

# **LA FATIGUE DES ENROBES BITUMINEUX, IMPACT DE LA TEMPERATURE ET DE LA NATURE DES GRANULATS**

**PAR MOHAMED AFECHKAR, CHEF DE SERVICE RECHERCHE AU CNER**

## **INTRODUCTION**

La route constitue une artère principale pour l'économie nationale, elle assure le déplacement des personnes et des biens. Cependant, ces dernières années, la croissance du transport des marchandises par camions a mis d'avantage à l'épreuve les grands axes routiers de notre réseau (exemple : voie de contournement de Rabat Salé).

Il apparaît donc nécessaire d'approfondir les études menées sur les matériaux de chaussées et en particulier, les enrobés bitumineux constituant les couches de roulement de ces axes fortement sollicités par un trafic lourd (surcharge). Ces études qui doivent se concentrer sur 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, etc.

L'endommagement des structures de chaussée est provoqué principalement par la fatigue qui est due au passage répété des poids lourds. Cet endommagement en fatigue est simulé en laboratoire par l'essai normalisé de détermination de la résistance en fatigue des mélanges hydrocarbonés NF EN 12697-24- Mars 2005. Cet essai permet de construire la droite de fatigue du béton bitumineux testé. Cette droite de fatigue (pente de la droite de fatigue et la déformation à un million de cycle  $\epsilon_6$ ) est utilisée dans la procédure de dimensionnement des structures de chaussée pour calculer la déformation admissible au sein du béton bitumineux.

Le laboratoire du CNER se penche actuellement sur l'étude des performances des bétons bitumineux (résistance à la fatigue,  $\epsilon_6$ , etc) en vue de les maîtriser et de fournir à tous les intervenants (Administration, bureaux d'études, entreprises, laboratoires, etc) les outils nécessaires aux études de dimensionnement des structures de chaussées.

Le présent article traite les différents paramètres influençant la fatigue « liant, granulats, fines, températures,.. », ainsi que les résultats des essais réalisés au laboratoire du CNER à l'aide du matériel de la flexion à quatre points.

## **I. FATIGUE DES BETONS BITUMINEUX**

### **1 - Définitions et critère d'évaluation**

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 104) dont l'amplitude est inférieure à la résistance à la rupture instantanée du matériau.

Par définition, une éprouvette est dite fatiguée lorsque son module atteint la moitié de sa valeur initiale mesurée au premier cycle de chargement dans les mêmes conditions d'essai (même température et même fréquence). La durée de vie  $N_f$  d'une éprouvette est donc le nombre de cycles correspondant à un module de rigidité égal à la moitié du module initial de cette même éprouvette (figure 1).

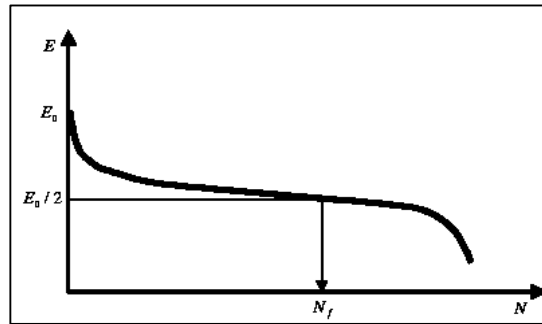


Figure1 : Définition du critère classique de fatigue et détermination de la durée de vie  $N_f$

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

## 2. Fonctionnement de la chaussée :

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 2).

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 lourds, engendrent des "micro" dégradations qui s'accumulent et peuvent entraîner la ruine du matériau par fatigue. Alors, la direction de contrainte 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).

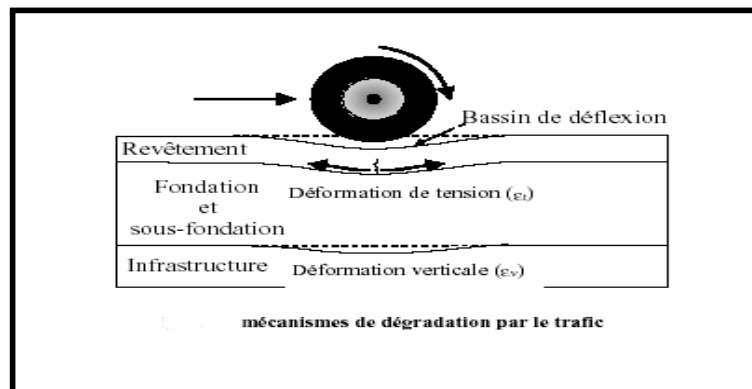


Figure2 : Schématisation des sollicitations induites par le trafic.

L'allure des déformations longitudinales réelles à la base d'une couche de chaussée a été étudiée sur le manège du LCPC. La figure 3 présente le principe de cette expérimentation.

