérage

Après avoir des résultats acceptables aux spécifications de BBME 0/14 classe 03 pour les deux dosages examiner en niveau 01, nous avons préparé des mélanges avec deux dosages de bitume 5,6 et 6,4 % et peser 22 kg de mélange pour préparer des plaques d'enrobé de dimensions 500 mm x 180 mm x 100 mm en utilisant une table de compactage (FIGURE IV.) selon la norme EN 12697 – 33, qui consiste à exécuter un compactage au moyen d'une roue lourde (1 bar, 6 bars).



**Photo IV.3.** Table de compactage (compacteur à roue).

Les caractéristiques des plaques préparées sont présentées dans la tableau suivant :

**Tableau IV.5.** Caractéristiques des plaques fabriquées.

Teneur en liant	5.6	6.4
Masse volumique apparente	2.29	2.26
Masse volumique réelle	2.472	2.449
indice de vide	7.36	7.71

Les pourcentages de vides obtenus dans notre cas répondent à la spécification de la norme EN 13108 – 1 pour BBME, qui demande un taux de vide confiné entre 5 et 8 % pour exercer l'essai.

On laisse la plaque pendant deux jours après compactage, puis on simule sur l'appareil d'orniérage 1000 cycles (aller-retour) de passage des véhicules lourds avec des pneus de 6 bars de pression d'air et 5 kN de charge à la température ambiante, ce que on appelle 1000 cycles à froid.

Après terminé l'application de 1000 cycles à froid, on conserve ces plaques pendant 16 heures à 60 °C à l'intérieur de l'appareil d'orniérage, et nous commençons l'application de 1000, 3000, 10 000 et 30 000 cycles.

Les Photos ci -dessous montrent la méthode de relevé des lectures après la fin de l'application de chaque palier de cycles demandés.



Photo IV.4. Mesure de profondeur d'orniérage.

#### IV.4.6. Résultat d'essai d'orniérage

Tableau IV.6. Résultats de l'essai d'orniérage,

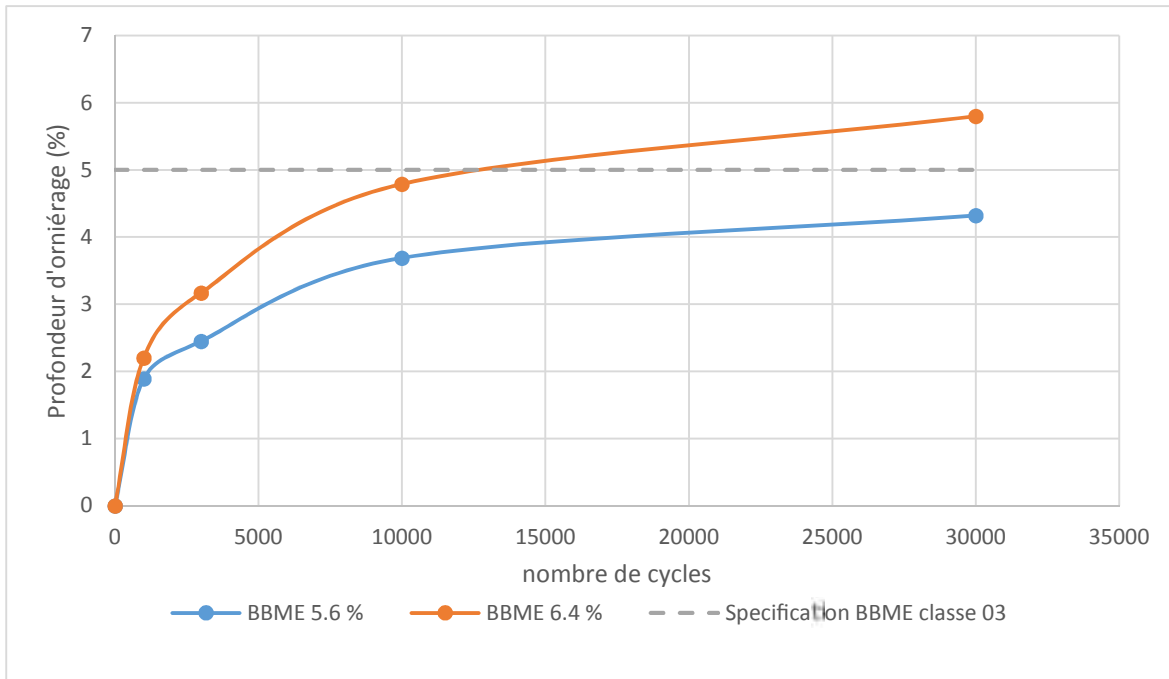
Cycles	BBME 5.6 %		BBME 6.4 %		Températures de matériaux	
	P. Orn-A (mm)	% Orn-A	P .Orn-B (mm)	% Orn-B	Temp-A (°C)	Temp-B (°C)
0	0	0	0	0	59.33	58.52
1000	1.89	1.89	2.2	2.2	59.64	58.33
3000	2.45	2.45	3.17	3.17	61.37	61.06
10000	3.69	3.69	4.79	4.79	60.91	59.08
30000	4.32	4.32	5.8	5.8	60.77	61.77

P. Orn : Profondeur d'orniérage

Pour les bétons bitumineux à module élevé de classe granulaire 0/14 comme notre cas, la norme européenne EN 13108 – 1 spécifie **30000 cycles** comme un critère, il demande un taux de déformation **inférieur ou égal à 5 %** pour la classe trois (3), et dans notre cas les résultats sont conformes pour les mélanges de 5.6 % et non conforme pour le dosage 6.40 % , ils restent acceptables pour les BBME moins résistant tel que de classe 02 ( $\leq 7.5 \%$ ) et classe 01 ( $\leq 10 \%$ ).

Ci-dessous, la figure IV.7 présente la courbe de l'évolution de pourcentage d'orniérage en fonction du nombre de giration pour chaque dosage :





**Figure IV.7.** Les courbes de l'évolution de pourcentage d'ornièrage en fonction du nombre de giration

- ✓ On remarque que la courbe correspondante au dosage de 6.40 % est plus haute que celle correspondante au dosage 5.60 %, ce que signifie que ce dosage est plus déformable, et moins résistant à l'ornièrage. Et ceci est bien expliqué dans différents documents tels que [J.L. DELORME, 2007] .
- ✓ Ce qui montre que l'augmentation du dosage en bitume a un effet négatif sur la résistance de mélange à l'ornièrage.
- ✓ Le dosage en bitume élevé est très sensible aux températures, spécialement à une haute température telle que celle de l'essai (60 °C) où il se ramollisse et présente un comportement élasto-plastique (déformation irréversible à l'état initial).

