

Projet National de recherche et développement

RAPPORT DE RECHERCHE N°3

**Endommagement des enrobés bitumineux à
l'eau et au gel**

Auteur(s) / Organisme(s) :

TRAN Duc Thang – ENTPE/Uni. de Lyon

SAUZEAT Cédric – ENTPE/Uni. de Lyon

DI BENEDETTO Hervé – ENTPE/Uni. de Lyon

Thème de rattachement :

Thème 1.5 – Mécanismes de dégradation des chaussées

Dégradations hivernales

Numéro de rapport (à établir par l'IRES)

N° lettre de commande : LC/19/DVDC/80

Date : 20/12/2019

Site internet : www.dvdc.fr

Plateforme collaborative : www.omnispace.fr/dvdc

Président : Dominique JAUMARD

Directeurs : Christine LEROY et Simon POUGET

Gestion administrative et financière : IRES (www.ires.asso.fr), 9 rue de Berri 75008 PARIS, contact@ires.asso.fr

Sommaire

Sommaire	2
1 Résumé	3
2 Introduction	4
3 Campagne expérimentale : suite et complément avec nouveaux conditionnements	5
4 Essai de fatigue	6
4.1 Description de l'essai de fatigue.....	6
4.2 Critères de fatigue utilisées	6
4.2.1 Critères sur les mesures globales	7
4.2.2 Critères sur les mesures locales	8
4.2.3 Critère moyen de fatigue: N_{f-moy}	9
4.3 Courbe de Wöhler	9
5 Résultats expérimentaux	10
5.1 Résultats des essais de fatigue	10
5.2 Résultats expérimentaux avec nouveaux conditionnements	13
5.2.1 Essais E*	13
5.2.1.1 Résultats expérimentaux.....	13
5.2.1.2 Construction des courbes maitresses et modélisation des résultats expérimentaux à l'aide du modèle 2S2P1D	15
5.2.1.3 Comparaison des résultats de module complexe normalisé (conditionnement principal et nouveaux conditionnements)	19
5.2.2 Essais TSRST	21
5.2.2.1 Éprouvettes non-vieillies	21
5.2.2.2 Éprouvettes vieilles	22
5.2.2.3 Comparaison des résultats des essais TSRST	23
6 Conclusion	25
Références	26
Liste des Symboles et Abréviations	27

1 Résumé

Résumé en français

Suite au 2^{ème} rapport, ce 3^{ème} rapport continue à présenter la campagne expérimentale menée dans le cadre de la thèse de doctorat de TRAN Duc Thang. Deux nouveaux conditionnements avec les cycles HF (Heating-Freezing) et HC (Heating-Cooling) ont été introduits lors d'une campagne expérimentale complémentaire. Les effets de cycles FT (Freezing-Thaw), HF et HC sur les comportements étudiés de l'enrobé bitumineux sont analysés à partir des résultats expérimentaux obtenus.

Abstract

Following the second report, this third report continues to present the experimental campaign carried out during the PhD of TRAN Duc Thang. Two new conditioning procedures with HF (Heating-Freezing) and HC (Heating-Cooling) cycles were introduced during a complementary experimental campaign. The effects of FT (Freezing-Thaw), HF and HC cycles on the studied behaviour of the asphalt mixtures are analysed on the basis of the obtained experimental results.

2 Introduction

Suite à la validation du deuxième rapport (Tran, et al., 2019), ce troisième rapport continue à présenter les travaux expérimentaux dans le cadre de la thèse de doctorat de TRAN Duc Thang, réalisée à l'École Nationale des Travaux Publics de l'État (ENTPE). Cette thèse traite de l'endommagement des enrobés bitumineux à l'eau et au gel. Elle est menée en collaboration avec l'entreprise EUROVIA et contribue aux travaux du sous-thème 1.5 « Dégradations hivernales » du projet national DVDC.

Ce rapport se compose de 6 parties.

Les deux premières parties sont le résumé et l'introduction.

La troisième partie rappelle la campagne expérimentale principale et présente la campagne complémentaire qui introduit deux nouveaux conditionnements aux analyses exposées dans le 2^{ème} rapport DVDC.

La quatrième partie décrit l'essai de fatigue utilisé et les critères de fatigue considérés.

La cinquième partie présente les nouveaux résultats expérimentaux résultant des essais qui sont introduits dans la troisième partie.

Les conclusions sont données dans la sixième partie.

3 Campagne expérimentale : suite et complément avec nouveaux conditionnements

Ce chapitre présente à la fois le bilan des essais réalisés dans la campagne expérimentale principale et la campagne complémentaire avec nouveaux conditionnements.

La Figure 3-1 détaille tous les essais réalisés dans la campagne expérimentale principale. Les résultats des essais dans les cases vertes ont déjà été présentés dans le rapport N°2 (Tran, et al., 2019), ceux dans les cases oranges sont des nouveaux résultats qui sont détaillés dans la 5^{ème} partie de ce rapport.