Le point A de la chaussée est sollicité lors du passage d'une charge, roulant à une vitesse constante  $V$ . ce point est situé à une profondeur  $d$  par rapport à la surface de la chaussée. Le signal correspondant à la déformation longitudinale (dans la direction de roulement) au point A est présenté dans la figure suivante.

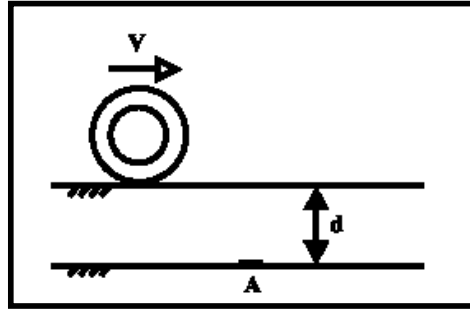


Figure 3 : Positionnement d'une jauge axiale à la base d'une chaussée (point A), à une profondeur  $d$  pour étudier les déformations dues au passage d'une roue à une vitesse  $V$ .

Lors de l'approche de la charge, ce point est soumis à une contraction puis à une extension quand la charge est suffisamment proche du point A. l'allure générale du signal obtenu (figure 4) est presque symétrique mais avec une plus faible amplitude pour la partie du signal qui présente la contraction lors de l'éloignement de la charge. Le caractère symétrique de cette courbe est d'autant plus marqué que la température est élevée.

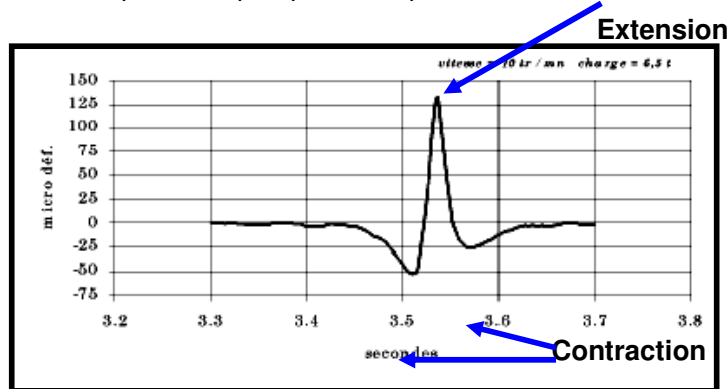


Figure 4 : Signal de déformation enregistré à la base de la chaussée lors du passage d'une roue à vitesse constante.

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.

L'amplitude de la partie en 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 des chaussées se fait donc principalement par **"traction par flexion"**. L'amorce de la fissure doit se déclencher théoriquement à cet endroit.

La forme de ce signal et le nombre de paramètres qui le définissent (variation de température, de la charge, des conditions climatiques, ...) soulignent les difficultés de la reproduction du signal réel en laboratoire.

Le signal de la figure 4 peut être utilisé pour déterminer la fréquence  $F$  de la sollicitation des essais de fatigue en laboratoire. Le calcul se fait à l'aide de la distance  $L$  entre les crêtes en contraction du signal, et du temps qu'a mis la roue pour parcourir cette distance.

### 3 - Mécanisme de la fatigue :

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 5).

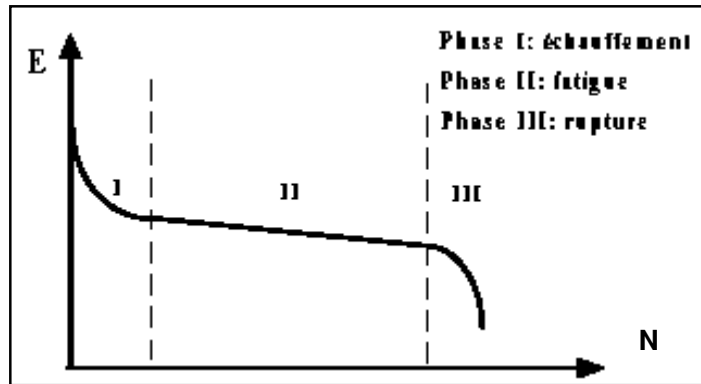


Figure 5 : Distinction de trois phases différentes dans un essai de fatigue

- 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. EFFET DES PARAMETRES DE FORMULATIONS SUR LA FATIGUE

Les paramètres de formulation qui influencent la loi de fatigue des bétons bitumineux sont :

### 1 - Les granulats :

#### 1.1 - Aspects de la courbe granulométrique :

Il semble que la courbe granulométrique ne soit pas un paramètre facilement étudiable, puisqu'il ne peut être considéré isolément, dans la mesure où il conditionne la teneur en filler et la teneur en bitume. Cependant tous les résultats montrent qu'une courbe granulométrique continue est meilleure qu'une courbe discontinue.

