

## REMERCIEMENTS

*J'exprime mes remerciements à l'ensemble des personnes ayant contribué à l'aboutissement de ce travail de mémoire.*

*Je voudrais exprimer toute ma gratitude, au Mr HOUARI HACHMI mon encadreur de mémoire.*

*Je remercie les personnels du laboratoire des travaux publics  
L T P E UNITE DE SAIDA.*

*Je remercie le chef du laboratoire de mon université « Mr OTBI » de son soutien*

*Sans oublier le patron de l'entreprise monsieur zouaoui mustapha  
et tous les travailleurs de cette entreprise*

*Je remercie mon collègue MOUSSAOUI MADDAH et tous les  
étudiants de notre promotion*

.

### ***Dédicace***

*je voudrais dédier ce mémoire à l'ensemble de notre famille :  
 , à nos chères mères, à nos pères, à ma sœur amina, à nos  
 frère, et mon cousin SOFIANE et la famille KOURAT, mes  
 amis qui ont su me donner le goût du travail, ,à mon chère  
 amis BOUTAIBA BAGHDAD*

*pour nous avoir encouragé. Ainsi, je remercie tous les gens qui  
 ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail*

## **Résumé :**

La rupture de la couche de roulement est parmi les causes principale de la dégradation des voiries, dans notre pays, cette couche de roulement est constituer généralement d'un béton bitumineux et qui sera sous l'effet d'un trafic intense est dynamiques.

Pour cela on choisit étudies les caractéristiques mécanique dynamique du BB tel queLe module élastiques complexe le module de cisaillement dynamique et le coefficient de poisson par des essais très simples et moins couteux comme l'essai fréquence de résonance (ERUDITE) et voir à l'avenir les possibilités d'exploitations ces données dans le dimensionnement des couche de roulement souple en béton bitumineux.

**Mots clés :** essais non destructifs, béton bitumineux, module d'élasticité dynamique, éprouvettes, résistance, fréquence de résonance

## ملخص

كسر الطبقة السطحية هي من بين الأسباب الرئيسية لتدهور الطرق في بلادنا، والطبقة السطحية عموما تشكل الخرسانة الإسفلتية وهذا هو تحت تأثير حركة المرور الكثيفة الدينامكية لهذا علينا أن نختار الخصائص الميكانيكية الحيوية مثل معامل مرونة الدينامكية و معامل القص الديناميكي ونسبة بواسون بواسطة اختبارات بسيطة وأقل تكلفة كتردد صدى ومحاولة رؤية بيانات تصميم الخرسانة الإسفلتية

الكلمات الرئيسية :

الاختبارات غير المتلفة، معامل مرونة الدينامكية ، الخرسانة الإسفلتية

المقاومة، تردد صدى، عينة

# Table de matiers

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| INTRODUCTION GENERALE .....                                                                          | 3  |
| chapitre I GENERALITES SUR LES MATERIAUX BITUMINEUX                                                  |    |
| 1- GENERALITES SUR LES MATERIAUX BITUMINEUX .....                                                    | 4  |
| 1.1. Fabrication du bitume .....                                                                     | 4  |
| 1.2Composition chimique et structure des bitumes .....                                               | 5  |
| 2. Propriétés rhéologiques des liants bitumineux.....                                                | 7  |
| 2.1 Classes de comportement des bitumes purs en fonction de déformation et de la température T ..... | 7  |
| 2.2 Les caractéristiques classiques.....                                                             | 8  |
| 2.3 Caractérisation des propriétés rhéologiques du liant dans le domaine linéaire (vel) .....        | 10 |
| 3-CLASSES DE BITUMES .....                                                                           | 13 |
| 4- mélange bitumineux.....                                                                           | 13 |
| 4.1 Description du mélange bitumineux .....                                                          | 13 |
| 4.2. Les spécifications des bitume.....                                                              | 14 |
| 4.3 Le choix de la classes de bitume .....                                                           | 15 |
| 5. La formulation du mélange bitumineux.....                                                         | 15 |
| 6. Propriétés rhéologiques des enrobés bitumineux .....                                              | 17 |
| 6.1 Généralités .....                                                                                | 17 |
| 6.2 Grandes classes de comportement .....                                                            | 17 |
| 6.3 Exemples de caractérisation des enrobés à basse température.....                                 | 19 |
| 6.4 MODÉLISATION DU COMPORTEMENT LINÉAIRE (VEL).....                                                 | 25 |
| 7. LES ESSAIS MECANIQUE SUR LES ENROBÉS BITUMINEUX .....                                             | 27 |
| 7.1 Essai Marshall (NF P 98-251-) .....                                                              | 27 |
| 7.2 Essai Duriez (NF P 98 -251).....                                                                 | 28 |
| 8. L'enrobé de bitume dans la chaussée.....                                                          | 29 |
| 8.1 La place des matériaux bitumineux dans les structures routières .....                            | 29 |
| CHAPITRE II METHODE DE LA FREQUENCE DE RESONANSE                                                     |    |
| 1 .Introduction .....                                                                                | 32 |
| 2.Notion physique.....                                                                               | 32 |
| 2.1Notion physique sur les vibrations.....                                                           | 32 |
| 3. Méthodes non destructives de caractérisation du béton bitumineux .....                            | 35 |
| 4. Méthode de la fréquence de résonance.....                                                         | 39 |

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1Principes généraux.....                                                  | 39 |
| 4.2 Dispositifs de mesure : .....                                           | 40 |
| 4.3 Procédure de contrôle .....                                             | 42 |
| chapitre III partie expérimentale                                           |    |
| 1-Procédures expérimentales, résulta et discussion .....                    | 45 |
| 1.1Introduction .....                                                       | 45 |
| 2-Matériau d'essai.....                                                     | 45 |
| 2.1-Essais sur <i>granulaire</i> .....                                      | 45 |
| 3. Essais sur les mélanges BB 0/14.....                                     | 56 |
| 3.1-Essais KUMAGAWA.....                                                    | 56 |
| 3.2 Mesure de la masse volumique apparente de béton <i>bitumineux</i> ..... | 58 |
| 4. Les résultats obtenus sur L T P O- SAIDA: .....                          | 59 |
| 4.1 .Les résultats obtenus sur le Béton bitumineux 0/14 .....               | 59 |
| 4.2Les résultats obtenus sur bitume.....                                    | 61 |
| 5. Essai sur ERIDUT .....                                                   | 61 |
| 5.1-Protocole de l'expérience .....                                         | 61 |
| 6.Conclusion : .....                                                        | 69 |
| Conclusion Générale: .....                                                  | 71 |
| RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....                                            | 72 |
| Liste des figures.....                                                      | 75 |

### INTRODUCTION GENERALE

Les structures de chaussées routières sont soumises, en service, à des sollicitations très complexes. La circulation automobile et le climat ont une influence importante sur le comportement des matériaux de chaussées, d'où l'importance de bien connaître les caractéristiques dynamiques avec un instrument ultrasons tel l'ERIDUT.

Dans notre étude on cherche des nouvelles méthodes qui vont contribuer à simplifier les essais mécaniques qui ont été consommé plus de temps et cout, et pour éviter ces problème pertinente dans les méthodes classique on est dirigé vers une méthode récente qu'appelle fréquence de résonance

C'est dans ce contexte de besoins de connaissance de l'évolution des caractéristiques intrinsèques des matériaux mis en œuvre et de connaissance de l'évolution générale des chaussées, qu'émergent et s'affirment les techniques non destructives de contrôle. En revenant à la résistance des matériaux, certaines caractéristiques du béton bitumineux sont indispensables lors de la conception et du contrôle des chaussées. Parmi ces caractéristiques, nous avons le module d'élasticité longitudinale, le module d'élasticité transversal et le coefficient de Poisson. Ces deux derniers figurent dans le cas de la déformation transversale ou de cisaillement, on parle de coefficient de Poisson «  $\mu$  », et de module d'élasticité transversal «  $G$  » appelé aussi module de cisaillement et module de rigidité.

# **Chapitre I**

## **GENERALITES SUR LES MATERIAUX BITUMINEUX**

## 1- GENERALITES SUR LES MATERIAUX BITUMINEUX

Les bitumes sont surtout composés de carbone et d'hydrogène, d'où leur nom d'hydrocarbure.

Le bitume est utilisé dans l'industrie pour ses propriétés d'étanchéité et d'isolation (thermique et acoustique).

Néanmoins, les applications routières sont les plus nombreuses puisque, en effet, 90% de la production de bitume est utilisée sous forme d'enrobés et d'enduits superficiels. Par ailleurs, on estime que la totalité des réserves mondiales de pétrole brut devrait dépasser les 600Gt, ce qui laisse présager un long et bel avenir à cette industrie [1].

En outre, il convient de distinguer les termes de bitume et de liant hydrocarboné trop souvent confondus. En effet, le liant hydrocarboné peut être bitumineux, goudronneux, à base de bitume fluidifié...

### 1.1. Fabrication du bitume

Concernant les principaux modes de fabrication des bitumes, citons la distillation en raffinerie des pétroles bruts lourds contenant suffisamment de fractions lourdes pour produire du bitume. La première étape de ce processus consiste en une distillation atmosphérique qui permet de séparer les fractions légères du pétrole (essences, kérosène, gaz) des fractions lourdes, ces dernières étant ensuite distillées sous vide pour produire fuels, huiles et bitume. Outre la distillation, citons encore les procédés de soufflage et de dés asphaltage. Le premier Procédé consiste à oxyder les résidus sous vide par soufflage d'air chaud à 250 °C.

Le deuxième procédé est, quant à lui, utilisé pour des résidus sous vide ayant une teneur en fractions lubrifiantes trop importante et consiste à traverser le résidu sous vide par un courant ascendant de solvant : la différence de solubilité des fractions bitumineuses vis-à-vis du solvant employé permet alors d'obtenir le bitume souhaité. Dans ce dernier cas, le bitume présente une faible pénétrabilité (2-2-1).

En Algérie, il existe trois procédés pour la fabrication des bitumes routiers à savoir la distillation sous vide (distillation directe), le semi-soufflage ainsi que le procédé de dés asphaltage. Le quatrième qui est utilisé par d'autres pays est le procédé des bitumes reconstitués qui se fait par mélange de résidu lourds avec des concentras aromatiques résultant de l'extraction des lubrifiants.

## 1.2 Composition chimique et structure des bitumes

On distingue deux grandes familles de composés du bitume : les asphaltènes et les maltènes.

Les asphaltènes sont composés essentiellement d'hydrogène et de carbone et se présentent sous la forme d'un "solide" friable brun à noir. Généralement, les bitumes comportent 10 à 20% en poids d'asphaltènes. Quant aux maltènes, ils sont constitués principalement d'huiles saturées, d'huiles aromatiques et de résines.

L'ensemble forme un système colloïdal constitué par une suspension de micelles d'asphaltènes peptisés par les résines dans un milieu huileux (Figure 01). En effet, les résines absorbent sur les asphaltènes et permettent leur dispersion dans le mélange huileux (hydrocarbures aromatiques et saturés). On dit qu'il y a peptisation. Les aromatiques assurent le rôle de solvant, tandis que les saturés assurent le rôle de flocculant.

La dispersion des agglomérats d'asphaltènes est plus ou moins forte selon la composition de la phase maltène (huiles + résines) : la structure du bitume est, en effet, différente selon que les asphaltènes forment ou non un réseau floculé, baignant dans un milieu dispersant faiblement structuré par les résines. Dans ce cas, on parle de structure "gel" (élasto plastique). Dans le cas d'une structure où les asphaltènes

forment une suspension diluée et bien stabilisée dans un milieu dispersant fortement structuré par les résines, les asphaltènes ne peuvent interagir. On parle alors de structure "sol" (visqueuse) [2].

Une classe intermédiaire, appelée "sol-gel", correspond aux bitumes intermédiaires.

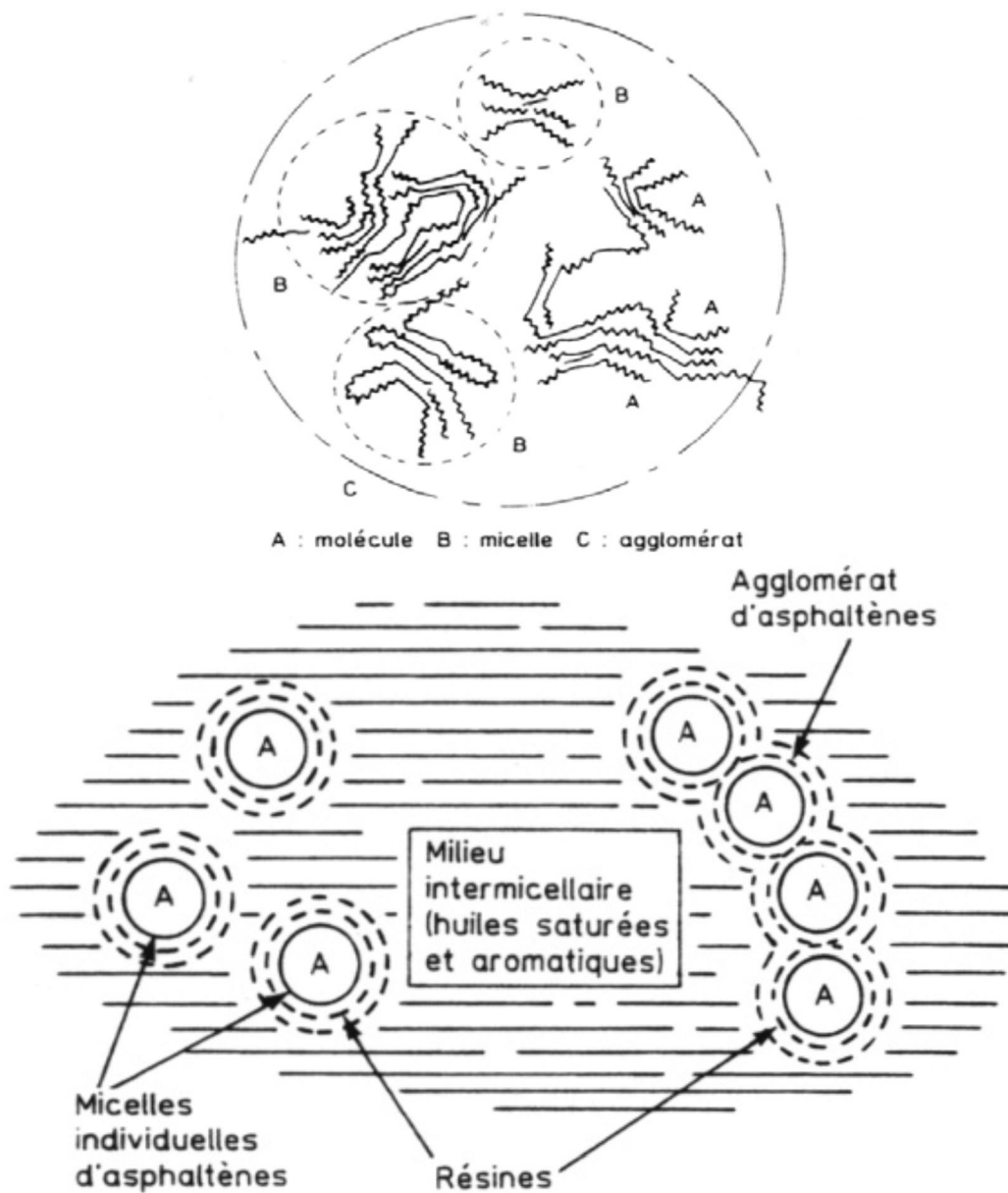


Figure 01. a) Macrostructure des asphaltènes [2], b) Schématisation de la structure colloïdale du bitume [3].

## 2. Propriétés rhéologiques des liants bitumineux

### 2.1 Classes de comportement des bitumes purs en fonction de déformation $\epsilon$ et de la température $T$

La Figure 02 permet d'identifier simplement les principaux types de comportement des bitumes en fonction de l'amplitude de la déformation ( $\epsilon$ ) et de la température ( $T$ ), pour une vitesse de déformation fixée. On y distingue :

- les domaines fragile et ductile, où la résistance à la traction ( $\sigma_p$ ) peut être mesurée ;
- le comportement élastique linéaire, caractérisé par les modules ( $E$ ) et ( $G$ ) ;
- la rupture fragile, qui peut être caractérisée par la ténacité ( $K_c$ ) ou l'énergie de rupture  $G_c$  (mécanique linéaire de la rupture) ;
- le domaine viscoélastique linéaire, caractérisé par les modules complexes  $E^*$  et  $G^*$  ;
- le comportement purement visqueux (Newtonien), caractérisé par la viscosité  $\eta$  ;
- pour des déformations de l'ordre de quelques pour cent, le domaine où le comportement est fortement non linéaire.

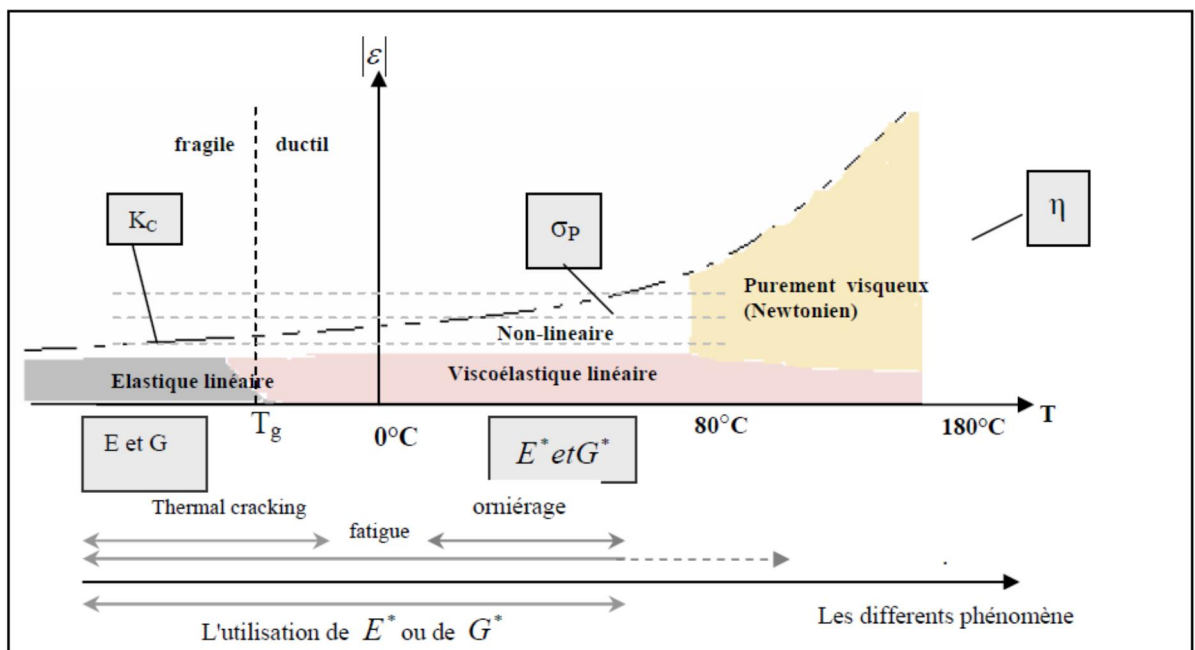
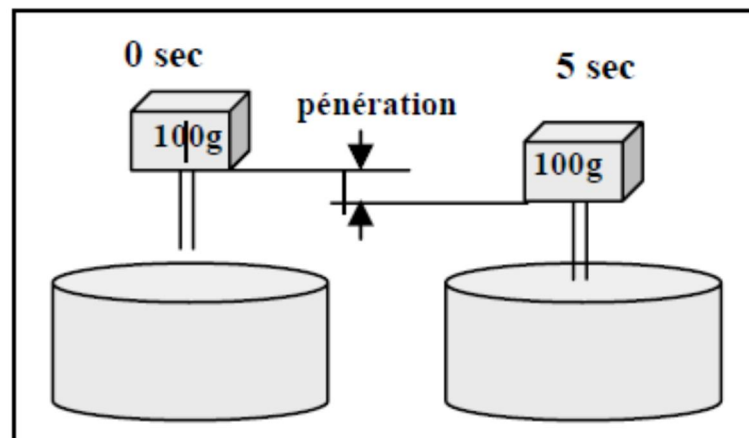


Figure 02 Classes de comportement des bitumes en fonction de  $|\epsilon|$  et  $T$  [4] [5].

