

Huitième congrès national de la route

Ifrane 3 & 4 juin 2010

**EFFET DE LA SUBMERSION PROLONGEE SUR LA
DUREE DE VIE DES ENROBES BITUMINEUX**

AFECHKAR MOHAMED

**CHEF DE SERVICE DE LA RECHERCHE ROUTIERE
AU CENTRE NATIONAL D'ETUDES ET DE
RECHERCHES ROUTIERES**

1. INTRODUCTION

Les enrobés bitumineux constituent l'un des principaux matériaux utilisés dans la construction et la maintenance au Maroc. Ils doivent répondre à une série d'exigences :

- Etre maniable durant la mise en œuvre ;
- Contribuer dans la portance structurelle de la chaussée ;
- Offrir une bonne résistance à l'orniérage, à la fissuration due à fatigue et à la fissuration thermique;
- Offrir une résistance à l'eau et au vieillissement (durabilité) ;
- Etre imperméable pour protéger le corps de chaussée de l'eau ;
- Assurer une bonne adhérence des pneumatiques dans des conditions climatiques variées ;
- Offrir un niveau acceptable de bruit dû au frottement des pneumatiques sur la chaussée ;
- Etre facile d'entretien et à peu de frais ;
-

Les mélanges bitumineux sont conçus pour répondre à ces exigences et leurs formulations (proportions et caractéristiques des constituants) varie selon le rôle assuré par l'enrobé, dans la chaussée, le niveau de trafic et les contraintes climatiques.

Les propriétés mécaniques des enrobés et leurs durabilité sont assurés par la stabilité de la matrice granulaire, par les propriétés cohésives du bitume et par une bonne adhésivité bitume granulat. La détérioration de la chaussée se produit avec le temps en raison de l'action combinée du trafic et du climat, soumettant le revêtement routier à des changements continuels , de charge, de température et d'humidité.

L'eau étant considéré comme le principal compétiteur de l'adhésion entre le bitume et les granulats, en effet, une submersion prolongée d'une chaussée en enrobé bitumineux a des effets néfastes sur la bonne tenue de toute la structure :

- elle provoque la saturation des sols supports en faisant chuter leur portance ;
- elle déstabilise les couches en GNT en emportant les fines et mettant leurs caractéristiques mécaniques dans des conditions défavorables ;
- elle fait chuter les résistances des mélanges bitumineux ;
- elle déclenche le désenrobage en fragilisant le collage liant granulat (PH de l'eau stagnée) ;

Dans ce cadre, une étude au laboratoire du CNER a été menée pour étudier l'effet de l'immersion prolongée sur l'enrobé bitumineux en matière de résistance à la fatigue et de durée de vie.

Les résultats de l'étude en question ont mis en évidence que les résistance à la fatigue et ainsi les durées de vie ont été nettement réduit à cause de l'immersion prolongée de l'enrobé bitumineux.

2. L'ADHESIVITE BITUME GRANULATS DANS LES ENROBES BITUMINEUX

Pour qu'il y'a adhésion du bitume au granulat il doit y avoir contact entre le bitume et le granulat ; l'enrobage s'effectue à haute température pour rendre le bitume fluide et lui permettre de recouvrir efficacement la surface irrégulière des granulats. Néanmoins, en présence d'une gangue de poussière sur les granulats, on assiste à un recouvrement par le liant sans qu'il y ait adhésion.

L'adhésion est assurée par des forces d'interactions intermoléculaires entre le liant bitumineux et la surface des granulats. Il peut s'agir de lien électrostatique, en raison, de la surface généralement électriquement chargée des granulats, de liaisons hydrogène lorsque des groupements hydroxyles sont présents à la surface des granulats, ou de liens dispersifs de type forces de Van der Waals. Ces interactions sont généralement suffisantes pour obtenir l'adhésivité souhaitée sur la surface d'un granulat sèche et propre. Un **ancrage mécanique** résultant d'une pénétration de l'adhésif (bitume) dans les aspérités du substrat (granulat) peut également contribuer à l'amélioration de l'adhérence, surtout dans le cas d'une surface poreuse.

Les composés polaires provenant du bitume qui sont fortement adsorbés par les granulats rentrent en compétition pour les mêmes sites que l'eau, les rendant plus vulnérables en présence d'eau. Les composés modère polaire et les acides carboxyliques en solution diluée sont facilement désorbés en présence d'eau, mais les composés basiques sont moins facilement déplacés. Les bitumes contenant une plus grande quantité d'asphaltènes sont plus sensibles à l'eau, les composés pyroaromatiques qu'ils contiennent sont remplacés à l'interface par des composés légers et des composés polaires basiques tensioactifs, surtout aliphatique surtout en présence d'eau.

Le type de granulat influence également cette adhésivité en raison des différentes affinités avec le bitume. Les granulats qui ont un contenu élevé en silice (électronégatif) sont généralement plus susceptibles au désenrobage par l'eau que ceux qui ont un contenu élevé en carbonate (électropositif). L'adhésivité est aussi influencée par la cinétique de déplacement du bitume par l'eau, elle est liée au temps nécessaire à l'eau pour atteindre l'interface et déclencher le processus de désenrobage.