#### 1.2 Teneur en fines :

Il a été montré qu'un sous dosage en fine est moins défavorable qu'un excès. Ainsi, pour une teneur en bitume égale à 3.5%, le meilleur comportement à la fatigue est obtenue pour une teneur en fine égale à 7%, Voir figure 6.

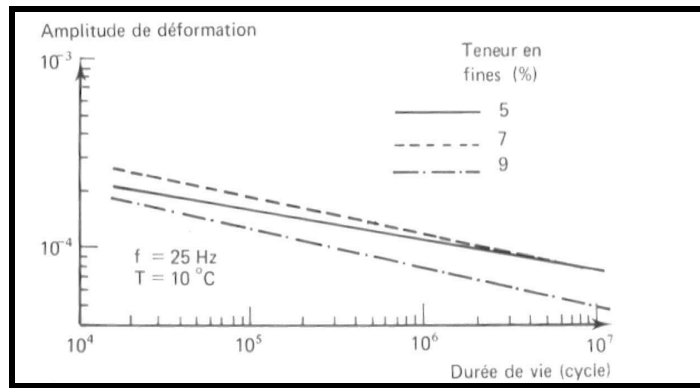


Figure 6 : Influence de la teneur en fines sur la droite de fatigue

## 2 - Le bitume

### 2.1 - La teneur en bitume :

Il a été montré qu'une teneur en bitume élevée améliore l'enrobage, augmente la déformabilité et est favorable à la résistance à la fatigue. Mais en revanche, il y'a un désaccord sur l'existence d'une teneur optimale.

La figure ci-dessous montre pour deux teneurs en vides l'effet de l'augmentation de la teneur en liant. Inversement, une diminution de la teneur en bitume entraîne une chute importante de la résistance à la fatigue.

Il est important de savoir que le bitume influe aussi par sa pénétrabilité. Un bitume trop dur peut conduire par temps froid à une fragilité excessive. Ceci impose de bien prendre garde au moment de la fabrication à la surchauffe.

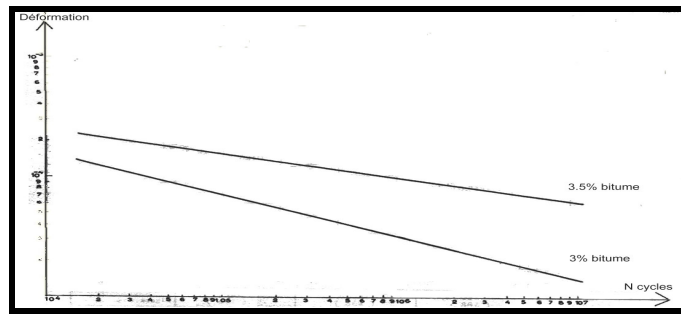


Figure 7 : influence de la teneur en bitume sur la droite de fatigue

### 2.2 - La dureté du bitume :

Ce facteur est tout à fait déterminant, car, en conditionnant la rigidité de l'enrobé, il conditionne de même sa durée de vie en fatigue. Certaines recherches vont jusqu'à estimer que dans l'expression de la loi de fatigue, il faudrait prendre en compte non pas la déformation de l'enrobé, mais la déformation du bitume, obtenue par application d'un facteur de proportionnalité égal à la concentration de bitume dans l'enrobé.

Toutes les études menées sur le sujet, montrent que le rôle de la nature du liant est très important sur la résistance en fatigue de l'enrobé.

Les résultats montrent aussi que les enrobés préparés avec les bitumes modifiés par les élastomères donnent des durées de vie plus élevées et des modules de rigidité plus faibles par rapport au bitume de distillation directe.

## 2 - La compacité

La compacité est estimée par tous comme un des facteurs les plus déterminants. A déformation constante ou à contrainte constante, il a été montré que les durées de vie augmentent avec la compacité. Les deux tableaux et la figure ci-dessous illustrent bien cette influence. Ainsi à déformation égale à  $1,5 \cdot 10^{-4}$ , les durées de vie pour trois teneurs en vides, montrent qu'un gain de compacité de 3% augmente la durée de vie d'environ  $6 \cdot 10^4$  cycles.

| Enrobés (Teneur en vides en %) | N (Cycle)         |
|--------------------------------|-------------------|
| 10                             | $4,42 \cdot 10^5$ |
| 14                             | $4,41 \cdot 10^5$ |
| 17                             | $7,68 \cdot 10^4$ |