## 2.2 Les caractéristiques classiques

### 2.2.1 Pénétrabilité (NF T 66-004)

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



*Figure 03 Essai de pénétrabilité pour le bitume*

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

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

### 2.2.2 Température de fragilité Fraas (NF t 66-006)

Correspond à une température à laquelle un film mince d'un bitume rompt sous l'effet d'une flexion; cet essai empirique donne une indication sur les propriétés à froid d'un bitume.

### 2.2.3 Essai RTFOT "Rolling Thin Film Oven Test" (NF T 66-032)

A l'enrobage, les granulats chauffés aux environs de 160°C sont mis en contact avec le bitume chaud qui se répartit en film mince autour du granulat, favorisant ainsi un vieillissement du liant. L'oxydation chimique est violente car l'apport énergétique est intense (température et oxygène de l'air). L'essai RTFOT est employé pour permettre de caractériser ce type de vieillissement des bitumes.

Dans des conditions bien précises d'essai RTFOT, le bitume placé en film mince, est régulièrement exposé à un flux d'air chaud dont le débit est contrôlé. On mesure ensuite les propriétés habituelles sur le liant vieilli: pénétrabilité et température de ramollissement bille et anneau. Ces valeurs dites après RTFOT, sont alors comparées aux valeurs initiales. Elles sont plus proches de celles du liant extrait de l'enrober, que de celles obtenues sur le bitume d'origine.

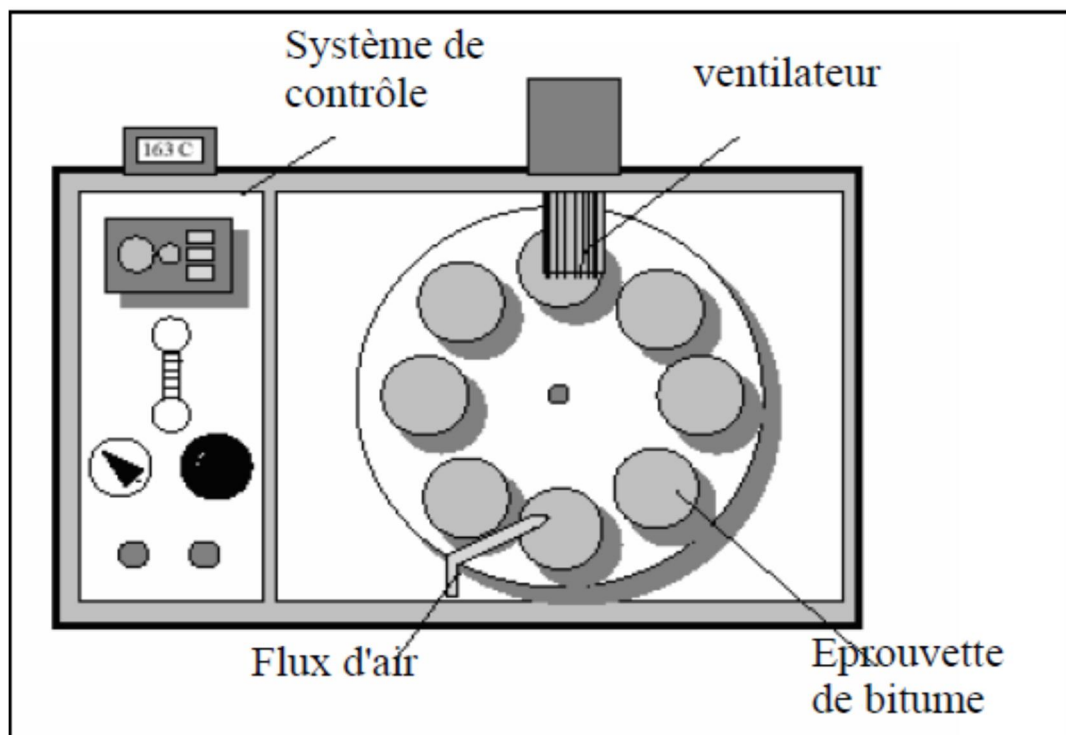


Figure 04 Essai RTFOT

## 2.2.4 L'essai PAV "Pressure Aging Vessel"

Cet essai est employé pour permettre de caractériser le vieillissement des bitumes in situ . (Après 3 à 5 années de service).

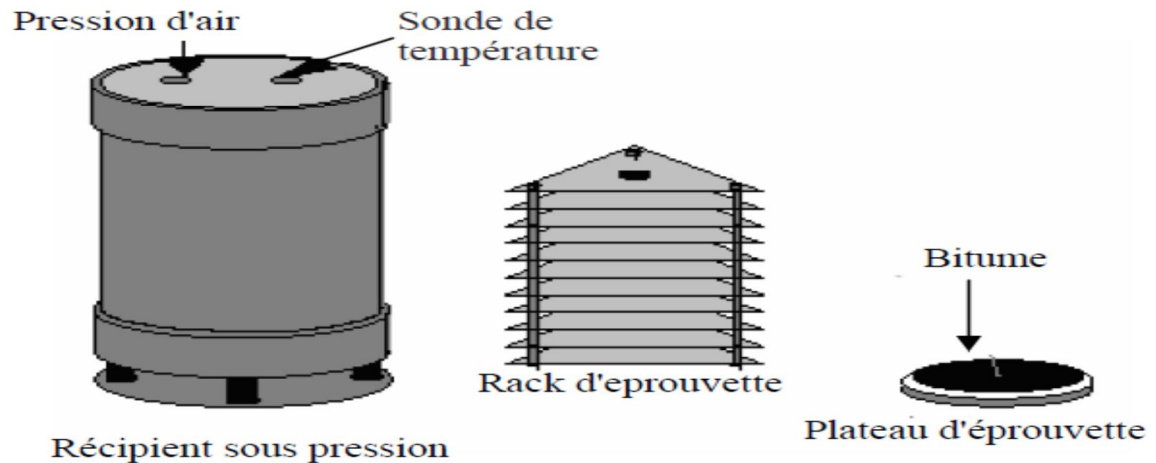


Figure 05 Essai PAV

## 2.3 Caractérisation des propriétés rhéologiques du liant dans le domaine linéaire (vel)

### 2.3.1 Définition d'un corps viscoélastique

Un corps monodimensionnel et non vieillissant est dit viscoélastique (par opposition à viscoplastique) si l'effacement est total lors d'une expérience d'effacement ( $\sigma_{\infty} \rightarrow 0$ )

L'expérience représentée dans la Figure 06 consiste à appliquer un créneau de déformation au matériau.

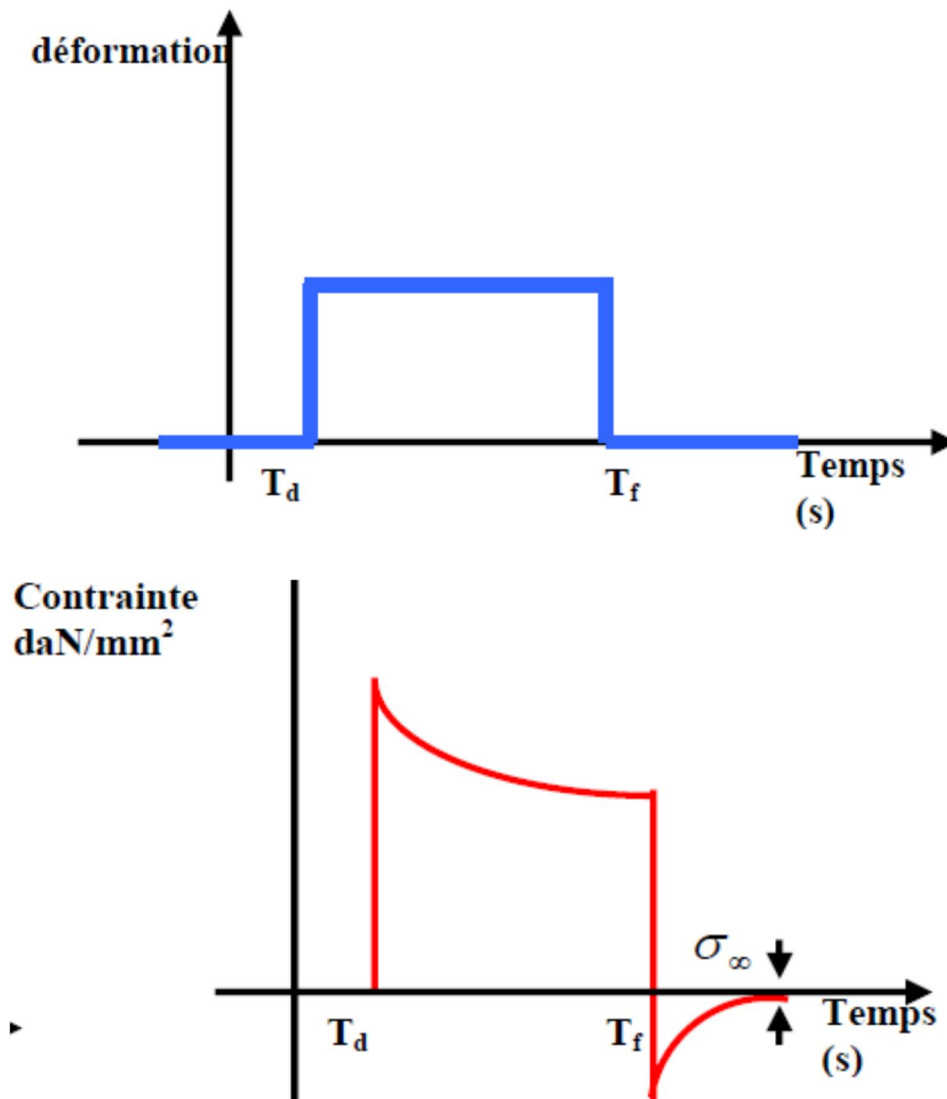


Figure 06 Expérience d'effacement et réponse du matériau en contrainte

### 2. 3.2 Définition d'un corps viscoélastique linéaire

De plus, un matériau viscoélastique possède un comportement linéaire s'il suit le principe de superposition de Boltzmann, c'est-à-dire si sa réponse à une sollicitation composée d'un certain nombre de sollicitations élémentaires est la somme des réponses à chacune de ces sollicitations [6].

| <u>Sollicitations</u>                     | <u>Réponses</u>                                                               |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| $\epsilon_1(t)$                           | $\sigma_1(t)$                                                                 |
| $\epsilon_2(t)$                           | $\sigma_2(t)$                                                                 |
| $\lambda\epsilon_1(t) + \mu\epsilon_2(t)$ | $\lambda\sigma_1(t) + \mu\sigma_2(t) \forall (\lambda, \mu) \in \mathbb{R}^2$ |

## 2.3.3 Caractérisation des propriétés à la rupture

### 2.3.3.1 Essai de traction directe SHRP

Cet essai permet de mesurer la résistance à la rupture en traction du bitume, à basse température. Le test est valide dans les zones de température où la déformation nécessaire à la rupture se situe dans un intervalle allant de 1 à 10% environ. Dans cet intervalle, les bitumes évoluent rapidement d'une rupture fragile à une rupture ductile.

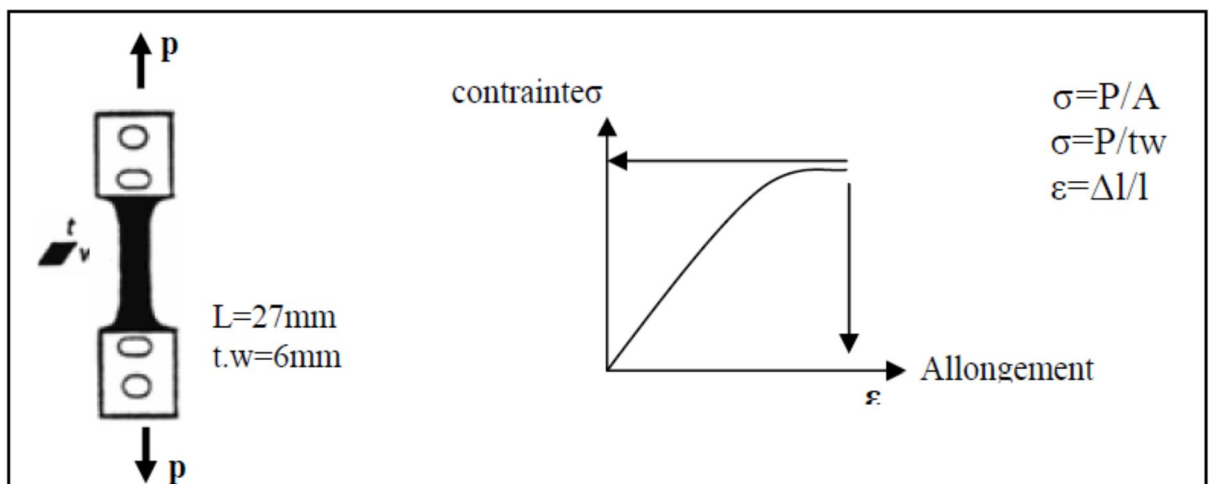


Figure 07 Essai de traction directe d'après Anderson[ 8]

### 2.3.3.2 l'essai de flexion

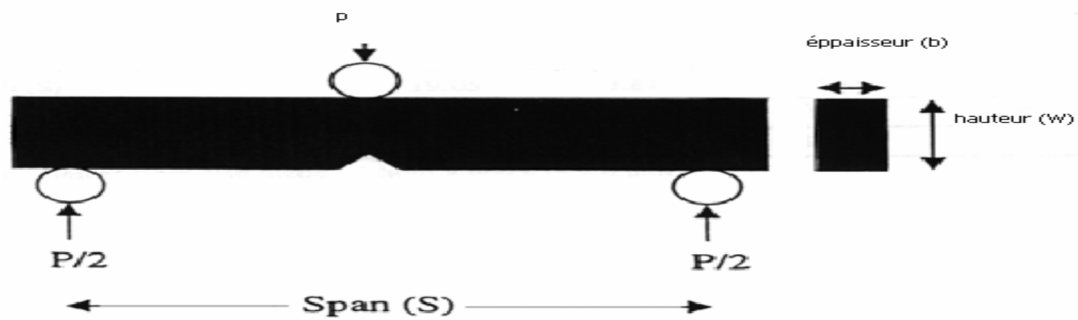


Figure 08 Schéma de l'essai de flexion 3 points sur éprouvette de bitume

Pré-entaillée, d'après Lee et Hesp[8].

La ténacité KIC ( $\text{N.m}^{-3/2}$ ) est déterminée à partir des dimensions de l'éprouvette et de la charge à la rupture PQ

Où a représenté la taille de l'entaille (5 mm), B (12,5 mm) l'épaisseur de l'éprouvette,

Et W (25 mm) la hauteur de l'éprouvette.

### 3-CLASSES DE BITUMES

Les valeurs obtenues lors de ces différents essais sont à la base des spécifications sur les bitumes. Ceux-ci sont répartis en classes correspondant à une gamme donnée de valeurs de pénétrabilité à 25°C :

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

### 4- mélange bitumineux

#### 4.1 Description du mélange bitumineux

Le béton bitumineux est composé de deux éléments principaux : les granulats et le bitume.

Les granulats assurent la structure rigide de l'enrobé et le bitume procure la cohésion de l'ensemble et est responsable du caractère visqueux.

# Chapitre I

---

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.

## a. Les granulats

Les granulats proviennent de carrières où les roches massives sont concassées, ou bien sont d'origine alluvionnaire.

Les granulats sont répartis en différentes classes granulaires normées qui sont définies par le diamètre minimal et le diamètre maximal du granulat (norme P18-101). Les granulats sont ainsi classés en fines, sables, gravillons, cailloux et graves.

L'intégration des granulats dans le mélange bitumineux nécessite de connaître différentes caractéristiques :

- celles qui tiennent à la nature de la roche d'origine (dureté, résistance au polissage, résistance aux chocs) ;
- celles qui résultent de la fabrication des granulats (propreté, forme, granularité, angularité, homogénéité).

En outre les essais mécaniques permettent d'établir un classement selon :

- la résistance à la fragmentation par les essais Los Angeles (norme P18-573) ;
- la résistance à l'usure et à l'attrition par l'essai Micro-Deval humide (norme P18-572) ;
- la résistance au polissage (norme P18-575) ;

## b. le Bitume

Ayant la capacité de lier les granulats entre eux, le bitume confère ses propriétés rhéologiques au mélange ainsi élaboré.

Ce sont principalement les propriétés viscoélastiques des bitumes qui déterminent le comportement dynamique des couches bitumineuses sous l'action des véhicules.

## 4.2. Les spécifications des bitume

Les spécifications des différentes classes de bitume sont données au *partie I*

## 4.3 Le choix de la classes de bitume

Soumise aux sollicitations du trafic et du climat, la chaussée peut subir des dégradations telles que :

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

## 5. La formulation du mélange bitumineux

Nous nous intéressons ici aux matériaux traités aux liants hydrocarbonés à chaud, bétons et enrobés bitumineux, graves et sables bitume, qui résultent du mélange de granulats et de liant hydrocarboné avec éventuellement des additifs, dosés, chauffés et malaxés en centrale. La plupart de ces techniques font l'objet des normes de la série NF P98-130 à 150. Elles traitent de la définition, de la classification, des caractéristiques et des particularités de fabrication et de mise en œuvre de chaque produit. Elles concernent en outre les graves-bitume, les enrobés à module élevé, les divers bétons bitumineux, ainsi que les sables-bitume et les enrobés recyclés à chaud qui ne sont pas couverts par une norme de produit.