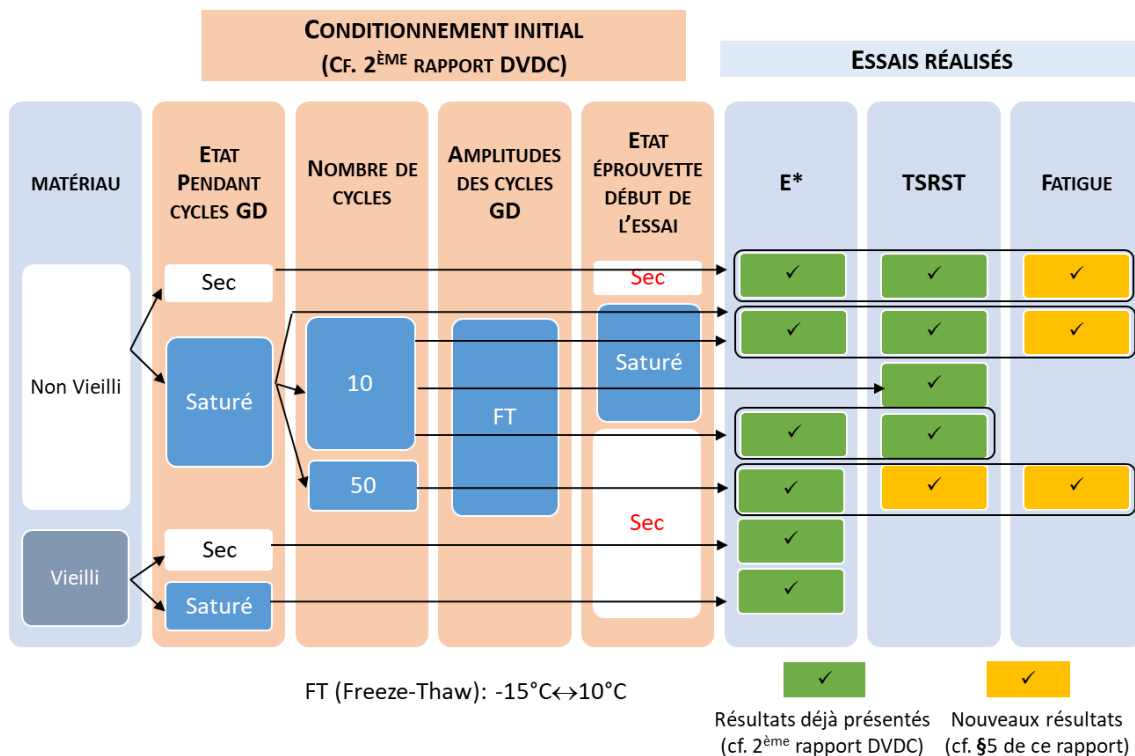


Figure 3-1. Campagne expérimentale principale (cf. 2^{ème} rapport DVDC)

Les premiers résultats obtenus de la campagne principale montrent que le conditionnement appliqué a un effet négligeable sur les propriétés viscoélastiques linéaires des matériaux testés à sec, et aussi sur les valeurs à la rupture des essais TSRST. Un nombre de cycles de gel/dégel (FT- Freeze Thaw) inférieur à 50 semble insuffisant pour observer l'endommagement des enrobés bitumineux. D'un point de vue pratique, l'augmentation du nombre de cycles de FT n'est pas réaliste car trop coûteuse en temps. En revanche, l'étude de influence de la « sévérisation » de l'amplitude des cycles de conditionnement apparaît comme importante.

Deux nouveaux conditionnements ont été ajoutés (cf. Figure 3-2). Le premier conditionnement concerne des cycles HF (Heating - Freeze) pour lesquels la température varie entre 50°C (pendant 6h) et -15°C (pendant 6h). Le deuxième conditionnement introduit des cycles HC (Heating - Cooling) avec une température variant entre 50°C (pendant 6h) et 10°C (pendant 6h). Ces 2 types de conditionnement permettent de découpler les effets dus au gel de ceux créés par un échauffement.

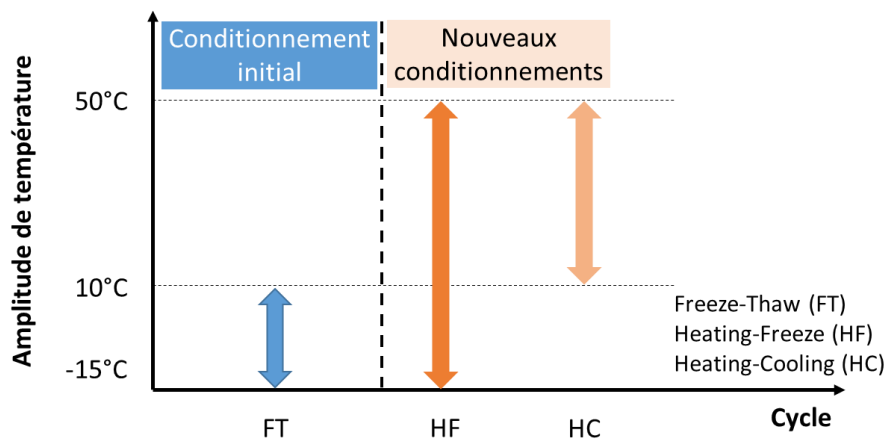


Figure 3-2. Amplitude de température des cycles de conditionnement : campagne expérimentale principale (avec conditionnement initialement prévu) et campagne complémentaire (avec les nouveaux conditionnements)

La Figure 3-3 présente la campagne expérimentale complémentaire avec les nouveaux conditionnements. Dans cette campagne, les essais E* et les essais TSRST sont réalisés sur des éprouvettes à l'état sec ayant subi en condition saturée 10 cycles HF et HC.

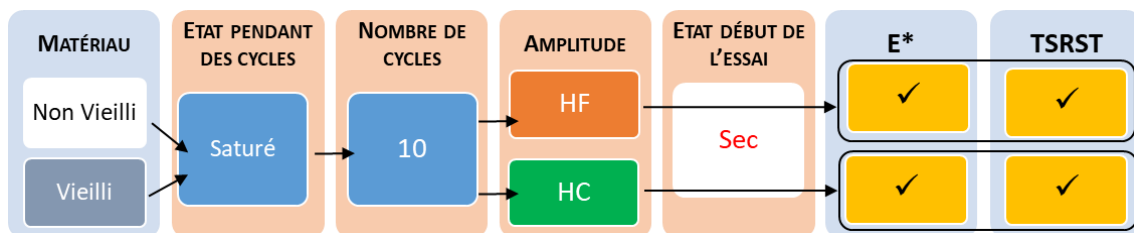


Figure 3-3. Campagne expérimentale complémentaire avec les nouveaux conditionnements (cycles HF et HC, cf. Figure 3-2)

4 Essai de fatigue

4.1 Description de l'essai de fatigue

L'essai de fatigue est réalisé sur une éprouvette cylindrique (75mm de diamètre et 140mm de hauteur). La température et la fréquence de sollicitation sont fixées au cours de l'essai : $T=10^{\circ}\text{C}$ et $\approx 10\text{Hz}$. L'éprouvette est soumise à une sollicitation sinusoïdale en déformation centrée à zéro. Le pilotage s'effectue sur la moyenne des valeurs mesurées à l'aide des trois extensomètres disposés à 120° autour de l'éprouvette (cf. rapport N°2). L'amplitude de déformation axiale est constante au cours de l'essai. Pour un matériau donné, les essais sont réalisés à 4 différents niveaux d'amplitude : 80 ,90 ,100 et $120\mu\text{def}$.

