

République Algérienne Démocratique et Populaire

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



**Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics**

المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية

Code :.....

# Mémoire

Pour l'Obtention du Diplôme de MASTER

Filière : TRAVAUX PUBLICS

Spécialité : INFRASTRUCTURES DE BASE

## Thème

Recherche bibliographie des caractéristiques de fatigue des matériaux routiers et lois de fatigue prise en considération dans le dimensionnement des chaussées

*Encadré par :*

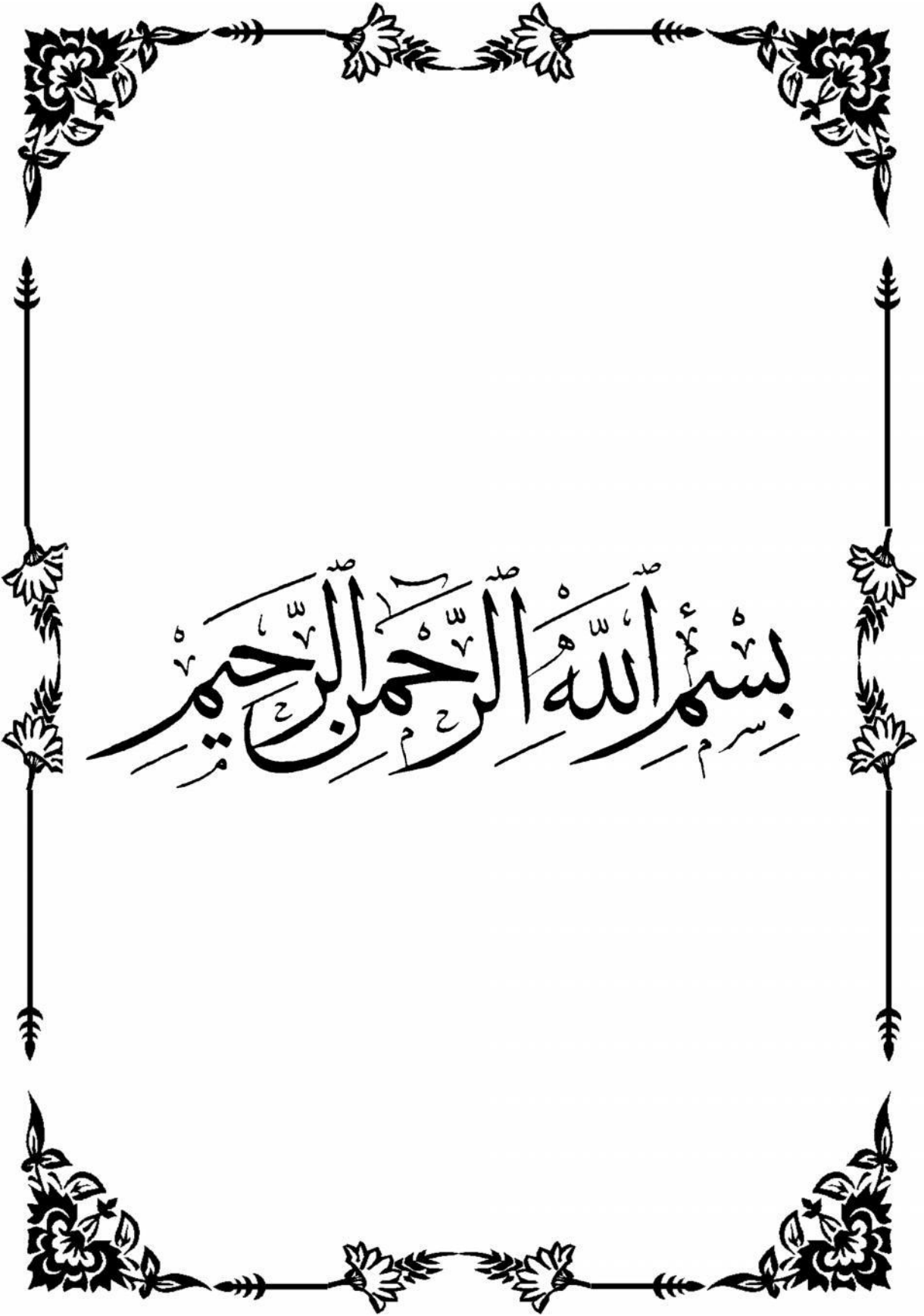
**Pr.DERRICHE Zohra**

*Présenté par :*

**HAMMACHI RABAH**

**Promotion 2015**

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



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## REMERCIEMENTS

*Nous remercions le Dieu qui nous a orientés au chemin du savoir et les portes de la science. Nous tenons à remercier vivement tous ceux qui nous ont aidés à l'élaboration de ce mémoire ; nous pensons particulièrement à :*

- *PR.DERRICHE, notre encadreur, qui nous a accompagnée tout au long de notre travail, pour son écoute attentive et ses précieux conseils qui nous ont orienté et amélioré notre travail.*
- *Aux membres de jury qui ont accepté de valider notre travail.*
- *Ainsi qu'à tous les professeurs d'ENSTP qu'on a eu tout au long de notre cycle.*

*Enfin, nous remercions toute personne qui nous a aidées de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.*

*RABAH*

## SOMMAIRE :

CHAPITRE I : Fonctionnement d'une chaussée routière.....	2
1. Introduction [5] : .....	3
2. Les différents types de structures [5] : .....	5
2.1. STRUCTURE EN GNT [5] : .....	6
2.2. STRUCTURE EN MATERIAUX TRAITES AUX LIANTS HYDROCARBONES [5] : .....	7
2.3. LES STRUCTURES SEMI-RIGIDES [5] : .....	8
2.4. LES STRUCTURES RIGIDES [5] : .....	8
2.5 FONCTIONNEMENT DE LA CHAUSSEE [1] : .....	11
CHAPITRE II : Notion de fatigue des matériaux routiers.....	13
I. GENERALITESURLESENROBESBITUMINEUX [1] : .....	14
I.1 COMPOSITIONDESENROBES [1] : .....	14
I.1.1 LES LIANTS HYDROCARBONES [1] : .....	14
I.1.2 LES GRANULATS [1] : .....	14
I.2 LESESSAISDECARACTERISATION DESBITUMES [1].....	15
I.2.1 ESSAIS STANDARDS [1] : .....	17
I.2.2 LES ESSAIS MECANIQUES [1] : .....	17
II. PHENOMENEDELA FATIGUEDESENROBESBITUMINEUX [1] 18	
II.1GENERALITES [1].....	19
II.1.1NOTATIONS ETDEFINITIONS [1].....	19
II.1.2 DISPERSION DES DUREES DE VIE [1] .....	20
II.1.3LIMITED'ENDURANCE.....	21
CHAPITRE III : Les essais de fatigue des matériaux routiers .....	23
1. Introduction [2] : .....	24
2. Les essais de fatigue [2] : .....	24
2.1. ESSAIS DE FLEXION [2] : .....	24
2.1.1. FLEXION2 POINTS [2] : .....	24

2.1.2 FLEXION 3 POINTS [2] :.....	25
2.1.3 FLEXION 4 POINTS [2] :.....	26
2.1.4 FLEXION SUPPORTEE [2] :.....	27
2.2 ESSAIS DE TRACTION – COMPRESSION [2] .....	28
2.2.1 TRACTION DIRECTE A LA "MAER" [2] .....	28
2.2.2. TRACTION–COMPRESSION [2] .....	29
2.2.3 L'ESSAI TRIAXIAL [2] .....	30
2.2.4 TRACTION INDIRECTE [2] .....	30
2.3 ESSAIS DE CISAILLEMENT [2] .....	31
II.2.3.1 CYLINDRE CREUX [2] .....	31
2.3.2 ESSAI DE CISSION [2] : .....	32
CHAPITRE IV : .....	34
Les mécanismes de fatigue des matériaux routiers.....	34
I. Introduction [4] : .....	35
II. Types de rupture [4] : .....	35
2.1. Types élémentaires de rupture : .....	36
I. Rupture fragile : .....	36
II. Rupture ductile : .....	36
2.2 Fissures spécifiques selon la structure : .....	36
2.2.1. Structures rigides .....	36
2.2.2. Structures semi-rigides .....	37
CONCLUSION GENERALE.....	40

## LISTE DES FIGURES:

Figure I.1: Schéma de passage de la charge roulante au point de mesure [1] .....	3
Figure I.2: Déformation longitudinale résultante mesurée au point par la jauge [1]..	4
Figure I.3: Coupe type d'une structure de chaussée souple [4] .....	6
Figure II.1: Essai de pénétrabilité [1] .....	16
Figure II.2: Essai RTFOT [1]. .....	16
Figure II.3: Essai PAV [1] .....	17
Figure II.4: Essais homogènes sur les enrobés (Température 20°C) [1] .....	18
Figure II.5: Courbe de WÖHLER [1] .....	20
Figure II.6: Limite d'endurance ou limite de fatigue [1]. .....	21
Figure III.1: Schématisation de l'éprouvette et de la sollicitation dans l'essai flexion 2 points [2]. .....	25
Figure III.2: Appareil de l'essai de flexion 2 points (LCPC-Nantes – France) [2] ...	25
Figure III.3: Schématisation de l'éprouvette et de la sollicitation dans l'essai flexion 3 points [2]. .....	26
Figure III.4: Schématisation de l'éprouvette et de la sollicitation dans l'essai flexion 4 points [2]. .....	26
Figure III.5: Appareil de l'essai de flexion quatre points (DWW – Pays Bas) [2] ...	27
Figure III.6: Essai de flexion supportée sur poutre d'après BARKSDALE [2] .....	27
Figure III.7: Schématisation de l'éprouvette et de la sollicitation dans l'essai de traction directe [2]. .....	28
Figure III.8: Schématisation de l'éprouvette et de la sollicitation dans l'essai traction- compression [2]. .....	29
Figure III.9: Essai de traction – compression (ENTPE – France) [2]. .....	29
Figure III.10: Schématisation de l'éprouvette et de la sollicitation dans l'essai triaxial [2] .....	30
Figure III.11: Schématisation de l'éprouvette, du chargement dans l'essai traction indirecte, et de la surface de rupture généralement rencontrée [2]. .....	31
Figure III.12: Principe de l'essai du cylindre creux [2]. .....	31
Figure III.13: Eprouvette et la fissuration dans l'essai de cission [2]. .....	33
Figure IV.1: Distinction de trois phases différentes dans un essai de fatigue [3].....	35

## *LISTE DES TABLEAUX :*

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients [1].....	9
Tableau II.1 : Essais mécaniques sur les liants [1]. .....	18
Tableau IV.1: Types de rupture fragile[4] .....	36

## Résumé :

L'application d'une charge roulante induit une déformation en flexion des couches de la chaussée. Cette flexion entraîne des sollicitations en compression verticale à l'endroit de la charge et des sollicitations en traction horizontale à la base des couches d'enrobé [Corté, 2005]. A la base d'une couche de roulement, l'amplitude et la fréquence de la déformation induite dépendent de la profondeur du point, de la géométrie du dispositif de chargement (roues jumelées ou simples), de la température et de la vitesse de passage de la roue. Le caractère viscoélastique du matériau joue aussi un rôle non négligeable [De la Roche, 1996, Rivière, 1996]. C'est le cumul des sollicitations en traction qui entraîne l'endommagement puis la rupture par fatigue.