Le dimensionnement des couches de matériaux traités aux liants hydrocarbonés demande de connaître la dépendance du module de rigidité du matériau vis-à-vis de la température et de la vitesse de chargement, et de son comportement à la fatigue.

Cependant la recherche d'une formulation optimum reste complexe car elle doit tendre vers un compromis. Par exemple, l'utilisation des matériaux roulés facilite la maniabilité au détriment de la résistance. L'utilisation de matériaux concassés augmente la résistance mais demande beaucoup d'énergie pour le compactage (augmentation du coût). D'autres interactions sont rencontrées avec des paramètres externes comme la température, ce qui complique davantage le choix de la formulation [9].

Ainsi la formulation doit jouer sur différents paramètres tels que la courbe granulaire, la compacité, l'angularité des granulats, le type de bitume, la teneur en liant, le type et la teneur en fines.

## a)METHODE DE FORMULATION ADOPTER EN ALGERIE :

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

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

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

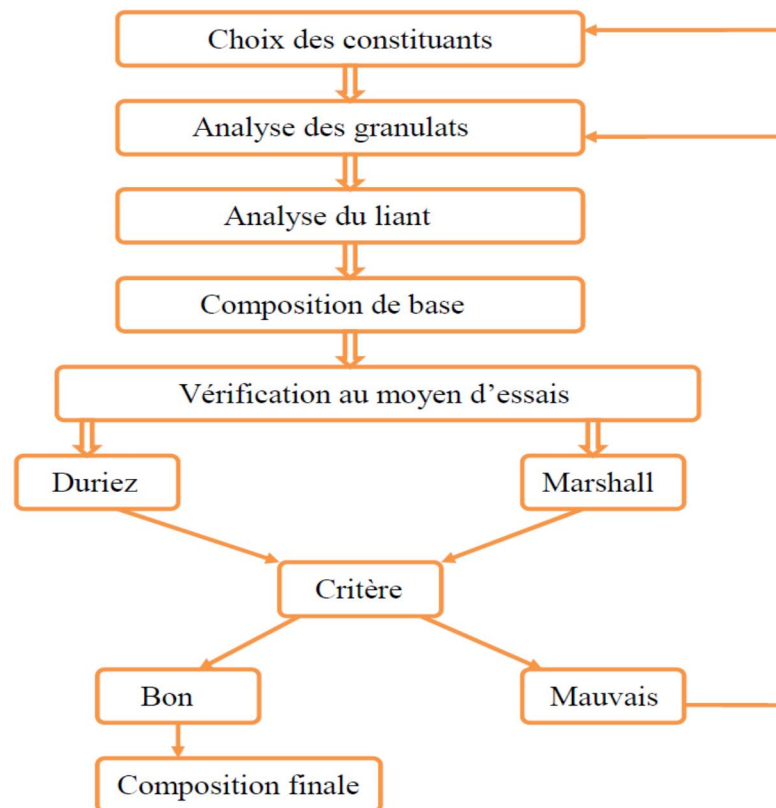


Figure 09 Organigramme de formulation d'enrobés bitumineux en Algérie

## 6. Propriétés rhéologiques des enrobés bitumineux

### 6.1 Généralités

L'analyse des sollicitations et des dégradations observées sur chaussées, sous l'effet conjugué du trafic et de la température, montre qu'il convient principalement de prendre en compte et de caractériser quatre propriétés thermomécaniques pour les mélanges bitumineux :

- le module (rigidité) et sa dépendance vis-à-vis de la température et du mode de chargement ;
- la fatigue ;
- l'évolution des déformations permanentes ;
- la fissuration et la propagation des fissures à basse température.

Les deux premières propriétés permettent de préciser l'effet structurel et son évolution dans le temps. La troisième est liée à la caractérisation de l'orniérage. La dernière qui fait apparaître des couplages thermo-mécaniques, est en général non modélisée malgré son importance pratique. Soulignons encore que la température joue toujours un rôle essentiel dans les études relatives à ces matériaux.

### 6.2 Grandes classes de comportement

Les enrobés bitumineux ont un comportement complexe. La Figure 12 permet d'identifier les quatre types de comportement principaux des enrobés bitumineux en considérant l'amplitude de la déformation  $\varepsilon$  et le nombre de cycles de chargement appliqués  $N$  [6] :

- pour un faible nombre de chargements et des déformations de quelques pour cents, le comportement observé est fortement non linéaire ;
- pour des chargements comprenant quelques centaines de cycles et des déformations "faibles" ( $<10^{-4}$ ) le comportement est considéré, en première approximation, viscoélastique linéaire ;

# Chapitre I

-lors de chargements de plusieurs dizaines de milliers de cycles et des déformations "faibles", les phénomènes d'endommagement apparaissent, le matériau se "fatigue" ;

-en outre, lorsque des cycles déviatoires en contraintes sont appliqués à partir d'une contrainte nulle, des déformations irréversibles non négligeables existent pour des amplitudes de déformation "proches" de la rupture. Leur accumulation crée de l'orniérage. C'est le quatrième type de comportement qu'il convient d'identifier

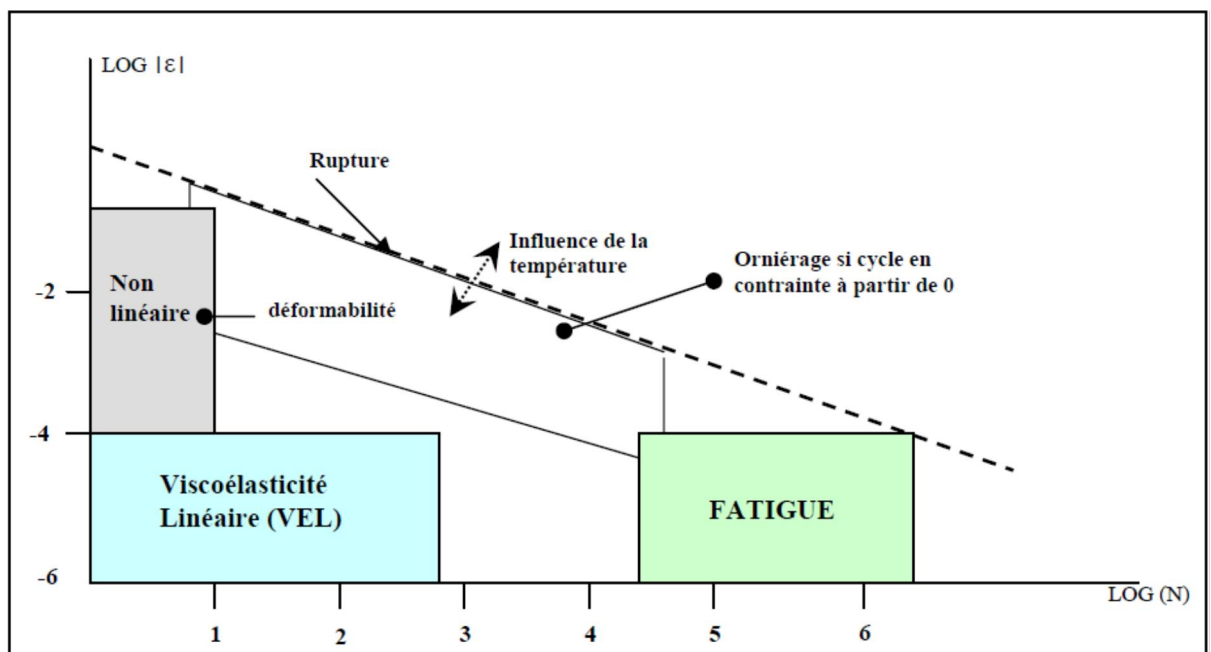


Figure 10 Comportement "type" des bétons bitumineux, ( $\epsilon$ ) déformation – ( $N$ ) nombre dechargements [6].

La Figure 10 permet de fixer un ordre de grandeur des différents domaines de comportement du mélange bitumineux pour une température fixée. Les frontières considérées correspondent bien évidemment à des ordres de grandeur qui peuvent varier sensiblement selon le matériau, la température et la direction du chemin de sollicitation suivi (compression, cisaillement, etc.).

Dans ces conditions, les quatre propriétés mécaniques importantes pour les matériaux traités

aux liants hydrocarbonés utilisés dans le domaine des terrassements routiers sont :

- la rigidité ou le module (comportement viscoélastique linéaire : VEL) ;
- le comportement en fatigue ;
- le comportement à l'orniérage qui correspond à l'accumulation de déformations permanentes. Cela constitue donc un phénomène lié aux irréversibilités et aux non linéarités déjà existantes dans le domaine des faibles déformations ;
- la fissuration et la propagation de fissure au travers de la structure de chaussée. En particulier, le phénomène de fissuration par apparition de contraintes liées aux variations de température (dilatation et/ou contraction thermique) est un aspect important qui introduit un couplage thermique/mécanique.

## **6.3 Exemples de caractérisation des enrobés à basse température**

Les hypothèses de milieu continu et d'isotropie des enrobés bitumineux sont retenues.

Au regard de l'hypothèse de milieu continu, bien que sa structure composite grenue confère à l'enrobé utilisé couramment sur chaussées un caractère hétérogène, on peut faire l'hypothèse d'homogénéité macroscopique à l'échelle d'une couche de chaussée. Pour les éprouvettes de laboratoire, on considère généralement qu'un rapport de 10 entre la taille du plus gros granulat et celle de l'éprouvette est suffisant pour considérer celle-ci homogène. Bien que ce rapport ne soit pas toujours obtenu (de l'ordre de 6 pour les éprouvettes testées en retrait thermique empêché), on fait l'hypothèse d'homogénéité.

Concernant l'hypothèse d'isotropie, le mode de mise en œuvre de l'enrobé sur chaussées (répandage du matériau foisonné par couche et compactage par passages successifs de compacteurs à la surface) confère au matériau une certaine anisotropie (orientation privilégiée des grains par le compactage). De la même façon, les éprouvettes fabriquées en laboratoire présentent ce type de propriété. Pour minimiser ces effets, on réalise souvent les essais sur des éprouvettes prélevées dans une même direction du matériau. Dans les calculs de dimensionnement routier, on fait l'hypothèse d'isotropie du matériau.

## 6.3.1 Essai de module complexe sur bétons bitumineux

### a) Considérations générales

Dans le domaine viscoélastique linéaire "VEL" (Figure 10), on pratique sur enrobés les essais de module complexe avec la même procédure que celle décrite au paragraphe III.3.6. Suite à de nombreuses études sur le module complexe des enrobés bitumineux réalisées entre autres par Di Benedetto et De la Roche, on montre que celui-ci est directement influencé par :

- la formulation du matériau [10],
- la température [10] [11],
- la fréquence de sollicitation [10] [11],
- la fatigue [12],
- le niveau de sollicitation [13] [10].

### b Limite du domaine linéaire

Concernant la dernière propriété énoncée ci-dessus, Charif en 1990 a notamment étudié l'évolution de la norme du module complexe d'un enrobé bitumineux en fonction de l'amplitude de déformation. Rappelons que le comportement viscoélastique des enrobés est linéaire si le principe de Boltzmann est vérifié. Charif en 1990 obtient un comportement linéaire des enrobés pour des déformations inférieures à  $10^{-4}$ m/m.

Quant à Doubbaneh en 1995, il trouve que le domaine linéaire des enrobés est limité à des déformations n'excédant pas quelques  $10^{-5}$ m/m [15]. Plus récemment, Airey et al. En 2002 et 2003 ont vérifié à partir de trois formulations d'enrobés et deux bitumes (un bitume pur 50/70 et un bitume modifié au copolymère tribloc en étoile de styrène et de butadiène) que la limite du comportement linéaire des enrobés correspond à des déformations de l'ordre de  $10^{-4}$ m/m [8].

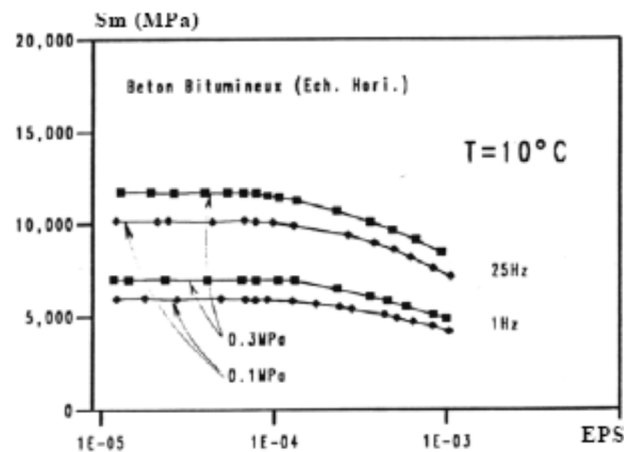


Figure 11 Evolution de la norme du module complexe  $S_m$  avec l'amplitude de déformation axiale, d'après Charif [8]

### c Influence de la formulation d'enrobé:

Comme la réalisation des essais de détermination du module complexe des enrobés bitumineux est longue et coûteuse, de nombreux chercheurs se sont intéressés à la possibilité de prédire la valeur de ce module à partir de la composition de l'enrobé bitumineux, cela dans l'optique d'obtenir un ordre de grandeur utilisable dans le dimensionnement des chaussées.

Les relations trouvées sont dérivées de statistiques basées sur la comparaison de résultats d'essais mécaniques sur plusieurs enrobés bitumineux ayant des compositions qui balayent les principaux paramètres de formulation. De plus, parmi les formules empiriques trouvées dans la littérature, la majorité d'entre elles concerne uniquement la norme du module complexe, l'angle de phase étant rarement étudié. A notre connaissance, peu d'auteurs ont établi des relations entre le module complexe du liant et celui de l'enrobé, valables à la fois pour la norme et pour l'angle de phase du module complexe [14] [15] [16] [20] [17].

Plusieurs types de formules prévisionnelles ont donc été développés pour établir une relation empirique entre le module des enrobés et les propriétés de leur liant, en y introduisant la distribution volumique des différents constituants du mélange. Citons, par exemple, les relations d'Heukelom et Klomp [18],

### 6.3.2 Essai de traction directe

Il s'agit d'un essai de traction à température constante et à vitesse de déformation constante. Au cours de l'essai, les paramètres mesurés sont la contrainte, la déformation et la température à l'instant  $t$ . La contrainte maximale, encore appelée contrainte de rupture, et la déformation correspondante, donnent directement accès à la résistance en traction du matériau testé, pour les conditions d'essais (température, vitesse) considérées.

On observe classiquement que plus la vitesse de déformation imposée est élevée, plus l'enrobé a un comportement rigide (contrainte maximale plus élevée) et l'allongement à la rupture est faible (Figure 12).

Il est à noter enfin que l'essai de compression diamétrale (« essai de traction indirecte » ou encore « essai brésilien ») peut également être réalisé en laboratoire afin de déterminer la résistance en traction d'un enrobé bitumineux. Le principal avantage de ce dernier essai réside dans le fait que les éprouvettes peuvent être directement prélevées in-situ et qu'elles ne doivent pas être collées sur des casques en métal. Son principal désavantage est qu'il s'agit d'un « essai non-homogène »

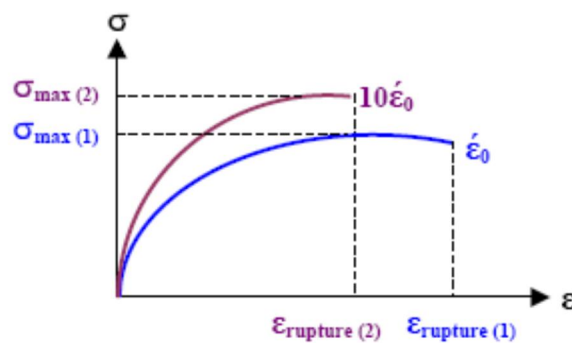


Figure 12 Résultats classiques pour l'essai de traction directe sur enrobés

(1) essai à vitesse de déformation  $\dot{\epsilon}$

(2) essai à vitesse de déformation  $10 \dot{\epsilon}_0$

### 6.3.3 Essai de retrait thermique empêché (AASHTO TP10)

#### a) Principe de l'essai

Lorsqu'un matériau est soumis à une variation de température, il subit des déformations. Si celles-ci sont empêchées, les variations de température créent des contraintes appelées contraintes thermiques. Ce type de couplage thermomécanique est par exemple à l'origine des problèmes de fissuration observés à basse température sur les chaussées.

Les chaussées sont un exemple où les déformations sont restreintes. En moyennes températures, les enrobés sont des corps viscoélastiques. Lorsque la température augmente les contraintes thermiques créées, qui sont des contraintes de compression, se dissipent par la relaxation. En basse température, l'enrobé se comporte comme un corps élastique très rigide.

Lorsque la température baisse, des contraintes de tension se créent sans pouvoir se dissiper.

Lorsque ces contraintes atteignent la limite de résistance du matériau, des fissures apparaissent. Ce phénomène est illustré à la Figure 13. La température à laquelle apparaît la fissure est appelée température de fissuration thermique.

Le principe de l'essai de retrait thermique empêché, encore appelé Thermal Stress Restrained Specimen Test (TSRST), consiste donc à maintenir la hauteur d'une éprouvette d'enrobé constante tout en diminuant la température à vitesse constante (généralement  $-10^{\circ}\text{C}/\text{H}$ ).

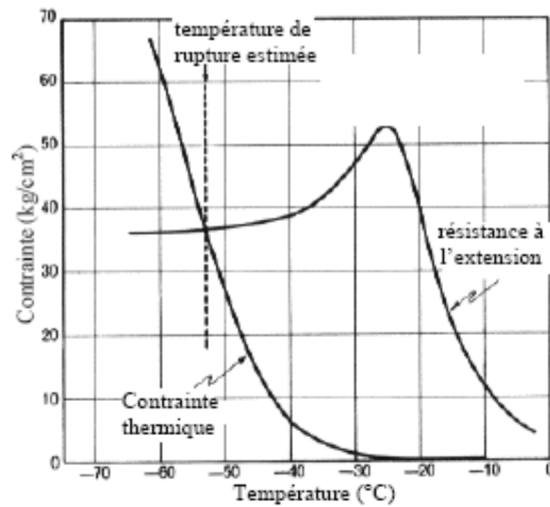


Figure 13 Méthode d'estimation de la contrainte de rupture thermique[8].