4.2 Critères de fatigue utilisés

La fatigue des enrobés bitumineux est déterminée, non seulement par la rupture physique des éprouvettes, mais aussi par différents critères de fatigue basés sur les valeurs mesurées au cours de l'essai.

Dans ce rapport, 5 critères de fatigue sont utilisés dont 3 critères basés sur les mesures globales : $N_{f-50\%}$, N_{f-Co} , $N_{f-\varphi_{\text{max}}}$. Les deux autres critères $N_{f-\Delta\epsilon_i}$ et $N_{f-\Delta\varphi_i}$ sont basés sur les mesures locales. Les descriptions des 5 critères sont détaillées dans les sous-chapitres suivantes.

4.2.1 Critères sur les mesures globales

a) Critère classique: $N_{f-50\%}$

C'est le critère le plus simple pour déterminer la durée de vie en fatigue du matériau testé. Il est détaillé dans la Norme européenne (NF EN 12697-24, 2012) pour les enrobés bitumineux. Il consiste à déterminer le nombre de cycles pour lequel la norme du module complexe de l'éprouvette testée réduite de 50% par rapport à sa valeur initiale.

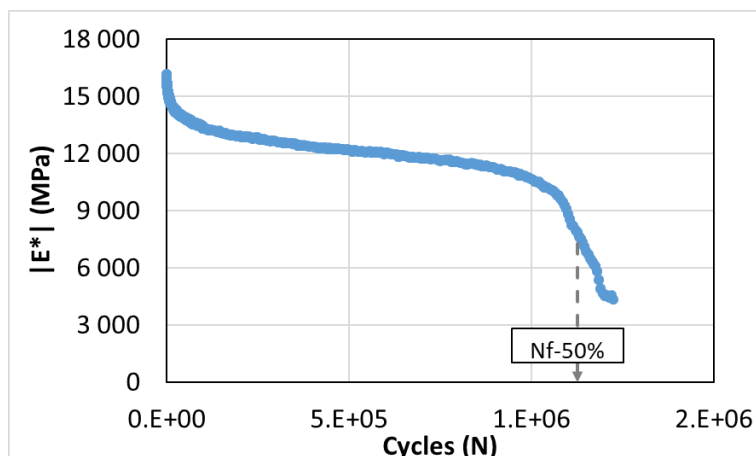


Figure 4-1. Evolution de la norme du module complexe durant l'essai de fatigue et critère de fatigue $N_{f-50\%}$ (Test - SG3B1(5.7)0FT)

b) Changement de concavité de la courbe de fatigue: N_{f-Co}

Ce critère est basé sur le changement de la concavité de la courbe $||E^*|-N$ (Figure 4-2). Ce point marque la fin de la deuxième phase du test de fatigue. A partir de ce point, l'éprouvette n'étant plus homogène est également considérée comme en fin de durée de vie en fatigue.

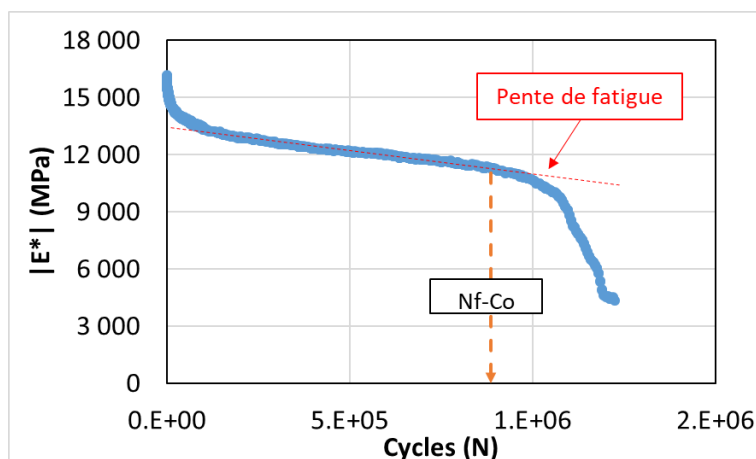


Figure 4-2. Evolution du module complexe durant l'essai de fatigue et critère de fatigue N_{f-Co} (Test - SG3B1(5.7)0FT)

c) Point de valeur maximale de l'angle de phase du module complexe: $N_{f-\varphi_{max}}$

Ce critère, proposé par (Kim, et al., 2003) et utilisé dans les travaux de (Mangiafico, 2014) (Ramirez Cardona, 2016), consiste à identifier deux points d'inflexion sur la courbe $|E^*|-N$. Le deuxième point d'inflexion (SIP – Second Inflexion Point) correspond à la valeur maximale de l'angle de phase du module complexe. Il est lié étroitement à un changement du comportement mécanique du matériau, en raison de l'accumulation de dommages par fatigue. Pour cette raison, le nombre de cycles correspondant au SIP est considéré comme la durée de vie en fatigue $N_{f-\varphi_{max}}$. La Figure 4-3 présente un résultat du test SG3B1(5.7)0FT : l'évolution de l'angle de phase du module complexe durant l'essai de fatigue et le critère de fatigue $N_{f-\varphi_{max}}$.