#### IV.4.7. L'essai Module et l'essai de fatigue

Après avoir les résultats conformes de l'essai PCG, tenue à l'eau et l'essai d'ornièrage comme nous avons montré dans le chapitre précédent, on a décidé de suivre l'étude avec le dosage 5,6 %, pour tester notre formulation avec ce dosage dans le troisième et el quatrième niveau.

On a préparé 84 kg d'enrobé avec ce dosage, pour préparer une plaque d'enrobé de dimensions 600 mm x 400 mm x 150 mm en utilisant la même table de compactage avec certaine de changement pour être compatible avec les dimensions de plaques, tels que les roues (Photo IV.5), suivant la même norme, qui consiste à exécuter un compactage au moyen de deux roues lourds avec 1 bar au début et 6 bars après certaines étapes.



**Photo IV.5.** Compactage d'une plaque de module et fatigue.

La plaque d'enrobé a été coupée par une scie mécanique (Photo IV.6), suivant des profils mentionnés dans la norme EN 12697 – 33, tels qu'ont mentionné dans le paragraphe § 1.3.3.4, pour formuler des éprouvettes d'une forme trapézoïdale de 56 mm à la base, 25 mm à la tête, une hauteur de 250 mm et épaisseur de 25 mm avec une tolérance de  $\pm 1$  mm (Photo IV.7).



**Photo IV.6.** Coupure de plaque au but de préparer les trapèzes par une scie mécanique.



**Photo IV.7.** Etapes de former une éprouvette trapézoïdale à partir une sous plaque de 25 mm d'épaisseur.

Dans notre cas on a préparé 26 éprouvettes correctes en termes de dimension, divisés en quatre groupes de quatre éprouvettes avec les spécifications recommandées de masse volumique ( $\pm 1\%$ ) et indice de vide ( $\pm 0.7\%$ ).

Après 15 jours de conservation, quatre éprouvette trapézoïdales ont été placé sur l'appareil de flexion à deux points avec une microdéformation de  $38\mu\text{def}$ , cette valeur est inférieure à la valeur maximale recommandée  $50\mu\text{def}$ , pour éviter tout risque de fatigue des éprouvettes au moment de chargement.

Le profil utilisé au but de tracer les courbes isochrone et isotherme sont est de 5 à 25 °C avec des pas de 5 °C, avec des fréquences de 0.5, 1, 2, 3, 10, 20 et 30 Hz.

#### IV.4.8. Résultat d'essai module complexe

Cet essai à pour but de mesurer le comportement des enrobés à travers les valeurs de module rigidité et module complexe, dans notre étude on a réalisé cet essai par la méthode de flexion en deux points (système console) sur des éprouvettes trapézoïdales, les résultats d'essai sont présentés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau IV.7.** Résultats de l'essai module complexes du dosage 5.6 % (15°C et 10 Hz)

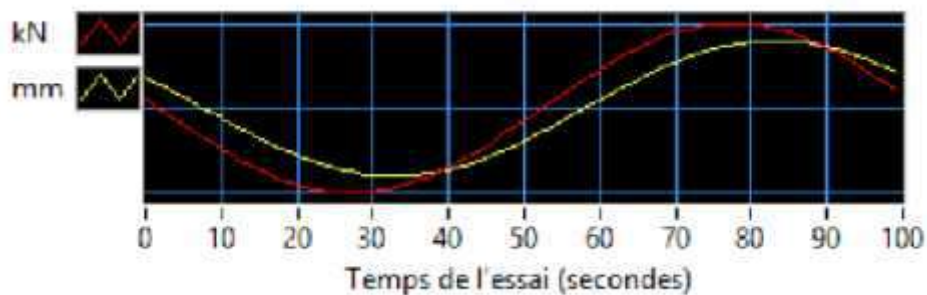
		EP 1	EP 2	Moyenne
Module de Rigidité (MPa) $ E^* $		12665	12528	12596.5
Angle de phase $\varphi$	(°)	12.11	12.67	12.39
	radians	$\pi/14.8$	$\pi/14.2$	$\pi/14.5$
Module dynamique E1		12386	12225	12305.5
Module de perte E2		2645	2737	2691

La norme européenne EN 13108 – 1 classe les BBME selon leur module de rigidité à une température de 15 °C et une fréquence de 10 Hz en trois classes, la classe 01 avec  $|E^*| \geq 9\,000\text{ MPa}$  et les classe 02 et 03 avec  $|E^*| \geq 11\,000\text{ MPa}$  .

Pour notre enrobé la valeur moyenne trouvée de  $|E^*|$  est au environ de 12600 MPa, elle caractérise un enrobé de classe.

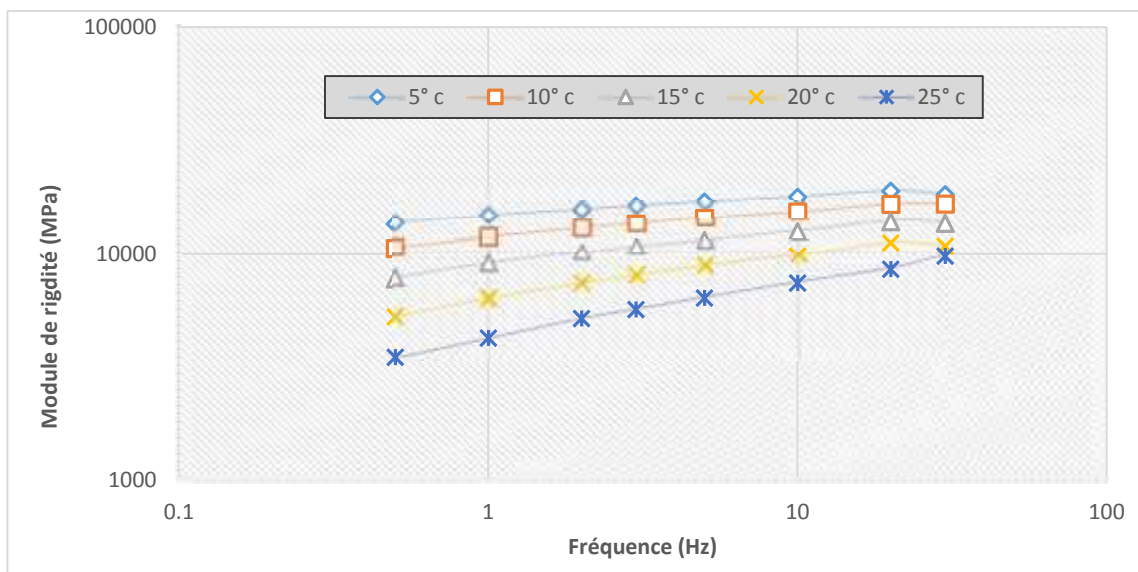
D’après [Y. LEFEVEUR, 2001] la valeur de l’angle de phase  $\varphi$  caractérise le comportement du matériau et l’énergie dissipée  $\phi$  II. 3.3.1, on a trouvé un angle de  $\pi/14 \leq \pi/2$  , dans ce sens on en déduit que le comportement élastique qui domine dans notre matériaux, cette valeur est reliée à l’énergie dissipée qui est de l’ordre de 2645 MPa.