Les essais normalisés en France sont conduits sur des éprouvettes trapézoïdales collées sur leur grande base, sur lesquelles on impose soit l'effort, soit le déplacement à l'extrémité libre. Ce dispositif est censé reproduire l'état de sollicitation alterné à la base des couches d'enrobé. L'essai est conduit à une fréquence de l'ordre de 10 Hz, cette fréquence étant liée à la vitesse des véhicules (soit les poids lourds sur une chaussée routière). Du fait du caractère viscoélastique du matériau, le mode d'asservissement, la température et la fréquence de l'essai ont une influence significative. On a montré que ménager des temps de repos peut modifier très sensiblement la durée de vie des éprouvettes [Bruhat, 1999, Domec, 2005].

Cette mémoire est consacrée à Recherche bibliographie des caractéristiques de fatigue des matériaux routiers. Après un court chapitre introduisant les fonctionnements d'une chaussée routière sous la sollicitation du trafic, le chapitre 2 traite des notions de fatigue des matériaux routiers. Le chapitre 3 est consacré aux essais aux laboratoires de fatigue. Divers mécanismes de fatigue sont ensuite présentes au chapitre 4.

## ملخص:

تطبيق حمولة المتداول يؤدي الى تشوه الانحناء للطبقات الرصف. هذا الانحناء يؤدي إلى تشدد في ضغط الرأس في الموقع من الحمل والإجهاد الشد الأفقية في قلب الطبقات المغلفة [كورت 2005]. في قاعدة دورة ترتدي، والسعة والتردد من سلاله المستحث تعتمد على عمق هذه النقطة، هندسة الجهاز تحميل (التوأم أو عجلة واحدة)، ودرجة الحرارة ومعدل مرور من عجلة القيادة. طبيعة اللزجة من المواد أيضا يلعب دورا هاما [دي لا روش، 1996 نهر، 1996]. وتؤكد الشد المتراكمة الناتجة الضرر والفشل والتعب.

وتجرى الاختبارات القياسية في فرنسا على عينات شبه منحرف المستعدين على قواعدهم الكبيرة، التي تفرض هو القوة، أو النزوح في نهاية حرة. ويهدف هذا الجهاز إلى إعادة إنتاج الدولة يتحامل بالتناوب مع أساس الطبقات المغلفة. ويجري اختبار على تردد حول 10 هرتز، هذا التردد التي تتعلق سرعة المركبات (الشاحنات أو على رصيف الطريق). بسبب الطبيعة اللزجة للمواد، وطريقة الاستبعاد، ودرجة الحرارة وتواتر اختبار لديهم تأثير كبير. فقد تبين أن فترات الراحة المنزلية يمكن أن يغير كثيرا من حياة العينات.

وتكرس هذه الذاكرة للبحث مراجع من خصائص التعب من المواد الطريق. بعد فصل قصير يقدم طريقة عمل رصيف الطريق تحت وطأة حركة المرور، ويتناول الفصل 2 مفاهيم التعب من المواد الطريق. ويخصص الفصل 3 لمختبرات الفحص التعب. آليات التعب المختلفة ثم يتم الحالية في الفصل 4.

## ABSTRACT :

The application of a rolling load induces a bending deformation of the pavement layers. This bending leads to stresses in the vertical compression at the location of the load and the horizontal tensile stresses in the core of coated layers [Corté 2005]. At the base of a wearing course, the amplitude and frequency of the induced strain depends on the depth of the point, the geometry of the loading device (twin or single wheel), the temperature and the rate of passage of the wheel. The viscoelastic nature of the material also plays a significant role [De la Roche, 1996 River, 1996] .It accumulated tensile stresses resulting damage and fatigue failure.

The standard tests are conducted in France on trapezoidal specimens bonded on their large bases, on which is imposed is the force, or displacement at the free end. This device is intended to reproduce the biasing state alternately with the basis of the coated layers. The test is conducted at a frequency of about 10 Hz, this frequency being related to the speed of vehicles (trucks or on a road pavement). Because of the viscoelastic nature of the material, the mode of enslavement, the temperature and the test frequency have significant influence. It was shown that household rest periods could alter significantly the life of the specimens.

This memory is dedicated to search bibliography of fatigue characteristics of road materials. After a short chapter introducing the workings of a road pavement under the stress of traffic, Chapter 2 deals with fatigue notions of road materials. Chapter 3 is devoted to the fatigue testing laboratories. Various fatigue mechanisms are then present in Chapter 4.

### INTRODUCTION

La route est un élément capital et indispensable au développement de nos sociétés. Intégrée à la problématique environnementale, elle se doit de participer au cadre du développement durable en employant des constituants dont le cycle de vie pourra être ré- initié dans le futur.

Parmi les matériaux qui la composent, les structures flexibles à base d'enrobés bitumineux ont pris une part extrêmement importante dans sa constitution. Un gisement gigantesque de bitume et de granulats se trouve donc disponible sur la planète et il se doit d'être réutilisé.

Le bitume, matière extraite d'un pétrole de plus en plus rare, présente contrairement au ciment, l'avantage de se ramollir par réchauffage des agrégats d'enrobés. Il est donc possible, moyennant régénération de ses qualités, de réutiliser les matériaux bitumineux.

Il apparaît donc nécessaire d'approfondir les études menées sur les matériaux de chaussées et en particulier, les bitumes et les enrobés bitumineux. Ces études doivent s'appliquer à terme, au dimensionnement des chaussées. Un effort important se concentre dans la compréhension, aussi bien au laboratoire que sur la route, de la performance des enrobés bitumineux dans les chaussées telle que la résistance à l'orniérage, la résistance au retrait thermique, la résistance à la fatigue.

La fatigue est l'un des principaux modes de ruine des chaussées bitumineuses.

Ce phénomène conditionne par ailleurs leur dimensionnement dans tous les pays possédant une méthode rationnelle de dimensionnement.

# CHAPITRE I : Fonctionnement d'une chaussée routière

## 1. Introduction [5] :

La chaussée routière peut être définie-en :

- **Au sens géométrique** : comme la surface aménagée de la route sur laquelle circule les véhicules.
- **Au sens structurel** : c'est l'ensemble des couches des matériaux superposées qui permettent la reprise des charges.

La chaussée routière fait appel à trois grandes familles de matériaux, toutes à base de granulats :

- Matériaux non liés « GNT ».
- Matériaux traités aux liants hydrocarbonés GB, BB, EME.
- Matériaux traités aux liants hydrauliques GC, BC, Bm.

Le passage d'un véhicule engendre des contraintes normales et de cisaillement dans toutes les directions des couches de la chaussée. La couche d'assise constituée de matériaux bitumineux subit essentiellement le phénomène de fatigue causé par les cycles de traction/compression dans la direction parallèle à l'axe de roulement. Les figures I.1 et I.2 montrent la déformation longitudinale à la base de la couche d'assise au passage d'une roue.

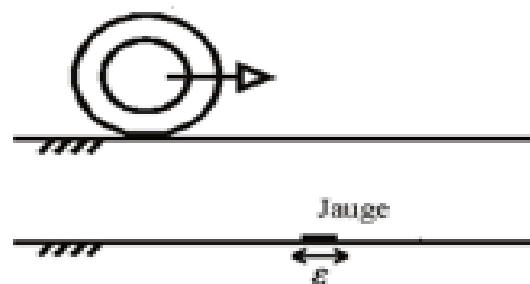


Figure 0.1: Schéma de passage de la charge roulante au point de mesure [1]

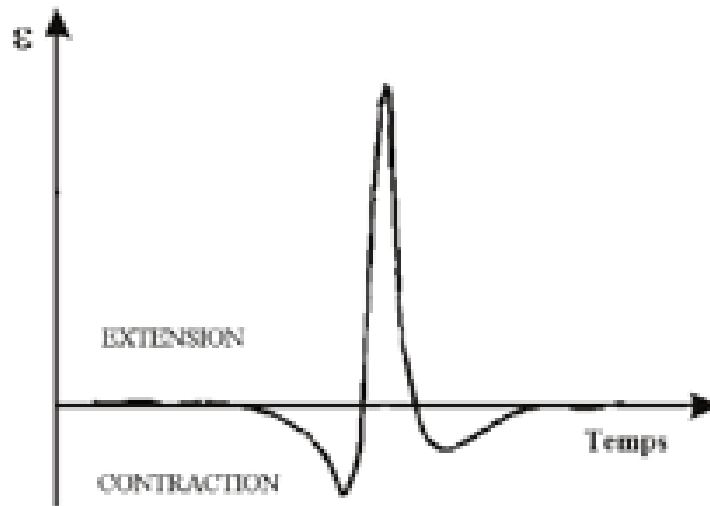


Figure 0.2: Déformation longitudinale résultante mesurée au point par la jauge [1]

A l'approche de la charge, le point de mesure est soumis à une contraction puis à une extension quand la charge en est suffisamment proche. De plus, les phases d'extension et de contraction sont fortement asymétriques et d'autant plus que la température est élevée.

A chaque passage de roue, la chaussée subit donc un chargement du même type : [contraction-extension-contraction]. C'est la répétition de ces sollicitations qui est à l'origine de la fatigue de la chaussée (à sa base dans la direction longitudinale).

L'amplitude de la partie extension du signal de sollicitation est environ trois à quatre fois plus grande que celle correspondant à la partie en contraction. En outre la résistance de l'enrobé bitumineux en traction est beaucoup plus faible que sa résistance en compression. L'endommagement par fatigue se fait donc principalement dans la phase de traction de la flexion (figure I.4 de la page 9). La traction par flexion étant plus forte à la base de la chaussée (quand il s'agit des couches collées), l'amorce de la fissure doit se déclencher théoriquement à cet endroit.

La forme de ce signal et le nombre de paramètres qui la définissent (variation de température, de la charge, du trafic, de l'épaisseur des couches, de la portance du

sol de fondation, des effets climatiques) soulignent des difficultés de la reproduction du signal réel en laboratoire

## 2. Les différents types de structures [5] :

En combinant les matériaux routiers, quatre grandes familles de structures de chaussées sont proposées :

- Structures souples.
- Structures semi-rigides.
- Structure en matériaux traités aux liants hydrocarbonés.
- Structures rigides.

En principe une chaussée peut avoir en ordre les 03 couches suivantes :

### **a. Couche de roulement (surface) :**

La couche de surface est en contact direct avec les pneumatiques des véhicules et les charges extérieures. Elle a pour rôle essentiel d'encaisser les efforts de cisaillement provoqués par la circulation. Elle est en général composée d'une :

- couche de roulement qui a pour rôle :
  - i. d'imperméabiliser la surface de chaussée.
  - ii. d'assurer la sécurité (par l'adhérence) et le confort des usagers (diminution de bruit, bon uni).
- couche de liaison, qui a pour rôle essentiel d'assurer une transition, avec les couches inférieures les plus rigides.

### **b. Couche de base :**

La couche de base joue un rôle essentiel, elle existe dans toutes les chaussées, elle résiste aux déformations permanentes sous l'effet du trafic. Elle reprend les efforts verticaux et repartit les contraintes normales qui en résultent sur les couches sous-jacentes. L'épaisseur de la couche de base varie entre 10 et 25cm.