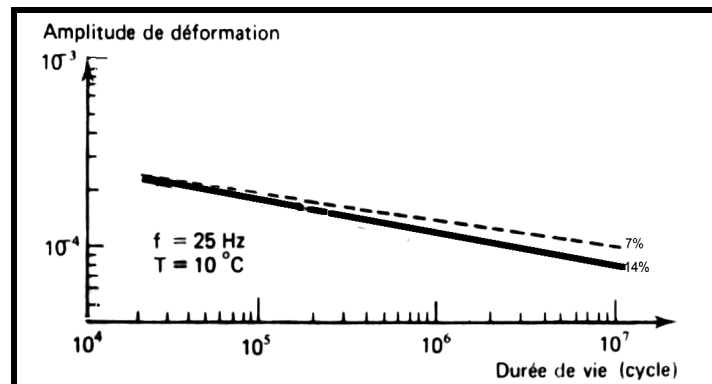


Figure 8 : Influence de la teneur en vides sur la droite de fatigue

## 4 - La température :

Les mélanges hydrocarbonés à chaud sont des matériaux viscoélastiques qui sont très influencés par la variation de température et notamment, leurs modules de rigidité. Dans la suite de l'article, ce point sera traité afin de déterminer son influence sur la loi de fatigue des enrobés bitumineux.

## III - ETUDE DE LA FATIGUE DES ENROBES BITUMINEUX AU LABORATOIRE DU CNER

### 1 - Principe de l'essai

L'essai de fatigue s'effectue par la mise en flexion à quatre points des éprouvettes parallélépipédiques d'enrobés bitumineux à température constante choisie. Pour une même fréquence de sollicitation sinusoïdale la méthode nécessite la réalisation de plusieurs essais élémentaires dans une enceinte thermo régulée pour maîtriser la température de l'essai

L'essai consiste :

- solliciter une éprouvette console parallélépipède en imposant une déformation sinusoïdale à amplitude constante jusqu'à rupture par fatigue ;
- enregistrer au cours de cette sollicitation l'évolution de l'amplitude de la force en tête relative à la réaction de l'éprouvette.

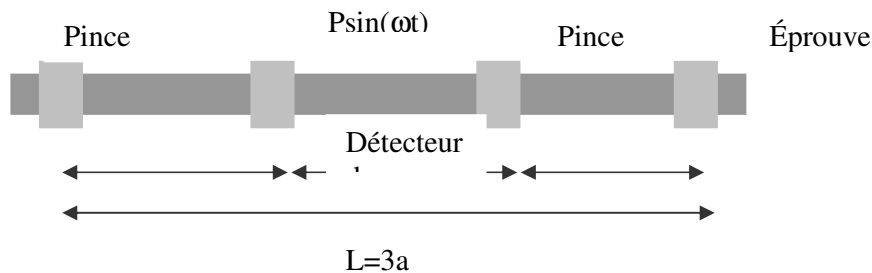
- mesurer la durée de vie de l'éprouvette (le nombre de cycle de sollicitation à la rupture).
- Répéter les opérations (citées ci-avant) à différents d'amplitude de déformation. Afin de construire la droite de fatigue du mélange étudié et de calculer :
  - La déformation relative correspondant en moyen à  $10^6$  cycles de sollicitations  $\epsilon_6$ .
  - La pente de la droite de fatigue  $b$ .

La sollicitation des éprouvettes est réalisée à une fréquence de  $(10 \pm 1)$  Hz par un système capable d'appliquer une flexion sinusoïdale au milieu de l'éprouvette et présentant, pour un réglage de flèche donné, une variation moyenne de la flèche au milieu  $< 0.1 \mu\text{m}/\text{N}$  lorsque la force appliquée varie de 100 à 300 N. Pour des besoins particuliers, l'essai peut être réalisé à des fréquences différentes, constantes à 5% près pendant la durée de l'essai.

Cette machine a été développée pour effectuer des essais de flexion dynamique. Elle est capable d'appliquer des contraintes dynamiques sinusoïdales de force/déformation dans une gamme de fréquence de 0.1 à 50 Hz.

L'ensemble de base comprend :

- Bâti d'essai
- Enceinte thermo régulée pour fixer la température à laquelle on veut réaliser l'essai
- Moteur pneumatique à capteurs de déplacement intégrés
- Raccord pneumatiques, régulateur et tuyauterie pour connexion à un compresseur
- 5 capteurs de déplacement et 2 sondes de température
- Ordinateur Pentium, logiciel utilitaire et d'étalonnage
- Compresseur





Appareil pour essai de fatigue

## 2 - Essai et résultats

Deux formulations d'enrobés bitumineux ont été étudiées lors de la présente étude. Ces enrobés notés EB1 et EB2. Les granulats ayant servi à la confection des éprouvettes de EB1 proviennent de la carrière de Beni Abid (près de Azemmour), par contre ceux de l'enrobé EB2 proviennent de la carrière Bhalil.