La figure ci-dessous présente le retard entre l’application de charge, et la déformation



**Figure IV.8.** Courbe de force et déplacement en fonction du temps.

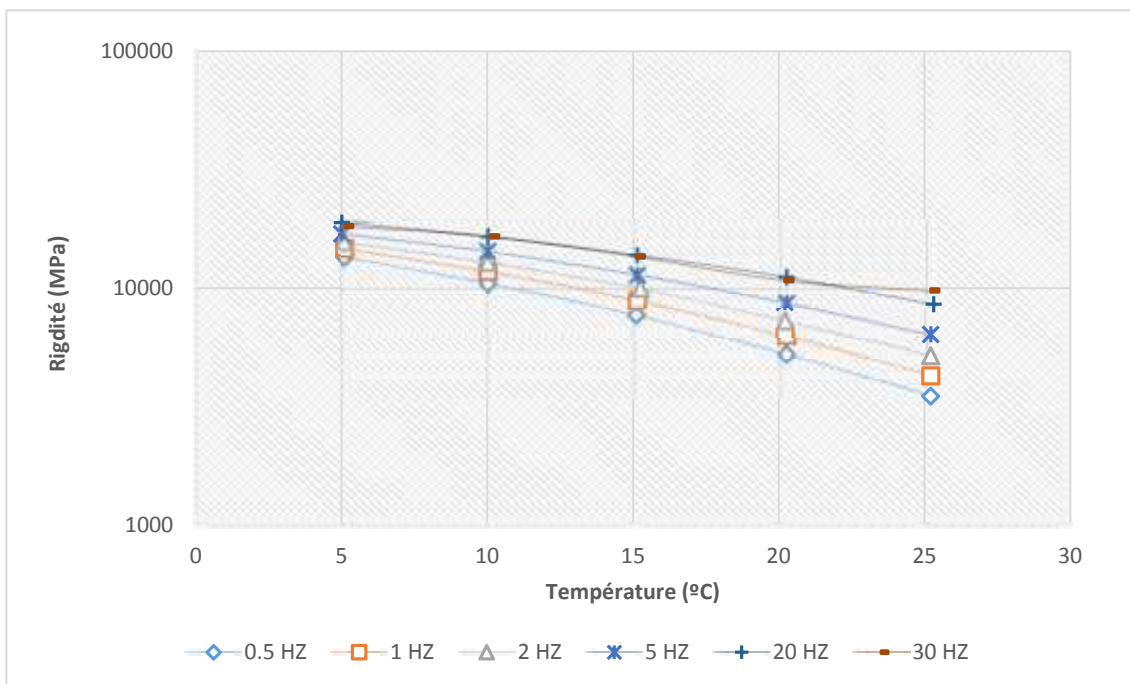
La figure ci-dessous (IV-9) est une courbe qui présente le module complexe, ou le Module rigidité  $|E^*|$  en fonction de la fréquence pour chacune des températures d'essais T, en coordonné bi – logarithmique, cette présentation s’appelle la courbe isotherme :



**Figure IV.9.** Courbe isothermes du module complexe

Comme on a exprimé dans les chapitres précédents (§ II.3.3.5) cette présentation montre la *sensibilité cinétique* (c'est-à-dire la variation de module avec la vitesse de la sollicitation), au début on peut voir d'une façon claire que :

- Le module est en relation positive avec la fréquence, (la fréquence ici est la simulation du trafic) ;
- La variation du module en fonction de la fréquence est linéaire, cette linéarité n'est pas vérifiée pour les fréquences entre 20 et 30 Hz, ce que peut être expliqué par l'apparition de phénomène de fatigue, qui se traduit par l'augmentation de la force de chargement dans cette fréquence;
- Avec la croissance de la fréquence, le module est devenu moins sensible à la température, à titre comparatif à une fréquence de 0,5 Hz le module perd de l'ordre 54.7 % de sa valeur pour un température entre 15 et 25 °C (4238 MPa), cette perte diminue progressivement jusqu'à 40 % à une fréquence de 25 Hz dans le même intervalle de température.



**Figure IV.10.** Courbe isochrones du module complexe.

Comme déjà mentionné dans le chapitre III sur la *sensibilité thermique* (c'est-à-dire la variation de module avec la température), et dans le but de démontrer cette sensibilité, nous avons présenté les résultats de mesure de module de rigidité de 5 jusqu'à 25 °C à différentes fréquences, on a pu constater ce qui suit :

- ✓ La valeur de module de rigidité diminue avec la croissance de température, donc la relation entre le module et température est proportionnellement inversée .



- ✓ La basse température correspond à la valeur la plus élevée du module : la décroissance de la température provoque une augmentation de la consistance du bitume et ce dernier devient plus dur.
- ✓ Avec la croissance de température, le module est devenu plus sensible à la température, à titre comparatif à une température de 15 °C le module perte de l'ordre 73 % de sa valeur entre -10 et 25 Hz, cette perte augmente progressivement jusqu'à 78 % à une température de 25°C dans le même intervalle de fréquence.