## c. Couche de fondation :

En complément des matériaux non traités, elle substitue en partie le rôle du sol support, en permettant l'homogénéisation des contraintes transmises par le trafic, assure une bonne portance du sol support et reprend une partie des charges supérieures.

## d. Couche de forme :

La couche de forme est une structure plus ou moins complexe qui sert à adapter les caractéristiques aléatoires et dispersées des matériaux de remblai ou de terrain naturel aux caractéristiques mécaniques, géométriques et thermiques requises pour optimiser les couches de chaussée.

Elle n'y est utilisée que pour opérer des corrections géométriques et améliorer la portance du sol support à long terme. L'épaisseur de la couche de forme est en général entre 20 et 70 cm (voir fig I.3).

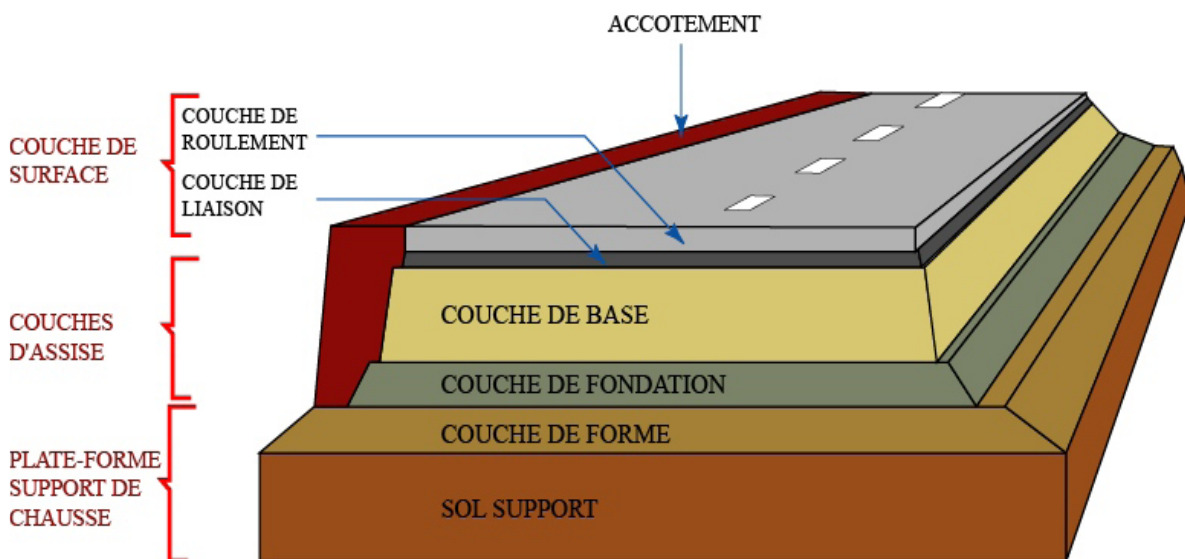


Figure 0.3: Coupe type d'une structure de chaussée souple [5]

## 2.1. STRUCTURE EN GNT [5] :

Cette structure est utilisée pour les routes à faible trafic, elle présente une structure économique mais elle a comme inconvénients :

- Module d'élasticité faible (100 à 500 MPa).
- Structure d'épaisseur relativement élevée.

Les chaussées souples sont constituées par des couches superposées de matériaux non susceptibles de résistance notable à la traction.

Les couches supérieures sont généralement plus résistantes et moins déformables que les couches inférieures.

Pour une assurance parfaite et un confort idéal, la chaussée exige généralement pour sa construction, plusieurs couches exécutées en matériaux différents, d'épaisseurs déterminées, ayant chacune un rôle bien défini.

Les chaussées souples sont constituées d'un corps de chaussée en matériaux non traités et du bitume. Celles-ci ne pouvant mobiliser que de faibles efforts assimilables à une flexion, la répartition des efforts verticaux sur le sol support est modéré. Le critère principal de dimensionnement d'une chaussée souple réside donc dans la limitation de la sollicitation du sol support de manière à éviter sa planification qui se traduirait en surface par d'importantes déformations de la chaussée.

### **2.2. STRUCTURE EN MATERIAUX TRAITES AUX LIANTS HYDROCARBONES [5]:**

C'est une structure de chaussée dans laquelle les couches de base et de fondation sont traitées aux liants hydrocarbonés.

Elle présente les avantages suivants :

- Absence de retrait, chaussée continue
- Module d'élasticité  $E$  moyen (1000 à 15000 MPa), structure souple
- acceptant les déformations et les surcharges accidentelles

Ses inconvénients :

- Module d'élasticité moyen, épaisseur relativement élevée
- Module d'élasticité variable en fonction de la température et de la durée d'application de la charge :
- ✓  $E$  baisse si température élevée
- ✓  $E$  baisse si la vitesse de circulation diminue

### 2.3. LES STRUCTURES SEMI-RIGIDES [5] :

Les chaussées comportant une couche de base (quelques fois une couche de fondation) traitée au liant hydraulique (ciment, granulats,...). La couche de roulement est en enrobé hydrocarboné et repose quelque fois par l'intermédiaire d'une couche de liaison également en enrobé bitumineux. Ce type de chaussée n'existe à l'heure actuelle qu'à titre expérimental en Algérie.

Les chaussées comportant une couche de base ou une couche de fondation en sable gypseux. Ce type de chaussée est très répandu dans le sud d'Algérie.

Ses avantages :

- ✓ Module pratiquement indépendant de la température :  
 $E=23.000$  MPa (Grave – Ciment)
- ✓ Caractéristiques mécaniques élevées :  $R_t=1,5$  à  $2$  MPa

Ses inconvénients :

- Fissuration du retrait
- Impossibilité de réaliser des couches minces (15 cm)
- Courbe de fatigue plate (comportement très sensible à un sous dimensionnement ou aux surcharges éventuelles)

### 2.4. LES STRUCTURES RIGIDES [5] :

Comportant des dalles en béton qui fléchissant élastiquement sous les charges transmettent les efforts à distance et les répartissent ainsi sur une couche de fondation qui peut être une grave stabilisée mécaniquement, une grave traitée aux liants hydrocarbonés ou aux liants hydrauliques.

Une dalle en béton se différencie en particulier d'une couche traitée par sa forte teneur en ciment.

## CHAPITRE I : Fonctionnement d'une chaussée routière

Son comportement sous l'action d'une charge  $P$  est comparable à celui d'une couche granulaire traitée au ciment mais dont les caractéristiques seraient beaucoup plus élevées.

Le dimensionnement consiste donc à calculer l'épaisseur de la dalle pour supporter, sans se fissurer ou se rompre, la répartition des charges pendant une durée donnée.

Ceci consiste à :

- Déterminer la contrainte du béton à la traction par flexion et s'assurer qu'elle est inférieure à la contrainte de traction admissible du béton.
- Apprécier le comportement à la fatigue de la dalle.

Tableau 1: Avantages et inconvénients [1]

Avantages	inconvénients
E élevé, indépendant de la température et de la durée d'application de la charge $E = 35\ 000\ \text{MPa}$	Retrait hydraulique et thermique : Susceptibilité à la fissuration, donc nécessité de réaliser des joints, d'où <b>discontinuité</b>
Résistance à la compression très élevée	Sensibilité à un sous-dimensionnement
Résistance à la traction	
Courbe de fatigue relativement plate : résistance élevée à la répétition des charges	
Une bonne tenue à la fatigue	

Les chaussées rigides qui sont constituées d'un corps de chaussée en matériau en ciment ou en dalle béton de ciment. Ces matériaux présentent une forte rigidité, et peuvent par conséquent mobiliser des efforts notables de traction par flexion.

## CHAPITRE I : Fonctionnement d'une chaussée routière

La répartition des efforts au niveau du sol support conduit à une faible sollicitation de ce dernier.

Le principal critère de dimensionnement d'une chaussée rigide réside dans la limitation des efforts de traction par flexion des matériaux sous l'effet de la répartition des charges.

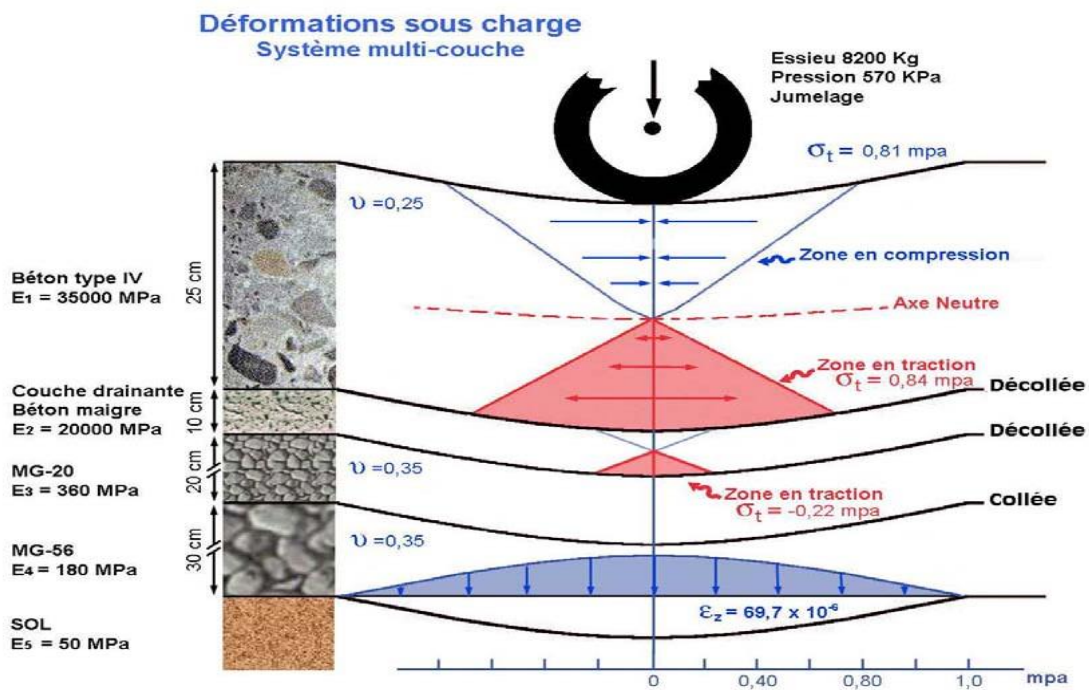


Figure 0.4: Etat de la chaussée sous déformation [1]

## **2.5 FONCTIONNEMENT DE LA CHAUSSEE [1]:**

Le passage d'un véhicule engendre des contraintes de traction et de compression dans les différentes directions des couches de la chaussée. Chaque couche de la chaussée est assimilée à une poutre qui subit des flexions sous l'effet du trafic (figure I.5).

Les compressions répétées sous le passage de la charge peuvent induire des déformations permanentes qui, si elles sont importantes, se traduisent par un orniérage à la surface de la chaussée.

Les tractions répétées à la base des couches d'une chaussée, sous l'effet du passage des véhicules, engendrent des "micros" dégradations qui s'accroissent et peuvent entraîner la ruine du matériau par fatigue. Alors, la direction de contrainte qui nous intéresse, et qui est principalement à l'origine des fissurations par fatigue, est celle qui se trouve parallèle à l'axe de roulement (ou l'axe de la chaussée).