La déformation totale, notée  $\epsilon^{\text{totale}}$ , peut se décomposer en la somme d'une déformation mécanique et d'une déformation d'origine thermique, respectivement notées  $\epsilon^{\text{mécanique}}$  et  $\epsilon^{\text{thermique}}$ . Il vient :

$$\epsilon^{\text{totale}} = \epsilon^{\text{mécanique}} + \epsilon^{\text{thermique}} \quad 6.3$$

Etant donné que le retrait est empêché :

$$\epsilon^{\text{totale}} = 0 \quad 6.4$$

$$\epsilon^{\text{mécanique}} = -\epsilon^{\text{thermique}} = -\alpha \Delta T \quad 6.7$$

Avec  $\alpha$  le coefficient de dilatation/contraction thermique moyen de l'enrobé ( $\alpha=30\mu\text{m/m}/^\circ\text{C}$ ). Cet essai introduit un couplage thermo-mécanique puisque, à partir d'une sollicitation thermique ( $\epsilon^{\text{thermique}}=\alpha*\Delta T$ ) on obtient une sollicitation mécanique induite ( $\epsilon^{\text{mécanique}}=-\alpha*\Delta T$ ). Au cours de l'essai, la contrainte de traction induite par la variation de température (contrainte thermique) se développe dans l'éprouvette d'enrobé jusqu'à la fracture de celle-ci. L'essai de retrait thermique empêché utilisé permet donc de caractériser le comportement de la chaussée à basse température. En effet, la procédure de l'essai est fondée sur l'hypothèse que la contraction de la couche de surface pendant un refroidissement est restreinte dans la direction longitudinale (la longueur de la route peut être considérée comme infinie).

Les paramètres de l'essai les plus souvent considérés sont : la contrainte de rupture et la température de rupture. La Figure 14 montre le résultat typique d'un essai de retrait empêché sur un enrobé au bitume pur et sur un enrobé au liant modifié.

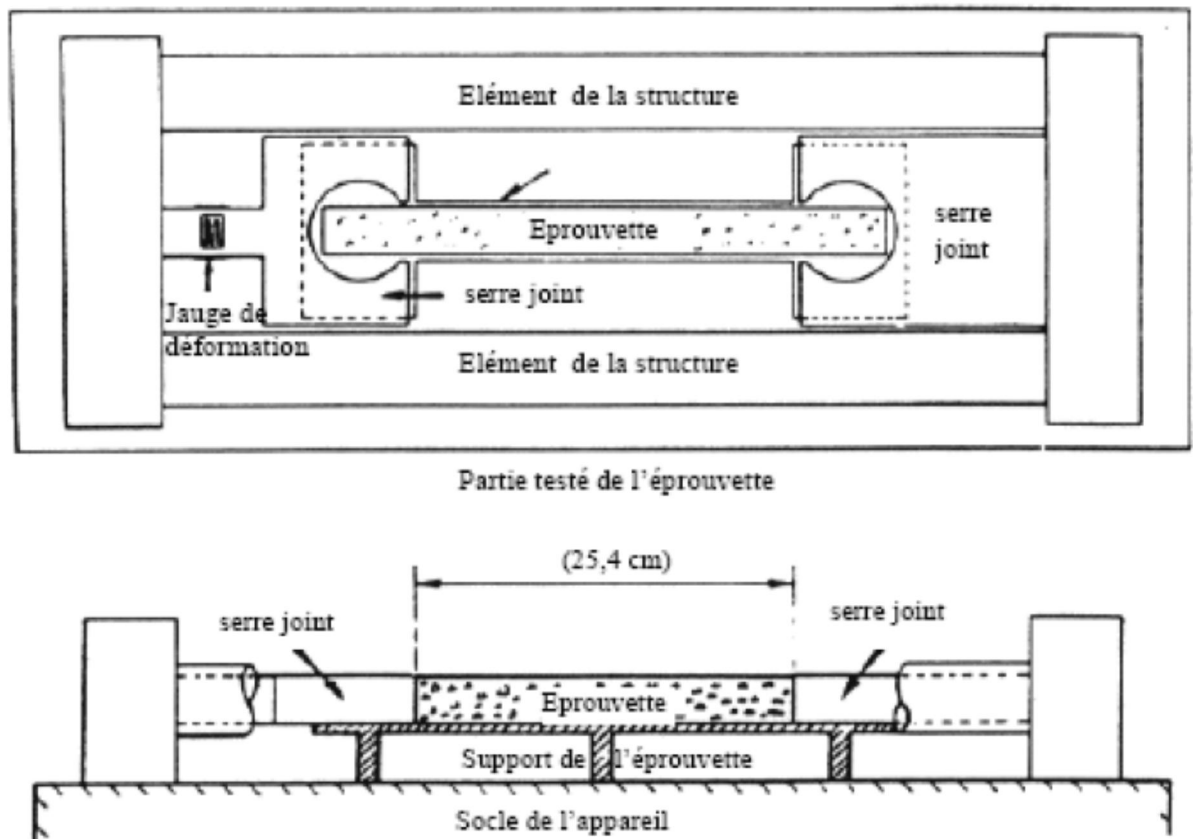


Figure 14 .Appareil développé par Monismith et al. (1965) pour l'essai de retrait thermique Empêché [8]

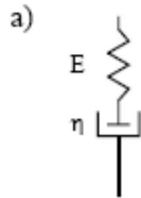
### 6.4 MODÉLISATION DU COMPORTEMENT LINÉAIRE (VEL)

Cette partie est consacrée à une présentation non exhaustive des différents modèles rhéologiques trouvés dans la littérature pour la modélisation des matériaux bitumineux en petites déformations, i.e. dans le domaine visco-élastique linéaire (VEL)..

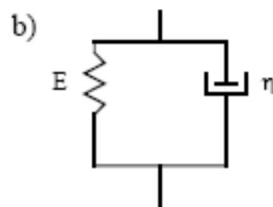
#### 6.4.1 Assemblage discret de ressorts et d'amortisseurs - spectre discret:

Toute combinaison de ressorts (éléments élastiques) et d'amortisseurs linéaires (éléments visqueux Newtoniens) constitue un modèle viscoélastique linéaire analogique (Ferry, 1980). De nombreux modèles combinant ressorts et amortisseurs linéaires ont,

par ailleurs, été employés et présentés dans la littérature de manière à décrire le comportement viscoélastique linéaire des liants et des mélanges bitumineux. Les combinaisons les plus simples sont les modèles de Maxwell et de Kelvin-Voigt



**.Eléments de Maxwell (liquide viscoélastique)**



**élément Kelvin-Voigt (solide viscoélastique)**

*Figure 15*

### 6.4.2 Modèles de Maxwell et de Kelvin-Voigt généralisés:

Le modèle de Maxwell généralisé est constitué d'un groupe de  $n$  éléments de Maxwell montés en parallèle, avec éventuellement un ressort et un amortisseur linéaire en parallèle. Le modèle de Kelvin-Voigt généralisé est constitué d'un groupe de  $n$  éléments de Kelvin-Voigt en série, avec éventuellement un ressort et un amortisseur linéaire en série.

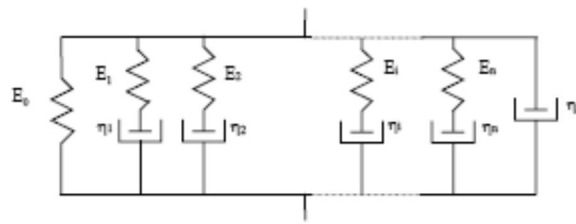


Figure 16. Modèle de Maxwell généralisé.

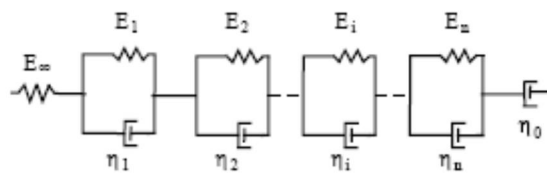


Figure 17. Modèle de Kelvin-Voigt généralisé.

Les modèles généralisés de Maxwell et de Kelvin-Voigt (Figure 16 & Figure 17) permettent une description tout à fait satisfaisante du comportement des liants et des enrobés bitumineux à condition qu'un nombre suffisant d'éléments ( $n$ ) soit considéré ( $n=8$  apparaît comme un minimum) [19]

## 7. LES ESSAIS MECANIQUE SUR LES ENROBÉS BITUMINEUX

### 7.1 Essai Marshall (NF P 98-251-)

L'essai permet de déterminer pour une température et une énergie de compactage

Données le «pourcentage des vides», la «stabilité» et le «fluage» dits Marshall d'un mélange hydrocarboné à chaud.



*Figure 18 Application de la compression Marshall*

### **7.2 Essai Duriez (NF P 98 -251)**

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



*Figure 19 La compression (Duriez)*

## 8. L'enrobé de bitume dans la chaussée

### 8.1 La place des matériaux bitumineux dans les structures routières

Les chaussées se présentent comme des structures multicouches (figure.20.), qui sont mises en œuvre pour répartir les charges induites par le trafic que le sol support seul ne pourrait pas soutenir.

La structure complète comprend :

- le sol support ;
- la couche de forme qui protège le sol support pendant les travaux, permet d'améliorer les caractéristiques mécaniques des matériaux de remblais ou du terrain en place et de les protéger du gel ;
- les couches d'assise (couche de fondation + couche de base) qui sont constituées de matériaux élaborés (le plus souvent liés pour les chaussées à trafic élevé) qui doivent répartir les contraintes de pression dues au trafic dans les limites admissibles au niveau de la plate-forme support ;

# Chapitre I

---

- les couches de surfaces (couche de liaison + couche de roulement) qui subissent directement les actions du trafic.

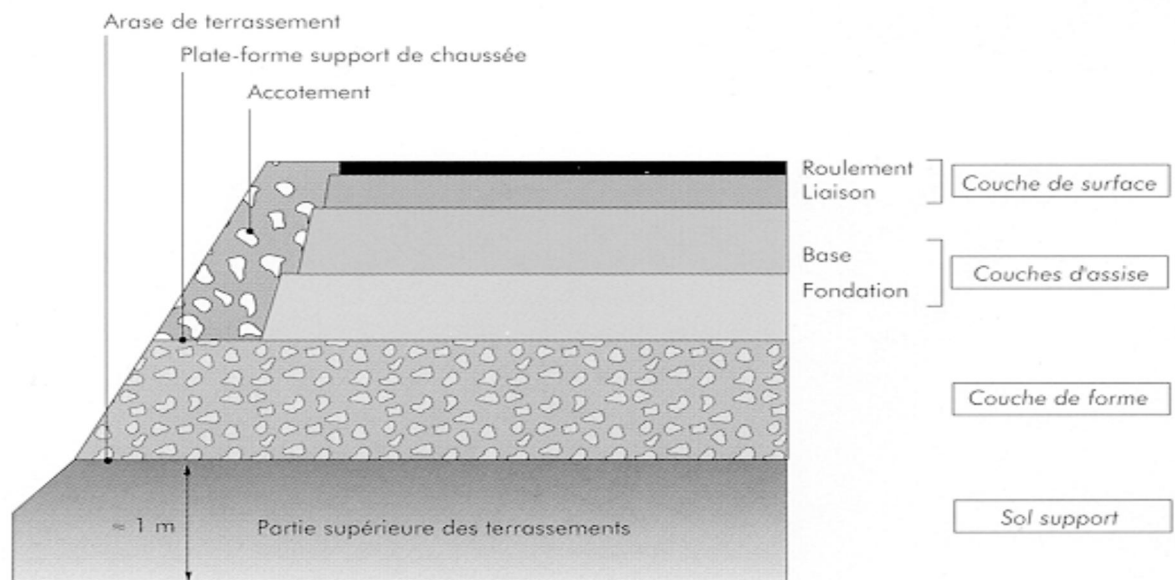


Fig.20. Schéma d'une coupe de chaussée [21]

Les matériaux bitumineux peuvent être utilisés dans les couches de surface et dans les couches d'assise.

Les structures de chaussées sont réparties en deux grandes classes en ce qui concerne le réseau routier français : les chaussées bitumineuses et les chaussées en béton de ciment. En France la majorité des structures routières appartiennent à la famille des chaussées bitumineuses. La figure 21 donne un aperçu des structures bitumineuses le plus fréquemment rencontrées.

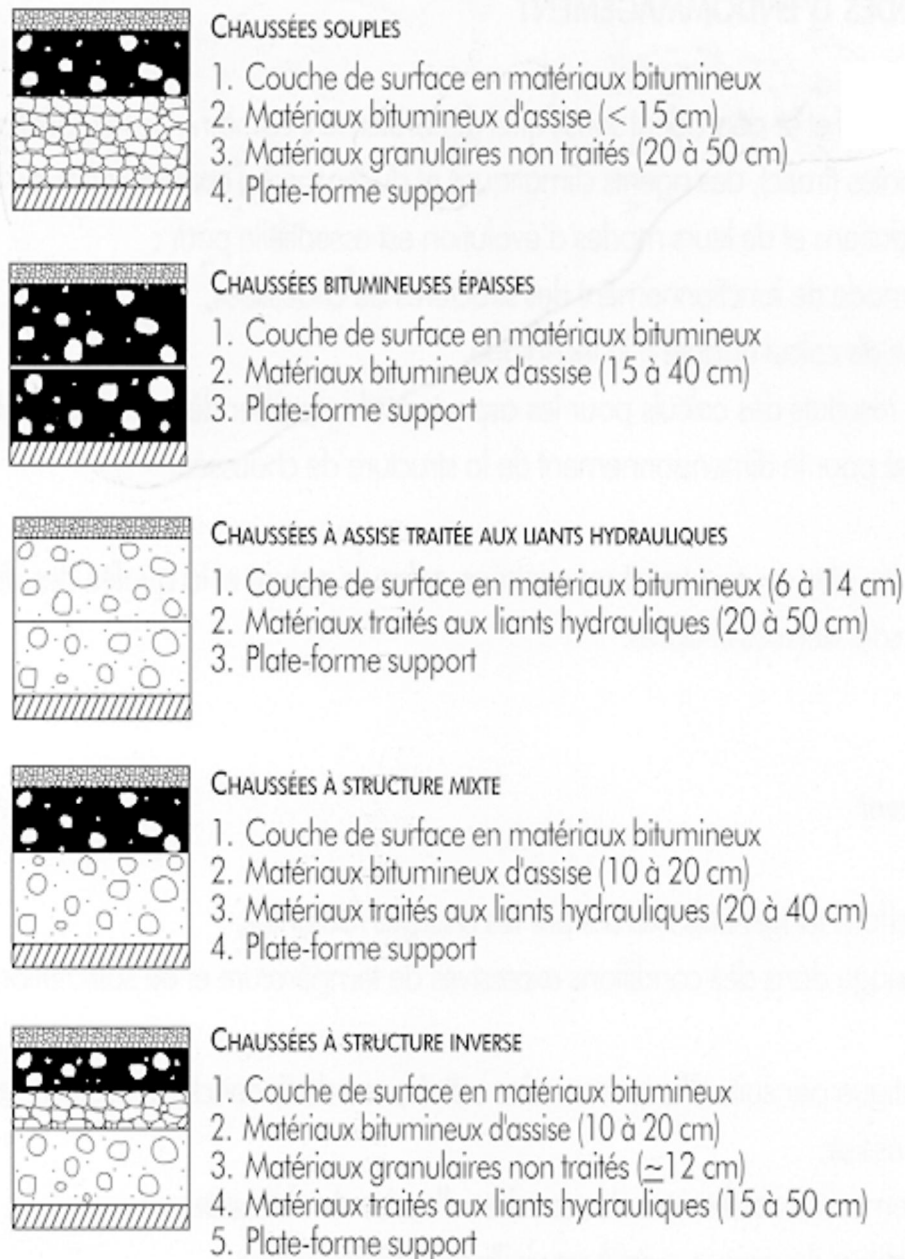


Fig.21 Schéma des différents types de structures de chaussée [21]

Les chaussées souples et les chaussées bitumineuses épaisses sont employées pour le réseau départemental, les autres structures étant utilisées pour des niveaux de trafic plus élevés.

**CHAPITRE II**

**METHODE DE LA**

**FREQUENCE DE**

**RESONANSE**

### 1 .Introduction

Le béton bitumineux pris par sa nature évolutive, peut être considéré comme un matériau vivant. Il renferme des oscillations microscopiques propres à lui, et le fait d'atteindre ces oscillations par un agent extérieur induit une résonance de vibration qui est l'élément clé dans la dynamique des matériaux et encore pour la statique si on arrive à relier les caractéristiques dynamiques à celles statiques.

Pour l'analyse de la contrainte du corps de chaussée routier soumises au flux de la circulation des différentes catégories de véhicule de transport ou d'impact, il est plus approprié d'employer les caractéristiques dynamiques, dont la détermination est plus facile par rapport aux caractéristiques statiques si on possède un instrument ultrasonore. Par ailleurs, si on peut trouver une relation entre ces deux types de caractéristiques, on aurait gagné en temps et en matière lors de la conception ou du contrôle ou de l'entretien de chaussée, car cet essai est facile et est entièrement non destructif.

### 2. Notion physique

#### 2.1 Notion physique sur les vibrations

##### 2.1.1 Qu'est-ce qu'une vibration?

Si vous pouviez observer un objet vibrant au ralenti, vous pourriez voir des mouvements dans différentes directions. La distance sur laquelle se déplacent l'objet et sa vitesse permettent de déterminer plus facilement ses caractéristiques de vibration. Les termes utilisés pour décrire le déplacement de l'objet sont la fréquence, l'amplitude et l'accélération.

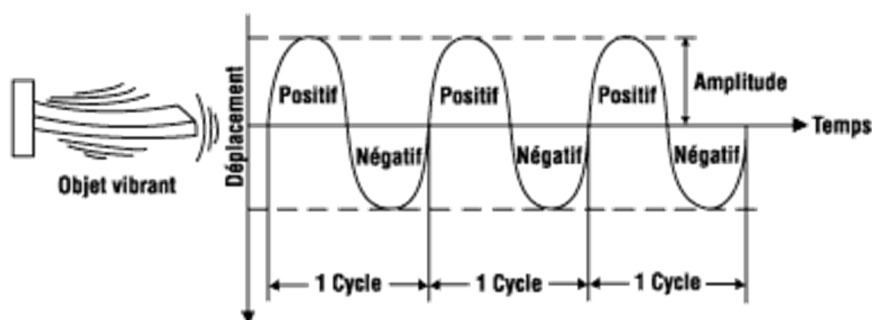


Figure22 : Représentation de mesures d'exposition d'une vibration [24]

### 2.1.2 Fréquence

Un objet vibrant effectue un **va-et-vient** de part et d'autre de sa position fixe normale. Un cycle complet de vibration est produit lorsque l'objet se déplace d'une position extrême à l'autre position extrême, puis revient au point de départ. Le nombre de cycles effectués par un objet vibrant pendant une seconde est appelé sa fréquence. L'unité de fréquence est l'hertz (Hz). Un hertz correspond à un cycle par seconde.