La texture de surface des granulats fait partie des facteurs qui influencent la cinétique du désenrobage. Un granulat lisse démontre moins de résistance au désenrobage qu'un granulat rugueux. Après la pluie, l'eau peut se retirer des enrobés bitumineux si le temps sec est suffisant, et ainsi le phénomène de guérison de l'enrobé est déclenché et l'évaporation de l'eau va permettre au bitume de réadhérer à nouveau. Ainsi, l'eau présente à l'interface bitume granulat provoque une situation thermodynamique défavorable pour la bonne tenue de l'enrobé bitumineux, et qui s'aggrave avec les sollicitations mécaniques du trafic routier. L'eau peut accéder à l'interface liant granulat suite à la fissuration du film de bitume, causée par les sollicitations mécaniques, exposant une partie du granulat.

a. Adhésivité active ou absolue

À l'interface se manifestent des interactions mécaniques résultant d'une interpénétration plus ou moins intime des matériaux. Cette liaison est due, à l'échelle macroscopique, à l'enchevêtrement des structures géométriques.

Il existe cependant des mécanismes qui se déroulent au niveau moléculaire et mettent en jeu des forces beaucoup plus importantes.

L'adhérence du liant au squelette minéral provient d'une affinité entre des molécules du liant et des molécules du minéral. Cette affinité se traduit par la tendance du fluide à s'étaler sur la surface du solide à réaliser un mouillage (« enrobage »).

Si elle met en jeu des forces faibles, du type Van Der Waals, l'adhésivité est médiocre ; l'intervention des forces électrostatiques apporte déjà plus d'énergie au système ; enfin, l'adhésivité maximum est obtenue lorsque ces forces sont des liaisons chimiques de type covalent.

L'établissement de ces forces de liaisons entre un liant et un minéral naturellement incompatibles nécessite l'intervention de certaines substances douées d'affinité, à la fois pour le liant et pour le minéral. De telles substances, très particulières dans leur constitution, peuvent exister naturellement dans les liants noirs (bases pyridiques de goudrons par exemple). On réserve, en technique routière, le nom de dopes d'adhésivité à des produits ajoutés intentionnellement pour obtenir ou accentuer un tel effet.

b. Adhésivité passive

Elle caractérise l'aptitude d'un film de bitume préalablement adsorbé à résister au désenrobage par l'eau.

La vapeur d'eau arrive toujours à pénétrer dans l'épaisseur du bitume, à atteindre la surface minérale et à réagir avec celle-ci. Au voisinage de cette surface, l'eau pénètre entre le minéral et la couche de bitume, et peut ensuite provoquer le désenrobage.

L'adhésivité passive est donc liée au temps total mis par l'eau pour :

- d'une part, traverser le film de bitume ;
- d'autre part, provoquer le désenrobage.

Les essais classiques d'évaluation de l'adhésivité passive reposent sur des cycles d'immersion de l'enrobé dans l'eau à différentes températures, pH et forces ioniques.

Les principales constatations dégagées de ces tests par de nombreux auteurs sont les suivantes :