#### IV.4.9. Résultat d'essai fatigue

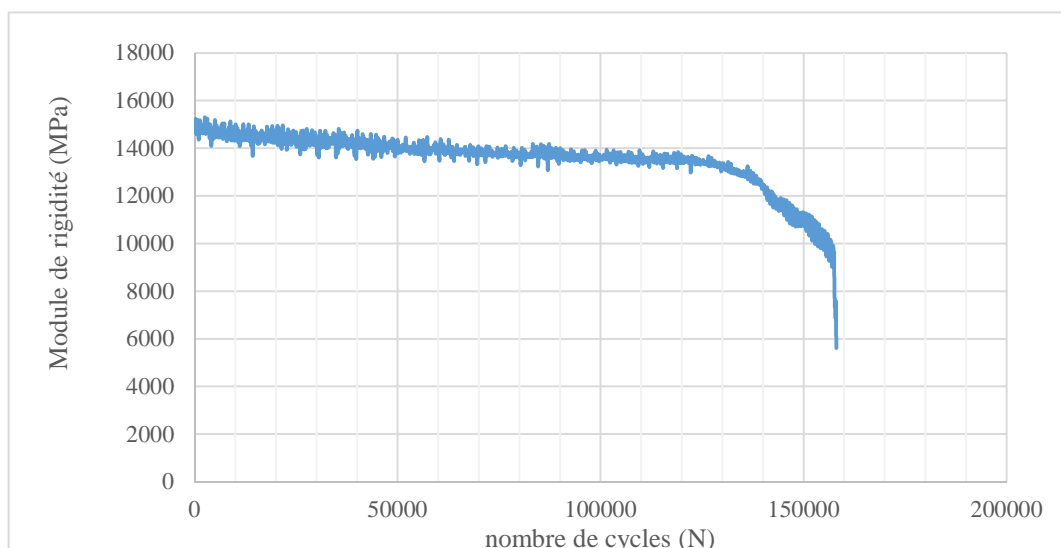
On utilise le même appareil (flexion deux points) pour déterminer la résistance à la fatigue, dans ce cadre on teste les éprouvettes à une température de 10 °C et une fréquence de 25 Hz, les conditions référentielles de la norme de spécification EN 13108 – 1 avec des microdéformations de 105, 108 et 111  $\mu$  .

Le tableau ci-dessus présente les résultats de l'essai avec ces trois niveaux de chargement

**Tableau IV.8.** les résultats de l'essai avec ces trois niveaux de chargement.

Déformation imposé ( $\mu$ def)	105	108	111
Rigidité initial (MPa)	15197	14446	14828
Nombre de cycles d'échec	158045	42466	2002905

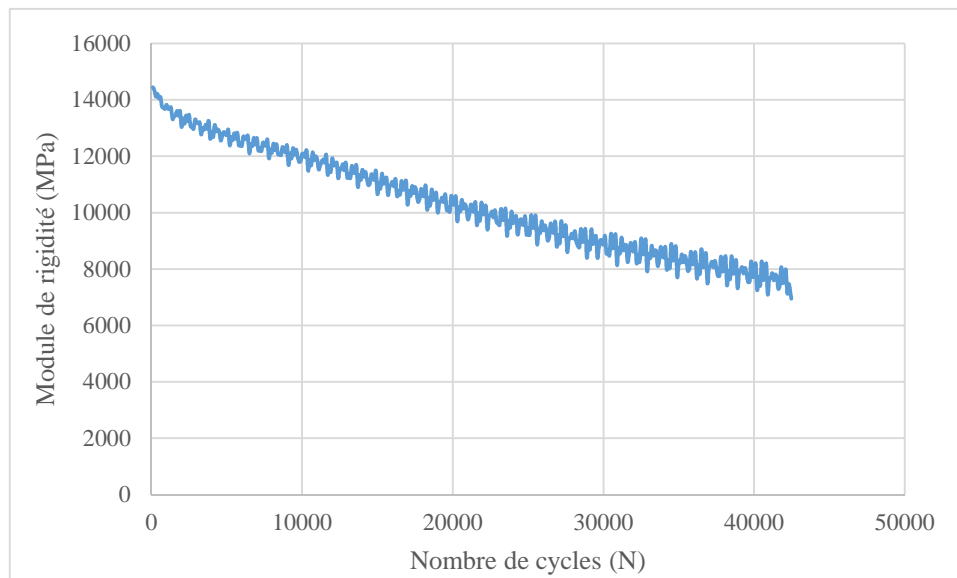
Durant l'essai on mesure l'évolution de module durant le chargement, les courbes présentent dans les figures du IV.11 au IV.13.



**Figure IV.11.** Evolution de module de rigidité en fonction le nombre de cycles de chargements à 105 microdéformation.

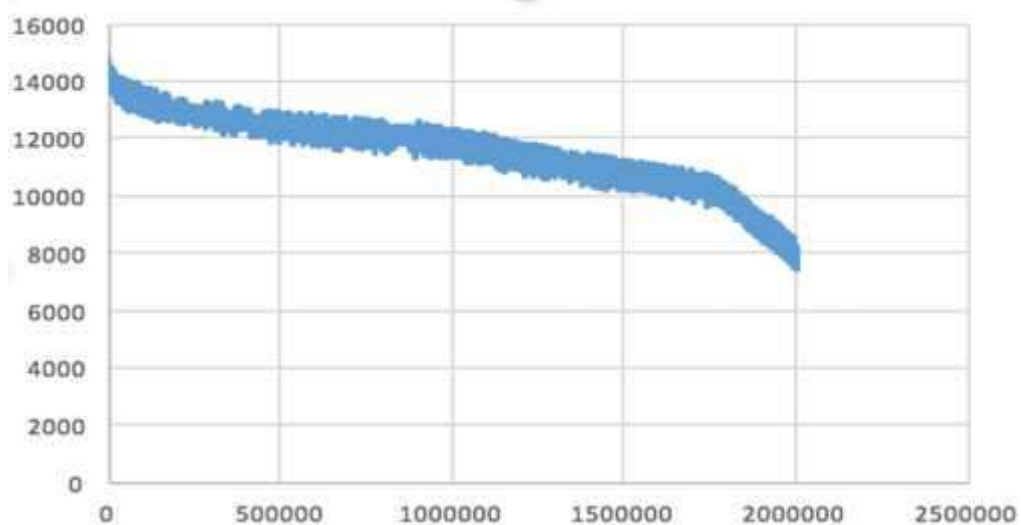
L'évolution du module dans ce cas n'a pas tracé la forme correcte mentionné dans le chapitre II, une absence de phase 1 d'échauffement, et une chute hors du l'ordinaire du module constaté dans la zone après 130000 cycles et d'une chute brusque après 150000 cycles.