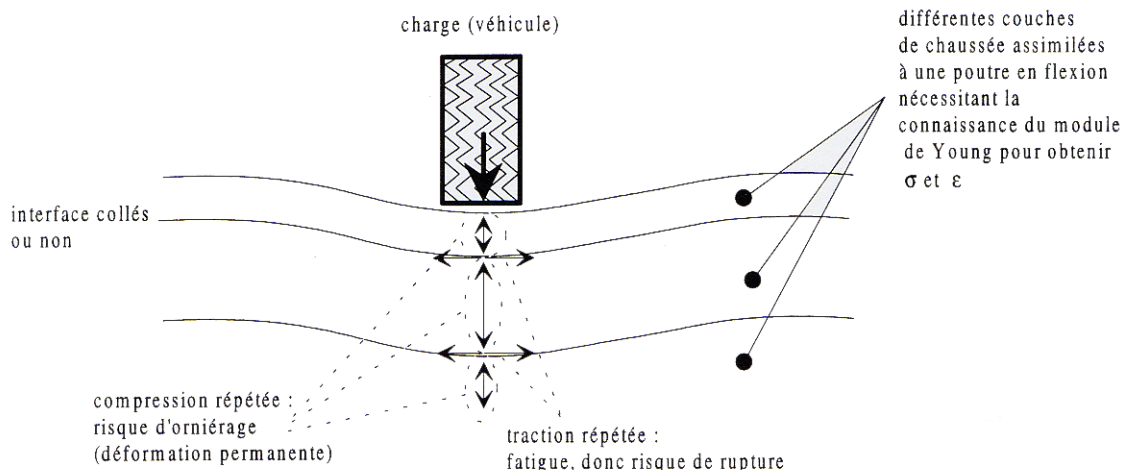


Figure 0.5 : Schématisation des sollicitations induites par le trafic [1]

### -Conclusion du chapitre :

Parmi les différents matériaux utilisés pour la fabrication des corps de chaussée, les matériaux bitumineux sont les plus employés. En effet, les chaussées souples, les chaussées bitumineuses épaisses et les chaussées semi-rigides, incluant des enrobés bitumineux, représentent 96% des chaussées du réseau national concédé ou non (SETRA et LCPC, 2000). Les chaussées en béton de ciment ne correspondent qu'aux 4% du réseau restant.

Ces dernières sont, de plus, généralement recouvertes de matériaux bitumineux compte tenu des exigences de confort et de sécurité de la couche de roulement.

Le fonctionnement mécanique global de la structure de chaussée correspond à de la flexion qui se produit à chaque passage d'essieu de poids lourd. Une chaussée bitumineuse se comporte comme une structure multicouche reposant sur un support déformable. Chaque fond de conclu> est soumis à l'action répétée de contraintes de traction provoquant ainsi une dégradation infinitésimale des matériaux.

# CHAPITRE II : Notion de fatigue des matériaux routiers

## **I. GENERALITES SUR LES ENROBES BITUMINEUX [1] :**

### **I.1 COMPOSITION DES ENROBES [1] :**

L'enrobé bitumineux est un mélange dans une proportion choisie de granulats et de liant hydrocarboné. Dans ce mélange, le liant hydrocarboné est principalement responsable de la cohésion tandis que le squelette minéral constitué par les granulats assure la rigidité de l'ensemble.

#### **I.1.1 LES LIANTS HYDROCARBONES [1] :**

Les bitumes sont des corps noirs, solides ou liquides visqueux à température ambiante, les bitumes sont des ensembles très complexes d'hydrocarbures. Très globalement on y rencontre des solides en solution dans des matières liquides (huiles pétrolières).

La densité des bitumes à 20 °C est voisine de 1. Ils existent dans la nature mais résultent surtout de la distillation fractionnée de certains pétroles bruts dits "bruts à bitume".

Ils sont employés pour la fabrication des mélanges bitumineux :

- Purs à chaud (160° à 180°) pour la fabrication des graves bitumes, sables bitumes, enrobés divers et bétons bitumineux.
- Fluidifiés par addition de produits pétroliers plus légers qui disparaissent par évaporation (Fréquent pour les enduits).

#### **I.1.2 LES GRANULATS [1] :**

Les granulats se répartissent suivant leur taille moyenne en plusieurs familles : fines, sables, gravillons et cailloux. Les diamètres minimaux et maximaux de ces familles sont normalisés.

La granularité est la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat. Elle conditionne la compacité de l'enrobé ainsi que ses caractéristiques mécaniques.

Pour constituer le squelette granulaire de l'enrobé, on mélange les différentes classes granulaires dans une certaine proportion. La distribution de la taille des différents grains (des plus

gros au plus petit) constitue la courbe granulométrique du mélange. Celle-ci peut être continue ou discontinue (c'est à dire qu'une ou plusieurs fractions granulaires peuvent manquer), selon la destination du mélange et les propriétés visées.

La forme d'un élément granulométrique est définie par ses trois caractéristiques dimensionnelles principales : l'épaisseur, la grosseur et la longueur.

Les éléments de mauvaise forme se fragmentent plus facilement, ils diminuent la maniabilité et le compactage devient plus difficile. Ces éléments ont tendance à prendre de préférence une orientation de leurs plus grandes dimensions qui rend proche de l'horizontale (inconvenient de glissance pour les enduits et les enrobés).

Nous citons quelques essais de laboratoire permettant de déterminer certaines caractéristiques mécaniques des granulats :

- Résistance à la fragmentation (chocs) [1] :

Elle est mesurée par le coefficient de "Los Angeles". Cette mesure est destinée à évaluer la résistance des granulats à la fragmentation sous l'action du trafic.

- Résistance à l'attrition et à l'usure [1] :

L'essai utilisé est le Micro Deval à sec ou en présence d'eau. Cette mesure ayant pour but de chiffrer l'usure qui se produit d'une part entre les gravillons entre eux dans une assise et d'autre part entre le pneumatique et le granulat à la surface des revêtements. Comme l'usure est très influencée par la présence d'eau, l'essai le plus représentatif est le Macro Deval en présence d'eau.

## **I.2 LES ESSAIS DE CARACTERISATION DES BITUMES [1]**

Plusieurs types d'essais permettent de caractériser les liants bitumineux. On peut les classer en deux catégories principales : les essais standards de caractérisation (mis au point dans les années 1920) et les essais mécaniques (apparus dans les années 1940).

### I.2.1 ESSAIS STANDARDS [1] :

Parmi lesquels on peut citer :

- Essai de pénétrabilité à l'aiguille (NF T 66-804)

L'essai consiste à mesurer en  $10^{\text{ème}}$  de mm, l'enfoncement dans un échantillon de bitume à température donnée, d'une aiguille standard au bout d'un temps de 5s (figure II.1). La valeur de pénétration est d'autant plus grande que le bitume est mou.

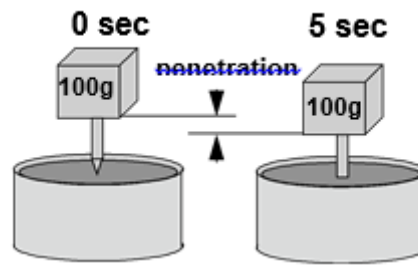


Figure 0.1: Essai de pénétrabilité [1]

- Le point de ramollissement bille et anneau (NF T 66-804)

L'essai consiste à déterminer la température (notée **TBA**) pour laquelle une bille d'acier normalisée traverse un échantillon de bitume maintenu dans un anneau métallique. Il caractérise la consistance du matériau : plus la température bille et anneau est faible, plus le bitume est susceptible.

- L'essai RTFOT "Rolling Thin Film Oven Test" (NF T 66-032)

Cet essai est employé pour caractériser le vieillissement des bitumes à l'enrobé. En effet, lors de la fabrication d'un enrobé, les granulats chauffés aux environs de 160°C sont mis en contact avec le bitume chaud qui répartit en film mince autour du granulat, ce contact induisant un vieillissement du liant. Pour l'essai RTFOT, dans des conditions d'essai précises, le bitume placé en film mince, est régulièrement exposé à un flux d'air chaud dont le débit est contrôlé. On mesure ensuite les propriétés habituelles du liant : pénétrabilité et température de ramollissement bille et anneau. Ces valeurs, dites après **RTFOT**, sont alors comparées aux valeurs initiales. Elles sont plus proches de celles du liant extrait de l'enrobé, que celles obtenues sur le bitume d'origine.

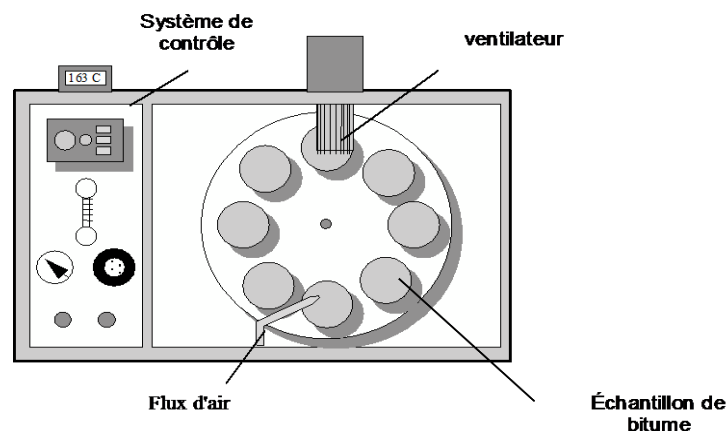


Figure 0.2: Essai RTFOT [1].

### - L'essai de PAV "Pressure Aging Vessel" (AASHTO PPI)

Cet essai est employé pour caractériser le vieillissement des bitumes in-situ. Le résidu de l'essai **RTFOT** est chauffé et versé dans des plateaux métalliques qui constituent les éprouvettes de l'essai **PAV**. Ces plateaux sont rangés dans un rack qui sera placé dans un récipient dans l'enceinte thermique. A la température de l'essai, une pression d'air est appliquée dans le récipient. Après une durée de vingt heures, la pression est diminuée lentement (8 à 10 minutes). Les plateaux d'éprouvettes sont placés ensuite dans un four à 63°C pendant 30 minutes. On mesure ensuite les propriétés habituelles du liant : pénétrabilité et température de ramollissement bille et anneau. Ces valeurs, dites après **PAV**, sont alors comparées aux valeurs initiales et aux valeurs obtenues après **RTFOT**.

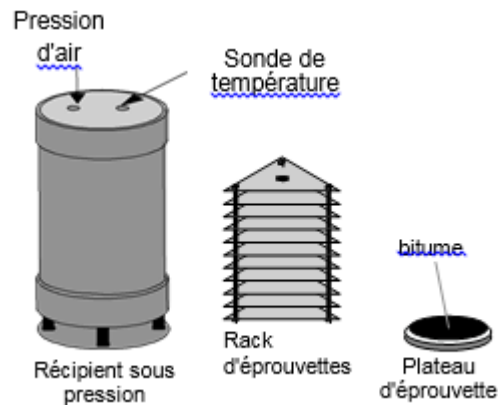


Figure 0.3: Essai PAV [1]

### 1.2.2 LES ESSAIS MECANIQUES [1] :

Ce type d'essai a été choisi suite au programme de recherche **SHRP** (Strategic Highway Research Program), lancé aux états unis en 1988 pour une durée de cinq ans et poursuivi par une deuxième tranche à partir de 1996 sur les liants et enrobés bitumineux. L'objectif poursuivi était de pouvoir relier les caractéristiques des liants mesurés en laboratoire aux performances des liants dans l'enrobé sur chaussées.