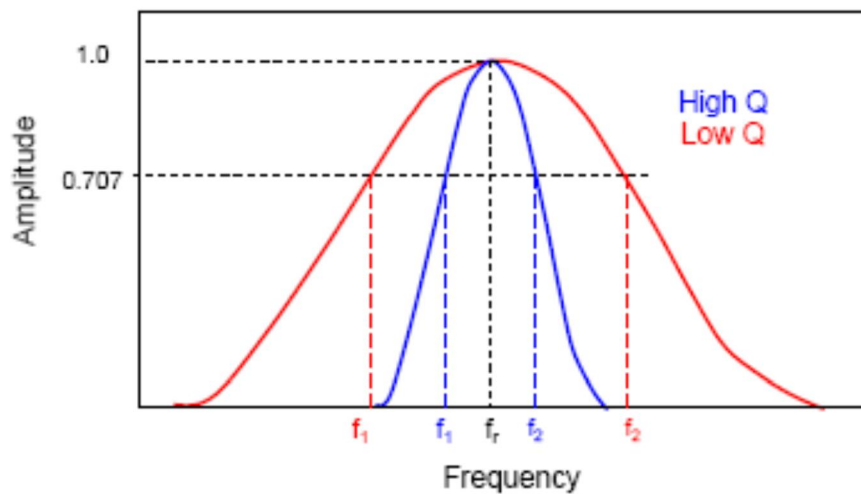


Figure 23 : Relation entre amplitude de fréquence pour une poutre à proximité de la résonance [25]

### 2.1.3 Amplitude

Un objet vibrant se déplace sur une distance maximale de part et d'autre de sa position fixe. L'amplitude est la distance comprise entre la position fixe et la position extrême, d'un côté ou de l'autre, et elle est mesurée en mètres (m). L'intensité de la vibration dépend de l'amplitude.

### 2.1.4 Accélération (mesure d'intensité de vibration)

La vitesse d'un objet vibrant passe de zéro à une valeur maximale pendant chaque cycle de vibration. Elle est maximale lorsque l'objet passe par la position fixe naturelle qu'il occuperait en l'absence de vibration, en déplacement vers une position extrême. L'objet vibrant ralentit à mesure qu'il s'approche de sa position extrême, où il s'arrête, pour repartir ensuite dans le sens contraire vers la position fixe et l'autre position extrême. La vitesse de la vibration s'exprime en mètres par seconde (m/s).

## Chapitre II

---

L'accélération est une grandeur qui indique dans quelle mesure la vitesse varie en fonction du temps. La mesure s'exprime en unités de vitesse (mètres par seconde) par seconde ou en mètres par seconde carrée ( $m/s^2$ ). L'accélération passe de zéro à une valeur maximale pendant chaque cycle de vibration. Elle augmente à mesure que l'objet s'approche de la position fixe qu'il occuperait en l'absence de vibration.

### 2.1.5 Qu'est-ce que la résonance?

Chaque objet tend à vibrer à une fréquence particulière appelée fréquence de vibration naturelle. La mesure de la fréquence de vibration naturelle varie en fonction de la composition de l'objet, de sa taille, de sa structure, de son poids et de sa forme. Si une force vibratoire est appliquée à un objet à une fréquence égale à sa fréquence de vibration naturelle, on obtient un état de résonance. Une machine vibrante transmet la quantité maximale d'énergie à un objet lorsqu'elle vibre à la fréquence de résonance de l'objet.

### 2.1.6 Types d'ondes

Les deux modes principaux utilisés en contrôle industriel concernent les ondes longitudinales, appelées ondes de compression ou ondes de dilation dans la théorie de l'élasticité, et les ondes transversales appelées également ondes de cisaillement. La longueur d'onde  $\lambda$  est liée à la vitesse de propagation  $v$  par la relation :

$$\lambda = v/f$$

D'où  $f$  : est la fréquence de la vibration

Les ondes longitudinales sont caractérisées par le fait que la direction de la vibration (direction du déplacement des particules ou encore polarisation de l'onde) est la même que celle de la propagation.

Les ondes transversales se propagent dans une direction perpendiculaire à celle de la vibration. Ces ondes ne peuvent exister que dans les solides car leur existence est liée à une résistance au cisaillement que ne possèdent ni les liquides ni les gaz.[26]

### 3. Méthodes non destructives de caractérisation du béton bitumineux

Dans la pratique, le carottage est la méthode d'auscultation la plus simple et la plus répandue.

Cet essai consiste à prélever un échantillon cylindrique du corps de chaussée. L'état des interfaces entre les différentes couches peut parfois être déterminé visuellement sur l'échantillon prélevé ou à l'intérieur du trou de carottage. Mais il peut avoir été affecté par l'opération de carottage. Ce résultat doit donc être utilisé avec précaution. Le carottage peut être valorisé en étant couplé avec l'essai d'ovalisation à pour principe la mesure des variations de diamètre.

Du trou de carottage à plusieurs profondeurs, au passage d'une charge. Les interfaces sont analysées en faisant deux mesures, une juste au-dessus de l'interface et l'autre juste en dessous. Dans le cas où ces valeurs sont égales, l'interface est adhérente, alors que dans le cas contraire, l'interface est partiellement ou totalement dégradée. Ces méthodes destructives d'auscultation constituent un excellent outil complémentaire d'auscultation de l'état de l'interface en fin d'expérience.

Cependant, le caractère destructif de ces méthodes, qui perturbe le comportement mécanique du corps de chaussée en changeant sa géométrie, les rend incapables de mesurer des dégradations.

Progressives d'interfaces. C'est pourquoi la mesure du décollement des couches de chaussée au cours de l'essai nécessite l'emploi de méthodes d'auscultation non destructive.

#### 3.1.1 Le vibreur Goodman (vibreur léger)

Le vibreur Goodman est un appareil qui sert à l'auscultation dynamique des chaussées. Il est développé depuis 1961 par les Laboratoires des Ponts et Chaussées Français.

Le principe de l'essai est basé sur la propagation des ondes de surface. Une charge verticale sinusoïdale est appliquée à la surface de la chaussée. Un accéléromètre (ou géophone) posé à côté de l'excitateur enregistre la phase de l'onde de surface qui se propageant dans la chaussée. Ce capteur est éloigné progressivement de l'excitateur de façon à pouvoir calculer la longueur de l'onde de surface, ainsi que la vitesse de phase. Cette opération est effectuée pour plusieurs fréquences d'excitation de façon à pouvoir déterminer la vitesse de phase en fonction de la fréquence.

## Chapitre II

---

Le but de l'essai est de construire la courbe donnant la vitesse de phase en fonction de la fréquence, appelée courbe de dispersion. Cette courbe peut nous renseigner sur les différentes caractéristiques de la chaussée (épaisseurs et modules de rigidité), ainsi que sur l'état des interfaces, ceci par un calage sur un modèle simple. Le problème majeur d'emploi du vibreur l'Eger est de réaliser un essai ponctuel de rendement horaire t'es faible. Cet appareil n'est plus utilise aujourd'hui.[27]

### 3.1.2 Le collographe

Le principe du collographe, d'écrit par est le suivant : une bille vibrante applique une charge sinusoïdale, d'amplitude 2000 N et de fréquence 60 Hz `a la surface de la Chaussée. Des capteurs mesurent la composante verticale de la réponse de la structure. Les signaux Sont ensuite filters afin de réduire les bruits mécaniques. L'amplitude de la réponse sinusoïdale Caractérise l'état structurel de la chaussée. Cette valeur est constante le long d'une section homogène Et varie en présence de singularités. Cet appareil est cependant peu utilise pour d'étêter le d'défauts D'interface car il est peu sensible à ce type de d'gradations [28]



*Fig.24 : Illustrations du la collographe [28]*

### 3.2.3 Le Falling Weight Deflectometer (FWD)

Le réflectomètre masse tombante ou FWD (Falling Weight Deflectometer) est conçu pour Mesurer le bassin des d'flexions provoqué par une masse tombante appliquée sur une plaque (de Diamètre 30 cm), ([www.infralab.ch](http://www.infralab.ch)). Il se compose :

- d'une remorque tractée de 850 kg environ transportant les 'éléments de mise en charge et les Neuf capteurs de d'emplacement,
- d'un système de pilotage automatique, d'acquisition et de traitement de l'information, embarqua dans le véhicule tracteur.

Après la mise en station de la remorque au droit du point de mesure, la masse est lib 'errée d'une Hauteur pouvant varier de 2 à 40 cm provoquant une force variable de 7 à 135 kN.

La hauteur de Chute et la force appliquée sont fixées en fonction de la nature de la structure testée. La transmission De la charge se fait par un ressort dont la constante permet de d'finir la durée du chargement. Les 9 capteurs (dont un est au centre de la plaque) enregistrent la d'enformée longitudinale sur 2 mètres Environ du point d'application de la charge (figure 3). Pour les structures routières, les caractéristiques de chargement sont réglées de manière `à obtenir Une impulsion d'une durée de 28 ms, soit environ 34 Hz, correspondant `a la durée de charge D'un poids lourd circulant `à une vitesse moyenne d'environ 70 km/ainsi, le FWD permet de restituer le comportement d'une structure de chaussée in-situ. En Théorie, par analogie entre un calcul 'élastique et les mesures du FWD, il est possible de d'exterminer état colle ou non des interfaces entre les couches. Cependant, aucune étude ne fait référence `à L'efficacité du FWD pour caractériser des d'collements et en particulier leurs limites

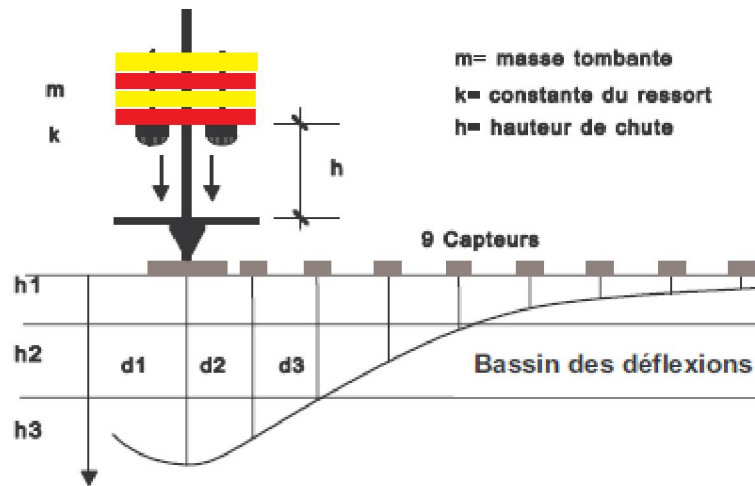


Fig. 25 : Principe de fonctionnement du FallingWightDeflectometer [27]

### 3.3.4 Impact-Echo

L'impact-Echo se base sur l'analyse du spectre de réponse d'un élément d'ouvrage soumis à une excitation mécanique. Suite à une impulsion générée par l'impact d'une bille d'acier de petit diamètre en surface de l'élément à tester, une onde de compression se propage dans le matériau (figure 5).

La réflexion multiple de l'onde (sur une interface avec un autre matériau de caractéristiques différentes) provoque une réponse cyclique amortie de fréquence  $f_{ei} = 1/\Delta t$ . Ce signal de réponse enregistré à l'aide d'un capteur situé très près du point d'impact est ensuite transformé dans le domaine des fréquences. Les ondes de compression arrivent les premières au récepteur, elles produisent le signal de réponse dominant.

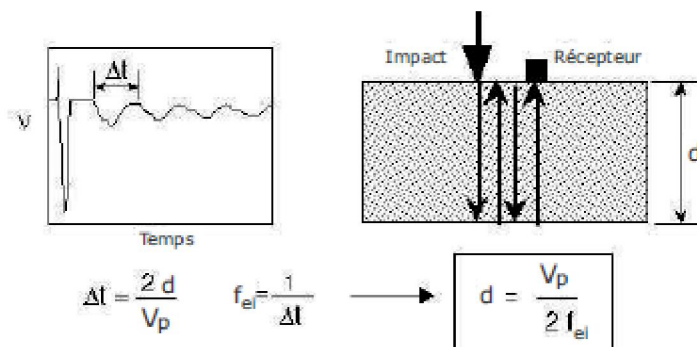


Fig26 : Principe de fonctionnement de l'impact écho [29]

## Chapitre II

---

La propagation de ces ondes dans un matériau élastique peut être simplement d'écrite à l'aide des relations suivantes :

$$d = \frac{\beta v_p}{2f_{ei}} \dots\dots\dots 1$$

$$x = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \dots\dots\dots 2$$

Ou E et  $\nu$  : sont le module d'Young et le coefficient de Poisson du matériau considère ;

D : désigne la distance parcourue par l'onde (aller-retour dans une couche de chaussée par exemple) ;

$V_p$  : la vitesse de propagation des ondes de compression dans le matériau (pour un béton,  $v_p$  est de l'ordre de 4000 m/s) ; et  $\beta$  : est un facteur de forme. Dans le cas des chaussées, on peut assimiler le Corp. d'épreuve à une plaque ;  $\beta$  est alors voisin de 1. Un d'collement est susceptible d'être d'écalle par impact-écho, sous certaines conditions. Il doit avoir une ouverture supérieure à 0,1 mm, et sa plus petite dimension latérale doit être supérieure à 25% de la longueur d'onde de l'impulsion produite par le choc de la bille. Ces conditions sont généralement remplies pour les structures de chaussées [29]

### 4. Méthode de la fréquence de résonance

#### 4.1 Principes généraux

La méthode de la fréquence de résonance définie par la norme NF P18-414 est basée sur l'excitation des oscillations propres d'une éprouvette à tester par une certaine fréquence externe (fréquence de résonance).

Suivant le type d'excitation, on obtient des vibrations longitudinales, de torsion, ou de flexion. La fréquence de résonance est fonction des dimensions géométriques, de la répartition des masses et des propriétés élastiques de l'éprouvette. En général, les éprouvettes doivent avoir une forme géométrique simple. Prismes et cylindres sont les plus adaptés

Pour les bétons bitumineux sont considères come des matériaux viscoélastique, dont ( $E^*$  et  $G^*$ ). En utilisant la méthode de fréquence de résonance, le matériau est soumis à

## Chapitre II

---

de très petites forces et aucun changement n'apparaît dans la structure du béton bitumineux.

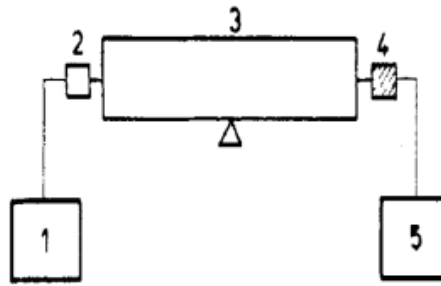
Les constantes élastiques du matériau, mesurées de cette façon, sont appelées le module d'élasticité « dynamique »  $E^*$ , le module de cisaillement « dynamique »  $G^*$  et le coefficient de Poisson « dynamique »  $\nu$ . Elles sont différentes des constantes élastiques mesurées dans les conditions de charges statiques. Pour ces constantes élastiques « statiques », le terme « statique » est en général omis. Il est à noter que la valeur du module d'élasticité dynamique est généralement différente du module d'élasticité statique que l'on détermine en mesurant la déformation d'un corps soumis à une charge donnée orientée dans la même direction que celle

De la mesure dimensionnelle. Cet écart est dû à la différence du niveau de sollicitation mécanique des corps d'épreuve entre les deux méthodes. Dans le cas de la mesure par résonance les efforts appliqués sont insignifiants, le module est alors donné par la pente de la tangente à l'origine du courbe effort - déformation. Dans le cas du module statique, la charge d'essai est élevée, et, les déformations n'étant plus à ce stade proportionnelles aux

Efforts, le module est donné par une droite sécante au courbe effort - déformation, c'est-à-dire qu'il est inférieur à la valeur du module dynamique. Pour un matériau de construction tel que le béton bitumineux, il n'y a pas de corrélation simple entre les constante « dynamiques » et « statiques ».

### 4.2 Dispositifs de mesure :

L'équipement de mesure doit être capable de produire des vibrations harmoniques dans le domaine de 10 à 20000 Hz. La fréquence propre des parties indépendantes de l'équipement, doit se situer en dehors de ce domaine. En général, un générateur électrodynamique de basse fréquence (voir figure 6), ajustable de façon continue, pour produire des fréquences dans le domaine ci-dessus, sera suffisant. La fréquence d'excitation doit être indiquée avec une précision de  $\pm 1\%$ .

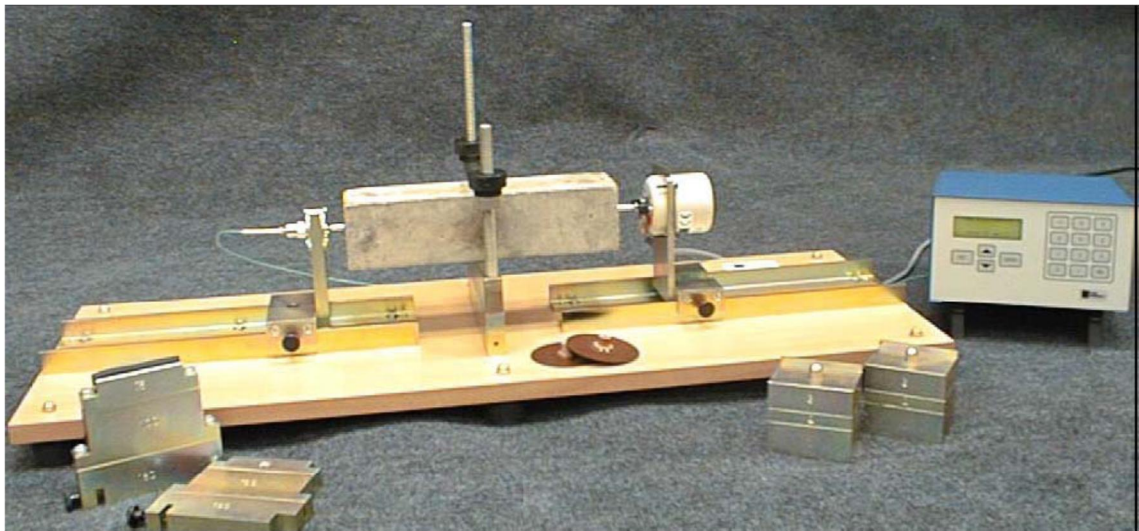


**1 : générateur basse fréquence ; 2 : émetteur électro-acoustique ; 3 : éprouvette de béton**

**Étudié ; 4 : récepteur électro-acoustique ; 5 : appareil de mesure.**

*Figure 27 : Bloc diagramme pour un mesure de fréquence de résonance  
(Appareil ERUDIT) [30].*

Le matériel de mesure est composé d'un générateur de basse fréquence, de deux transducteurs électro-acoustiques (émetteur et récepteur), et d'un indicateur de tensions (par exemple un voltmètre électronique) (figure 7). Les courants alternatifs, fournis par le générateur de basse fréquence, sont transformés en vibrations mécaniques par le transducteur électroacoustique (émetteur).