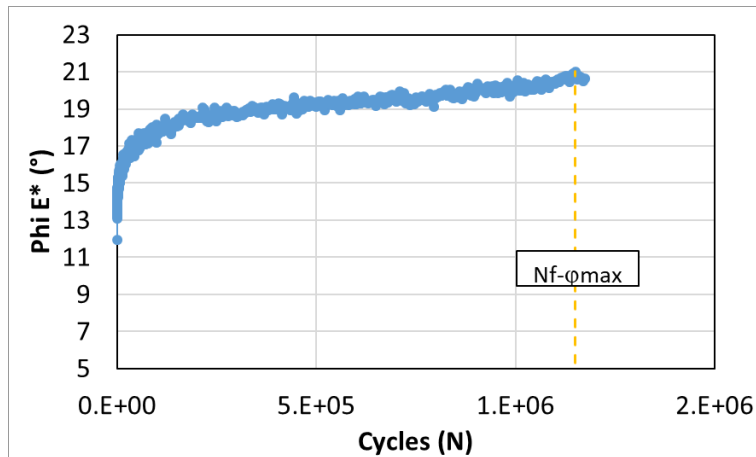


Figure 4-3. Evolution de l'angle de phase du module complexe durant l'essai de fatigue et critère de fatigue $N_{f-\phi_{max}}$ (Test - SG3B1(5.7)0FT)

4.2.2 Critères sur les mesures locales

L'analyse de l'évolution des mesures de chaque extensomètre au cours des essais de fatigue peut révéler des changements locaux de l'éprouvette. Ces changements sont liés à la perte de l'homogénéité due au développement de macro-fissures dans l'éprouvette en cours d'essai.

a) Critère basé sur les écarts relatifs des amplitudes de 3 extensomètres : $N_{f-\Delta\epsilon_i}$

Le premier critère considère les écarts relatifs ($\Delta\epsilon_i$) (Eq. 4-1) entre l'amplitude de déformation d'un extensomètre (ϵ_i) au cycle considéré et sa valeur initiale (ϵ_{i0}) au cycle 60^{ème}. Lorsqu'un des extensomètres présente une valeur $\Delta\epsilon_i$ supérieure à 25% (en valeur absolue), le champ de déformation est considéré comme hétérogène et la rupture de l'éprouvette atteinte ($N_{f-\Delta\epsilon_i}$)

$$\Delta\epsilon_i = \frac{\epsilon_i - \epsilon_{i0}}{\epsilon_{i0}} \quad \text{Eq. 4-1}$$

La Figure 4-4 montre un exemple de l'essai SG3B1(5.7)0FT

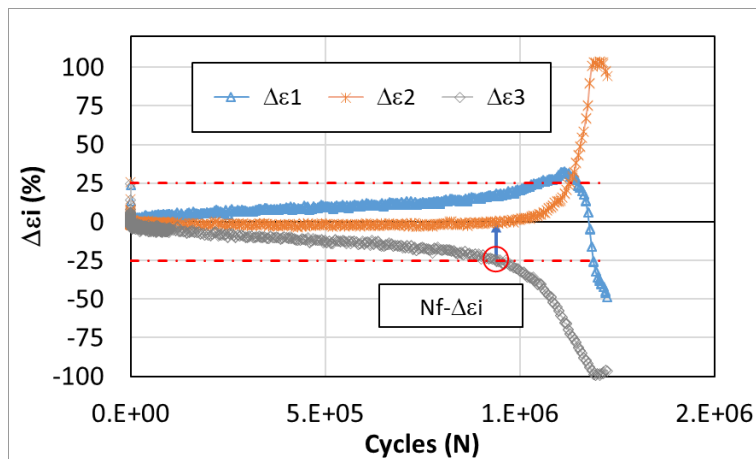


Figure 4-4. Critère basé sur les valeurs $|\Delta\epsilon_i| \geq 25\%$ (Test - SG3B1(5.7)0FT)

b) Critère basé sur les écarts d'angles de phase de 3 extensomètres par rapport à celle de la déformation moyenne: $N_{f-\Delta\phi_i}$

Le deuxième tient en compte de l'évolution de l'angle de phase du signal de déformation de chaque extensomètre. Quand la différence ($\Delta\phi_i$) entre l'angle de phase mesurée par un des extensomètres (ϕ_i) et celui de la déformation moyenne (ϕ) est supérieure à 5° (en valeur absolue), la rupture de l'éprouvette atteint ($N_{f-\Delta\phi}$).

$$\Delta\varphi_i = \varphi_i - \varphi$$

Eq. 4-2

La Figure 4-5 montre un exemple pour l'essai SG3B1(5.7)0FT

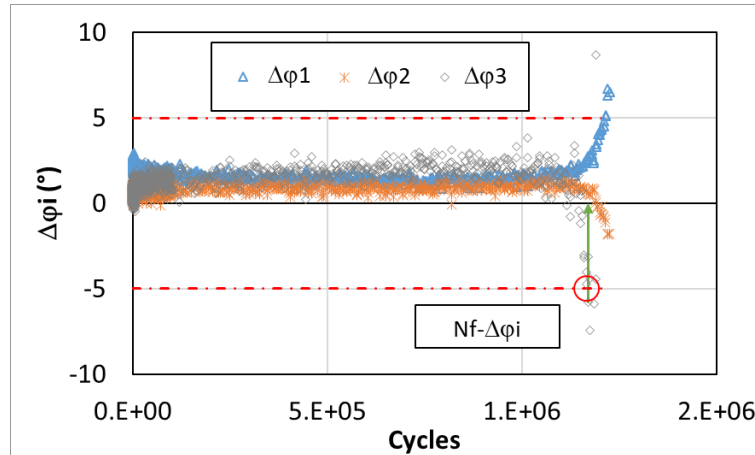


Figure 4-5. Critère basé sur les valeurs $|\Delta\varphi_i| \geq 5^\circ$ (Test - SG3B1(5.7)0FT)

4.2.3 Critère moyen de fatigue: N_{f-moy}

Quand les 5 critères de fatigue sont déterminés, le critère moyen calculé par l'équation Eq. 4-3 est déterminé comme le critère choisi de l'essai de fatigue.

$$N_{f-moy} = \frac{1}{5} \times (N_{f-50\%} + N_{f-Co} + N_{f-\varphi_{max}} + N_{f-\Delta\epsilon_i} + N_{f-\Delta\varphi_i})$$

Eq. 4-3

La Figure 4-6 présente l'ensemble des critères utilisés sur la courbe $|E^*|$ -N du Test - SG3B1(5.7)0FT.