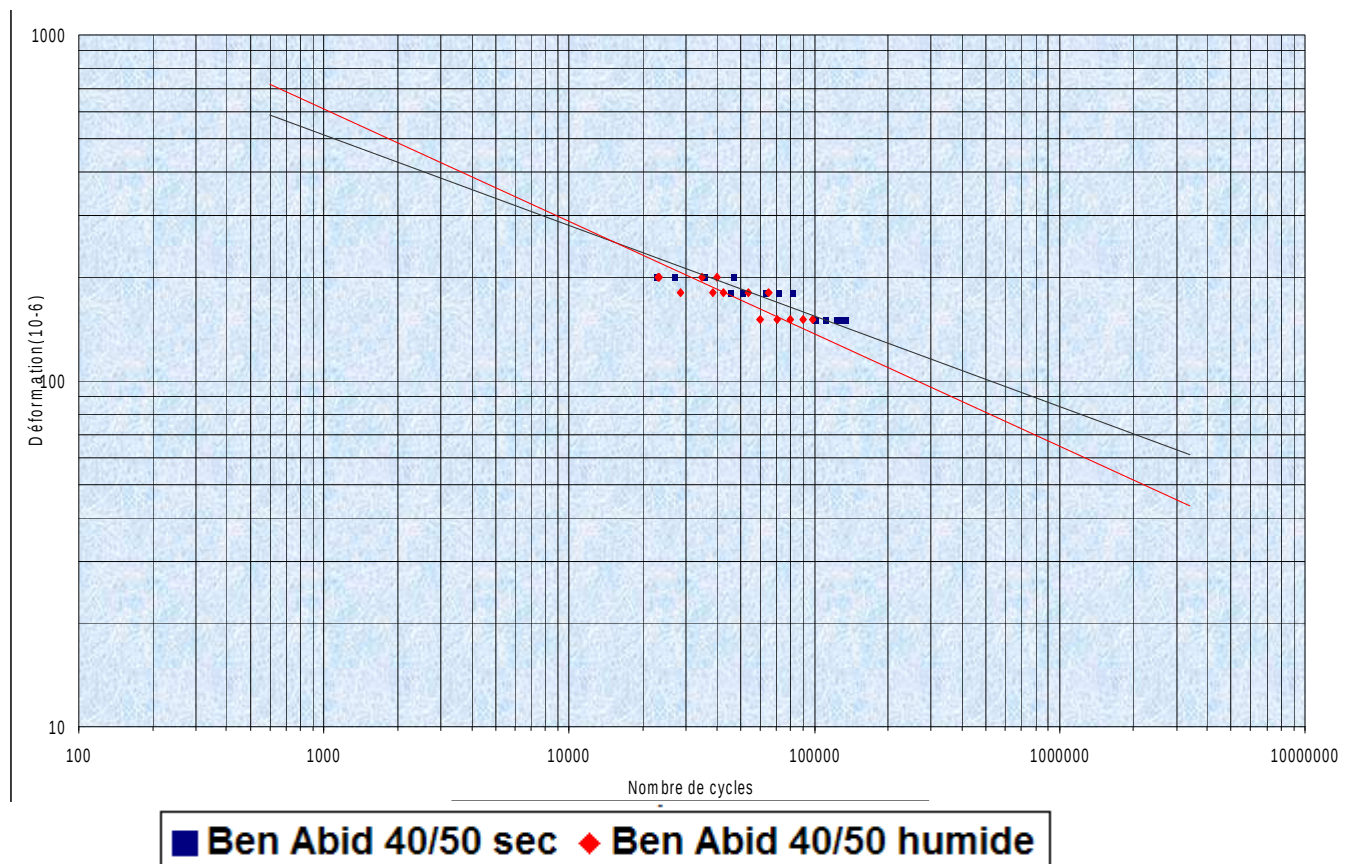
- des molécules de gros poids moléculaires adsorbées en surface,
- un pH acide et une faible force ionique de l'eau utilisée,
- l'ajout d'un dope cationique dans le bitume.

