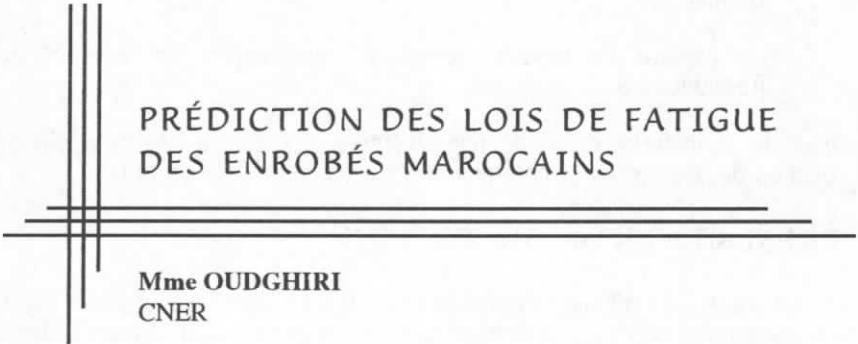




## PRÉDICTION DES LOIS DE FATIGUE DES ENROBÉS MAROCAINS

**Mme OUDGHIRI**  
CNER

## 1- INTRODUCTION

L'apparition des fissures ou encore fatigue de l'enrobé bitumineux est le résultat de la répétition des charges aux basses températures et aux fréquences de sollicitation élevées ; Afin de limiter ce phénomène , des méthodes de dimensionnement ( à la rupture ) basées sur la connaissance des propriétés mécaniques du matériau et une loi permettant la prévision en fatigue , ont été mises au point . Par ailleurs , la présence du bitume dans le mélange confère à celui-ci un comportement viscoélastique et les propriétés mécaniques deviennent alors des grandeurs complexes . Ainsi , plusieurs essais de laboratoire sont utilisés pour leur détermination dont on citera l'essai de flexion alternée qui permet :

- la détermination du nombre de cycles à la rupture pour une contrainte donnée ;
- la mesure du module complexe pour différentes températures et fréquences .

Les résultats serviront alors de données d'entrée aux calculs de dimensionnement des couches de chaussées et notamment pour les cas de trafics forts .

## 2- PRESENTATION DU PROJET

Le projet qui s'intitule ' Prédiction des lois de fatigue des enrobés bitumineux est une étude qui s'est déroulée dans le cadre de la coopération Maroc-Belge ; Il se présente sous la forme de deux volets :

- Le premier a pour but de déterminer les modules complexes et loi de fatigue des enrobés bitumineux marocains qui sont soit confectionnés au CRR moyennant des constituants marocains , soit prélevés d'une chaussée nouvellement renforcée , ce qui permettra moyennant un échantillonnage représentatif , de proposer des valeurs marocaines jusqu'alors absentes ;
- Le deuxième volet a pour objectif l'utilisation d'un logiciel de calcul de formulation mis au point par le CRR appelé ' PRADO ' qui comme ses initiales l'indiquent signifie (programmes pour la conception et l'optimisation des enrobés bitumineux) ; Il permet alors , après un calage approprié de proposer une

formule d'enrobé à partir des différents constituants , de déterminer le module de rigidité pour plusieurs températures et fréquences et enfin de prédire une loi de fatigue ou un allongement à la rupture pour cette formule

### 3- PROPRIETES MECANIQUES

Les propriétés et lois mécaniques les plus importantes des enrobés bitumineux sont le module de rigidité , la loi de fatigue et la loi de la déformation permanente . Seuls les deux premiers font l'objet de la présente communication .

#### 1- Module de rigidité

##### a- Définition

Le module de rigidité  $|E^*|$  est tout simplement la norme du module complexe  $E^*$  . Ce dernier est le rapport entre la contrainte appliquée et la déformation qui en résulte . Ce qui peut être expliqué par :

$$\begin{aligned} s &= s_0 \sin ( 2 \pi f t ) \text{ ( contrainte sinusoidale)} \\ e &= ( T , W ) \sin ( 2 \pi f t - j ) \text{ ( la déformation est aussi} \\ &\text{sinusoidale et} \\ &\text{présente un retard } j ) \end{aligned}$$

$$\text{d'où } E^* ( f , t ) = |E^*| ( f , t ) . \exp ( i j )$$

##### b- Méthodes de détermination

Plusieurs méthodes ( Tableau n° 1 ) sont utilisées pour la calcul du module de rigidité dont on cite la méthode belge et celles basées sur le nomogramme de Van der Poel , ce dernier permet la prévision du module de rigidité  $S_b$  du bitume en connaissant l'IP et la TBA pour tout couple ( fréquence - température )