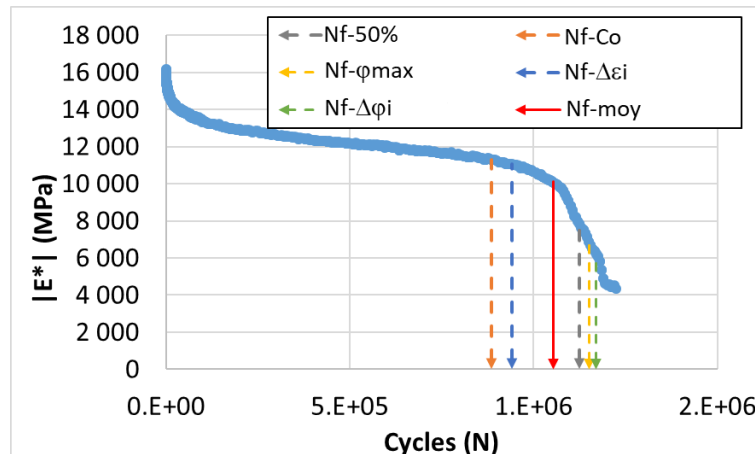


Figure 4-6. Comparaison du critère moyen par rapport aux autres critères de fatigue (Test - SG3B1(5.7)0FT)

4.3 Courbe de Wöhler

La courbe représentant la durée de vie de l'éprouvette N , en fonction de l'amplitude de la sollicitation ϵ est appelée courbe de Wöhler du matériau. Cette courbe est caractérisée par une relation suivante :

$$\epsilon = A \cdot N^b$$

Eq. 4-4

La courbe devient donc une droite en coordonnées logarithmiques (Figure 4-7). Le constante A et la pente b sont déterminés par une régression linéaire sur les résultats individuels en logarithmes

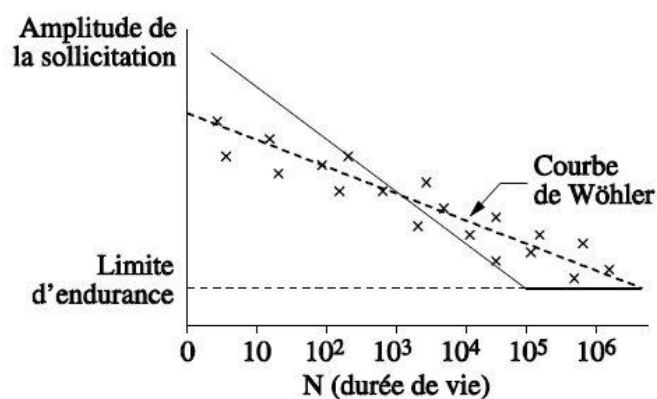


Figure 4-7. Courbe de Wöhler (Di Benedetto & Corté, 2005)

A partir de la fonction de la courbe de Wöhler, ε_6 déformation admissible pour 10^6 cycles est calculée. Elle correspond à l'amplitude de la sollicitation qu'il faudrait appliquer au matériau pour obtenir une durée de vie à l'essai de fatigue de 10^6 cycles. Cette valeur est ensuite utilisée pour le dimensionnement routier.

5 Résultats expérimentaux

5.1 Résultats des essais de fatigue

15 essais sur les éprouvettes ayant subi à trois types de conditionnement 0FT.DRY, 0FT.SAT, 50FT.DRY ont été réalisés. Le Tableau 5-1 introduit les éprouvettes testées, leurs degrés de saturation ainsi que les amplitudes de déformation lors les essais de fatigue.

Tableau 5-1. Eprouvettes testées en fatigue

Type de conditionnement	Eprouvette	Degré de saturation avant cycles GD (%)	Nombre de cycles GD	Teneur en vide en début d'essai (%)	Degré de saturation en début d'essai (%)	Amplitude de sollicitation (μ_{def})
0FT.DRY	SG3B1(5.7)	0	0	5.7	0	80
	SG1A8(5.2)	0		5.2	0	80
	SG1A2(6.1)	0		6.1	0	90
	SG6B7(5.9)	0		5.9	0	100
	SG4B6(7.4)	0		7.4	0	100
	SG3B12(5.9)	0		5.9	0	100
	SG3B4(5.7)	0		5.7	0	120
0FT.SAT	SG4B11(8.0)	70.0	0	8.0	70.0	80
	SG1A5(5.0)	72.5		4.6	72.5	80
	SG5C5(7.9)	72.0		7.5	72.0	100
	SG5C8(8.0)	81.2		7.9	81.2	120
50FT.DRY	SG4B7(7.8)	73.4	50	8.5	0	80
	SG4B5(7.7)	74.6		9.1	0	90
	SG5C4(7.6)	77.5		8.8	0	100
	SG6B1(7.5)	78.4		8.4	0	120

Les données expérimentales sont ensuite analysées en utilisant les critères introduits au chapitre 4. Le Tableau 5-2 présente les résultats des essais fatigue, la durée de vie, les valeurs de b et ε_6 selon les différents critères.

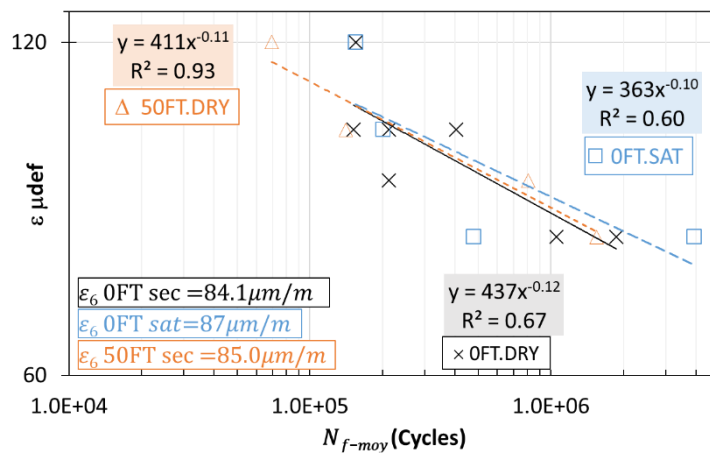
Les résultats montrent que :

- Les variations de la durée de vie selon les critères choisis sont faibles. L'écart type relatif de chaque essai est inférieure à 30% sauf l'essai sur l'éprouvette SG3B12,
- Les critères de fatigue utilisés donnent des valeurs très proches de b et ε_6 pour chaque type de conditionnement,
- Entre deux type de conditionnement différents, les valeurs de b et ε_6 ne varient pas nettement.