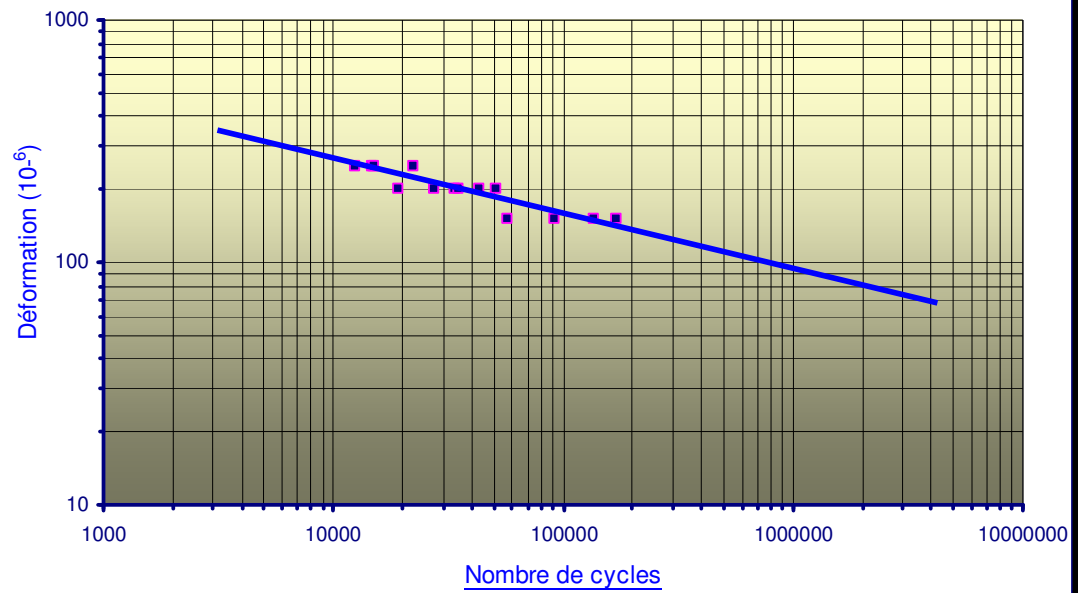
| Classes<br>granulaires | 0/4 | 4/6 | 6/10 | Teneur en<br>liants<br>(40/50) |
|------------------------|-----|-----|------|--------------------------------|
| EB1                    | 55  | 30  | 15   | 5.8                            |
| EB2                    | 55  | 15  | 30   | 6                              |

Il faut noter que les essais de fatigue ont été réalisés sous les températures (10°C, 20°C, 30°C) pour EB1 et 20°C pour EB2 20°C.

Les droites de fatigue établies sur la base de essais sont comme suit :