# - Méthodes basées sur le nomogramme de Van Der Poel

Tableau n°1

| Méthode de                                    | Valeur de $ E^* $                                                                                                                                                                                        | Remarques                                     |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Heukelom et Klomp                             | $ E^*  = \frac{2.5 \cdot C_v}{n} \left[ 1 + \frac{S_b}{n \cdot (1 - C_v)} \right]$ $n = 0.83 \log \frac{S_b}{V_g}$ $C_v = \frac{V_g}{V_g + V_b}$                                                         | Mélanges dont le % des vides est voisin de 3% |
| Heukelom et Klomp corrigée par Finj van Draat | $C_v \text{ corrigée par } C_v$ $C'_v = \frac{v-3}{1+\frac{v-3}{100}}$                                                                                                                                   | non justifié expérimentalement                |
| Saunier                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ne peut être représenté analytiquement ;</li> <li>- Aux basse températures ou hautes fréquences , module obtenu à partir d'interpolations téméraires</li> </ul> | % vides : [ 4, 26% ]                          |

## b/ Méthode belge

La méthode belge est basée sur des résultats expérimentaux obtenus sur 52 mélanges caractérisés par :

$$76.7 < V_g < 85\% \quad 9\% < V_b < 16.2\%$$

$$\text{et } 1.5\% < v < 14\%$$

L'éprouvette d'enrobé est soumise à la flexion alternée ( dont un bref aperçu sur la confection et l'essai de flexion est donnée ultérieurement ) pour des gammes de fréquence et de température respectives de 3 Hz à 100 Hz et de -20°C à 30°C .

Au cours de l'essai , on mesure les amplitudes de la force  $F_0$  appliquée au sommet et de la déformation résultante  $f_0$  en ce point . Le module complexe est alors déterminé soit par ses parties réelles et imaginaires soit par son module et son angle de phase :

$$E_1 = \frac{1}{g} \frac{F_0 \cos j}{f_0} + \frac{1}{m} \frac{F_0 \sin j}{M \omega^2} ; \quad E_2 = \frac{1}{g} \frac{F_0 \sin j}{f_0} + \frac{1}{m} \frac{F_0 \cos j}{M \omega^2}$$

$$|E^*| = \frac{1}{g} \frac{F_0}{f_0} \sqrt{\left( \cos j + \frac{1}{m} \frac{F_0}{M \omega^2} \right)^2 + \left( \sin j \right)^2}$$

$$j = \arctg \left( \frac{F_0 \sin y}{F_0 \cos y + \frac{1}{m} \frac{F_0}{M \omega^2}} \right)$$

avec  $M$  = masse de l'éprouvette

$\omega$  = pulsation

$y$  = déphasage entre force et flèche

$m$  et  $g$  = coefficients dépendants des dimensions de l'éprouvette.

Par ailleurs , il a été montré que :

- Le module de rigidité obéit à la loi d'équivalence fréquence - température et peut être alors représenté par une courbe appelée courbe maîtresse

- Le module de rigidité peut aussi être écrit sous la forme  $|E^*| = E^* \cdot R^*$  avec  $E^*$  = limite supérieure de la courbe et  $R^*$  module réduit variant de 0 à 1 ; Le module réduit peut être obtenu par :

$$\log R^*(pen) = 0.8169 - 1.313 \log pen$$

$$\text{et } E^* = 1.436 \cdot 10^4 \cdot r^{0.55} \exp(-5.84 \cdot 10^{-2} \cdot V)$$

avec  $0.16 < r < Vg/Vb < 12$  et  $1.5\% < v < 32\%$

### 3-2/ Loi de fatigue

Les couches bitumineuses subissent à leur base, du fait du trafic, des allongements répétés qui génèrent des dommages de fatigue. Celle-ci obéit à une loi empirique de la forme  $Nr = K (1/e_0)^x$

avec  $Nr$  : nombre de cycles à la rupture  
 $e_0$  : déformation initiale

En flexion alternée réalisée pour une fréquence et une température données, la relation est alors