La Figure 5-1 présente les 3 courbes de Wöhler en utilisant les valeurs N déterminées par le critère Nf -moy. Les 3 droite de Wöhler obtenues sont très proches. On peut conclure que les conditionnements utilisés n'ont pas d'effet significatif sur la durée de vie en fatigue du matériau testé.

Tableau 5-2. Résultats des essais de fatigue

Type de conditionnement	Eprouvette	Amplitude (μdef)	Critères de base					Moyen	Ecart type relatif (%)	Critère choisi	
			$N_{f-50\%}$	N_{f-Co}	$N_{f-\phi_{max}}$	$N_{f-\Delta\epsilon_i}$	$N_{f-\Delta\phi_i}$			N_{f-moy}	
0FT.DRY	SG3B1	80	1124999	884999	1150000	939999	1170000	1053999	12.5	1053999	
	SG1A8	80	2085000	1700000	2180974	1195000	2180974	1868390	22.7	1868390	
	SG1A2	90	215000	205000	215000	215000	215000	213000	2.1	213000	
	SG6B7	100	213649	210000	213649	213649	213649	212919	0.8	212919	
	SG4B6	100	440000	320000	400000	440000	420000	404000	12.3	404000	
	SG3B12	100	175000	100000	240000	105000	230000	152000	39.1	170000	
	SG3B4	120	159608	135000	159608	159608	159608	154686	7.1	154686	
	ϵ_6			84.9	83.0	85.0	82.7	85.1	84.2	1.4	84.2
b			-0.117	-0.115	-0.121	-0.122	-0.120	-0.117	2.6	-0.119	
0FT.SAT	SG4B11	80	513550	375000	490000	505000	513604	479431	12.3	479431	
	SG1A5	80	3000000	3645000	4360000	4675000	4000000	3936000	16.5	3936000	
	SG5C5	100	210000	174999	199999	210000	210000	201000	7.5	201000	
	SG5C8	120	154686	154686	154686	154686	154686	154686	0	154686	
	ϵ_6			85.6	86.4	87.5	87.9	87.2	86.9	1.0	87.0
	b			-0.119	-0.097	-0.100	-0.099	-0.105	-0.104	8.6	-0.103
50FT.DRY	SG4B7	80	1595000	1450000	1500000	1550000	1605000	1540000	4.2	1540000	
	SG4B5	90	890000	500000	630000	1000000	1000000	804000	28.3	804000	
	SG5C4	100	150000	135000	125000	145000	150000	141000	7.7	141000	
	SG6B1	120	85500	50000	75000	46500	90500	69500	29.1	69500	
	ϵ_6			85.7	82.7	83.9	85.9	86.4	84.9	6.0	85.0
	b			-0.117	-0.115	-0.118	-0.101	-0.115	-0.113	1.8	-0.114

Figure 5-1. Courbe de Wöhler déterminée avec le critère N_{f-moy}

5.2 Résultats expérimentaux avec nouveaux conditionnements

5.2.1 Essais E*

7 essais E* ont été réalisés sur les 3 éprouvettes du matériau non vieilli et sur les 2 éprouvettes du matériau vieilli. Avant chaque essai, l'éprouvette ayant subi le nouveau conditionnement est séchée dans le dessiccateur sous-vide jusqu'au degré de saturation de 0%. Le Tableau 5-3 présente les essais E* avec les nouveaux conditionnements de cycles HF et HC.

Tableau 5-3. Epreuves testées ayant subi les nouveaux conditionnements

Type de conditionnement	Eprouvettes	Degré de saturation avant cycles (%)	Cycles	Teneur en vide en début d'essai (%)	Degré de saturation en début d'essai (%)	Etat pendant d'essai
10HF.DRY	SG1A4(6.6)	82.6	10HF	7.50	0	SEC
	SG6B3(6.3)	82.6		7.20		
10HC.DRY	SG3B3(5.1)	81.2	10HC	7.70		
A.10HF.DRY	SG3aB4(5.8)	64.7	10HF	6.60		
	SG2aB3(6.6)	70.4		6.80		
A.10HC.DRY	SG2aB5(6.7)	70.8	10HC	6.65		
	SG2aB12(6.6)	72.4		6.60		

5.2.1.1 Résultats expérimentaux

5.2.1.1.1 Éprouvettes non-vieillies

3 éprouvettes non-vieillies ont été testées à l'état sec, dont 2 éprouvettes conditionnées avec 10 cycles HF et 1 éprouvette conditionnée avec 10 cycles HC.

Pour chaque éprouvette, les résultats tracés dans le plan Cole-Cole et dans l'espace de Black (Figure 5-2), se situent sur une courbe continue et unique. Le principe d'équivalence temps-température (PETT) est donc vérifié. Il est appliqué afin de construire les courbes maîtresses de la norme et l'angle de phase du module complexe ainsi que celles du coefficient de Poisson complexe (cf. 5.2.1.2).

La Figure 5-2 présente l'ensemble des résultats de l'essai E* sur les éprouvettes ayant subi le conditionnement initial (0FT, 10FT et 50FT) et les nouveaux conditionnements (10HF et 10HC). Ces éprouvettes ont été toutes testées à l'état sec.

Il faut noter que l'éprouvette SG6B12(7.4)50FT a été re-testée suite au résultat obtenu dans le 2^{ème} rapport DVDC. Le résultat de l'essai SG6B12(7.4)50FT présenté dans ce rapport est nouveau.

Les résultats montrent que, dans le plan Cole-Cole, les éprouvettes soumises à 10HF et 10HC ont un module plus élevé par rapport aux éprouvettes soumises au conditionnement initial avec les cycles FT. Dans l'espace de Black, la différence entre les éprouvettes ayant subis des cycles HF et HC et celles ayant subis des cycles FT n'est pas significative.