Selon [Yann LEFEVEUR, 2001] cette forme est obtenue dans le cas d'une rupture par fatigue thermique.



**Figure IV.12.** Evolution de module de rigidité en fonction le nombre de cycles de chargements à 108 microdéformation.

L'évolution du module dans ce niveau de chargement n'a pas tracé la forme correcte cette fois aussi, on constate la phase une (1) d'échauffements, mais on observe une chute anormal du module cette fois aussi. La cause probable qui peut engendrer ce type problème est la mauvaise fixation des éprouvettes sur l'appareil.



**Figure IV.13.** Evolution de module de rigidité en fonction le nombre de cycles de chargements à 111 microdéformation.



L'évolution de module dans ce niveau a permet de tracer une forme correcte, l'évolution passe de la phase une (1) d'échauffements, et continue vers 50 % de la valeur de rigidité initiale ou en peut considérer que l'enrobé est fatiguée.

L'échantillon prends plus deux millions cycles pour atteindre la moitié de sa valeur de rigidité, avec ce niveau de résistance aux déformations l'enrobé est considère comme un BBME de classe 03. Malheureusement un point correct n'est pas suffisant pour tracer la droite de fatigue.

## CONCLUSION

Dans ce chapitre, des expériences ont été effectuées pour les quatre niveaux, Les résultats étaient les suivants :

- L'essai PCG a été réalisée avec des dosages (5.6% et 5.8% , 6.10%,6.40%) Les résultats étaient dans les normes .
- L'essai Duriez a été menée avec des dosages (5.6% et 6.40%) Les résultats étaient dans les normes .
- L'essai d'orniérage a été menée avec des dosages (5.6% et 6.40%) le résultat de (5.6%) étaient dans les normes mais les résultats du dosage de 6,4% étaient non conforme .
- L'essai Module et l'essai de fatigue ont été menés sur un enrobé dosé à 5.6% de bitume, les résultats étaient dans les normes .
- Les quatre niveaux ont été réalisé sur le dosage 5.6% , les résultats obtenus confirment un BBME de classe 3 .

# CONCLUSION GENERAL

# CONCLUSION GENERALE

L'utilisation des enrobés bitumineux dans la construction routière et aéronautique fait appel toujours à des nouvelles techniques d'évaluation de leurs caractéristiques, notre mémoire nous a permis d'aborder la méthode d'évaluation des caractéristiques des enrobés par la méthode des 04 niveaux

Au terme de cette mémoire, nous avons tiré les conclusions suivantes :

- Toute étude de formulation d'enrobé doit être précédé d'une caractérisation détaillée des matériaux utilisés (agrégats, bitume, additifs ...).
- L'étude de formulation nous permet de trouver la meilleure formule granulaire et les dosages en liant optimaux.
- La caractérisation de l'enrobé se fait selon la procédure des 04 niveaux.
- Le premier niveau nous permet de vérifier la compactibilité de l'enrobé au moyen de l'essai PCG, et la vérification de la tenue à l'eau de notre enrobé par l'essai DURIEZ.
- Après vérification des performances du 1<sup>er</sup> niveau avec certaines conditions, on ne peut pas se prononcer sur la qualité de l'enrobé sans passer par les essais de 2<sup>ème</sup> niveau.
- Le deuxième niveau concerne la déformation de l'enrobé sous l'effet du trafic, ceci est fait au laboratoire par l'essai d'orniérage, qui n'est qu'une simulation d'un passage des roues.
- Pour certain enrobé classique, on peut se limiter au 2<sup>ème</sup> niveau de vérification.
- Pour les enrobés spéciaux tels que les BBME et EME, on doit vérifier leurs comportements mécaniques par la détermination du module de rigidité et éventuellement le module complexe, cette étape est classé niveau 03.
- Pour plus de détail sur le comportement à long terme des enrobés spéciaux tels que le BBME et EME on doit vérifier le comportement vis à vis la résistance à la fatigue et c'est le 4<sup>ème</sup> niveau de caractérisation.
- L'exemple pratique étudié par nous même, montre que l'enrobé étudié a présenté de bonnes performances sur le 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> niveau ce qui nous a permis de continuer les autres niveaux et par la suite nous avons obtenu un module de rigidité qui réponds aux exigences d'un BBME Classe 03 (E de 12596 MPa), à ce niveau le comportement vis à vis de fatigue est vérifié.

- La réalisation des essais a quatre niveaux est relié principalement au système d'épreuve ce qui met en place des conditions de passage entre les niveaux, ceci dépend de la classe d'enrobé à formuler.
- Certaines propriétés des matériaux n'étaient pas conformes aux spécifications. Malgré cela, les caractéristiques de l'enrobé dosé à 5,6% étaient très bonnes et caractérisent un BBME classe 3.

# LISTE DES REFERENCES

**Abdelaziz BOUMADIANE, (2015) :** « Manuel technique de l'ingénieur routier : les enrobés bitumineux, formulation, exécution, contrôle de qualité », Laboratoire d'Expertise, d'Etude et d'Essais, L3E, Maroc.

**Bitume Québec, (2008) :** « Guide de bonne pratique : la mise en œuvre des enrobés », Bitume Québec, Québec, Canada.

**CDC-ENR05, (2005) :** «CAHIER DES CHARGES 'ENROBES A CHAUD», Le Ministre des Travaux Publics , Algérie.

**CST COLAS, (2006):** « Commission Scientifique et Technique», Paris, France.

**CTTP (2001) :** « *Contrôle Technique des Travaux Publics.* » , Algérie.

**De la Roche (1996) :** « Module de rigidité et comportement en fatigue des enrobés bitumineux », Ecole Centrale de Paris, France.

**DJABRI. A et HAMMANA. A ( 2016) :** «CARACTERISATION DES ENROBES BITUMINEUX RECYCLES » Université de Tébessa, Algérie.

**François OLARD, (2003) :** « Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à basses températures : relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé », Institut National des Sciences Appliquées INSA, Lyon, France.

**Hassan BAAJ, (2002) :** « Comportement a la fatigue des matériaux granulaires traites aux liants hydrocarbonés » Institut National des Sciences Appliquées INSA, Lyon, France.

**Ibrahim HACHANI, Djihad DAAS, (2013) :** « Etude d'un béton bitumineux modifié a la poudre de caoutchouc - Influence du mode de modification », UKM Ouargla, Algérie.