$\log e = \log A - B \log N$ . Pendant toute la durée de l'essai, les amplitudes de la force, du déplacement et le nombre de cycles sont relevés, la rupture est alors détectée dès que :

- L'allongement dépasse le triple de sa valeur initiale pour l'essai à force contrôlée
- La force est inférieure au quart de sa valeur initiale pour l'essai à déplacement contrôlé

La courbe obtenue dans une représentation bilogarithmique est alors une droite. Par ailleurs, le module et l'allongement à la rupture sont influencés par plusieurs paramètres.

## 4- PRESENTATION DE ' PRADO '

' Prado ' est un ensemble de programmes pour la conception et l'optimisation des enrobés bitumineux. Il est constitué de 7 programmes comme le montre le menu schématisé ci-dessous. Il permet donc soit de déterminer une formulation à partir des constituants, soit d'analyser une formulation déjà établie. Pour les deux cas, les propriétés mécaniques et la loi de fatigue sont connues. Cependant le logiciel tel qu'il a été mis au point par le CRR ne pouvait fonctionner pour le cas marocain. Une première adaptation s'imposait et ce pour deux causes :

- L'étude ne pouvait être faite si les spécifications du sable et du filler ne sont pas données ;
- La définition du sable belge est telle qu'elle ne permettait pas l'appellation d'un 0/4 ( considéré au Maroc comme sable ) le sable 0/4

Une fois adapté, le calcul des propriétés mécaniques de tous les mélanges testés au laboratoire, a été fait par ' PRADO ' et une confrontation des résultats est établie dans le but de proposer un calage de ce modèle.

## 5/ MODULE ET LOI DE FATIGUE DES EB MAROCAINS

Les essais de fatigue réalisés au laboratoire du CRR ont concerné des échantillons d'enrobé prélevés de chantiers qui étaient en cours en Octobre 1994 et d'autres fabriqués à l'aide de constituants marocains.

De même un échantillon de bitume pur 40/50 a été envoyé au CRR en vu de son identification

### 1- Présentation des échantillons

|                                                   | Type d'enrobé | dénomination | lieu de prélèvement     | Nbre d'éprouvettes | fraction granulaire prélevée |
|---------------------------------------------------|---------------|--------------|-------------------------|--------------------|------------------------------|
| Enrobés prélevés :<br>Eprouvettes<br>60*15*8 (cm) | GBB           | A            | Autoroute Rabat-Kénitra | 8                  |                              |
|                                                   | BB            | B            | Autoroute Rabat-Kénitra | 8                  |                              |
|                                                   | GBB           | C            | Av 6 Novembre           | 8                  |                              |
|                                                   | GBB           | D            | Bd Med V                | 8                  |                              |
| Enrobés confectionnés                             | BB            | M331         | carrière Benabid        |                    | G 4/6<br>S 0/4<br>S 0/3      |
|                                                   | BB            | M332         | Carrière Doukkala       |                    | G 6/10<br>S 0/4              |

Les éprouvettes prélevées sont sciées en nombre 16 sous forme trapézoïdale de dimensions moyennes B=56 mm , b = 25 mm , h = 250 mm et e = 25 mm.

Quant aux enrobés fabriqués , le PRADO a recommandé les formules suivantes :

| Bitume pur<br>40/50                | Enrobé      | Formulation proposée*                                                        | Traduit par                                                     | schématisé par |
|------------------------------------|-------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------|
| Péné =50 1/10 mm<br><br>TBA = 53°C | BB Benabid  | 40.9 % G 6/10<br>19.6 % G 4/6<br>19.7 % S 0/4<br>19.8 % S 0/3<br>6% BP 40/50 | 70.1 % PIERRES<br>28.84 % SABLES<br>9.5 % FILLER<br>6 % BITUME  |                |
| Péné =50 1/10 mm<br><br>TBA = 53°C | BB Doukkala | 42.5 % G 6/10<br>57.5 % G 4/6<br>6% BP 40/50                                 | 55.3 % PIERRES<br>36.65 % SABLES<br>8.05 % FILLER<br>6 % BITUME |                |