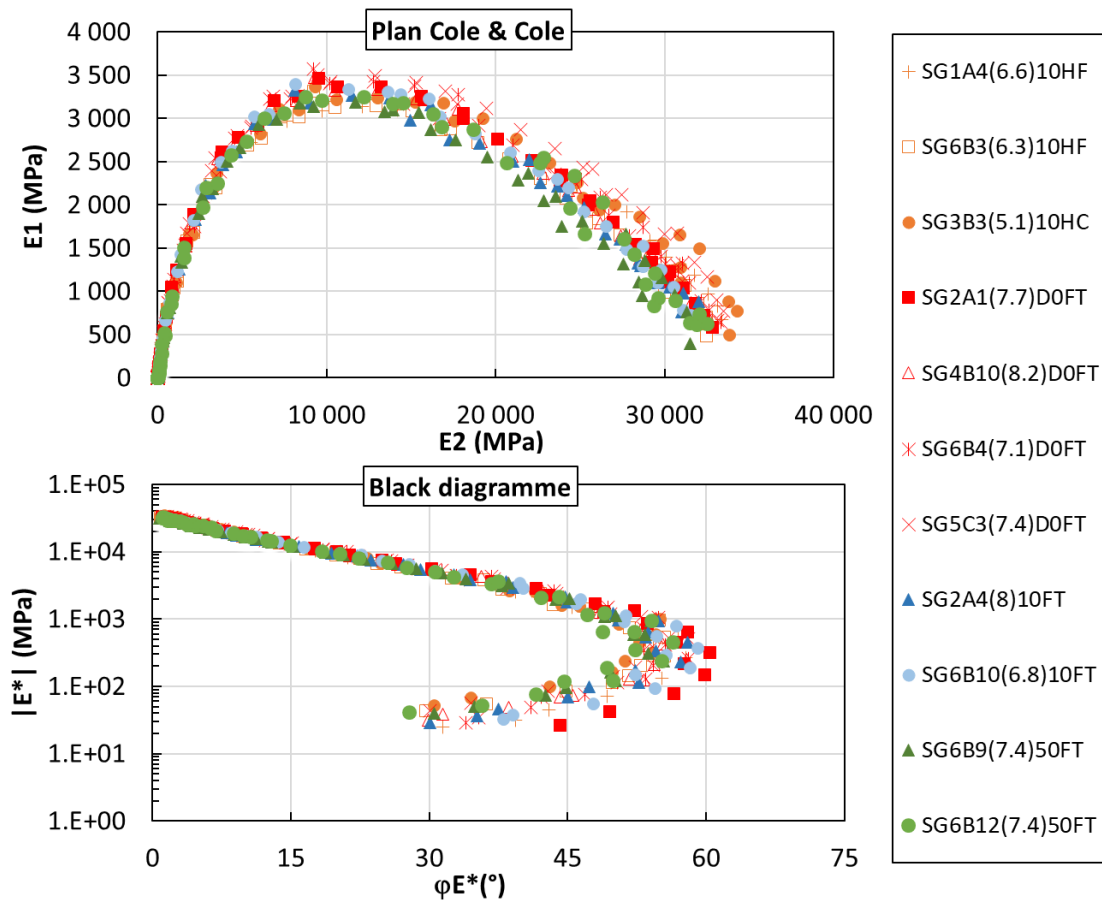


Figure 5-2. Module complexe E^* dans le plan Cole-Cole et l'espace Black des éprouvettes non-vieilles (Conditionnement initial et nouveaux conditionnements)

5.2.1.1.2 Éprouvettes vieilles

4 éprouvettes vieilles ont été testées à l'état sec, dont 2 éprouvettes conditionnées avec 10 cycles HF et 2 éprouvettes conditionnées avec 10 cycles HC.

De même façon, les résultats tracés dans le plan Cole-Cole et dans l'espace de Black chaque éprouvette (Figure 5-3), se situent sur une courbe continue et unique. Le principe d'équivalence temps-température (PETT) est aussi vérifié. Il est appliqué afin de construire les courbes maîtresses de la norme et l'angle de phase du module complexe ainsi que celles du coefficient de Poisson complexe (cf. 5.2.1.2)

Les résultats sur les éprouvettes vieilles sont plus fluctuant par rapport à ceux des éprouvettes non-vieilles; car les éprouvettes vieilles n'ont pas la même teneur en vide et elles ont été carottées dans des plaques d'enrobé qui pourraient avoir vieilli différemment au cours de leur fabrication.