*Fig. 28 : Le matériel de mesure [25].*

Les vibrations résultantes de l'éprouvette agissent sur le transducteur électro-acoustique (récepteur) qui transforme les vibrations mécaniques en oscillations électriques.

## Chapitre II

---

L'amplitude des oscillations fournies par le récepteur est indiquée, après une amplification adéquate, par le voltmètre. La masse des transducteurs électro-acoustiques en contact avec l'éprouvette doit être inférieure à 3 % de la masse de celui-ci. Pendant les mesures, on doit apporter une attention particulière aux conditions de support de l'éprouvette. Les supports de l'éprouvette doivent être placés aux nœuds de vibration, correspondant à l'excitation désirée, ou l'échantillon doit être posé sur du caoutchouc mousse, de façon à pouvoir vibrer librement. Une attention particulière doit être apportée à un couplage convenable, c'est-à-dire au contact

Entre l'émetteur et l'éprouvette, et entre l'éprouvette et le récepteur. Le couplage doit être réalisé de telle façon qu'il soit correct et reproductible sans aucune difficulté. Le couplage ne doit pas affecter la fréquence propre de l'éprouvette. Le couplage sans contact est particulièrement avantageux. Le couplage au moyen de graisses de pétrole, pour émetteur et récepteur, s'est avéré adéquat.[30]

### 4.3 Procédure de contrôle

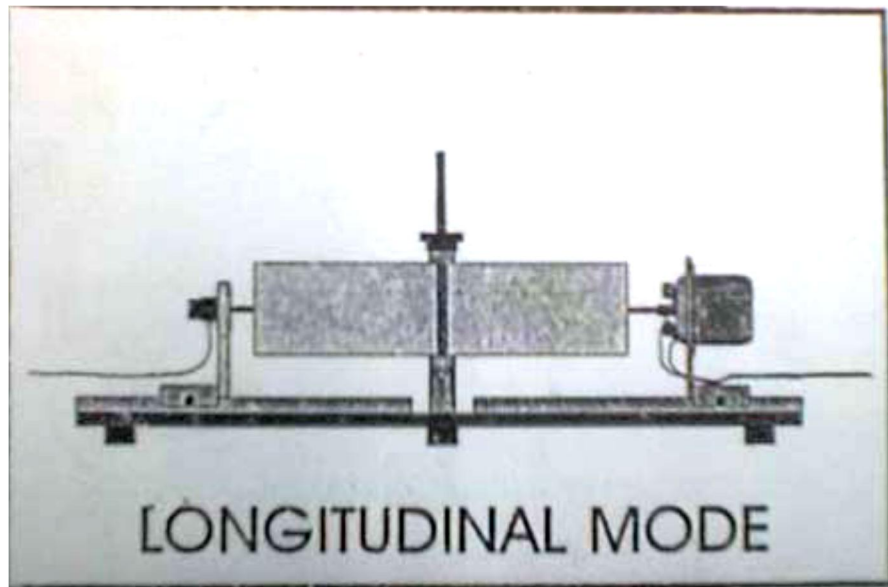
La procédure de contrôle consiste à placer les supports du prisme ou du cylindre de l'éprouvette, en fonction du type et du mode de vibration que l'on désire créer, sur le banc d'essais. Ensuite, les transducteurs électro-acoustiques sont placés dans les positions convenables sur les faces de l'éprouvette. L'émetteur est relié à la génératrice basse fréquence d'excitation. Le récepteur est relié à l'appareil de mesure après amplification. La mesure consiste à rechercher l'amplitude

Maximale de vibration de l'éprouvette, qui est mise en évidence par la déviation maximale de l'appareil de mesure, de la tension de sortie. Il existe trois (03) excitations de diverses formes

De vibrations :

#### a) Vibrations longitudinales

Les vibrations longitudinales sont produites quand la direction de vibration est parallèle à l'axe longitudinal de l'éprouvette. Pour cela les transducteurs acoustiques doivent être placés selon le schéma de la (figure 8) Pour un prisme le mode fondamental d'oscillation implique un nœud au milieu et des ventres Aux extrémités.



*Figure 29: Positionnement des transducteurs pour une vibration longitudinale [25].*

### **b) Vibrations de torsion**

Les vibrations de torsion se produisent quand une éprouvette est soumise à un couple Alternatif. Dans ce cas, les déplacements se produisant dans les éléments de masse de L'éprouvette, sont fonction du module de cisaillement. Les vibrations de torsion sont excitées en effectuant le couplage selon le schéma de la figure 9



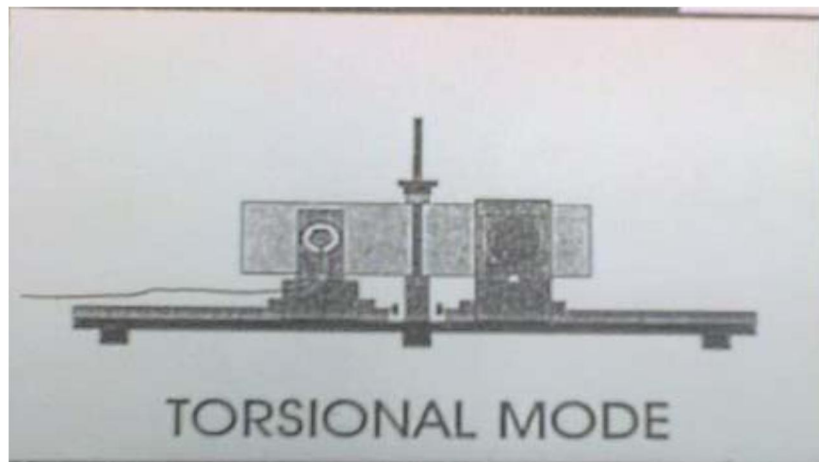
*Figure30 : Position des transducteurs pour une mesure de vibration de torsion. [25].*

## Chapitre II

---

### c) Vibrations de flexion

Les vibrations de flexion se produisent quand l'éprouvette est soumise à des charges de flexion variant alternativement. Dans le cas des vibrations de flexion, des modifications de dimensions et de forme se produisent dans les éléments de masse de l'éprouvette. L'excitation est produite dans un plan perpendiculaire à l'axe longitudinal de l'échantillon (figure 10). Pour le mode fondamental, le nœud de vibration apparaît à 0,224 L des extrémités de la Poutre). [25].



*Figure 31 : Position des transducteurs pour une mesure de vibration de flexion [25].*

# **Chapitre III**

## **Partie**

### **expérimentale**

### 1-Procédures expérimentales, résultats et discussion

#### 1.1 Introduction

Ce chapitre présente les différents résultats obtenus sur les granulats utilisés pour la composition du BB réalisé au sein du laboratoire de l'université et d'autres au laboratoire LTPO antenne de Saida, en plus des données et résultats extraits du rapport de composition du BB fourni par l'entreprise. En fin la partie essentielle de notre travail le test ERIDUT sur deux types d'éprouvette prismatique.

#### 2-Matériau d'essai

Dans nos essais on a utilisé le bitume bitumineux BB qui construit la couche de roulement (la couche supérieure de la route) Dans le cadre de notre étude, on a jugé important d'utiliser un mélange avec proportions différents de trois types de granulaires graviers 3/8 et 8/15 et le sable 0/3

##### 2.1-Essais sur *granulaire*

###### a- Analyse granulométrique

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue.

Les masses des différents refus ou celles des différents tamisages sont rapportées à la masse initiale de matériau, les pourcentages ainsi obtenus sont exploités, soit sous leur forme numérique, soit sous une forme graphique (courbe granulométrique). L'essai est effectué conformément à la norme française P 18-560



Figure 32 : Analyse granulométrique

### Gravie 8/15

Tableau01 : Analyse granulométrique de gravie 8/15

| Tamis<br>(mm) | Refus<br>Cumulés<br>(gr) | Refus<br>Cumulés<br>(%) | Tamisas<br>Cumulés<br>(arrondi)<br>(%) |
|---------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------------------|
| 16            | 72.5                     | 2.42                    | 98                                     |
| 12,5          | 468.3                    | 15.68                   | 84                                     |
| 10            | 1699.4                   | 56.90                   | 43                                     |
| 8             | 2554.3                   | 85.52                   | 14                                     |
| 6,3           | 2944.2                   | 98.58                   | 1                                      |
| 5             | 2985.5                   | 99.96                   | 0                                      |
| 2,5           | 2986.6                   | 100                     | 0                                      |

## Chapitre III

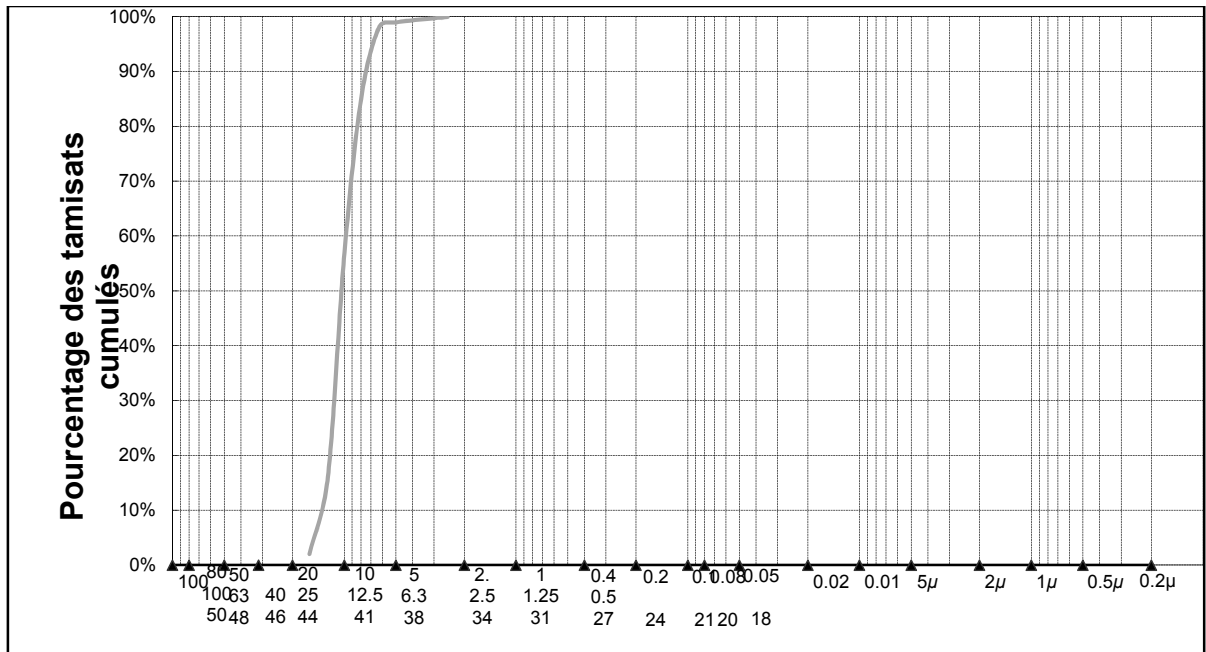


Figure 33 : Analyse granulométrique de gravie 8/15

### Gravie 3/8

Tableau02 : Analyse granulométrique de gravie 3/8

| Tamis<br>(mm) | Refus<br>Cumulés<br>(gr) | Refus<br>Cumulés<br>(%) | Tamisas<br>Cumulés<br>(arrondi)<br>(%) |
|---------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------------------|
| 10            | 9.5                      | 0.48                    | 100                                    |
| 8             | 408.8                    | 20.72                   | 79                                     |
| 6,3           | 464.3                    | 23.53                   | 76                                     |
| 5             | 983.1                    | 49.83                   | 50                                     |
| 2,5           | 1958.6                   | 99.28                   | 1                                      |
| 1,25          | 1972.8                   | 100                     | 0                                      |

\_\_\_\_\_



|  |  |  |  |
|--|--|--|--|
|  |  |  |  |
|--|--|--|--|

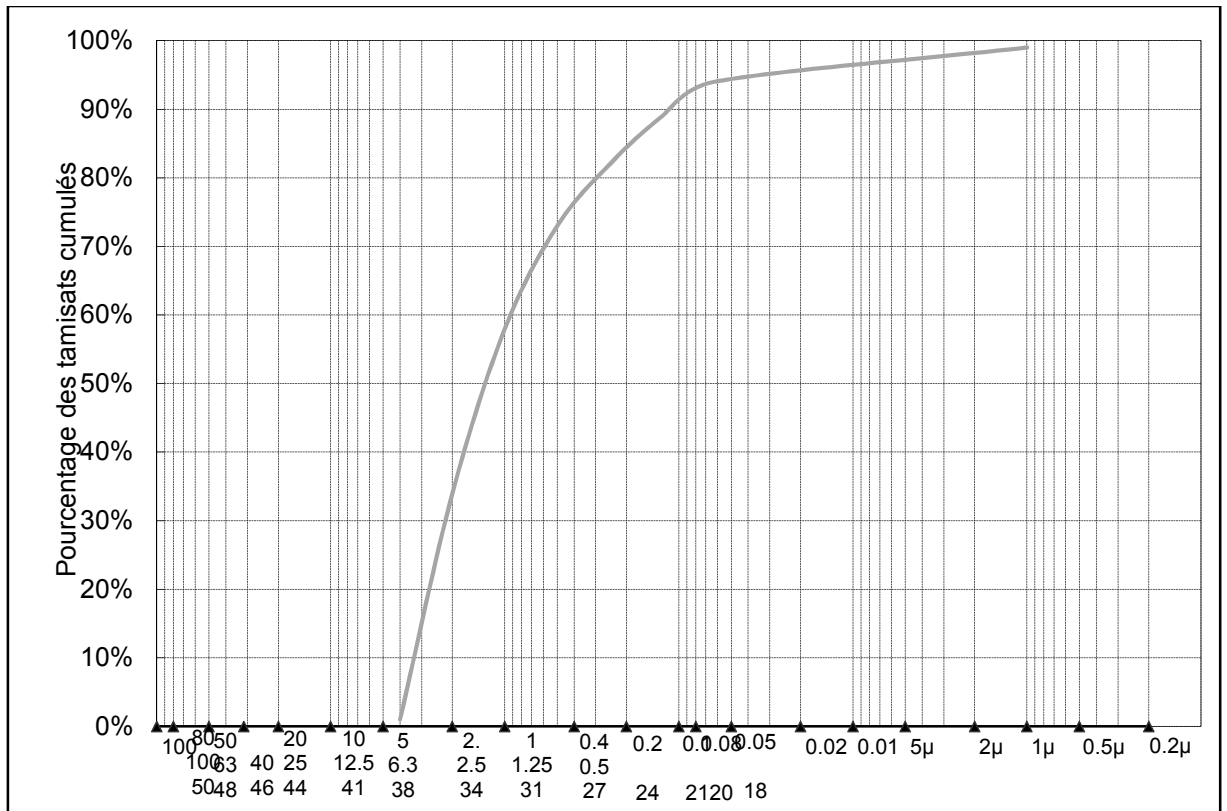


Figure 35 : Analyse granulométrique de sable 0/3

### b- Masses volumiques

La mesure des masses volumiques a été effectuée conformément à la norme française P 18-555.

La mesure de la masse volumique apparente des chantions a été déterminée selon la méthode de l'entonnoir.

La mesure de la masse volumique absolue des échantillons été effectuées par la méthode de la mesure au pycnomètre.

## Chapitre III

Tableau04 : Masses volumiques

| Echantillon | Masse<br>volumique<br>apparente (g /dm <sup>3</sup> ) | Masse<br>volumique<br>absolue (g /dm <sup>3</sup> ) |
|-------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Sable0/3    | 1551,2                                                | 2555.5                                              |
| Gravie3/8   | 1354,8                                                | 2430.6                                              |
| Gravie8/15  | 1374,9                                                | 2472.3                                              |

### c-Détermination du coefficient d'aplatissement

L'essai consiste à effectuer un double tamisage :

-Tamisage sur tamis à mailles carrées, pour classer l'échantillon étudié en différentes classes d/D

(Avec D = 1,25 d), suivant leur grosseur G.

- Puis tamisage des différentes classes granulaires d/D, sur des grilles à fentes parallèles d'écartement : **d/1.58**

Le coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire d/D correspond au passant du tamisage sur la grille à fentes d'écartement d/1,58, exprimé en pourcentage.

Le coefficient d'aplatissement global de l'échantillon est égal à la somme pondérée des coefficients d'aplatissement des différentes classes granulaires d/D composant l'échantillon.

Mg = Masse de chaque classe granulaire d/D, en grammes.

$$M = \sum M_g$$

Me = Masse des éléments de chaque classe granulaire d/D passant sur la grille correspondante, définie

Le coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire est donné par:  $M_e/M_g \cdot 100$

Le coefficient d'aplatissement global A est donné par :  $\frac{\sum M_e}{M} * 100$

Sauvant la norme p18-561

## Chapitre III

### Gravie 3/8

Tableau 05: coefficient d'aplatissement gravie 3/8

| Tamisage sur tamis                 |       | Tamisage sur grilles                 |                       |                    |
|------------------------------------|-------|--------------------------------------|-----------------------|--------------------|
| Classes granulaires<br><br>d/D(mm) | Mg(g) | Ecartement Me<br><br>Des grilles(mm) | Passant Me<br><br>(g) | Me/Mg*100<br><br>% |
| 8-10                               | 7.1   | 5                                    | 0.8                   | 11                 |
| 6.3-8                              | 490.5 | 4                                    | 72.1                  | 16                 |
| 5-6.3                              | 79.5  | 3.15                                 | 12.6                  | 16                 |
| 4-5                                | 662.3 | 2.5                                  | 26.5                  | 4                  |
| M=∑ Mg=1239.4                      |       | ∑ Me=112                             |                       |                    |
| A=∑ Me/M*100=9%                    |       |                                      |                       |                    |

Observation: conforme ( $A < 30$ )

## Chapitre III

### Gravie8/15

Tableau 06: coefficient d'aplatissement gravie8/15

| Tamisage sur tamis             |        | Tamisage sur grilles                 |                   |                |
|--------------------------------|--------|--------------------------------------|-------------------|----------------|
| Classes granulaires<br>d/D(mm) | Mg(g)  | Ecartement Me<br>Des grilles<br>(mm) | Passant Me<br>(g) | Me/Mg*100<br>% |
| 16-20                          | 86.7   | 10                                   | 15                | 17             |
| 12.5-16                        | 465.9  | 8                                    | 64.4              | 14             |
| 10-12.5                        | 1553.3 | 6.3                                  | 155.2             | 10             |
| 8-10                           | 1258.9 | 5                                    | 124               | 10             |
| 6.3-8                          | 564.4  | 4                                    | 52.5              | 9              |
| 5-6.3                          | 48.4   | 3.15                                 | 3.3               | 7              |
| M=∑ Mg=3977.6                  |        | ∑ Me=414.4                           |                   |                |
| A=∑ Me/M*100=10%               |        |                                      |                   |                |

Observation: conforme ( $A < 30$ )

d- équivalent de sable à 10 % de fines

L'essai d'équivalent de sable à 10 % de fines, permettant de mesurer la propreté d'un sable, est effectué

sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 2 mm et dont la proportion des éléments passant au tamis à mailles carrées de 0,08 mm a été ramenée à 10 % à l'aide d'un sable correcteur (si cette teneur en fines est supérieure à 11 %). Il

### Chapitre III

rend compte globalement de la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent. La valeur de l'équivalent de sable à 10 % de fines (PS) est le rapport, multiplié par 100, de la hauteur de la partie sableuse sédimentée, à la hauteur totale du floculat et de la partie sableuse sédimentée suivant la norme P 18-597



Figure 36 : Equivalent de sable

Tableau07 : Equivalent de sable

| Hauteur total h1<br>(cm) | Hauteur de sable<br>H2(piston)(cm) | ES=h2/h1*100<br>% | ES moyen% |
|--------------------------|------------------------------------|-------------------|-----------|
| 13.9                     | 8.8                                | 63                | 62        |
| 14.2                     | 8.8                                | 61                |           |

E=62 conforme (E>60)

## Chapitre III

---

### d-Essai Los-Angeles

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés dans la machine Los-Angeles, Telle qu'elle est décrite dans la présente norme (**P 18-573**).