### Droite de fatigue de EB1 à 10 °C

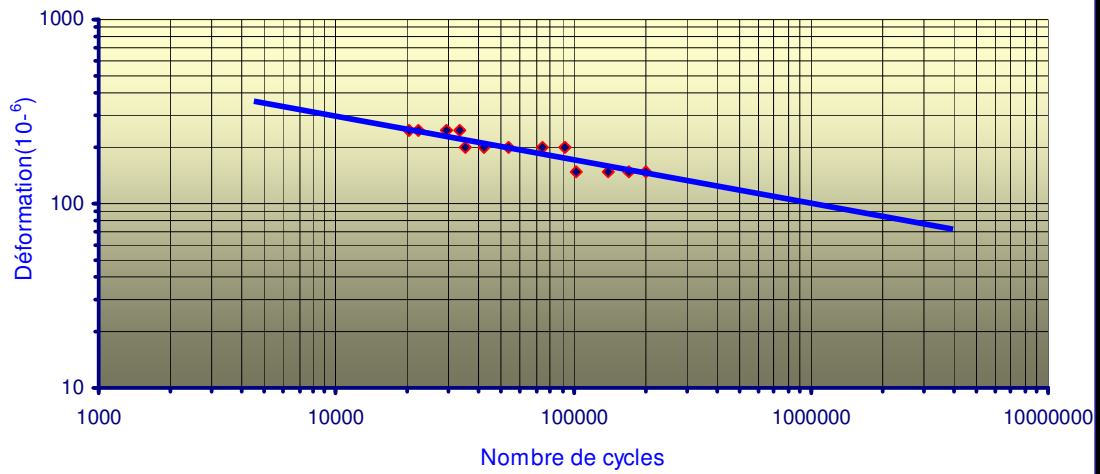


#### Paramètre de fatigue de EB1 à 10 °C

$$\ln(\epsilon) = -0,214 \cdot \ln(N) + 7,5397$$

$$\epsilon_6 = 97 \cdot 10^{-6}$$

### Droite de fatigue de EB1 à 20°C

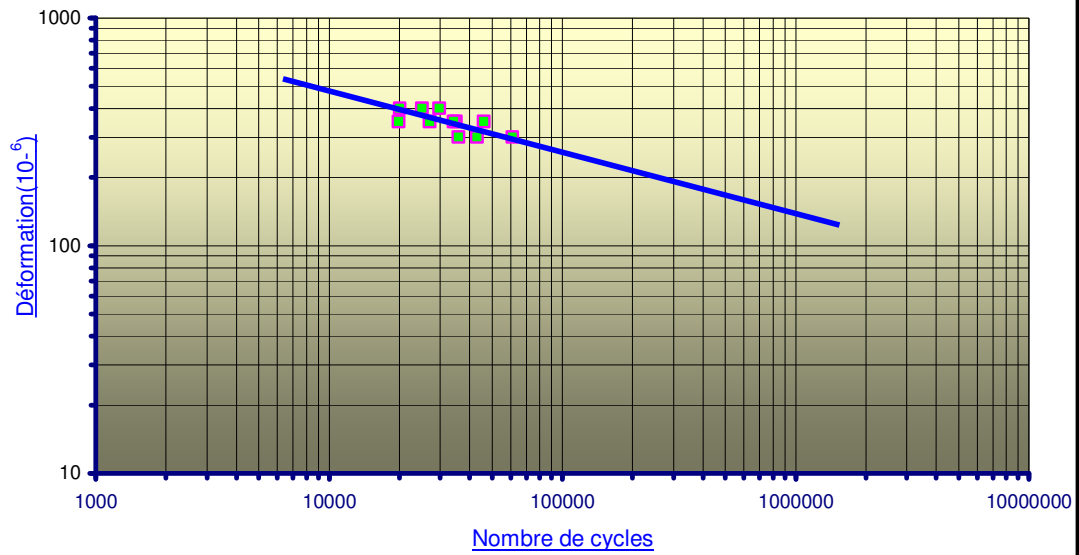


### Paramètre de fatigue de EB1 à 20°C

$$\ln(\epsilon) = -0,228 \cdot \ln(N) + 7,803$$

$$\epsilon_6 = 104 \cdot 10^{-6}$$

### Droite de fatigue de EB1 à 30 °C

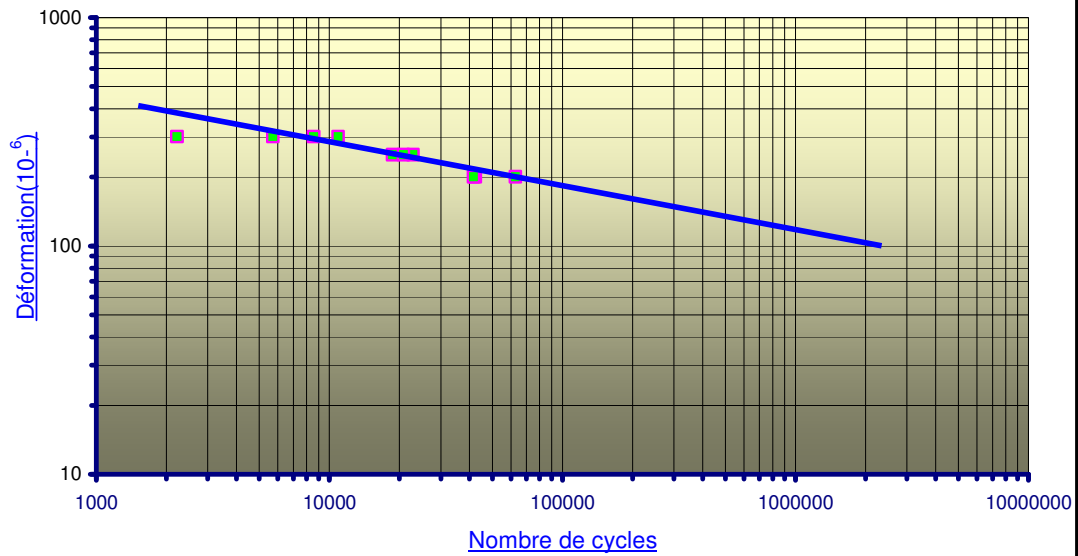


### **Paramètre de fatigue de EB1 à 30 °C**

$$\ln(\varepsilon) = -0,2231 \cdot \ln(N) + 8,1698$$

$$\varepsilon_6 = 166 \cdot 10^{-6}$$

### Droite de fatigue de EB2 à 20 °C



### **Paramètre de fatigue de EB2 à 20 °C**

$$\ln(\epsilon) = -0,1553 \cdot \ln(N) + 7,0319$$

$$\epsilon_6 = 132 \cdot 10^{-6}$$

### 3 Module de rigidité

Au cours de l'essai de fatigue, on peut mesurer le module complexe de l'enrobé par la détermination de sa norme ou de son module et de l'angle de déphasage. Ainsi on peut écrire que :

$$E^* = |E^*| (\cos\varphi + i\sin\varphi) \text{ avec } |E^*| : \text{module du module complexe } E^*$$