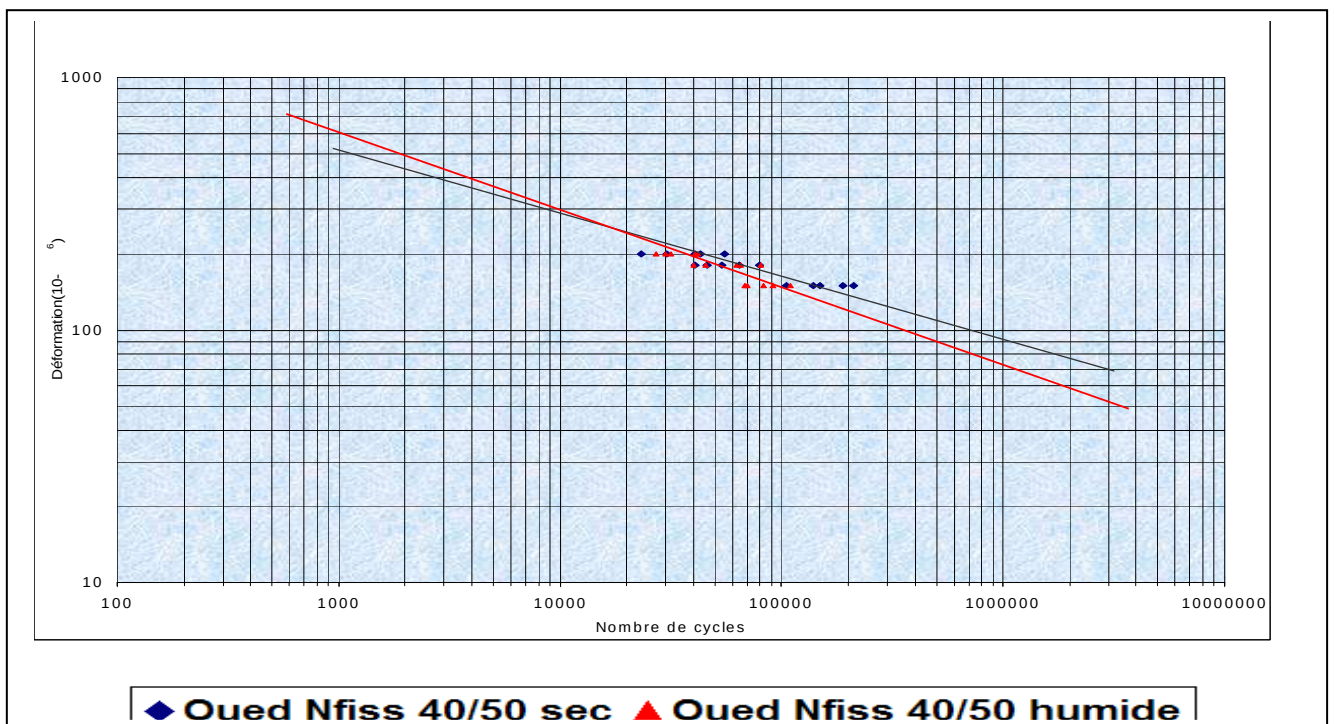
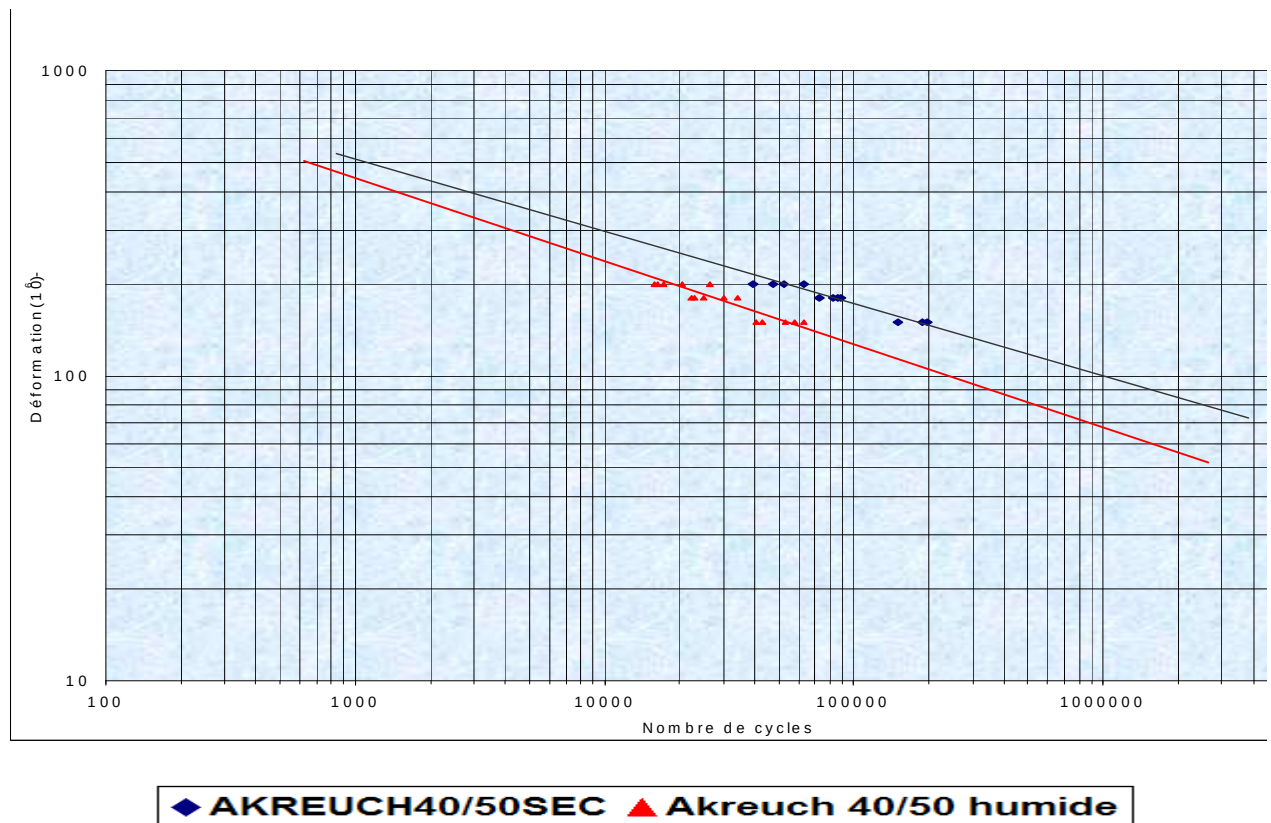
Ces tests sont néanmoins peu adaptés pour mettre en liaison les mécanismes de désenrobage, car ils superposent deux phénomènes : pénétration d'eau dans le bitume, désenrobage lui-même.