Lavée, séchée et pesée, la prise d'essai (5000 gr) est placée dans le tambour de la machine avec une charge de boulets appropriés à la granularité choisie.

Entraînés durant 500 tours (15 mn) par la tablette en acier, les boulets retombent avec le matériau qu'ils fragmentent.

Ce dernier est ensuite lavé sur un tamis à 1.6 mm, séché et pesé. Le coefficient Los Angeles est le rapport entre la masse du refus et la masse initiale.



*Figure 37: Essai Los-Angeles*

## Chapitre III

---

-Pour le gravie 3/8

L..A%=25 conforme (A% <25)

-pour le gravie 8/15

L..A%=22 conforme (A% <25)

Tableau 08:résultat de l' Essai Los-Angeles

| Gravier | Los-Angeles% |
|---------|--------------|
| 3/8     | 25           |
| 8/15    | 22           |

### e- La porosité

La porosité est définie comme le rapport du volume des vides contenus dans les grains et accessibles à l'eau, au volume réel de l'échantillon. La compacité est le volume plein du matériau sur le volume apparent. On peut dire que la porosité représente le complément à l'unité de la compacité.

Le Principe de l'essai c'est Mesurer le pourcentage des vides connectes avec la surface, a l'intérieur de la masse du l'échant ion suivant la norme p18-554

Tableau09 :résultat de essais La porosité

| Gravier | La porosité % |
|---------|---------------|
| 3/8     | 6             |
| 8/15    | 4             |

Conclusion : Selon les résultats obtenus des essais d'identification, il apparait que les granulats 3/8-8/15 et sable 0/3 présentent des caractéristiques Acceptables pour la fabrication de l'enrobes à chaud.

## Chapitre III

---

### 3. Essais sur les mélanges BB 0/14

#### 3.1-Essais KUMAGAWA

##### a/ Généralités

Pour l'extraction à froide des bitumes. Il est fourni avec : un chauffage électrique, une boîte de 25 filtres de 75 x 250 mm, un ballon de 1000 ml, un trépied, un tuyau réfrigérant et un tuyau de récolte de 10 ml division 1/10 avec un robinet. Alimentation: 220 V, 50 Hz, 1 ph - 400 W.

##### Pièces de Rechange:

Boîte de 25 filtres de 75 x 250 mm

Kit de verrerie

Chauffage électrique



*Figure 38 : appareille Essais KUMAGAWA*

## Chapitre III

---

Méthode d'essai :

On prend une quantité d'enrobés bitumineux ( $m_1$ ) puis la met sur une feuille de filtrage, le bitume va passer par les pores de filtre ( $m_3$ ) et les graines reste sur le feuille de filtrage ( $m_2$ ), on tamise la masse  $m_2$

Tableaux Tamisage la graine reste

Tableau10 : Tamisage la graine- Essais KUMAGAWA-

| Tamis | %de passants BB 0/14 |
|-------|----------------------|
| 16    | 100                  |
| 12,5  | 92                   |
| 10    | 80                   |
| 8     | 69                   |
| 6.3   | 54                   |
| 5     | 44                   |
| 2.5   | 32                   |
| 1.25  | 21                   |
| 0.63  | 14                   |
| 0.315 | 11                   |
| 0.16  | 8                    |
| 0.08  | 6                    |

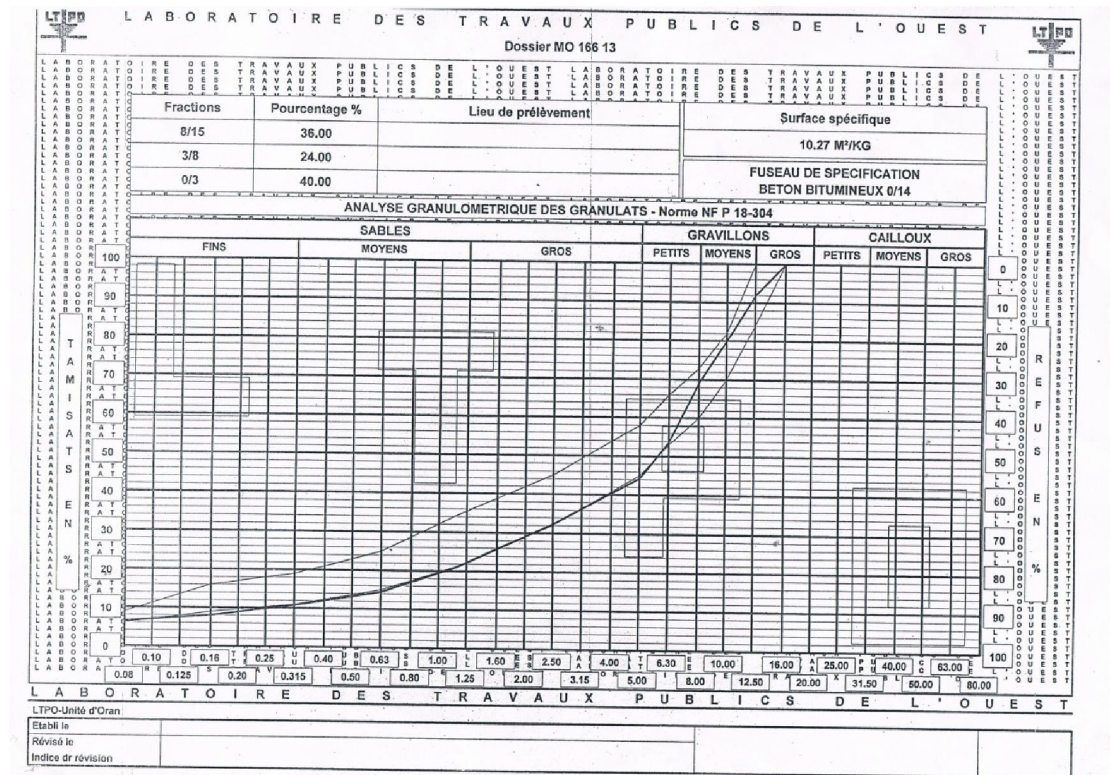


Figure39 : Analyse granulométrique béton bitumineux- Essais KUMAGAWA-

## 3.2 Mesure de la masse volumique apparente de béton *bitumineux*

On détermine la masse de l'éprouvette puis son volume apparent par pesée hydrostatique après paraffinage de sa surface. En application de la loi d'Archimède, on déduit la masse volumique apparente de l'éprouvette.

Cet essai est effectué sur les éprouvettes confectionnés en laboratoire (Duriez ou Marshall) ou sur des prélèvements réalisés in-situ par carottage par la norme NF P 98-250-6

## Chapitre III

Tableau 11 : masse volumique apparente de béton *bitumineux*

|                                                                    |                                                 |
|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Poids de la carotte                                                | 443.1                                           |
| Poids de la carotte paraffinée                                     | 459.8                                           |
| Poids de la paraffine                                              | 16.7                                            |
| Poids de la carotte dans l'eau                                     | 228.9                                           |
| Volume brute                                                       | 197.5                                           |
| Volume de la paraffine                                             | 18.55                                           |
| Volume net                                                         | 178.95                                          |
| La masse volumique apparente = poids de la carotte /<br>Volume net | 2.48gr/cm <sup>3</sup><br>2480kg/m <sup>3</sup> |

### 4. Les résultats obtenus sur L T P O- SAIDA:

#### 4.1 .Les résultats obtenus sur le Béton bitumineux 0/14

##### a) vérification des proportions du mélange

Les combinaisons granulaires opérées a partir des granulométries des fractions 8/15 – 3/8 et 0/3, conduisent a retenir dans ce cas un mélange renfermant les proportions suivantes :

8/15.....36%

3/8.....24%

0/3.....40%

La courbe granulométrique du mélange ainsi définit s'intègre totalement dans le fuseau spécifications de référence (BB 0/14 semi-grenu)

##### a)détermination de la teneur en liant :

### Chapitre III

Tableau12 : formulation BB 0/14 semi-grenu

| constituants      | Formule B |
|-------------------|-----------|
| 8/15              | 36%       |
| 3/8               | 24%       |
| 0/3               | 40%       |
| BITUME40/50       | 5.79      |
| MODULEDE RICHESSE | 3.60      |

#### b) DETERMINATOIN DES PERFORMANCES :

De même que pour le grave bitume, la formule testée a été soumise en laboratoire aux suivants :

- Essais marshal a 60 avec compactage de 50 coups/face

Tableau13 :Les résultats obtenus au terme des essais de Essais marshal

| PERFORMANCES                | FORMULE C | SPECIFICATIONS |
|-----------------------------|-----------|----------------|
| STABILITE MARSHALL<br>EN KN | 11.3      | MIN 10.5 KN    |
| FLUAGE5 (1/10mm)            | 38.38     | MAX40(1/10mm)  |
| Compacité                   | 94%       | MIN 92-MAX96%  |
| Rapports/S <sub>m</sub>     | 0.95      | >0.75          |

Les résultats obtenus montrent dans ce cas aussi que formule C testée enregistre des performances acceptables pas rapport spécifications en ; stabilité /fluage marshal compacité, et tenue al eau.

En définitive les formules proposées pour la fabrication des enrobés en centrale sont les suivantes :

## Chapitre III

---

BETON BITUMINEUX 0/14

8/15.....36%

3/8.....24%

0/3.....40%

BITUME 40/50.....5.79%

### 4.2 Les résultats obtenus sur bitume

Les échantillons de bitume ; utilisés pour les besoins des études de soumission aux essais suivants :

- essais de pénétrabilité à 25°
- mesures du point de ramollissement (TBA)
- mesures de la densité relative à 25°

Tableau 14 ; Les résultats des essais sur bitume

| Désignation des essais                               | Résultats obtenus | Spécifications  |
|------------------------------------------------------|-------------------|-----------------|
| - pénétrabilité à 25°C-100g-5s<br>(1/10mm) NFT66-004 | 42                | 40 à 50 1/10 mm |
| -TBA (°C) NFT66-008                                  | 52,5              | 47 à 60°        |
| -densité relative à 25°C<br>NFT66-007                | 1,038             | 1 à 1,1         |

Les valeurs obtenues caractérisent un bitume de classe 40/50

## 5. Essai sur ERIDUT

### 5.1-Protocole de l'expérience

Les échantillons préparés pour notre essai sont réalisés à la station de béton bitumineux à Ain Zarega (Saida), chez l'entreprise de Zouaoui Mustapha, et cela en suivant les démarches suivantes :



*Figure 40 : Station de béton bitumineux (AIN ZERGA - Entreprise ZOUAOUI Mustapha),*

Première étape :

On prépare une plate forme bien compacté en béton bitumineux de 150cm de longueur, 100cm de largeur et 10cm d'épaisseur voir figure N°.



*Figure 41 : Plateforme préparé en béton bitumineux*

## Chapitre III

---

Deuxième étape :

On trace les dimensions des éprouvette sur la plate forme en BB et on procèdent au découpage voir figure N°.



*Figure 42 : tracer des dimension des éprouvette sur la plate forme*



*Figure 43 : découpage de l'éprouvette*

Les étapes à suivre au niveau du laboratoire :

On utilise un appareil appelé ERIDUTE



*Figure 44 : appareil ERIDITE*

- Cet appareil doit être déposé sur une table spéciale pour l'isoler a des vibration extérieurs
- On dépose notre échantillon sur la plaque de l'ERIDITE, prenant en considération la position centrale de l'échantillon
- le pôle de récepteur et de l'émetteur doit toucher les deux extrémités de l'échantillon
- On laisse l'appareil 10min après son démarrage
- On donne l'appareil des fréquences correspond le béton bitumineux pour avoir les valeurs de son résonance qui on les utilisé après dans nos calcule



Figure 45 : Teste de l'éprouvette 100x100x500

### 5.2 Les résultats de l'essai de l'ERUDITE

Tableau15: résultats suivant les vibrations longitudinale (module dynamique)

|                  | Taille des éprouvettes<br>(mm) | $f_{rl}$ (Hz) | Q    |
|------------------|--------------------------------|---------------|------|
| Température 20°C | 100x100x300                    | 4900          | 2.13 |
|                  | 100x100x500                    | 2850          | 7.5  |

Tableau16: résultats suivant les vibrations de Torsion (module de cisaillement)

|                  | Taille des éprouvettes<br>(mm) | $f_{rt}$ (Hz) | Q    |
|------------------|--------------------------------|---------------|------|
| Température 20°C | 100x100x300                    | 2800          | 0.97 |
|                  | 100x100x500                    | 2700          | 0.93 |

Le module dynamique complexe du BB:

$$E^* = E' + iE'' = |E^*|e^{i\varphi}$$

### Chapitre III

D'où  $E'$  : est le module de stockage et  $E''$  est le module de perte

$$|E^*| = \sqrt{(E')^2 + (E'')^2}$$

$|E^*|(E_d)$  : est le module dynamique ;

$$E' = |E^*| \cos \varphi$$

$$E'' = |E^*| \sin \varphi$$

$$E_d = |E^*| = 4 \cdot L^2 \cdot \rho \cdot f_r^2 \cdot 10^{-12}$$

$$\xi = \frac{1}{Q} = \tan \varphi$$

$\xi$  : est le facteur d'amortissement,  $Q$ : est le facteur de qualité et  $\varphi$ : est l'angle de phase;

Le module de cisaillement complexe du BB:

$$G^* = G' + iG'' = |G^*|e^{i\varphi}$$

$$G_d = |G^*| = 4 \cdot L^2 \cdot \rho \cdot f_{rt}^2 \cdot 10^{-12}$$

$|G^*|(G_d)$  : est le module de cisaillement dynamique ;

Le coefficient de Poisson dynamique ( $\mu_d$ ) peut être calculé au départ des fréquences propres longitudinales et de torsion, en utilisant la formule :

$$\mu_d = \frac{E_d}{2G_d} - 1$$

Les résultats suivant la dimension des éprouvettes:

Tableau 17: résultats module dynamique

| Eprouvette    | $E_d$ (MPa) | Angle de phase $\varphi^\circ$ | $E'$ (MPa) | $E''$ (MPa) |
|---------------|-------------|--------------------------------|------------|-------------|
| 100x100x300mm | 21436.12    | 29.15                          | 18721.18   | 18441.48    |
| 100x100x500mm | 20143.8     | 7.6                            | 19966.84   | 2664.15     |

### Chapitre III

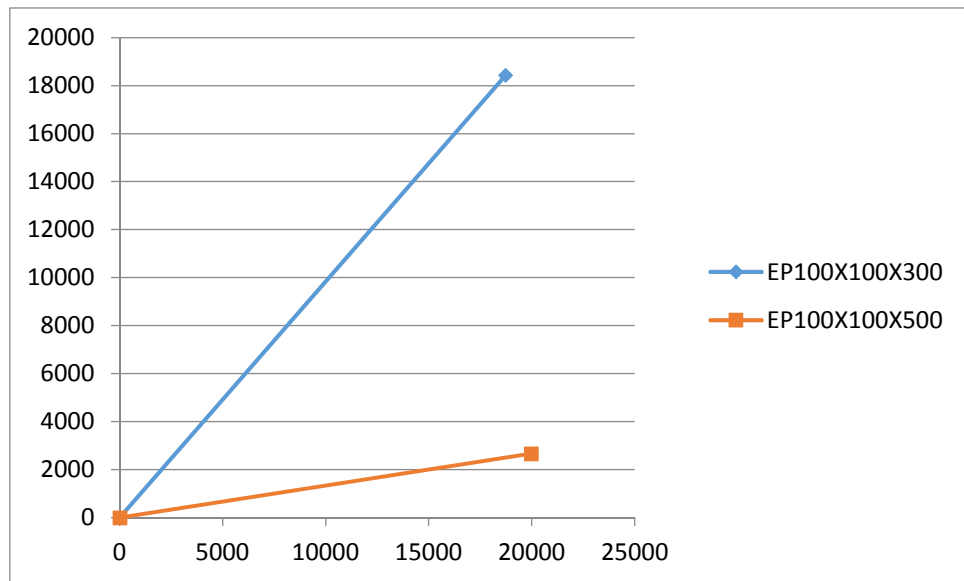


Figure46: Courbe maitre du module complexe Dynamique pour les deux éprouvettes

En remarque bien l'effet d'échelle (taille) dans les résultats obtenue ; lorsque les dimensions de l'éprouvette augmente le module dynamique diminue.