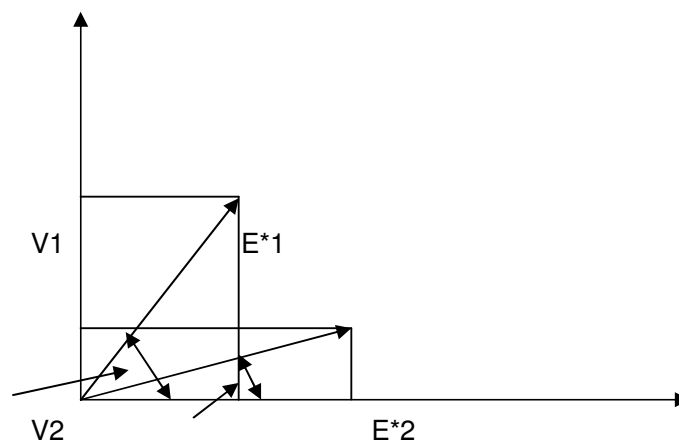
Et  $\varphi$  : angle de déphasage de la contrainte par rapport à la déformation

L'importance de cette écriture complexe du module de l'enrobé c'est qu'elle permet de traduire le vrai comportement de l'enrobé. En effet, le terme  $|E^*| \cos\varphi$  constitue la partie réelle du module complexe qui représente en fait le comportement élastique de l'enrobé qui se traduit sur la chaussée par des déformations réversibles (absence d'affaissement, d'orniérage, etc) ; par contre le terme  $|E^*| \sin\varphi$  constitue la partie imaginaire du module et qui représente à son tour le comportement visqueux de l'enrobé qui a été hérité de la viscosité du bitume qui se traduit sur la chaussée par des déformations irréversibles (affaissement, orniérage, etc).

En regardant cette écriture on peut aisément constater que quand l'angle  $\varphi$  est nul  $\sin\varphi$  est à son tour égale à zéro et l'enrobé a un comportement purement élastique, par contre quand l'angle  $\varphi$  est de  $\pi/2$ ,  $\cos\varphi$  est nul et l'enrobé se comporte comme un corps visqueux. En d'autres termes les formules d'enrobés qui peuvent nous offrir des angles de déphasages très petits ( $\sin\varphi$  aura tendance à être au voisinage de zéro) se caractériseront par un comportement d'enrobé à prédominance élastique, par contre les formules qui donnent un angle de phase qui s'approche de  $\pi/2$  se caractériseront par des comportements à prédominance visqueux.

De ce qui précède, on peut facilement comprendre que cette schématisation qui est l'écriture complexe nous offre une opportunité précieuse qui nous permet de distinguer entre plusieurs formulations de mélanges hydrocarbonés qu'on pourrait qualifier de similaires si on se limite dans leurs analyse aux essais classiques (Marshall, Duriez, etc), le schéma ci-dessous permet de nous illustrer d'une manière simple le propos qui est énoncé ci-avant.

Comportement visqueux



$\varphi 1$

$\varphi 2$  E1 E2

Comportement élastique

**Comportement viscoélastique d'un enrobé**

D'après ce schéma, on a deux enrobés qui ont le même module du module (module d'un nombre complexe,  $G^* = E + iV$  module de  $G^*$  càd  $|G^*| = \sqrt{E^2 + V^2}$ ) mais ont des comportements différents, l'enrobé 2 est plus élastique que l'enrobé 1 car le déphasage  $\Phi_2$  est plus faible et donc il peut supporter un chargement de trafic (déformation réversible) beaucoup plus important que l'enrobé 1.

Cet exemple montre d'une manière clair que  $E$  (module de l'enrobé) ne peut à lui seul nous permettre la description du comportement de l'enrobé, la valeur de  $\Phi$  (angle de déphasage) est aussi nécessaire.

A cet effet, les modules complexes à différentes températures pour les deux enrobés sont comme suit :

#### Pour EB1

$$E_{30^\circ\text{C}}^* = 1945[(\cos(47,24) + i \cdot \sin(47,24))] \quad (\text{MPa})$$

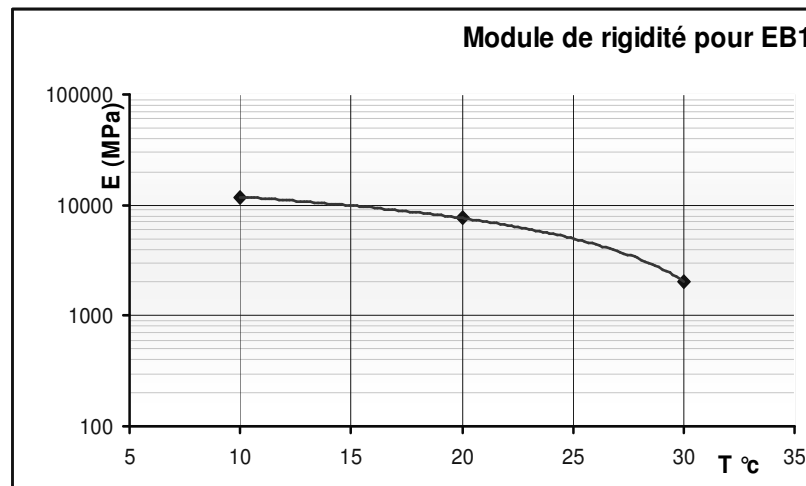
$$E_{20^\circ\text{C}}^* = 6520[(\cos(29,86) + i \cdot \sin(29,86))] \quad (\text{Mpa})$$