## 1- CONCLUSION

Les mélanges étudiés ci-avant peuvent être caractérisés par les paramètres suivants :

| En volume | GBB AUTO | BB AUTO | GBB 6 NOV | GBBMED V | BB DOUKKALA | BB BENABID |
|-----------|----------|---------|-----------|----------|-------------|------------|
| %P        | 45.27    | 49.55   | 48.84     | 43.98    | 43.91       | 56.73      |
| %S        | 27.30    | 24.41   | 24.18     | 27.54    | 29.32       | 16.92      |
| %F        | 7.27     | 6.34    | 7.05      | 3.92     | 6.44        | 7.29       |
| %B        | 9.42     | 9.11    | 8.82      | 8.70     | 12.62       | 12.81      |
| %V        | 10.74    | 10.59   | 11.11     | 15.86    | 7.71        | 6.25       |
| C'v       | 0.830    | 0.834   | 0.832     | 0.795    | 0.824       | 0.835      |

On en déduit alors que pour :

- le module de rigidité :



En portant les 6 courbes maîtresses dans un même graphique , on constate que les mélanges A, B, D et Doukkala sont presque confondues et le module infini est en moyenne égale à 20.000 MPa.

En revanche , si on élargit le fuseau des valeurs en considérant aussi le mélange Benabid , l'écart varierait alors de 200 MPa à haute température à 520 MPa à basse température .

En exceptant alors le mélange C , on recommande pour le module de rigidité le fuseau présenté dans le graphique ci-dessous .

En d'autres termes et à titre d'exemple : à 20 °C et 30 Hz , le module peut varier de 7755 à 9808 MPa et ce pour une concentration volumique variant de 0.824 à 0.834 et un pourcentage de vides de 7.7% à 11.1 %

On propose alors pour ces intervalles de concentration volumique et de pourcentage en vides , un fuseau de courbes maîtresses délimité à son minimum par la courbe de Benabid et à son maximum par la courbe du béton bitumineux de l'autoroute

- L'allongement à la rupture :

Pour les mêmes mélanges , les allongements à  $10^6$  cycles à 20 °C et 30 HZ valent en  $\mu\text{m}$

| GBB AUTO | BB AUTO | GBB 6 NOV | GBB MED V | BB DOUKKALA | BB BENABID |
|----------|---------|-----------|-----------|-------------|------------|
| 55.4     | 65      | 68.9      | 44.20     | 53.1        | 60         |

En examinant ces résultats , on remarque que le mélange qui possède le plus grand allongement à la rupture est le mélange C ( GBB Bd 6 NOV ) . Ceci peut être expliqué par le fait que ce mélange possède le rapport  $f/b = k$  le plus faible comme le montre le tableau ci-dessous.

|             | $K = f/b$ | % v  | $e_6 (\mu\text{m})$ | $E^* (20^\circ\text{C}, 30\text{Hz})$ |
|-------------|-----------|------|---------------------|---------------------------------------|
| GBB AUTO    | 0.77      | 10.8 | 55.4                | 9646                                  |
| BB AUTO     | 0.69      | 9.4  | 65                  | 10719                                 |
| GBB 6 NOV   | 0.45      | 17.1 | 68.9                | 3137                                  |
| GBB MED V   | 0.80      | 12.1 | 44.2                | 8786                                  |
| BB Doukkala | 0,50      | 7,36 | 60                  | 8966                                  |
| BB Banabid  | 0,57      | 6,11 | 53.                 | 7755                                  |

Ce tableau montre alors que plus K est élevée, plus l'allongement à la rupture est petit.

Par ailleurs, le code de bonne pratique belge ( page 50, édition 97 ) affirme bien ce résultat. En effet :

. Pour assurer la résistance à la fatigue, il faut un mastic souple c à d : riche en bitume et pauvre en filler : f/b faible ( cas du mélange C )

.Par contre, pour assurer la stabilité, il faut un mastic rigide ( donc relativement pauvre en bitume et riche en filler.

On comprend alors, que le paramètre mastic influe énormément et est plus déterminant que le paramètre % vides, quant à la durabilité d'un enrobé bitumineux.

Ainsi, pour un rapport f/b compris entre 0.45 et 0.80, l'allongement à la rupture varierait dans l'intervalle ( 44.2 - 68.9 )

On propose alors pour un rapport f/b < 0.45, un allongement à la rupture > 68.9  $\mu\text{m}$ .