Quatre essais ont été choisis dans ce programme, ces essais sont présentés dans le tableau II.1.

Tableau 0.1: Essais mécaniques sur les liants [1].

Type de l'essai	But de l'essai
Dynamic Shear Rheometer (DSR) (Rhéomètre de cisaillement dynamique) <sup>(1)</sup>	Mesurer les propriétés du liant à hautes et moyennes températures
Rotational Viscometer (RV)	Mesurer les propriétés du liant à hautes températures
Bending Beam Rheometer (BBR) (Essai de flexion de poutre)	Mesurer les propriétés à Basse température
Essai de traction directe (DTT)	Mesurer les propriétés à Basse température

## II. PHENOMENE DE LA FATIGUE DES ENROBES BITUMINEUX [1]

Selon le niveau de sollicitation et le nombre de cycles appliqués, l'enrobé présente trois types de comportement :

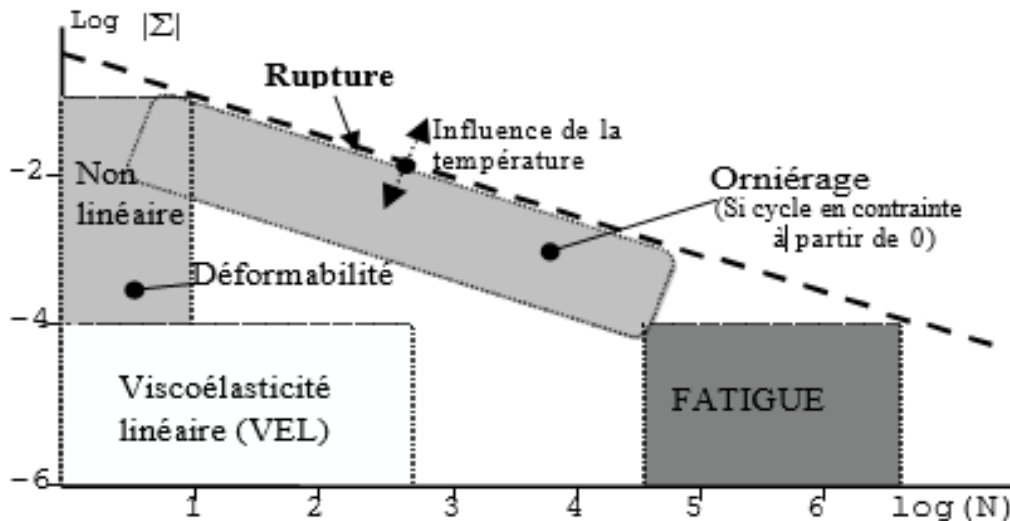


Figure 0.4: Essais homogènes sur les enrobés (Température 20°C) [1]

- Pour un faible nombre de chargements et des déformations de quelques pourcents, l'essai est un essai de déformabilité et on observe un comportement 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.
- Lors de chargement de plusieurs milliers de cycles et sous faibles déformations, des phénomènes d'endommagement apparaissent, le matériau se fatigue.

Les enrobés bitumineux sont soumis, sur la route, à des sollicitations de courte durée à chaque passage d'un véhicule lourd. Ainsi, la chaussée, qui se comporte comme un matériau rigide reposant sur un support déformable, est soumise à des efforts de flexion. Des contraintes de traction apparaissent alors à la base de la chaussée et sont répétées à chaque passage de roues. Vu que l'enrobé bitumineux résiste moins en traction qu'en compression, dans le cas de passage d'un grand nombre de véhicules, les fissures seront amorcées à la base de la chaussée due au phénomène de fatigue.

### II.1 GENERALITES [1]

#### II.1.1 NOTATIONS ET DEFINITIONS [1]

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

Ce phénomène est rencontré fréquemment dans de nombreux domaines industriels qui mettent en jeu des sollicitations cycliques :

- Sollicitation par flexion alternée d'une pièce tournante (essieu)
- Sollicitation par vibrations (avions, ouvrages d'art)

Les premières études fondamentales du phénomène de fatigue en laboratoire ont été entreprises en 1852 par **WÖHLER** sur les métaux. A l'heure actuelle, ce sont les matériaux pour lesquels on dispose des connaissances les plus étendues sur ce sujet. Egalement, la fatigue des bétons, des matériaux routiers.

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

La représentation classique des résultats de l'essai est la courbe de fatigue ou la courbe de **WÖHLER** (figure II.5). Cette courbe fait correspondre une durée de vie à la sollicitation exercée, qui peut être une contrainte ou une déformation imposée

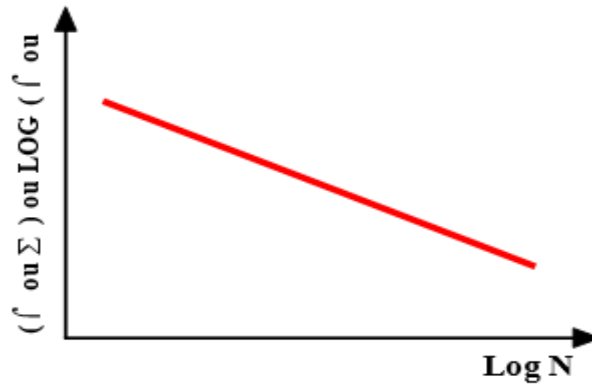


Figure 0.5: Courbe de WÖHLER [1]

La courbe de fatigue est présentée dans une échelle logarithmique ou semi-logarithmique. C'est l'axe du nombre de cycles ou la durée de vie qui est en logarithme puisqu'il couvre une plage importante pouvant aller de quelques milliers à plusieurs millions de cycles.

### II.1.2 DISPERSION DES DUREES DE VIE [1]

Les études des essais de fatigue sur divers matériaux montrent qu'il existe une dispersion importante dans les résultats de durées de vie. Cela est dû à l'hétérogénéité du matériau et au phénomène de fatigue lui-même.

Pour les métaux, la durée de vie peut varier dans un rapport de 1 à 10 pour des essais de fatigue réalisés sur des éprouvettes identiques. Ce rapport peut atteindre 1 à 30 pour les matériaux bitumineux et même 1 à 100 pour certains matériaux traités aux liants hydrauliques. Il faut donc effectuer un grand nombre de répétitions pour obtenir un ensemble de valeurs de nombre de cycles représentatif du phénomène réel. En pratique, on effectue plusieurs répétitions pour un niveau de sollicitation donné. On peut caractériser la loi de distribution de ces durées de vie par une loi log-normale, en faisant intervenir une moyenne et un écart type caractéristiques de la dispersion.

### II.1.3 LIMITE D'ENDURANCE

Pour certains aciers et d'autres matériaux, il existe une certaine valeur de sollicitation en dessous de laquelle le matériau résiste infiniment quel que soit le nombre de répétition de la sollicitation. Cette valeur est appelée "limite d'endurance" ou limite de fatigue (figure II.6). Les études effectuées n'ont jamais trouvé une limite d'endurance pour l'enrobé bitumineux. Il semble donc que pour ce matériau, le phénomène de fatigue est toujours présent, quelle que soit l'amplitude de la sollicitation appliquée

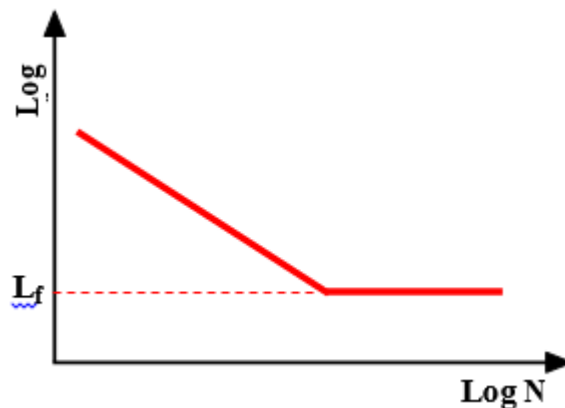


Figure 0.6: Limite d'endurance ou limite de fatigue [1].

### Conclusion du chapitre :

En terme de comportement du matériau, l'endommagement par fatigue est défini comme la "modification des caractéristiques d'un matériau, tenant essentiellement à la formation de fissures et résultant de l'application répétée de cycles de chargement" (Lalanne, 1999). Ces dégâts peuvent conduire à la rupture du matériau pour des amplitudes de sollicitation bien inférieures à la limite de résistance du matériau sous chargement monotone.

La répétition de ces chargements engendre, à très long terme, des dégradations de plus en plus importantes pouvant remettre en cause la pérennité de la structure. Ce phénomène de fatigue du matériau altère donc la durabilité des

structures de chaussées et doit être pris en compte pour parvenir à une prédiction de leur durée de vie. IL constitue un enjeu important de la rationalisation de la gestion des chaussées neuves ou existantes.

Afin d'étudier le comportement à la fatigue des enrobés, divers essais ont été pratiqués. Parmi lesquels, nous distinguons les essais de simulation du comportement mécanique et les essais de simulation routière (modèles réduits). Les essais de simulation du comportement mécanique visent directement le comportement des chaussées à la fatigue et utilise plus de simulation surtout au niveau des sollicitations. Les essais de simulation routière sont des essais empiriques. Ils font une copie, petite ou grande, de la route et demande donc moins de modélisation. Nous présentons dans la suite les différents essais de simulation du comportement mécanique utilisés au laboratoire pour étudier la fatigue des enrobés bitumineux.

# CHAPITRE III : Les essais de fatigue des matériaux routiers

## **1. Introduction [2] :**

Afin d'étudier le comportement à la fatigue des enrobés, divers essais ont été pratiqués. Parmi lesquels, nous distinguons les essais de simulation du comportement mécanique et les essais de simulation routière (modèles réduits). Les essais de simulation du comportement mécanique visent directement le comportement des chaussées à la fatigue et utilisent plus de simulation surtout au niveau des sollicitations. Les essais de simulation routière sont des essais empiriques. Ils font une copie, petite ou grande, de la route et demande donc moins de modélisation.

Nous présentons dans la suite les différents essais de simulation du comportement mécanique utilisés au laboratoire pour étudier la fatigue des enrobés bitumineux.

## **2. Les essais de fatigue [2] :**

### **2.1. ESSAIS DE FLEXION [2] :**

#### **2.1.1. FLEXION 2 POINTS [2] :**

C'est l'essai de fatigue développé au **LCPC** depuis 1965. L'étude de l'influence des paramètres de l'essai comme la température et le mode de sollicitation (force ou déplacement) a été faite par **DOAN** (1970). L'essai est répandu en Europe et normalisé en France. Ses résultats sont utilisés dans la méthode française pour le dimensionnement des chaussées.

L'éprouvette trapézoïdale est encastrée à sa grande base et sollicitée à son sommet (figure 1). Les sollicitations peuvent être en force ou en déplacement imposé. L'intérêt d'une éprouvette trapézoïdale est d'éloigner la section la plus sollicitée de l'encastrement et du point d'application de la charge. Ainsi, on peut éviter les effets parasites de bord et de concentration de contraintes sous le point d'application de la charge dans l'apparition des fissures. La nouvelle machine utilisée au LCPC exerce 4 essais simultanés.