**Jean Claude MOREUX, (1987) :** « Compacteur a cisaillement giratoire et simulateur de circulation (Orniereur) », Laboratoire Central De Ponts Et Chaussées, Paris, France.

**Jean François CORTE et Hervé DI BENEDETTO, (2005) :** « Matériaux routiers bitumineux 2 : constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges bitumineux, volume 2 », Hermès Lavoisier, France.

**Jean-Luc DELORME, Chantal de la ROCHE, Louissette WENDLING, (2007) :** « Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés », Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France.

**KETTAB R. Bali et J.M. FLUREAU, (2002) :** « Conception et Réalisation des Chaussées en Milieu Désertique (Design and Realization of Pavements in Desert Environment) », Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Nancy. France.

**KHENGAOUI Safia, (2013) :** « Valorisation du sable de dunes en couche de roulement sable – bitume », UKM Ouargla, Algérie.

**M. Meunier, (2012) :** « Prédiction de l'orniérage lié aux déformations permanentes des enrobés bitumineux », Ecole Centrale de Nantes, France.

**Mai Lan NGUYEN, (2009) :** « Etude de la fissuration et de la fatigue des enrobés bitumineux » Institut National des Sciences Appliquées INSA, Lyon, France.

**Mandel, (1955) :** « les corps viscoélastiques à comportement linéaire - Comptes rendus de l'Académie des Sciences », t. 241, pp. 1910-1912, Paris, France.

**Mohammed AFECHKAR :** « la fatigue des enrobés bitumineux, Impact de la température et de la nature des granulats », CNER, Algérie.

**Prato et Coll, (2011) :** « Rating of bituminous mixtures : Wheel trekking tests Campagneo analysais »,

**Rilem17, (1998) :** « bituminous binder and mixes –Rilem report, n° 17 » ,London ,Angleterre.

**Said LALDJI, (2015):** « Les Enrobés bitumineux », ETS Cours.

**Yann LEFEUVRE, (2001) :** « Contribution à l'étude du comportement en fatigue des enrobés bitumineux, Etude de l'allongement des éprouvettes comme manifestation de l'endommagement diffus, Expérimentation - Modélisation », Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France.

## Liste des normes :

**EN 13108-1 (2007) :** « Spécifications des matériaux - Partie 1 : Enrobés bitumineux ».

**NF EN 12697 – 10 (2003) :** « Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 10 : Compactibilité ».

**NF EN 12697-22, (2004) :** « Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 22 – Essai d'Orniérage ».

**NF EN 12697-24, (2005) :** « Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 24 – Résistance à la fatigue ».

**NF EN 12697-26, (2004) :** « Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 26 – Module de rigidité ».

**NF EN 12697 – 31, (2003) :** « Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 31 : Confection d'éprouvettes à la presse à compactage giratoire ».

**NF EN 12697-33, (2004) :** « Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 33 – Confection d'éprouvettes au compacteur de plaque ».

**NF P 98 – 250 – 3, (1992):** « Essais relatifs aux chaussées: Préparation des mélanges hydrocarbonés - Partie 3: confection des éprouvettes dans un bloc de mélange hydrocarboné ».

**NF P 98- 256- 1, (2002) :** « Essais relatifs aux chaussées : Essais statiques sur mélanges hydrocarbonés - Partie 1 : Essai DURIEZ sur mélanges hydrocarbonés à chaud ».

**NF P 98 – 260 – 1, (2001):** « Essais relatifs aux chaussées: Détermination la résistance au fatigue des mélanges hydrocarbonés -Partie 1: Essai par flexion deux points à amplitude de flèche constante sur éprouvettes trapézoïdale isocèles ».



# ANNEXE A

## RESULTAT DES CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

# LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

## ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE DES GRANULATS

NF P 18- 560 Septembre 1990

Structure: Unité de Ghardaïa

N° Dossier interne : **BM / 2018**

Classe granulaire: (0/3)

Prise d'essai: 1200g

Équipements utilisés : **Balance**

Lieu de travail:

Date:

Opérateur: Bouazza/maellakh

N° D'inventaire :

Ouverture <b>Tamis</b>	Refus partiel	Refus cumulé	Pourcentage refus	Pourcentage passant	<i>Observations</i>
80					
63					
50					
40					
31.5					
25					
20					
16					
12.5					
10					
8					
6.3					
5	10	10	1	99	
4					
3.15	12	22	2	98	
2.5					
2	192	214	17	83	
1.60					
1.25					
1	276	490	40	60	
0.80					
0.63					
0.500	192	689	56	44	
0.400					
0.315	108	790	65	35	
0.250					
0.200					
0.160	144	934	77	23	
0.125					
0.100					
0.080	204	1138	83	17	

# LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

## ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE DES GRANULATS

NF P 18- 560 Septembre 1990

Structure:

N° Dossier interne :

Classe granulaire: (3/8)

Prise d'essai: 3000g

Équipements utilisés :

Lieu de travail:

Date:

Opérateur: Bouazza/maellakh

N°D'inventaire :

Ouverture <b>Tamis</b>	Refus partiel	Refus cumulé	Pourcentage refus	Pourcentage passant	<i>Observations</i>
80					
63					
50					
40					
31.5					
25					
20					
16					
12.5					
10					
8	38	38	1	99	
6.3	1032	1070	21	79	
5	1326	2396	48	52	
4	1330	3726	75	25	
3.15	799	4525	91	9	
2.5	79	4604	92	8	
2	28	4632	93	7	
1.60	6	4638	93	7	
1.25					
1					
0.80					
0.63					
0.500					
0.400					
0.315					
0.250					
0.200					
0.160					
0.125					
0.100					
0.080					