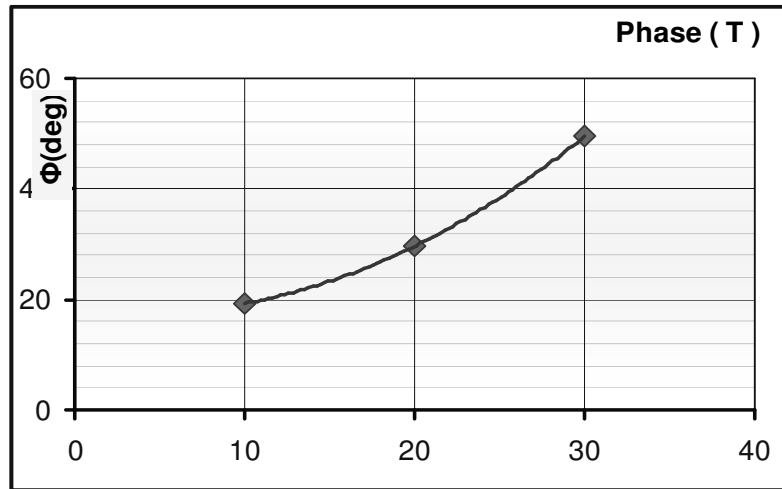
$$E_{10^\circ\text{C}}^* = 11000[(\cos(17,64) + i \cdot \sin(17,64))] \quad (\text{Mpa})$$

#### Pour EB2

$$E_{20^\circ\text{C}}^* = 7921[(\cos(29,23) + i \cdot \sin(29,23))] \quad (\text{MPa})$$

Les variations de la norme du module de rigidité ainsi que de l'angle de phase sont illustrés par les graphes suivants :





## CONCLUSION

Les essais de fatigue réalisés sur deux enrobés, l'un à base des matériaux de la carrière Ben Abid et l'autre à base des matériaux de Bhalil ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- La déformation à un million de cycle ( $\epsilon_6$ ) augmente en fonction de la température ce qui entraîne un accroissement de la résistance à la fatigue avec une croissance de la température ;

| T °          | 10                        | 20                          | 30                          |
|--------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| $\epsilon_6$ | $\epsilon_6 = 97.10^{-6}$ | $\epsilon_6 = 104. 10^{-6}$ | $\epsilon_6 = 166. 10^{-6}$ |

- La pente de la droite de fatigue est peu sensible à la variation de la température et les courbes de fatigues aux températures testées restent quasiment parallèles.

| T ( °C) | 10     | 20     | 30     |
|---------|--------|--------|--------|
| b       | -0.214 | -0.228 | -0.223 |

- l'élévation de la température engendre d'une part la diminution de la norme du module complexe et d'autre part l'augmentation de l'angle de phase entre la contrainte et la déformation ce qui se traduit par une prédominance du comportement visqueux caractérisé par des déformations irréversibles au niveau de l'enrobé ;

- l'EB2 est plus résistant à la fatigue qu'EB1 ;
- les droites de fatigue déduites des essais de fatigue à déformation constante semble dire que la durée de vie du matériau augmente avec la température, car à un même niveau de déformation le nombre de cycle correspondant le plus élevé est celui relatif à la température la plus élevée ;
- en comparant les deux enrobés à 20°C, on peut dire que EB1 a un comportement plus élastique que EB2 du fait que les angles de déphasage initiales sont pratiquement les mêmes, cependant en augmentant le nombre de cycle de sollicitation on a remarqué une nette augmentation du déphasage pour EB2 (qui a atteint 37°) par contre pour EB1 cet angle n'a pas dépassé 30,5°(les éléments inférieurs à 6mm pour EB1 sont de 85% par contre pour EB2 , ils sont de 70%) ;
- les paramètres de fatigue (La déformation à un million de cycle ( $\epsilon_6$ ), La pente de la droite de fatigue (b) ) déterminés par le laboratoire du CNER sont du même ordre que ceux utilisés par les spécifications françaises :  
 $(\epsilon_6 (10^\circ\text{C}, 25 \text{ Hz}) = 150.10^{-6}, b = -0.2)$