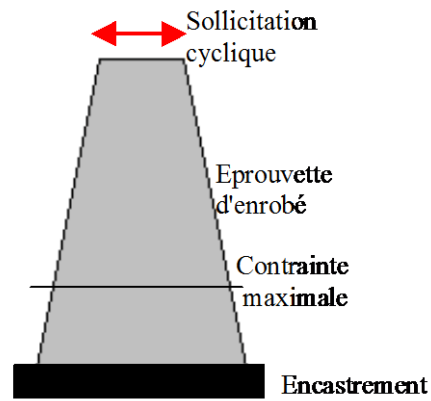


Figure 0.1: Schématisation de l'éprouvette et de la sollicitation dans l'essai flexion 2 points [2].



Figure 0.2: Appareil de l'essai de flexion 2 points (LCPC-Nantes – France) [2]

## 2.1.2 FLEXION 3 POINTS [2] :

L'éprouvette est une poutre qui repose sur deux appuis simples (figure II.3). La sollicitation est appliquée au centre de la poutre en mode de contrainte ou de déformation imposée.

Le moment de flexion est nul au droit des appuis et varie linéairement pour atteindre sa valeur maximale au centre de l'éprouvette. Le plan de rupture est généralement localisé sur ce même point ou très proche de celui-ci.

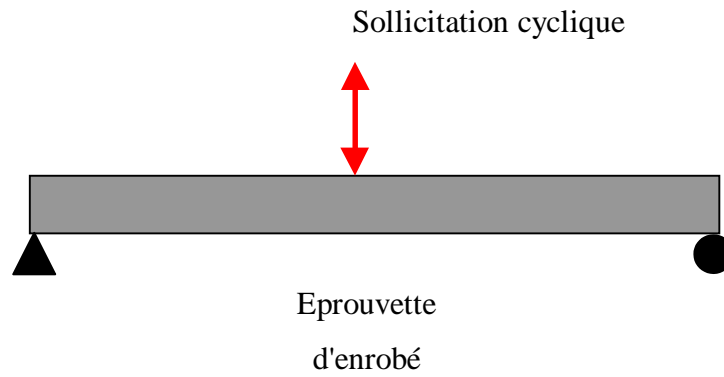


Figure 0.3: Schématisation de l'éprouvette et de la sollicitation dans l'essai flexion 3 points [2].

### 2.1.3 FLEXION 4 POINTS [2] :

Cet essai est largement utilisé aux Etats Unis. Il a été choisi suite au programme **SHRP** pour l'étude de la fatigue des enrobés bitumineux. Cet essai a été conçu pour éviter la concentration des dommages au centre de la poutre observée lors de l'essai de flexion trois points. La sollicitation est exercée sur deux points symétriques, partageant l'éprouvette en trois travées (figure II.4). En absence d'effort tranchant entre ces deux points, on peut profiter d'une zone assez longue sous moment uniforme.

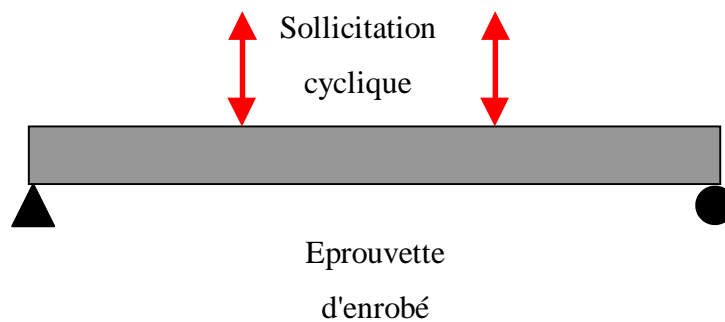


Figure 0.4: Schématisation de l'éprouvette et de la sollicitation dans l'essai flexion 4 points [2].

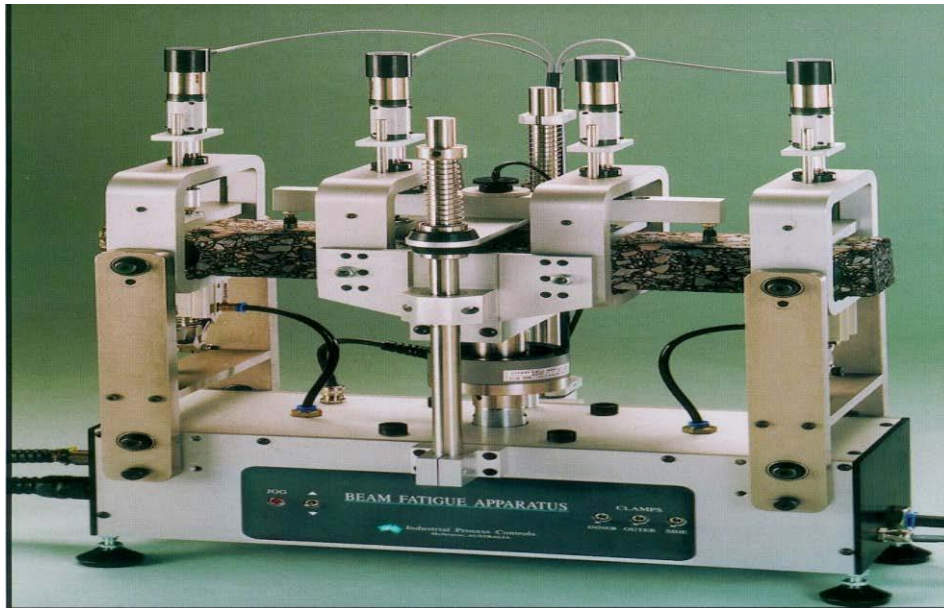


Figure 0.5: Appareil de l'essai de flexion quatre points (DWW – Pays Bas) [2]

#### 2.1.4 FLEXION SUPPORTEE [2] :

L'essai de flexion supportée porte une amélioration très importante par rapport aux essais de flexion 3 et 4 points. Dans cet essai et pour une meilleure simulation des conditions de la chaussée, l'éprouvette est placée sur une membrane du caoutchouc ou une couche d'air en pression (figure II.6). La géométrie de l'éprouvette est celle d'une poutre ou d'une plaque rectangulaire ou circulaire.

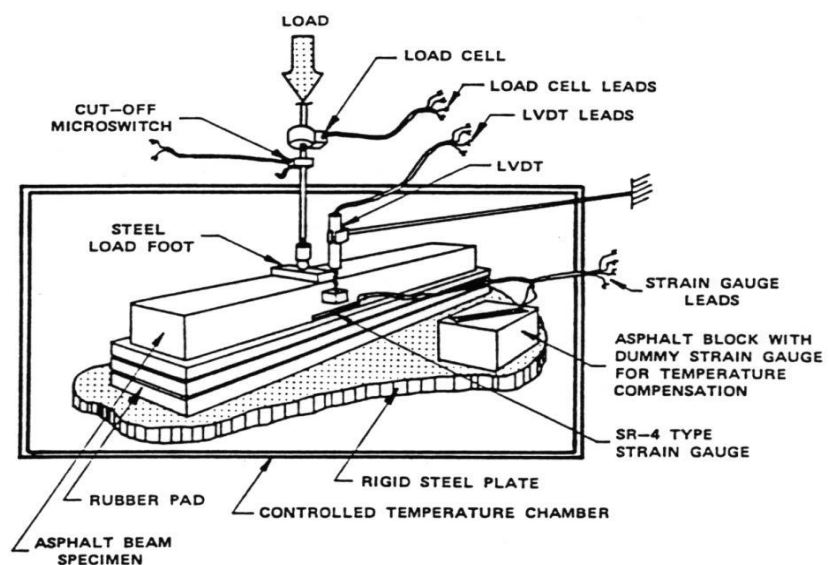


Figure 0.6: Essai de flexion supportée sur poutre d'après BARKSDALE [2]

## 2.2 ESSAIS DE TRACTION – COMPRESSION [2]

### 2.2.1 TRACTION DIRECTE A LA "MAER" [2]

L'essai de traction directe normalisé français (NF T 98-260-1) est réalisé sur la **MAER** (**M**achine **A**sservie pour **E**ssais **R**héologiques). Cet essai a été mis en place par **LINDER** (1977) et développé par **MOUTIER** (1990). Il consiste, pour une température donnée, à soumettre une éprouvette cylindrique à un chargement en traction jusqu'à une valeur donnée en déformation axiale  $\Sigma$  en suivant une loi de chargement contrôlée en déformation du type max

$\Sigma = at^n$  avec  $0.5 < n < 2$  (figure III.7). L'essai est reconduit pour plusieurs temps de

chargement  $t_i$  (même valeur de  $\Sigma_{\max}$ ).

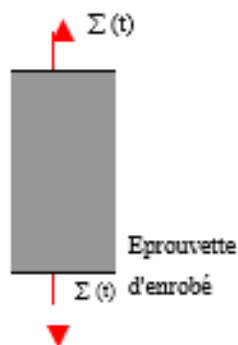


Figure 0.7: Schématisation de l'éprouvette et de la sollicitation dans l'essai de traction directe [2].

D'après **LINDER** l'essai est considéré complet du fait de sa structure qui permet d'effectuer facilement sur chaque éprouvette une suite d'essais fournissant l'ensemble des grandeurs utiles au dimensionnement.

## 2.2.2. TRACTION – COMPRESSION [2]

L'essai peut être réalisé sur des éprouvettes de forme cylindrique ou prismatique. L'éprouvette est soumise à des sollicitations axiales de type traction-compression alternée (figure II.8). Pour éloigner la fissuration des bords et améliorer l'essai, on peut évider l'éprouvette cylindrique en son milieu.

L'essai est homogène dans la partie centrale de l'éprouvette. Il peut être réalisé en contrôle de déformation ou de contrainte, ce qui est rarement le cas des autres essais de fatigue. Le module de rigidité, le coefficient de Poisson et d'autres caractéristiques mécaniques peuvent être tirées de l'expérience.

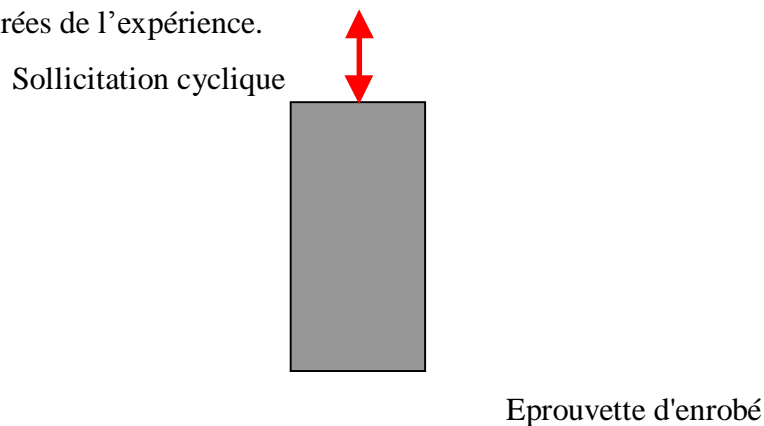


Figure 0.8: Schématisation de l'éprouvette et de la sollicitation dans l'essai traction-compression [2].