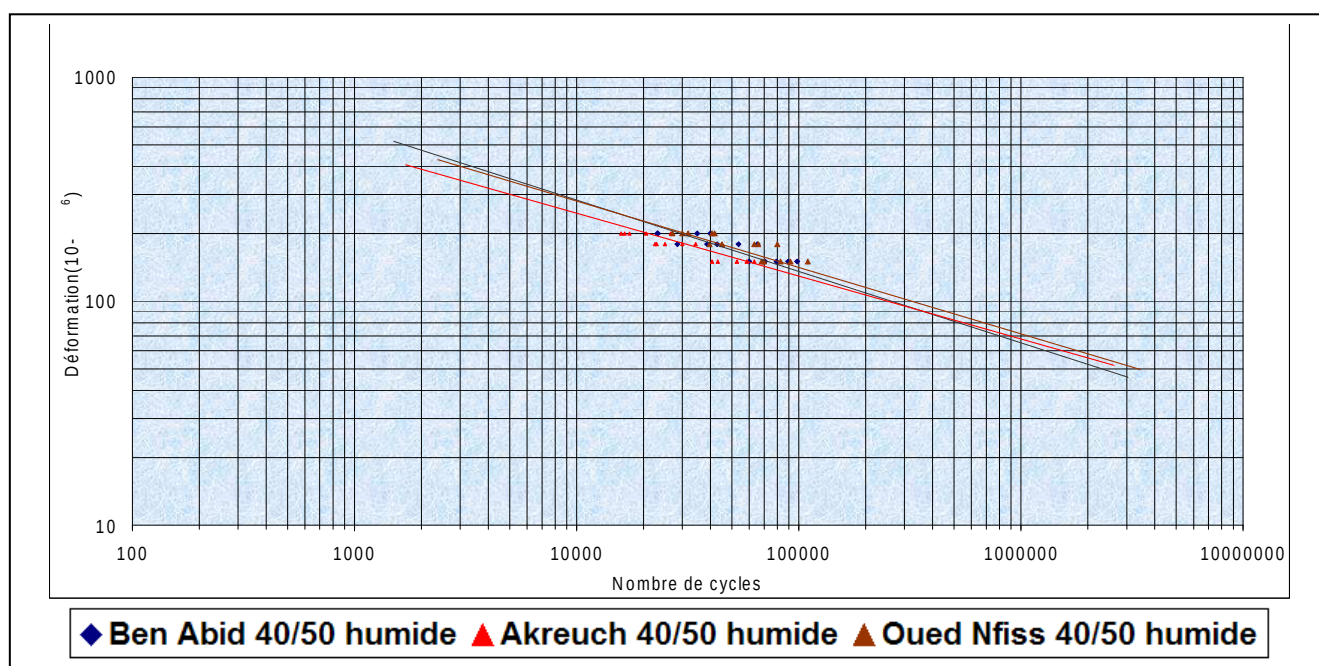
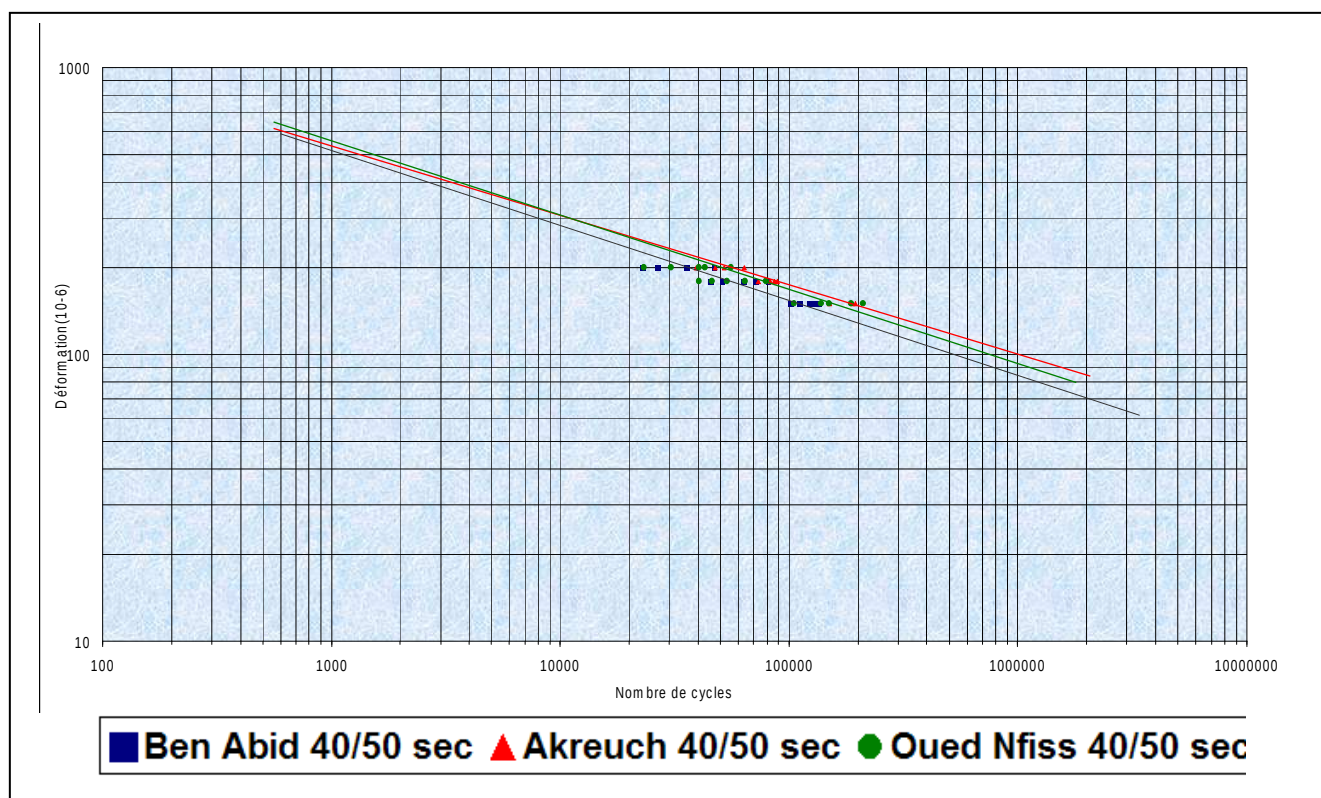
3. ETUDE DE LABORATOIRE