## 6- CALCUL A L'AIDE DE PRADO

Le calcul des propriétés mécaniques a également été effectué à l'aide de ' PRADO '. A cet effet, des essais d'extraction ont été réalisés sur les enrobés prélevés dont les résultats sont consignés dans le tableau n° ci-dessous :

Les résultats de calcul qui sont donnés sous forme de rapports , peuvent être récapitulés dans le tableau ci-dessous

| Mélange                                            | A ( GBB<br>auto ) | B ( BB<br>auto ) | C ( GBB<br>6 Nov ) | D ( GBB<br>Med V ) | M331 BB Doukkala | M332 BB<br>Benabid |
|----------------------------------------------------|-------------------|------------------|--------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| Type de bitume                                     |                   |                  |                    |                    |                  |                    |
| Péné                                               | 50                | 50               | 50                 | 50                 |                  |                    |
| TBA                                                | 53                | 53               | 53                 | 53                 |                  |                    |
| IP                                                 | -0,50             | -0,50            | -0,50              | -0,50              |                  |                    |
| Pourcentage<br>P.S.F.B en<br>masse                 |                   |                  |                    |                    |                  |                    |
| % P                                                | 56.70             | 61.70            | 58.30              | 61                 |                  |                    |
| % S                                                | 34.20             | 30.40            | 36.50              | 30.20              |                  |                    |
| % F                                                | 9.10              | 7.90             | 5.20               | 8.80               |                  |                    |
| % B                                                | 4.50              | 4.60             | 4.40               | 4.20               |                  |                    |
| Caractéristique<br>s du mélange                    |                   |                  |                    |                    |                  |                    |
| MVA ( m3 )                                         | 2.253             | 2.27             | 2.126              | 2.21               |                  |                    |
| % vides                                            | 10.74             | 9.8              | 15.86              | 12.89              |                  |                    |
| Type de<br>compactage                              | FORT              | TRES<br>FORT     | FAIBLE             | MOYEN              |                  |                    |
| E• ( Mpa )                                         | 24846             | 25945            | 18657              | 28663              |                  |                    |
| $\Omega E * \Omega(20^{\circ}\text{C} ,$<br>30 Hz) | 11720             | 11883            | 9073               | 11771              |                  |                    |

|                                               |       |       |       |       |  |  |
|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|--|--|
| Allongement à $10^6$ cycles ( $\mu\text{m}$ ) | 65    | 67    | 61    | 59    |  |  |
| a ( pente de la droite de la fatigue)         | 0.205 | 0.207 | 0.192 | 0.201 |  |  |

Comme il a été signalé auparavant , les résultats ' PRADO ' et essai doivent être confrontés afin de pouvoir caler le logiciel ; Ainsi :

En récapitulant , on a le tableau ci-dessous

|      |                                                                                                      |                                                                                                           |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| % Vp | > 45 et < 50                                                                                         | < 45 et > 57                                                                                              |
| % Vs | > 24 et < 28                                                                                         | < 24 et > 28                                                                                              |
| % Vf | > 6 et < 7.5                                                                                         | $\approx 7$                                                                                               |
| % B  | > 8.5 et < 9.5                                                                                       | $\approx 12$                                                                                              |
| %v   | > 10 et < 11.5                                                                                       | $\approx 7$                                                                                               |
|      | ou C'v = 0.83                                                                                        | ou C'v = 0.45 ou C'v = 0.7                                                                                |
|      | $E^* (\text{Essai}) = 0.78 E^* (\text{Prado}) - 248,07$<br>avec un coefficient de corrélation de 95% | $E^* (\text{Essai}) = 0.576 E^* (\text{Prado}) + 2744,34$<br>avec un coefficient de corrélation de 93,5 % |

. Pour l'allongement à la rupture :

Le même principe a été adopté et les corrélations sont alors :

| Mélanges fabriqués                                                         | Mélanges confectionnés                                                           |
|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| $e_6 (\text{Prado}) = 0.145 e_6 (\text{Essai}) + 79.3$<br>avec $r = 98 \%$ | $e_6 (\text{Prado}) = 0.259 e_6 (\text{Essai}) + 79.44$<br>( droite : 2 points ) |