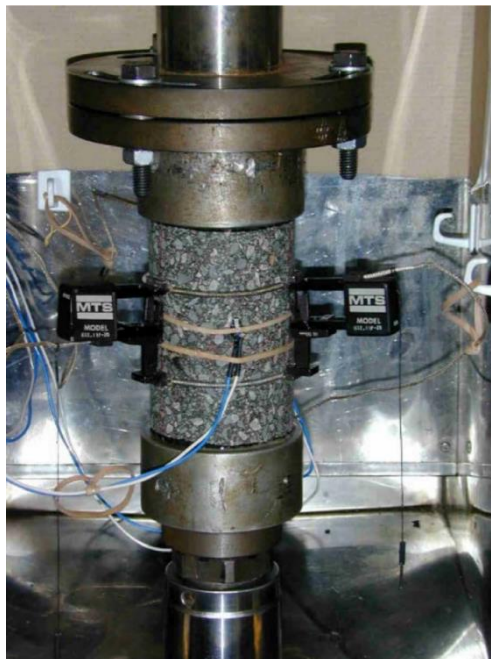


Figure 0.9: Essai de traction – compression (ENTPE – France) [2]

## 2.2.3 L'ESSAI TRIAXIAL [2]

En plus de la sollicitation de traction – compression de l'essai précédent, une pression de confinement sur l'éprouvette est appliquée (figure III 10). Cette pression de confinement permet de mieux simuler le comportement de la chaussée. En effet, l'essai triaxial permet d'appliquer des efforts latéraux qui existent dans le cas d'une chaussée réelle. Dans des essais plus complexes de ce domaine, l'application de la pression latérale peut être également cyclique.

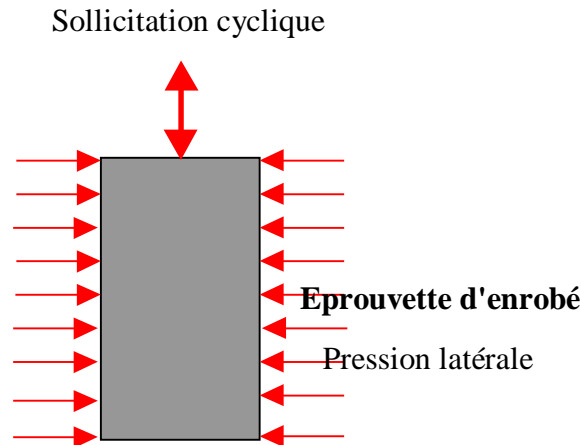


Figure 0.10: Schématisation de l'éprouvette et de la sollicitation dans l'essai triaxial [2]

## 2.2.4 TRACTION INDIRECTE [2]

Egalement appelé " l'essai brésilien", l'essai de fatigue par traction indirecte a été mis au point en 1968 par **KENNEDY** à l'université du Texas.

Dans cet essai, une éprouvette cylindrique est posée horizontalement (par rapport à sa génératrice) sur une barrette (figure III.11). La sollicitation exercée en mode de force uniquement, est appliquée sur une seconde barrette placée sur une génératrice opposée à la génératrice d'appui. Le plan de la rupture correspond généralement au diamètre vertical qui relie les deux barrettes. Sous l'application d'une force en compression sur la barrette supérieure, le diamètre vertical de l'éprouvette se trouve sous l'action de contraintes de traction (d'où l'autre nom de l'essai 'traction indirecte') qui la mènent à la rupture. Ces contraintes de traction sont uniformément réparties sur une grande partie du diamètre vertical de l'éprouvette. La figure III.11 schématise l'essai de traction indirecte et le plan de rupture généralement observé.

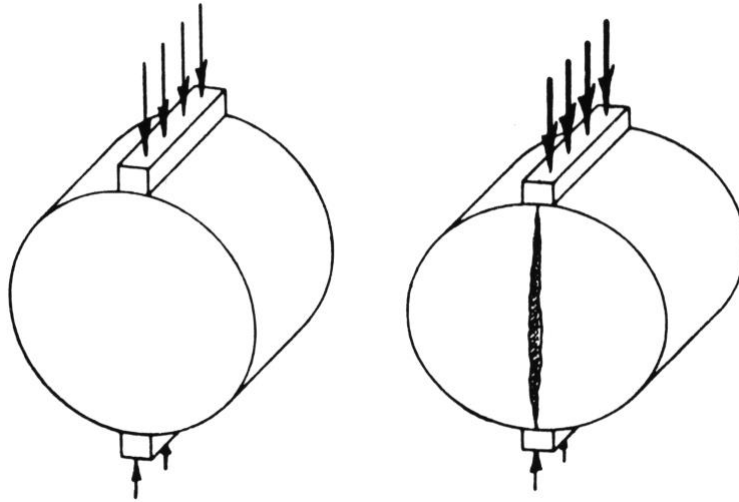


Figure 0.11: Schématisation de l'éprouvette, du chargement dans l'essai traction indirecte, et de la surface de rupture généralement rencontrée [2].

## 2.3 ESSAIS DE CISAILLEMENT [2]

### II.2.3.1 CYLINDRE CREUX [2]

Cet essai est principalement utilisé dans le domaine de la mécanique des sols pour étudier le comportement au cisaillement des sables et des argiles (figure III.12).

En 1987, **SOUSA** l'a adapté au cas des enrobés bitumineux. Une éprouvette de forme cylindrique creuse est soumise simultanément à l'application de contraintes de cisaillement par torsion et de contraintes de traction radiale. La faible épaisseur de l'éprouvette rend pratiquement homogène le champ de cisaillement.

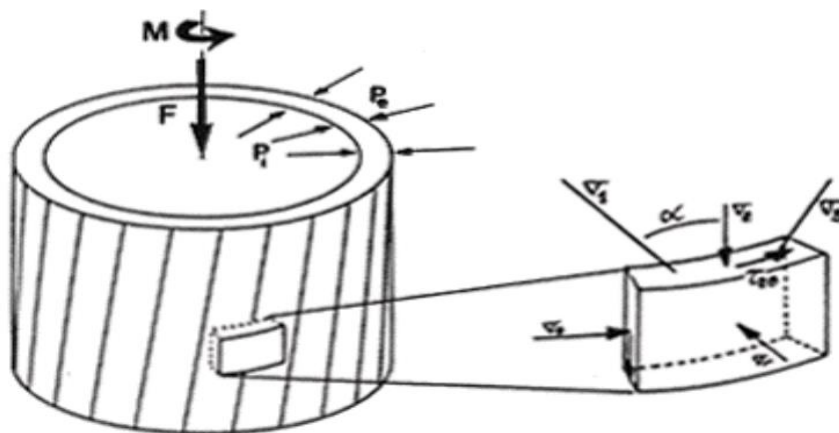


Figure 0.12: Principe de l'essai du cylindre creux [2].

### 2.3.2 *ESSAI DE CISSION [2] :*

Si on peut considérer la déformation par flexion comme la déformation la plus courante des enrobés bitumineux dans une chaussée, ce n'est toutefois pas la seule. Le passage des véhicules exerce, outre les sollicitations verticales, des sollicitations tangentielles. Ces sollicitations deviennent plus importantes lors d'une accélération ou d'un virage.

L'intérêt de cet essai de fatigue est plutôt pour les couches de surface (couches relativement minces) où les contraintes de cisaillements sont importantes. L'autre intérêt de cet essai est l'étude du collage des couches successives de chaussée qui est sous l'influence des contraintes tangentielles.

L'essai a été mis au point par **ASSI** (1983) au **LCPC**. Il a adopté pour l'éprouvette une structure prismatique de section transversale, diminuant graduellement des faces extrêmes (les encastements) vers le centre (plan médian). La sollicitation, pouvant être en contrôle de contrainte ou déformation, est appliquée comme un effort tranchant sur le casque de l'éprouvette. Ainsi, on obtient dans le plan médian de l'éprouvette un état de contrainte en cisaillement pur et quasiment constant, à l'intérieur d'une vaste zone centrale de ce plan. En outre, le cisaillement est peu variable dans le sens perpendiculaire au plan médian. Les contraintes les plus élevées sont situées à l'intérieur de l'éprouvette, donc la fissuration apparaîtra dans une zone qui n'est pas affectée par les défauts résultant du sciage de l'éprouvette (figure III.13). Ces particularités ont à ce que la dispersion des durées de vies soit beaucoup plus faible que celle des essais de flexion. L'expérience montre que la dispersion de durée de vie est plus faible en contrôle de déformation.

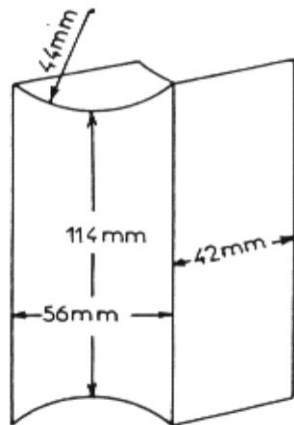


Figure 0.13: Epreuve et la fissuration dans l'essai de cission [2]

### Conclusion du chapitre :

Nous venons de présenter les différents essais de laboratoire dédiés à l'étude du phénomène de la fatigue des enrobés bitumineux. Ces essais sont classés en trois catégories selon la nature des efforts menant à la ruine : Les essais de flexion, les essais de traction compression et les essais de cisaillement. Un deuxième classement est lié à l'état de contraintes et de déformations proposé par **DIBENEDETTO** [20]. Les essais sont classés en deux catégories : Essais homogènes et essais non-homogènes. Parmi les essais de fatigue surnommés, tous les essais de flexion et également l'essai de traction indirecte sont classés dans la catégorie des essais non-homogènes. L'essai de traction – compression et l'essai triaxial sont des essais homogènes. Egalement, les essais de cisaillement sont considérés homogènes. En fait, pour l'essai de cission, la contrainte maximale et donc la zone d'amorçage des fissures de fatigue se trouve au cœur de l'éprouvette et non, comme dans les essais de flexion, sur les parois de l'éprouvette. L'essai de cylindre creux est également considéré homogène grâce à la faible épaisseur de l'éprouvette qui rend pratiquement homogène le champ de cisaillement. La majeure partie des essais de fatigue sur les enrobés bitumineux sont réalisés à l'aide des essais non-homogènes (flexion deux, trois et quatre points et traction indirecte).

# CHAPITRE IV :

## Les mécanismes de fatigue des matériaux routiers

### I. Introduction [4] :

Il ne suffit pas de connaître le champ des contraintes, il faut savoir aussi comment se produit la rupture.

- ✓ L'étude des mécanismes de rupture a pour but de comprendre les processus de rupture et de fournir un critère de rupture.
- ✓ Il existe deux types de ruptures, les ruptures fragiles et les ruptures ductiles.