Afin d'apprécier l'effet des immersions prolongées sur les enrobés bitumineux, nous avons étudiés plusieurs formules fabriqués sur la base de matériaux granulaires issus de trois carrières différentes : Ben Abid, Oued Nfiss et Akreuch. L'étude en question a consisté en la réalisation des essais de fatigue sur des éprouvettes conservées à sec à 20°C et sur des éprouvettes immergées à 20 °C pendant sept jours. Les essais de fatigue ont été réalisés selon la norme européenne EN 12697-24 (méthode de flexion à quatre points).

Les droites de fatigue déterminées pour les différentes formules sont comme suit :







a. Exploitation des résultats du laboratoire pour le dimensionnement

Calcul du trafic équivalent

La structure de la chaussée dépend principalement du sol support, des matériaux constitutifs du corps de chaussée et du trafic à supporter. Pour les méthodes de dimensionnement rationnelles et certaines méthodes empiriques, le trafic est pris en compte en tant que nombre cumulé d'essieux qui sollicitent la chaussée durant sa durée de vie qui est donnée par la formule suivante :

$$NE = 365 \times T \times V_C \times P_L \times A \times \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i} \right] \times C_1$$

où :

- T : Trafic journalier dans les deux sens à l'année de mise en service ;
- PL : Pourcentage du poids lourd ;
- VC : Pourcentage sur la voie la plus chargée ;
- i : Taux de progression du trafic ;
- n : Durée de vie ;
- A : Coefficient d'agressivité ;
- C1 : Coefficient correcteur lié à la largeur de la chaussée, avec :
 - C1 = 1 si la largeur est supérieure à 6m ;
 - C1 = 2 si la largeur est inférieure à 4m ;
 - C1 = 1,5 si la largeur est comprise entre 4 et 6m.

Le dimensionnement de chaussées par le biais des modèles de calcul tel que ALIZE, consiste à :

- Choisir une structure de chaussée qui résistera au trafic estimé ;
- Modéliser la structure de chaussée, en calculant les contraintes et les déformations au niveau de chaque couche ;
- Vérifier est ce que les déformations et les contraintes calculées sont inférieures aux valeurs admissibles correspondants à chaque couche de matériaux.

Pour notre cas, nous allons supposer que les déformations et calculées à la base des couches d'enrobés sont égales aux déformations admissibles.

La valeur de $\epsilon_{t,ad}$ est donnée par la relation suivante :

$$\epsilon_{t,ad} = \epsilon_6 (\theta_{eq}, f) (NE/10^6)^b k_r k_c k_s \quad (1)$$

Avec :

- **b** : La pente de la droite de fatigue ;
- **ϵ_6** : déformation à un million de cycle qui caractérise la résistance à la fatigue du matériau
- **k_r** : Un coefficient qui ajuste la valeur de la déformation admissible au risque de calcul retenu en fonction des facteurs de dispersion sur l'épaisseur (écart-type Sh) et sur les résultats des essais de fatigue (écart-type SN).

$$k_r = 10^{-ub\delta}$$

- ✓ u : variable centrée réduite associée au risque r ;
- ✓ b : pente de la loi de fatigue du matériau ;
- ✓ δ : écart –type de la distribution de logN à la rupture.

$$\delta = [SN^2 + (c^2 / b^2) Sh(2)].05$$

- ✓ c : coefficient reliant la variation de la déformation à la variation aléatoire d'épaisseur de la chaussée, Δh , ($\log \epsilon = \log \epsilon_0 - c \Delta h$). Pour les structures courantes, c est de l'ordre de 0.02 cm^{-1} .

Pour un risque de calcul de 50%, $u = 0$ et $k_r = 1$.

- **k_c** : coefficient de calage destiné à ajuster les résultats du modèle de calcul au comportement observé des chaussées de même type. Pour les chaussées bitumineuses, les valeurs retenues du coefficient de calage selon la nature du matériau bitumineux sont précisées dans le tableau suivant :

Matériau	k_c
grave-bitume	1.3
bétons bitumineux	1.1

Valeurs de K_c pour les matériaux bitumineux

- **k_s** : coefficient minorateur tenant compte de l'effet d'hétérogénéités locales de portance d'une couche de faible rigidité supportant les couches liées.