Tableau18 : résultats module de cisaillement

| Eprouvette    | $G_d(\text{MPa})$ | Angle de phase $\varphi^\circ$ | $G'(\text{MPa})$ | $G''(\text{MPa})$ |
|---------------|-------------------|--------------------------------|------------------|-------------------|
| 100x100x300mm | 6999.55           | 45.87                          | 4873.78          | 5824.01           |
| 100x100x500mm | 18879.2           | 47.87                          | 12664.45         | 14001.28          |

## Chapitre III

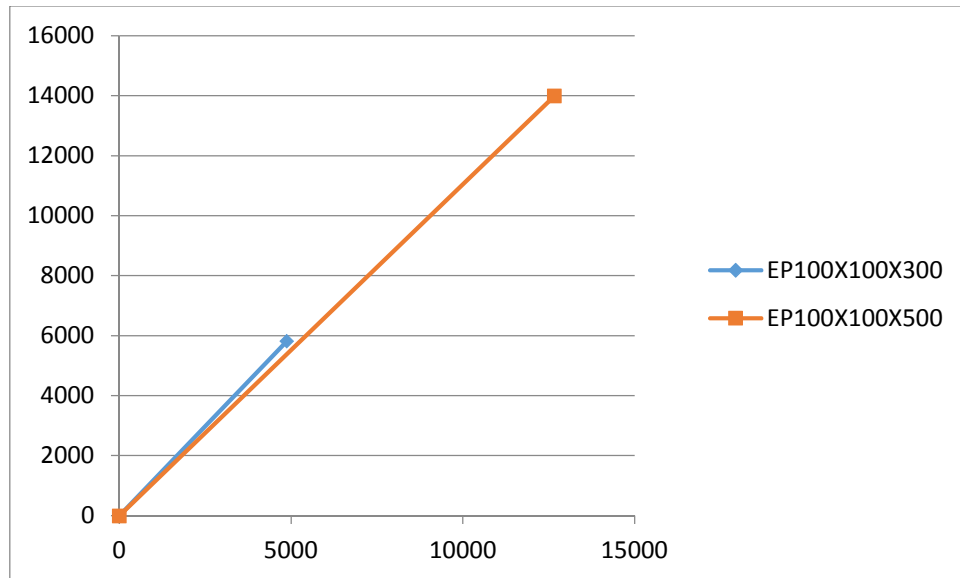


Figure47: Courbe maitre du module de Cisaillement Dynamique pour les deux éprouvettes

Et manière opposante à la première remarque; la valeur du module de cisaillement augmente avec l'augmentation de la taille d'éprouvette.

Tableau19: résultats coefficient de poisson

| Eprouvette    | $E_d$ (MPa) | $G_d$ (MPa) | $\mu_d$ |
|---------------|-------------|-------------|---------|
| 100x100x300mm | 21436.12    | 6999.55     | 0.53    |
| 100x100x500mm | 20143.8     | 18879.2     | -0.46   |

Pour le coefficient de poisson les résultats sont presque incluse dans l'intervalle  $-1 < \mu_d \leq 0.5$

### L'effet du changement de la température :

L'effet du changement de température sur le module dynamique est testé sur un seul type d'éprouvette le 100x100x300 mm

## Chapitre III

Tableau20: L'effet du changement de température sur le module dynamique

| Température | $f_r$ (Hz) | Q    | $\varphi^\circ$ | $E_d$ (MPa) | $E'$ (MPa) | $E''$ (MPa) |
|-------------|------------|------|-----------------|-------------|------------|-------------|
| 20°C        | 4900       | 2.13 | 29.15           | 21436.12    | 18721.18   | 18441.48    |
| 40°C        | 2700       | 6.5  | 8.74            | 6508.51     | 6504.09    | 988.97      |

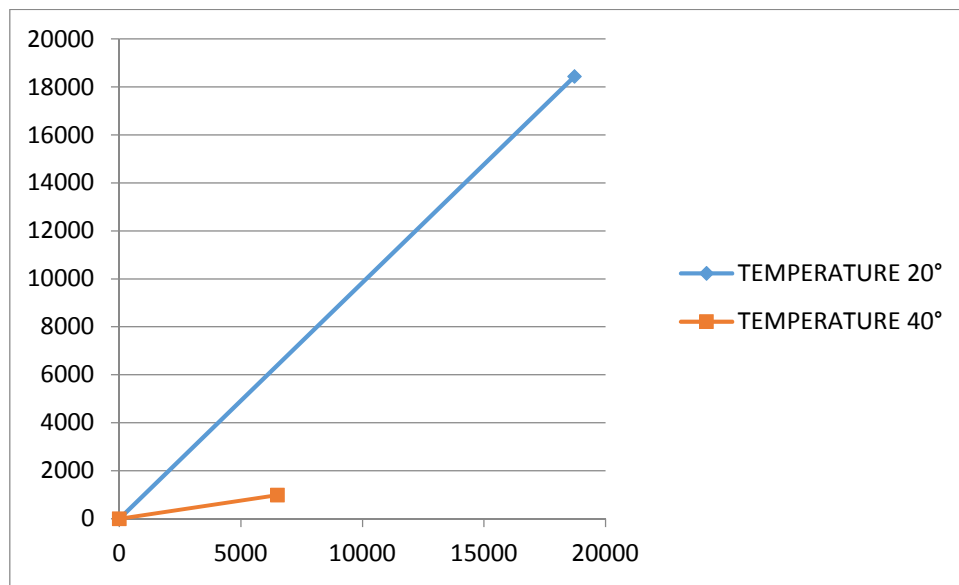


Figure48: l'effet de la température sur le module dynamique de l'éprouvette 100x100x300mm

On constate bien que le module dynamique diminue avec l'augmentation de la température, et le module de perte augmente par rapport au module de stockage ce qui signifie que le matériau a une tendance d'avoir un comportement visqueux que d'un comportement élastique.

### 6. Conclusion :

Après ces résultats expérimentaux ; à partir de l'analyse des constituants jusqu'aux tests par l'ERIDUT sur notre béton bitumineux objet d'étude on peut conclure ce qui suit:

Les résultats généralement obtenus sont acceptables si on les compare avec des essais mécaniques dynamiques.

Les modules dynamiques complexe ou de cisaillement change de valeur suivant les dimensions de l'éprouvette testée ; pour le module complexe une diminution de la valeur

## Chapitre III

---

quand la dimension de l'éprouvette augmente et la valeur du module de cisaillement augmente lorsque la dimension de l'éprouvette augmente.

L'effet de la température sur le module complexe, d'où on constate la diminution de la valeur du module dynamique avec l'augmentation de la température et vis-ver-ça.

## Conclusion générale

---

### Conclusion Générale:

Les essais non destructives sont des moyennes très intéressantes pour l'évaluation des caractéristiques mécaniques des matériaux, elles présentent un gain très important dans le temps et les coups, et un moyen utile dans les investigations sur l'état des ouvrages en cours de service telles les corps de chaussées routier.

A cette effet l'outil ultrason tel 'ERIDUT' c'est un moyen intéressant pour l'étude du béton bitumineux avec ces différents types pour mieux comprendre son comportement dynamique, afin d'améliorer ces caractéristiques mécaniques et produire une couche de roulement qui résiste bien au trafic routier.

Avec le climat dans notre territoire national qui reste entre les extrémités d'un climat très froid à un climat très chaud qui influe profondément sur le comportement et la résistance des couches de roulement, l'étude de l'effet de la température sur le BB avec un moyen ultrason restent insuffisantes.

L'évaluation des caractéristiques dynamiques des enrobés bitumineux avec le changement des différents paramètres (granulats, bitume, température,...), c'est un domaine de recherche très large et vaste à explorer surtout en terme de corrélation de ces résultats obtenues avec un moyen ultrason et des essais mécaniques.

### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] :SHELL BITUMES, *Techniques et Utilisations*, Ed. Société des Pétroles Shell, 1991.
- [2] :ADDALA, F., *Etude du comportement rhéologique des bitumes à moyenne et basseTempérature. Mise au point d'un nouvel essai de torsion-compression d'éprouvette creuse(T.E.C.). Thèse présentée à l'Institut National des Sciences Appliquées*, 1989.
- [3] :PUCCI, T., *Approche prévisionnelle de la fissuration par sollicitation thermique desRevêtements bitumineux*, Thèse de Doctorat EPFL Lausanne, 2000.
- [4] :OLARD, F., *étude et modélisation de comportement thermomécanique des enrobés bitumineux.mémoire de doctorat*, Lyon, 2000.
- [5] :OLARD, F., Di BENEDITTO, H, DNY, A., VANISCOTE, J.C., "Properties of bituminous mixtures at low temperatures and relations with binder characteristics",2003.
- [6] :DI BENEDETTO, H., "Nouvelle approches du comportement des enrobésbitumineux : résultatsexpérimentaux et formulation rhéologique", *Mechanical Tests for Bituminous Mixes, Characterization, Design and Quality Control, Proceedings of the Fourth Rilem Symposium, Budapest, 1990.*
- [7] :FERRY, J.D.,*viscoelastic properties of polymers*, 3rd End, John Wiley& Sons, 1980
- [8] :FrançoisOLARD,*thèse de doctorat, paris*, 2003.
- [9] : SOLIMAN (S.) – *Influence des paramètres de formulation sur le comportement à la fatigue d'un enrobé bitumineux – rapport de recherche LPC, n°58, 103 p, septembre 1976*

## Bibliographie

---

- [10] :DOUBBANEH, E., *comportement mécanique des enrobés bitumineux de petites ou grandes déformations.-thèse, lyon, 1995,217p.*
- [11] :DI BENEDETTO, H, DE LA ROCHE, C., *modulus of the art StiffnessModulus and fatigue of bituminous mixtures, E et FN spon, Ed. L, Francken, 1998.*
- [12] :SOLTANI, M.A., *fatigue des enrobes bitumineux. Thèse de doctorat, lyon,1998.*
- [13] :CHARIF, K., *Contribution à l'étude du comportement mécanique du béton bitumineux en petite et grandes déformations. Thèse de doctorat, paris, 1991,277p.*
- [14] :FRANCKEN, L., VANELSTRAETE, A., *Relation between mix stiffness and binder complex modulus. Eurobitume Workshop, 1995.*
- [15] :UGE, P., GEST, G., GRAVOIS, A., *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, N° spécial V, 1977,pp. 199-213.*
- [16] :ZENG, M., BAHIA, H.U., ZAHAI, h., ANERSON, MR., TURNER, P.,*Annuel meeting of th association of asphalt paving technologists, 2001.*
- [17] :WITCZAK, M.W., PELLINEN, T.K, *AC Mixture Response to Performance E\* and Sm Prediction Equation Methodology Results, Superpave Support and Performance Models Management, 2000.*
- [18] :HEUKELOM, W., KLOMP, J.G., *Road design and dynamic loadings AAPT, Vol. 33, 1964.*
- [19] :LEE, HJ., *Uniaxial constitutive modeling of asphalt concrete using viscoelasticity and continuum damage theory. NorthCarolina state university, 1996.*
- [20]:WITCZAK, M.W., ANDREI, D., MIRZA, W., *Development of revised Predictive Model for the dynamic modulus of asphalt Mixtures. Universityof Maryland, March1999.*

## Bibliographie

---

**[21]** : Guide technique – Conception et dimensionnement des structures de chaussées –  
Ed. SETRA-LCPC, December 1994

**[22]** : DE LA ROCHE (C.) and ODEON (H.). - Expérimentation USAP/LCPC/Shell -  
Fatigue des Enrobés - Phase 1 - Rapport de synthèse. Document de Recherche LCPC,  
sujet n° 2.01.05.2, 1993.

**[23]** : Cours de route tome 1 – dimensionnement des chaussées – Presses de l'Ecole  
Nationale des Ponts et Chaussées, 1984

**[24]** : [http://www.cchst.com/oshanswers/phys\\_agents/vibration/vibration\\_intro.html](http://www.cchst.com/oshanswers/phys_agents/vibration/vibration_intro.html)

**[25]** : *nondestructive tests of in situ materials strenath indices*

**[26]** : *Evaluation non destructive des matériaux a l'aide des ultrasons*

**[27]** : [www.infralab.ch](http://www.infralab.ch)

**[28]** : Jean-Michel Simonin « Contribution à l'étude de l'auscultation des chaussées  
par méthode d'impact mécanique pour la détection et la caractérisation des défauts  
d'interface » 2005

**[29]** : « DURABILITE MECANIQUE DU COLLAGE BLANC SUR NOIR DANS LES  
CHAUSSEES » pp.117-119. Thèse de DOCTORAT a Université de Nantes 2004

**[30]** : Collection BORDAS-DUNOD « Recommandations pour l'emploi de la  
méthode de fréquence de résonance dans le contrôle des éprouvettes en béton »

RILEM recommandation on non-destructive testing methods, Vol. 16 – N° 95 -Matériaux  
et Constructions, 1983.

## Liste de figures

---

### Liste des figures

Figure 01 : Macrostructure des asphaltènes et Schématisation de la Structure

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Colloïdale du bitume.....                                                                                                 | 06 |
| Figure 02 : Classes de comportement des bitumes en fonction de $I_aI$ et $T$ .....                                        | 07 |
| Figure 03 : Essai de pénétrabilité pour le bitume.....                                                                    | 08 |
| Figure 04 : Essai RTFOT.....                                                                                              | 09 |
| Figure 05 : Essai PAV.....                                                                                                | 10 |
| Figure 06 : Expérience d'effacement et réponse du matériau en contrainte.....                                             | 11 |
| Figure 07 : Essai de traction directe d'après Anderson.....                                                               | 12 |
| Figure 08 : Schéma de l'essai de flexion 3 points sur éprouvette de bitume<br>Pré-entaillée, d'après Lee et Hesp.....     | 13 |
| Figure 09 : Organigramme de formulation d'enrobés bitumineux en Algérie.....                                              | 16 |
| Figure 10: Comportement "type" des bétons bitumineux, ( $\epsilon$ ) déformation –<br>(N) nombre dechargements.....       | 18 |
| Figure 11 : Evolution de la norme du module complexe $S_m$ avec<br>l'amplitude de déformation axiale, d'après Charif..... | 21 |
| Figure 12: Résultats classiques pour l'essai de traction directe sur enrobés.....                                         | 22 |
| Figure 13 : Méthode d'estimation de la contrainte de rupture thermique.....                                               | 24 |
| Figure 14 : .Appareil développé par Monismith et al. (1965) pour<br>l'essai de retrait thermique Empêché.....             | 25 |
| Figure 15: .Eléments de Maxwell élément Kelvin-Voigt.....                                                                 | 26 |
| Figure 16 :Modèle de Maxwell généralisé.....                                                                              | 27 |
| Figure 17 : Modèle de Kelvin-Voigt généralisé.....                                                                        | 27 |

## Liste de figures

---

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 18 : Application de la compression Marshall.....                                               | 28 |
| Figure 19 : La compression (Duriez).....                                                              | 29 |
| Fig20 : Schéma d'une coupe de chaussée.....                                                           | 30 |
| Fig.21 : Schéma des différents types de structures de chaussée.....                                   | 31 |
| Figure22 : Représentation de mesures d'exposition d'une vibration.....                                | 32 |
| Figure 23 : Relation entre amplitude de fréquence pour une poutre à<br>proximité de la résonance..... | 33 |
| Fig.24 : Illustrations du la collographe.....                                                         | 36 |
| Fig. 25 : Principe de fonctionnement du FallingWightDeflectometer.....                                | 38 |
| Fig26 : Principe de fonctionnement de l'impact écho.....                                              | 38 |
| Figure 27 : Bloc diagramme pour une mesure de fréquence de résonance<br>(Appareil ERUDIT).....        | 41 |
| Fig. 28 : Le matériel de mesure .....                                                                 | 41 |
| Figure 29:Positionnement des transducteurs pour une vibration longitudinale.....                      | 43 |
| Figure30: Position des transducteurs pour une mesure de vibration de torsion.....                     | 43 |
| Figure 31 : Position des transducteurs pour une mesure de vibration de flexion .....                  | 44 |
| Figure 32 : Analyse granulométrique.....                                                              | 46 |
| Figure 33 : : Analyse granulométrique de gravie 8/15.....                                             | 47 |
| Figure 34 : Analyse granulométrique de gravie 3/8.....                                                | 48 |
| Figure 35 : Analyse granulométrique de gravie 0/3.....                                                | 49 |
| Figure 36 : Equivalent de sable.....                                                                  | 53 |
| Figure 37: Essai Los-Angeles.....                                                                     | 54 |
| Figure 38 :: appareille Essais KUMAGAWA.....                                                          | 56 |

## Liste de figures

---

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure39 : Analyse granulométrique béton bitumineux.....                                          | 58 |
| Figure 40 : Station de béton bitumineux<br>(AIN ZERGA – Entreprise ZOUAOUI Mustapha),.....        | 62 |
| Figure 41 : Plate forme préparé en béton bitumineux.....                                          | 62 |
| Figure 42 : tracer des dimension des éprouvette sur la plate forme.....                           | 63 |
| Figure 43 : découpage des éprouvette.....                                                         | 63 |
| Figure 44 : appareil ERIDITE.....                                                                 | 64 |
| Figure 45 : Teste de l'éprouvette 100x100x500.....                                                | 65 |
| Figure46: Courbe maitre du module complexe Dynamique pour les deux éprouvette..                   | 67 |
| Figure47: Courbe maitre du module de Cisaillement Dynamique pour les deux<br>éprouvettes.....     | 68 |
| Figure48: l'effet de la température sur le module dynamique de l'éprouvette<br>100x100x300mm..... | 69 |

## Liste des tableaux

---

### Liste des tableaux

|                                                                                             |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Tableau01 :Analyse granulométrique de gravie 8/15.....                                      | 46        |
| Tableau02 : Analyse granulométrique de gravie 3/8.....                                      | 47        |
| Tableau03:Analyse granulométrique de sable 0/3.....                                         | 48        |
| <i>Tableau04 : Masses volumiques.....</i>                                                   | <i>50</i> |
| <i>Tableau 05: coefficient d'aplatissement gravie 3/8.....</i>                              | <i>51</i> |
| Tableau 06: coefficient d'aplatissement gravie8/15.....                                     | 52        |
| Tableau07 : Equivalent de sable.....                                                        | 53        |
| Tableau 08:résultat de l' Essai Los-Angeles.....                                            | 55        |
| Tableau09 :résultat de essais La porosité.....                                              | 55        |
| Tableau10 : Tamisage la graine- Essais KUMAGAWA-.....                                       | 57        |
| Tableau11 : masse volumique apparente de béton <i>bitumineux</i> .....                      | 59        |
| Tableau12 : formulation BB 0/14 semi-grenu.....                                             | 60        |
| Tableau13 :Les résultats obtenus au terme des essais de Essais marshal.....                 | 60        |
| Tableau14 ;Les résultats des essais sur bitume.....                                         | 61        |
| <i>Tableau15: résultats suivant les vibrations longitudinale (module dynamique).....</i>    | <i>65</i> |
| <i>Tableau16: résultats suivant les vibrations de Torsion (module de cisaillement).....</i> | <i>65</i> |
| <i>Tableau17: résultats module dynamique.....</i>                                           | <i>66</i> |
| Tableau18 : résultats module de cisaillement.....                                           | 67        |
| Tableau19: <i>résultats</i> coefficient de poisson.....                                     | 68        |
| Tableau20: L'effet du changement de température sur le module dynamique.....                | 69        |