Dans un essai de fatigue, quelle que soit la sollicitation imposée, on distingue trois phases dans l'évolution du module en fonction du temps ou de nombre de cycles (figure IV.1)

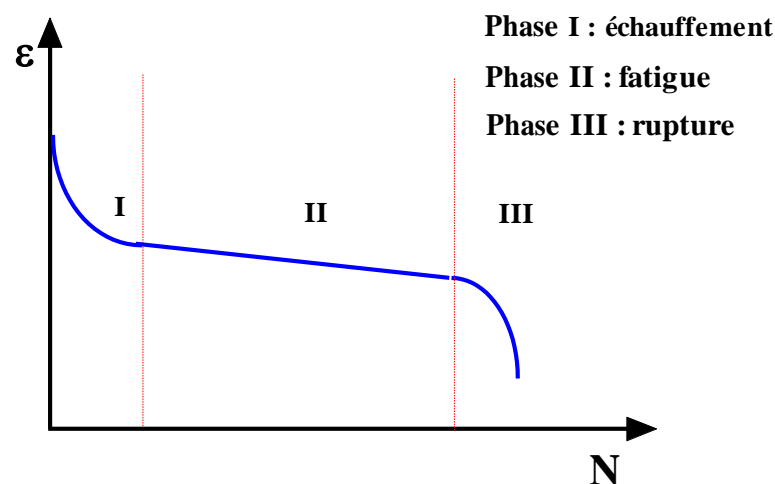


Figure 0.1: Distinction de trois phases différentes dans un essai de fatigue [3]

- Phase I ou **phase d'échauffement** : cette phase se traduit par une chute rapide de la valeur du module.
- Phase II ou **phase de fatigue** : un plateau légèrement incliné traduit l'établissement d'un régime stable et quasi-linéaire et une lente évolution de dommage.
- Phase III ou **phase de rupture** : décroissance accélérée du module, une concentration brutale des contraintes dans le voisinage des zones endommagées, développement rapide des fissures et macro fissuration, perturbation thermique et endommagement jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

### II. Types de rupture [4] :

La rupture détruit la cohésion de la matière par la création de discontinuité à l'échelle de l'existence des microfissures ou cavités, des fissures dans les structures mécaniques. Les causes et mécanismes sont étudiés par fractographie (échelle macroscopique) ou microfractographie (échelle du microscope électronique MEB ou) par l'analyse des faciès-types.

Les types de rupture sont :

- ✓ Rupture par fissuration rapide : ductile, semi-fragile, fragile ;
- ✓ Rupture par fissuration progressive :
  - A. Sous sollicitations statique : corrosion sous contrainte, fluage
  - B. Sous sollicitations cycliques : fatigue mécanique, fatigue thermique
  - C. Sous sollicitations complexes : Fatigue-corrosion, fatigue-fluage

2.1. Types élémentaires de rupture :

*I. Rupture fragile :*

**Mécanisme :** Se manifeste au niveau des liaisons intra-atomiques sans déformation plastique macroscopique.

*Tableau 0.1: Types de rupture fragile*

Rupture fragile	
Rupture fragile Trans granulaire (à clivage)	La rupture suit des plans cristallographiques (plans de clivage). Faciès de rupture cristallin (aspect brillant).
Rupture fragile inter granulaire	Caractérisée par une décohésion inter granulaire ; La rupture suit les joints des grains.

*II. Rupture ductile :*

**Mécanisme :** Se manifeste essentiellement par la présence des inclusions ou précipités. La rupture résulte de la naissance des cavités, l’allongement de ces cavités dans le sens de déformation et raccord de celles-ci par striction ou cisaillement qui conduisent à la rupture finale.

2.2 Fissures spécifiques selon la structure :

*2.2.1. Structures rigides*

Ces constructions présentent des joints, dans la couche de base, qui s’apparentent des fissures. Ces joints, longitudinaux et transversaux, sont larges en surface mais du fait du procédé de Construction, ils sont collés. Néanmoins,

sous l'action du trafic et des actions thermiques, ils peuvent perdre de leur capacité de transfert de charge d'une dalle à l'autre. Si les joints ne sont pas réalisés à temps, il peut aussi y avoir des problèmes de retrait, liés à la prise du béton. Dans ce cas des fissures rectilignes vont apparaître avec un pas quasi constant de plusieurs mètres. Si la couche de béton n'est pas assez épaisse pour supporter le trafic, les dalles peuvent aussi se fissurer (longitudinalement et transversalement, mais aussi aux coins) sous le passage répété des fortes charges roulantes.

### 2.2.2. Structures semi-rigides

Les structures semi-rigides ne possèdent pas de joint de dilatation (au contraire des structures rigides) dans les couches d'assises traitées aux liants hydrauliques. (Toutefois, au dernier catalogue des structures 98, cette disposition a un peu évolué et il devient nécessaire de préfissurer la couche de base avec l'emploi de certain grave ciment (plus riche en ciment) ou au-delà de certains trafics). De ce fait, la couche de base est soumise à une fissuration transversale inévitable due au retrait. Les fissures naissent dans la couche traitée pour remonter ensuite vers la surface. Les fissures apparaissent avec des pas compris entre 5 et 20 m, et leur ouverture est fonction de la température mais peut atteindre dans certains cas défavorables plusieurs millimètres. Les fissures de retrait sont transversales rectilignes mais au cours du temps, sous l'action du trafic, elles se ramifient. Le pas de fissuration observé en surface est très dépendant des caractéristiques de résistance en traction et du module d'Young de la couche traitée, mais le processus général reste l'apparition de grandes dalles qui peu à peu se subdivisent en plus petites. Pour lutter contre ces problèmes de fissuration inévitable, diverses entreprises ont développé des procédés de préfissuration sur lesquels nous reviendrons plus tard.

### 2.2.3. Structures souples

En plus des fissures de surface décrites plus haut, les chaussées noires, ou souples, sont soumises à la fissuration par fatigue de la couche de base, avec une propagation de la fissure dans la couche de roulement sous l'action du trafic. Sous le passage de la charge roulante, ces fissures se développent en maillage large. Dans les pays aux climats hivernaux rigoureux (ou des pays avec de fortes amplitudes thermiques), il se peut que la chute de température crée des contraintes de traction supérieures à la limite de résistance du béton bitumineux,

d'où l'apparition de fissures en surface. Ce phénomène est d'autant plus probable que le bitume utilisé est dur ou bien sensible au vieillissement.

✚ On distingue généralement 5 grandes familles de fissures :

1. Les fissures de fatigue : Ces fissures sont conséquentes au cumul de trafic. Elles affectent toutes les couches qui composent une chaussée ou uniquement la couche de roulement.
2. Les fissures de retrait : (de prise ou thermique) Elles sont présentes essentiellement dans les matériaux hydrauliques. Leur origine provient du retrait empêché de la couche de base créant ainsi des contraintes supérieures à la résistance à la traction des matériaux.
3. Les fissures de vieillissement : Ces fissures sont dues à l'évolution, principalement le vieillissement, des bitumes. Elles sont accentuées par les conditions climatiques.
4. Les fissures dues aux mouvements du support : Ces fissures sont dues à la réduction de la portance du sol sur lequel repose la structure de la chaussée. L'origine de ce phénomène peut être un sol mal drainé, un défaut de compactage, un glissement de terrain, etc....
5. Les fissures dues aux défauts de construction : Elles résultent d'erreurs de conception et/ou dimensionnement de la chaussée ou de mise en œuvre des matériaux.

✚ Le mécanisme de rupture par fatigue est généralement divisé en trois stades :

- l'**amorçage d'une fissure de fatigue** à partir d'un défaut géométrique ou métallurgique conduisant à une concentration locale de déformation ou de contrainte ;
- la **propagation** de cette fissure dans l'éprouvette ou la pièce ;
- la **rupture** de celle-ci.

L'effet des paramètres physico-chimiques ou électrochimiques est sensiblement différent dans les deux premiers stades qu'il conviendra de considérer séparément.

Pour mener à bien ce travail, nous définirons tout d'abord quelques termes indispensables avant de considérer les phases d'amorçage et de fissuration par fatigue-corrosion. Dans chaque cas, nous présenterons l'influence des principaux paramètres sur le comportement des matériaux soumis à un environnement soit aqueux, soit gazeux. Nous rendrons compte succinctement des principaux mécanismes mis en jeu.

L'étude des différents mécanismes de dégradations des chaussées permet de guider le choix des matériaux et des techniques. Une chaussée est vaste et peut affecter les différentes performances recherchées en terme de sécurité, de confort de pérennité. En particulier, afin de conserver l'intégrité structurelle de la structure de chaussée, il faut éviter que la fissuration des matériaux ne se propage et compromette la fonction d'étanchéité qui pérennise le support de la chaussée fortement sensible à l'eau.

### Conclusion du chapitre :

Dans le travail présenté ici, la problématique de la fissuration des matériaux de chaussées sous les charges répétées du trafic est plus spécifiquement abordée. Pour les chaussées bitumineuses souples ou épaisses, la répétition du passage des poids lourds induit un phénomène de fissuration par fatigue. Les fissures germent au sein des matériaux des couches profondes de la chaussée et se propagent vers la surface.

# CONCLUSION GENERALE

## Conclusion générale :

Ce travail s'est appuyé sur des recherches récentes visant une amélioration de la prise en compte des effets des chargements réels sur l'endommagement par fatigue des chaussées bitumineuses dans une partie de la recherche bibliographique.

Le comportement mécanique des enrobés bitumineux, dans les domaines des petites déformations, de la fatigue et de la fissuration, a été étudié lors de cette mémoire.

L'agression du trafic routier sur les chaussées implique plusieurs phénomènes qui provoquent à terme la ruine de la structure : l'orniérage, la fatigue et la fissuration. Les essais en laboratoire permettent de dimensionner les différents matériaux vis à vis de ces phénomènes pour optimiser la durée de vie des chaussées en fonction du trafic et des conditions climatiques. Cependant le lien entre les résultats in situ et ceux obtenus en laboratoire n'est pas bien défini [De La Roche, 1994 b] et la connaissance même des phénomènes mis en jeu dans les essais de laboratoire est insuffisante.

Dans cette étude nous apportons de nouveaux éléments d'interprétation et d'identification de ces phénomènes impliqués dans l'essai de fatigue en flexion des mélanges bitumineux. Notre démarche repose sur l'interprétation de l'allongement vertical significatif des éprouvettes trapézoïdales en cours d'essai de fatigue, phénomène que l'on retrouve aussi pour d'autres types d'essai [Wendling, 1998].

Les études consacrées à ce phénomène sont déjà fort anciennes ; les premières études de rupture sous l'effet de sollicitations répétées datent de plus de 150 ans, et les premières études fondamentales en laboratoire, effectuées sur les premières machines de fatigue, ont été effectuées par WOHLER en 1852.

Le travail fait reste toujours incomplet à cause du manque de documents surtout sur les lois de fatigue utilisées dans le dimensionnement rationnel des chaussées.

## Bibliographie :





### ✓ Les livres :

1. Thèse de doctorat : comportement à la fatigue des matériaux granulaires traités aux liants hydrocarbonés : l'institut nationale des sciences appliquées de Lyon : HASSAN BAAJ : 2002
2. Thèse de doctorat : Etude de la fissuration et de la fatigue des enrobés bitumineux : l'institut nationale des sciences appliquées de Lyon : MAO LAN NGUYEN : 2009
3. Article : Fissuration par fatigue : CLAUSE ROBIN : Ecole des mines de Douai
4. Thèse de doctorat : modélisation de la remontée de fissure en fatigue dans les structures routières par endommagement

### ✓ Les sites Web :

5. Google scholar

Sites :

-  <http://www.xavierbarbier.com/2012/07/11/les-mecanismes-de-la-fatigue-partie-1/>
-  [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fatigue\\_\(mat%C3%A9riau\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fatigue_(mat%C3%A9riau))
-  <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/essais-et-expertise-en-corrosion-et-vieillissement-42499210/essais-de-fatigue-corrosion-m135/>
-  <https://etudes.univ-rennes1.fr>