Module	$E < 50 \text{ MPa}$	$50 \text{ MPa} \leq E < 120 \text{ MPa}$	$120 \text{ MPa} \leq E$
K_s	1/1.2	1/1.1	1

Valeurs de K_s pour les matériaux bitumineux

b. Influence de l'eau sur la durée de vie

Calculons la durée de vie d'une couche d'enrobé qui a subi une immersion prolongée par l'eau. Pour simplifier un peu les formules, on posera: $K = k_r k_c k_s$. Ainsi, l'équation (1) devient :

$$(2) \quad \boxed{\varepsilon_{t,ad} = \varepsilon_6 (\theta_{eq}, f) (NE/10^6)^b K}$$

Lors de l'étude de laboratoire, on a pu tracer les droites de fatigue des différents enrobés à l'état sec ainsi qu'à l'état humide. Donc les pentes et les déformations à un million de cycle sont déterminées. Si on fait le calcul de l'épaisseur de la couche d'enrobé à partir des résultats de l'état sec pour une durée de vie de 10 ans, on obtiendra une certaine épaisseur e . Calculons pour cette même épaisseur, la durée de vie correspondante aux résultats obtenus à l'état humide. Ce qui revient à dire que :

$$\varepsilon_{t,ad}^s = \varepsilon_{t,ad}^h$$

D'après les relations précédentes, on écrit :

$$\varepsilon_6^h (\theta_{eq}, f) (NE^h/10^6)^{b_h} K = \varepsilon_6^s (\theta_{eq}, f) (NE^s/10^6)^{b_s} K$$

D'où :

$$\varepsilon_6^h \times \left\{ \frac{\alpha \times [(1+i)^{n'} - 1]}{10^6} \right\}^{b_h} = \varepsilon_6^s \times \left\{ \frac{\alpha \times [(1+i)^{n_0} - 1]}{10^6} \right\}^{b_s}$$

avec

$$\boxed{\alpha = 365 \times T \times V_C \times P_L \times A \times C_1}$$

ε_6^h : Déformation à un million de cycle pour l'enrobé qui a subi une immersion prolongée

b_h : Pente de la droite de fatigue pour l'enrobé qui a subi une immersion prolongée

n' : Durée de vie de l'enrobé qui a subi une immersion prolongée

ε_6^s : Déformation à un million de cycle pour l'enrobé qui a été conservé à sec

b_s : de la droite de fatigue pour l'enrobé qui a été conservé à sec

n_0 : Durée de vie de l'enrobé qui a été conservé à sec

Alors :

$$\epsilon_6^h \times \left(\frac{\alpha}{10^6} \right)^{b_h} \times \left[(1+i)^{n'} - 1 \right]^{b_h} = \epsilon_6^s \times \left(\frac{\alpha}{10^6} \right)^{b_s} \times \left[(1+i)^{n_0} - 1 \right]^{b_s}$$

On pose : $\beta = \left(\frac{\alpha}{10^6} \right)^{(b_s - b_h)}$ **et** $R = \frac{\epsilon_6^h}{\epsilon_6^s}$

La relation précédente devient :

$$\left[(1+i)^{n'} - 1 \right]^{b_h} = \left(\frac{\beta}{R} \right) \times \left[(1+i)^{n_0} - 1 \right]^{b_s}$$

Alors :

$$\left[(1+i)^{n'} - 1 \right] = \left(\frac{\beta}{R} \right)^{\frac{1}{b_h}} \times \left[(1+i)^{n_0} - 1 \right]^{\frac{b_s}{b_h}}$$

On pose : $\gamma = \left(\frac{\beta}{R} \right)^{\frac{1}{b_h}}$

Enfin, on trouve une relation qui lie en logarithme la durée de vie correspondant à l'état immergé :

$$n' = \frac{\ln \left\{ 1 + \gamma \left[(1+i)^{n_0} - 1 \right]^{\frac{b_s}{b_h}} \right\}}{\ln(1+i)}$$

L'étude de cas a été faite pour la RN1 avec les données suivantes:

- Le trafic est de 7000 veh/j ;
- Un pourcentage de poids lourd égale à 38% ;
- Agressivité d'un poids lourd dont le PTC > 1,5t : 0,2 essieux de 13t (compagne de pesage réalisée par le CNER) ;
- Taux de progression égale à 4% ;
- Durée de vie : 10 ans.

Donc on a :

<u>Enrobé bitumineux 0/10 avec matériaux de Ben Abid</u>							
T₀ (années)	α	β	γ	R	b_s	b_h	T' (années)
10	2427250	1,02659558	0,25721985	0,76470588	-0,1873	-0,2169	3,26

<u>Enrobé bitumineux 0/10 avec matériaux de Akreuch</u>							
T₀ (années)	α	β	γ	R	b_s	b_h	T' (années)
10	2427250	1,0289652	0,1854119	0,68	-0,2136	-0,2458	2,38

<u>Enrobé bitumineux 0/10 avec matériaux de Oued Nfiss</u>							
T₀ (années)	α	β	γ	R	b_s	b_h	T' (années)
10	2427250	1,06924233	0,39275051	0,8	-0,2349	-0,3104	5,18

4. Conclusions et recommandations

L'analyse des différents résultats issus de l'étude de laboratoire et de calculs et qui sont récapitulés dans le tableau ci après, permet de conclure ce qui suit :