### Masse volumique absolue :

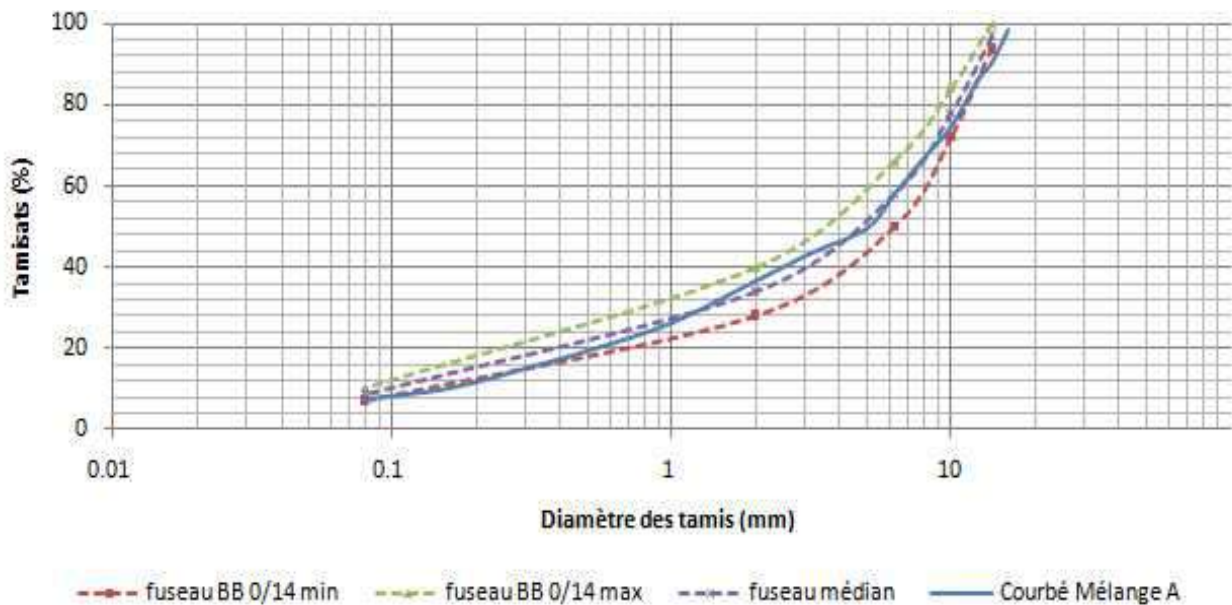
	0/3	3/8	8/15
P1	300	300	300
P2	2236.26	2236.36	2236.36
P3	2536.26	2536.26	2536.26
P4	2425.62	2423.68	2423.68
V	110.64	112.58	112.58
Masse volumique Absolue P1/V (g/cm)	2.711	2.664	2.664

# ANNEXE B

## ETUDE DE FORMULATION

**Tableaux B.1. CALCUL DE COMPOSITION GRANULAIRE.**

Tamis	0/3	44	3/8	28	8/15	28	Tamis	100
31,5	100	44	100	28	100	28	31,5	100
25	100	44	100	28	100	28	25	100
20	100	44	100	28	100	28	20	100
16	100	44	100	28	95	27	16	99
14	100	44	100	28	70	19	14	91
12,5	100	44	100	28	50	14	12,5	86
10	100	44	100	28	10	3	10	75
8	100	44	82	23	1	0	8	67
6,3	100	44	49	14	1	0	6,3	58
5	99	44	22	6	0	0	5	50
3,15	99	44	2	0	0	0	3,15	44
2	83	37	0	0	0	0	2	37
1	60	26	0	0	0	0	1	26
0,500	44	19	0	0	0	0	0,500	19
0,315	35	15	0	0	0	0	0,315	15
0,16	23	10	0	0	0	0	0,16	10
0,080	17	7	0	0	0	0	0,08	7



**Figure B.1 Courbe de mélange s'insere au fuseau de reference.**

**Informations Théoriques**

La Lois : Teneur en liant =  $k \cdot ( )^{0,2}$

avec :

- k** : Module de richesse : exprime l'épaisseur d'enrobage
- : Coefficient correcteur des masses volumiques
- : Surface Spécifique

**Tableaux B.2. CALCULE DE SURFACE SPECIFIQUE**

	Propor.	Coef.	Produit
G	42	0	0,11
S	43	2	0,98
s	8	12	0,95
f	7	135	10,10
	100		12.133

*Calcul de Coefficient Correcteur :*

$$= 2,65 / \text{MVRg}$$

$$\text{MVRg} = 2,682$$

$$= \mathbf{0,988}$$

**Tableau B.3 TENEUR EN LIANT DE LA PREMIERE FORMULATION**

<i>Module de richesse</i>	3,44	3.56	3,75	3,93
<i>Coefficient correcteur</i>	0,988			
<i>Surface Spécifique(m<sup>2</sup>/kg)</i>	12,133			
<i>Teneur en liant (%)</i>	<b>5,6</b>	<b>5.8</b>	<b>6.1</b>	<b>6,4</b>
<i>Densité théorique(g/cm<sup>3</sup>)</i>	2,472	2.46	2,45	2,449

# **ANNEXE C**

RESULTAT DE LA  
PARTIER  
EXPERIMONTAL



**TABLEAU C.1** Résultats de l'essai module complexes du dosage 5.6 %

Fréquence (Hz)	Température (°C)	Charge (kN)	Déformation (mm)	Effort (kPa)	Microdéformation	Angle de phase (°)	Rigidité (MPa)	Composant réel (MPa)	Composant imaginaire (MPa)	Module complexe
0,5	5,1	0,019556	0,036404	382,654109	28,193821	9,946095	13572	13368	2344	$E^* = 13368 + i 2344$
1	5,1	0,023087	0,039672	451,767534	30,724438	9,202443	14704	14515	2351	$E^* = 14515 + i 2351$
2	5,1	0,025344	0,040921	495,986895	31,691447	8,76079	15651	15468	2383	$E^* = 15468 + i 2383$
3	5,1	0,026184	0,040708	512,516137	31,526749	8,564577	16257	16075	2420	$E^* = 16075 + i 2420$
5	5	0,02773	0,041313	543,096743	31,995493	7,797511	16974	16817	2301	$E^* = 16817 + i 2301$
10	5	0,029904	0,04266	587,148291	33,038847	7,573458	17771	17618	2334	$E^* = 17618 + i 2334$
20	5	0,03272	0,044237	648,565824	34,259975	5,302613	18931	18852	1727	$E^* = 18852 + i 1727$
30	5,1	0,03985	0,056806	803,611758	43,994324	8,935548	18266	18058	2753	$E^* = 18058 + i 2753$
0,5	10	0,01471	0,035258	287,831431	27,305973	13,726517	10541	10240	2501	$E^* = 10240 + i 2501$
1	10	0,018476	0,039615	361,548784	30,6803	12,371183	11784	11511	2525	$E^* = 11511 + i 2525$
2	10	0,021235	0,04167	415,592428	32,272233	11,796258	12878	12606	2632	$E^* = 12606 + i 2632$
3	10,1	0,022423	0,042001	438,943978	32,528393	11,182181	13494	13238	2616	$E^* = 13238 + i 2616$
5	10	0,024346	0,042972	476,890411	33,27973	10,173567	14330	14105	2528	$E^* = 14105 + i 2528$
10	10,1	0,027204	0,045208	534,407246	35,012124	9,811078	15264	15042	2591	$E^* = 15042 + i 2591$
20	10	0,031204	0,048443	619,624508	37,51716	7,770376	16516	16369	2200	$E^* = 16369 + i 2200$
30	10,1	0,039874	0,062947	806,442926	48,750266	10,734299	16544	16273	2981	$E^* = 16273 + i 2981$
0,5	15,1	0,012837	0,04189	251,192375	32,442661	17,812781	7743	7372	2368	$E^* = 7372 + i 2368$
1	15,1	0,017108	0,048316	334,785814	37,418766	16,247677	8947	8590	2503	$E^* = 8590 + i 2503$
2	15,2	0,020117	0,050649	393,738136	39,225569	15,150858	10038	9689	2623	$E^* = 9689 + i 2623$
3	15,1	0,021495	0,050827	420,818614	39,363189	14,545215	10691	10348	2684	$E^* = 10348 + i 2684$
5	15,1	0,020278	0,04483	397,30521	34,71926	13,411416	11443	11132	2651	$E^* = 11132 + i 2651$
10	15,2	0,023559	0,047739	463,170249	36,971953	12,679787	12528	12225	2737	$E^* = 12225 + i 2737$
20	15,1	0,028918	0,053705	575,835669	41,592186	10,414994	13845	13625	2459	$E^* = 13625 + i 2459$
30	15,1	0,03292	0,063549	670,516395	49,216132	12,447211	13624	13329	2821	$E^* = 13329 + i 2821$