	Ben Abid		Akrach		Oued Nfiss	
	40/50		40/50		40/50	
	<u>Sec</u>	<u>Humide</u>	<u>Sec</u>	<u>Humide</u>	<u>Sec</u>	<u>Humide</u>
ϵ_6	85	65	100	68	90	72
La pente (b)	-0.1873	-0.2169	-0.2136	-0.2458	-0.2349	-0.3104
Durée de vie	10	3.26	10	2.38	10	5.18
Perte de durée de vie	67%		76%		49%	
$R = \epsilon_{6,h}/\epsilon_{6,s}$	0.76		0.68		0.8	

- la déformation à un million de cycles des trois formules d'enrobés, diffère selon la nature pétrographique des trois carrières ;
- l'enrobé bitumineux à base de granulat de Ben Abid présente la faible résistance à la fatigue ;
- le mélange avec les granulats de Akreuch présente la meilleure résistance à la fatigue ;
- les enrobés fabriqués avec les granulats calcaires présentent une meilleure résistance à la fatigue comparée à celle des granulats siliceux à l'état sec ;
- A l'état sec, les droites de fatigue relatives aux enrobés fabriqués à partir des granulats de la carrière de Ben Abid et celle de Oued Nfiss semblent parallèles, et donc le comportement des chaussées issues de ces deux carrières est à peu près le même durant la période de service ;
- L'immersion des enrobés a un effet néfaste sur les résistances à la fatigue des enrobés étudiés,
- Malgré que les matériaux de Akreuch ont présenté une meilleure résistance à la fatigue à l'état sec, en présence d'eau, ils se sont avérés plus vulnérables que les granulats siliceux ;
- La chute de la résistance à la fatigue à l'état humide comparée à celle obtenue à l'état sec, induit directement une chute remarquable dans la durée de vie de la chaussée qui peut atteindre 76 % de la durée de vie prévue ;
- Il paraît qu'il serait intéressant de recommander, pour les zones inondables, l'utilisation des granulats calcaires pour la fabrication des mélanges bitumineux puisqu'ils présentent une résistance à la fatigue plus fiable que les granulats siliceux ;
- Il est recommandé de continuer la recherche au niveau de ce sujet pour :
 - Etudier les périodes d'immersion les plus vulnérables pour le comportement des enrobés bitumineux ;
 - Etudier d'autres mélanges en utilisant des granulats provenant d'autres gîtes de matériaux pour approfondir l'étude en question ;
 - Suivre le comportement des chaussées à base d'enrobés bitumineux pour caler les résultats de laboratoire au comportement réel ;

Bibliographie

- Etude du mécanisme d'adhésion entre un liant bitumineux et un granulat (Carmel Jolicoeur, Phd , Professeur, Natalie Otis Msc, Université de Sherbrooke, Octobre 2006)
- M.DURIEZ - Traité de matériaux de construction – Edition DUNOD 1950 – Tome 1 et Tome 2.
- Laurent Frouin, Etude expérimentale des interactions surfaces minérales et bitume. Cas particuliers des argiles -Rapport de recherche LPC n°=154- Juin 1989.
- European Standard, Annexe D, Four-point bending test on prismatic shaped specimens (EN 12697-24 for approval for FV-21 Mai 2003).
- J.P.Marchand, Exemple d'utilisation de la méthode rationnelle de dimensionnement – Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (Mécanique des chaussées).
- CONCEPTION ET RENDEMENT DES CHAUSSEES : Questions de l'heure et besoins en recherches (bulletin de recherche n°F2 du millénaire Novembre 2000).
- Bulletin d'information technique de la Direction du laboratoire des chaussées (DLC) Vol.4, n°8, août 1999 : rigidité et résistance à la fatigue des enrobés.
- La Rhéologie des Bitumes : Principes et Modification (Didier Lesueur Rhéologie, Vol.2, 1-30(2002)).
- XIX^{ème} Congrès belge de la route (Bulletin CRR N°49-4ème trimestre 2001).
- Modes d'endommagements cycliques : Application à la fatigue des enrobés bitumineux (Didier Bodin 12décembre 2002).
- Amélioration de la performance des chaussées souples 1992-2002 (Construction ou reconstruction).
- Directive pour matériaux enrobés à chaud - Direction de la route et de la circulation routière.
- Revue générale des routes et des aéroports numéros: 748-1997;714-1994;687-1991;661-1989;730-1995.
- Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées numéros: 200-1995;220-1999.
- Le bitume (Monsieur MARVILLET).
- Caractérisation rhéologique des liants hydrocarbonés (Cahier 17 BM/n°1/1974 RILEM).
- Tac transportation intelligence-InfoTransports-volume 1 numéro 7-Décembre2003.
- TFE EHTP 2005, Yassir Yaccoubi et

- Sites Internet :
 - o <http://www.infrastructures.com/>
 - o <http://www.malverninstruments.fr/>
 - o www.trb.org
 - o www.mtq.gov.ma
 - o www.lcpc.fr