0,5	20,2	0,00895	0,042916	175,133797	33,236853	23,120837	5269	4846	2069	$E^* = 4846 + i 2069$
1	20,2	0,011936	0,047769	233,577742	36,995636	20,916497	6314	5898	2254	$E^* = 5898 + i 2254$
2	20,2	0,014931	0,051485	292,2622	39,87287	19,577257	7330	6906	2455	$E^* = 6906 + i 2455$
3	20,2	0,01623	0,051781	317,797007	40,102492	18,712946	7925	7506	2541	$E^* = 7506 + i 2541$
5	20,2	0,017997	0,052166	352,748199	40,400547	17,277527	8731	8339	2589	$E^* = 8339 + i 2589$
10	20,2	0,02062	0,053555	405,912313	41,476388	15,899595	9787	9417	2665	$E^* = 9417 + i 2665$
20	20,2	0,021539	0,049731	430,519327	38,514581	13,383004	11180	10889	2533	$E^* = 10889 + i 2533$
30	20,2	0,025961	0,063758	533,711094	49,377912	15,242061	10818	10475	2705	$E^* = 10475 + i 2705$
0,5	25,2	0,005948	0,042884	116,394403	33,212027	27,619373	3505	3105	1625	$E^* = 3105 + i 1625$
1	25,2	0,008187	0,048545	160,2086	37,595995	25,941296	4261	3832	1864	$E^* = 3832 + i 1864$
2	25,2	0,010607	0,051722	207,647851	40,056905	24,256711	5184	4727	2129	$E^* = 4727 + i 2129$
3	25,2	0,01171	0,052087	229,332225	40,338988	23,073521	5685	5231	2226	$E^* = 5231 + i 2226$
5	25,2	0,013341	0,052822	261,638584	40,908581	21,409646	6396	5956	2329	$E^* = 5956 + i 2329$
10	25,2	0,015856	0,054285	312,66489	42,04166	19,951356	7437	6998	2518	$E^* = 6998 + i 2518$
20	25,3	0,016291	0,049443	327,686484	38,29159	17,451506	8558	8186	2497	$E^* = 8186 + i 2497$
30	25,2	0,022533	0,0614	465,88717	47,55157	16,909484	9798	9420	2697	$E^* = 9420 + i 2697$

استخدام خليط من الإسفلتية للطرق وبناء الطائرات هو معروف جيدا، حيث أنها تمثل المواد الأساسية لإنتاج مختلف هذه الهياكل، تطوير هذه المواد يحسن نوعية الهياكل وكذلك متانتها، ومن بين التحسينات التي أدخلت هي الإسفلتية ذات المعامل هذه التقنية تستخدم على نطاق واسع في العالم وكما هو معروف في يستحق يقدم نهاية الدراسة.  
ينطوي العمل على تقديم الخطوات المختلفة لمعامل عالي لصناعة الإسفلت وكذلك صياغة واستخدامها، مع عرض صيغة نموذجية الإسفلتية ذات المعامل المر .  
المفتاحية : خليط الإسفلت الإسفلتية الإسفلتية ذات المعامل المرتفعة  
تجربة الإرهاق

## RÉSUMÉ

L'utilisation des enrobés bitumineux dans la construction routière et aéronautique est très connue, ils représentent un matériau fondamental pour la réalisation des différentes couches formant ces ouvrages. Le développement de ces matériaux permet d'améliorer la qualité des ouvrages ainsi que leur durabilité. Parmi les améliorations apportées sur les enrobés bitumineux on peut citer le développement des enrobés à module élevée, cette technique qui très utilisée dans le monde et peut connu en Algérie, mérite d'être présentée dans une mémoire de fin d'étude.

Le travail consiste en la présentation des différentes étapes de fabrication des enrobés à module élevée ainsi que leurs formulations et utilisation, avec la présentation d'un exemple de formulation de béton bitumineux à module élevée.

Mots clés : Enrobé bitumineux, béton bitumineux, béton bitumineux à module élevée, Module Complexe, Orniéragé, Fatigue, Tenue à l'eau

## ABSTRACT

The use of bituminous mixes in road and aeronautics construction is most known materials, which represent a fundamental materiel for the realisation of the different layer forming these structures. The development of these materials improves the quality of the structures as well as their durability. Among the improvement made to bituminous mixed, is the development of asphalt concrete with high modulus, a technique that is using in the world and may be known in Algeria, and deserves to be present in a final dissertation.

The study consists to present the different stages of manufacture of high modulus Asphalt concrete as well their formulations and use, with the presentation of an example of high modulus asphalt concrete formulation.

Keywords: bituminous mixture, Asphalt concrete, high modulus asphalt concrete, Complex Modulus, Rutting, Fatigue, Resistance to water