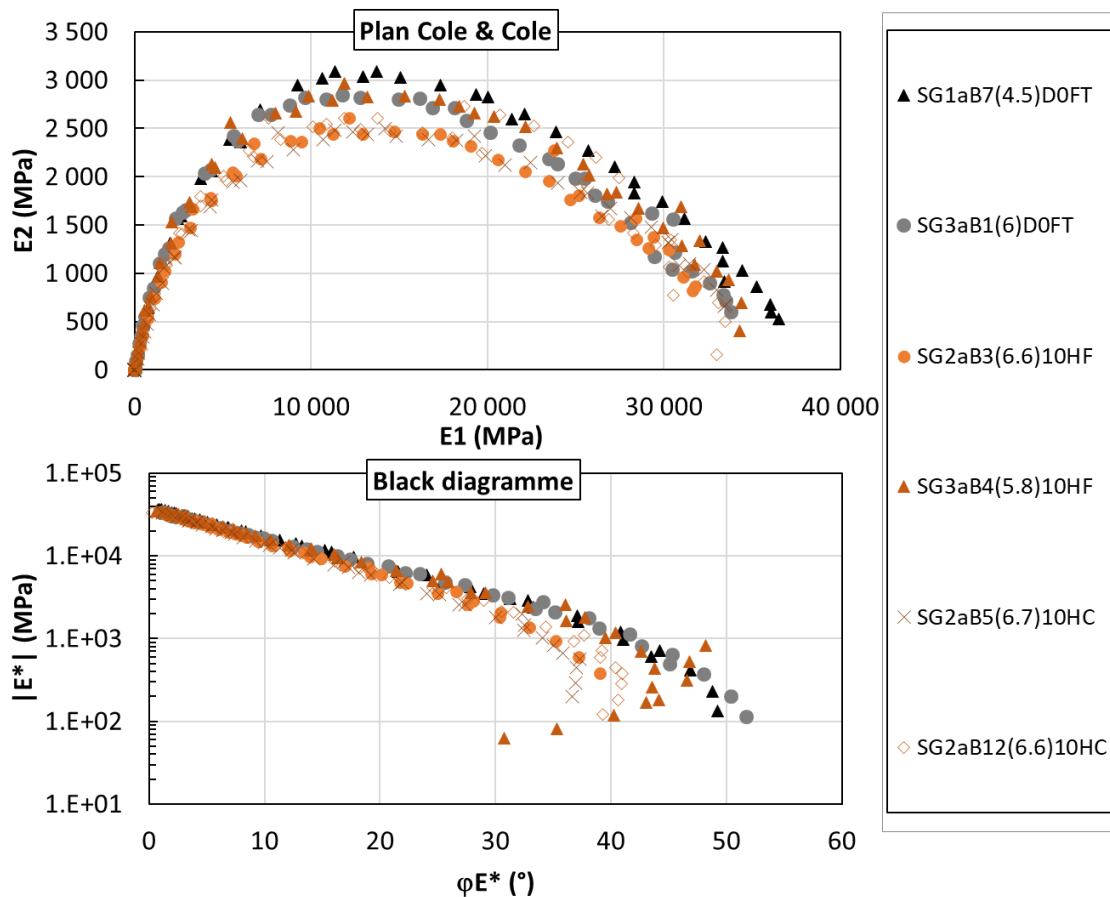


Figure 5-3. Module complexe E^* dans le plan Cole-Cole et l'espace de Black des éprouvettes vieilles (Conditionnement initial et nouveaux conditionnements)

5.2.1.2 Construction des courbes maîtresses et modélisation des résultats expérimentaux à l'aide du modèle 2S2P1D

Les coefficients de translation a_T obtenus pour construire les courbes maîtresses (Figure 5-4) qui sont identiques pour E^* et ν^* sont également quasiment identiques pour toutes les éprouvettes malgré les types de conditionnement différents. La variation de a_T en fonction de la température permet de déterminer les coefficients C_1 et C_2 de la loi WLF. Ces coefficients sont identiques pour le matériau non-vieilli et le matériau vieilli.

Les modélisations à l'aide du modèle 2S2P1D sont aussi tracées sur les figures présentées (Figure 5-6 et Figure 5-7). On constate que le modèle décrit correctement les résultats obtenus sur toute la gamme des fréquences et températures.

Le Tableau 5-4 présente les constantes du modèle 2S2P1D pour chaque éprouvette. Il y a 4 groupes ayant chacun des valeurs identiques des constantes (k , h , δ , β). Les deux premiers groupes correspondent respectivement, i) à des éprouvettes non vieilles conditionnées avec les cycles FT et, ii) à celles conditionnées avec les cycles HF et HC. Entre ces deux groupes nous pensons que les différences entre ces constantes s'expliquent par un vieillissement du bitume créé par les cycles avec échauffement (de type HC ou HF). Le troisième groupe inclut les éprouvettes de la 1^{ère} plaque vieilli (ayant subi 0FT) et celles de la 3^{ème} plaque vieilli (ayant subi 10HF). Pour ce groupe, l'effet du vieillissement créé par les cycles HF (avec échauffement) n'est pas visible (mêmes constantes k , h , δ , β). Ce vieillissement est sans doute très minime car le bitume a déjà été vieilli. Le quatrième groupe inclut les éprouvettes de la 2^{ème} plaque vieilli ayant subi un échauffement (cycles HF ou HC). Pour ces éprouvettes le bitume a sans doute subi un vieillissement plus important que celui des plaques 1 et 3 lors de la fabrication.

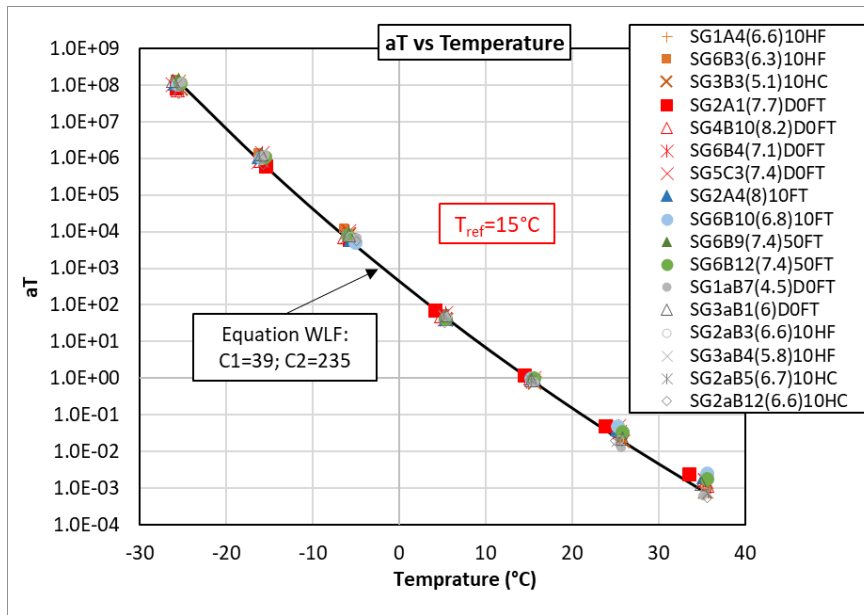


Figure 5-4. Coefficients de translation aT selon la température (à une température de référence $T_{ref}=15^{\circ}C$). Les mêmes coefficients sont obtenus pour E^* et ν^*

Tableau 5-4. Constantes du modèle 2S2P1D calibrées pour chaque éprouvette ($T_{ref}=15^{\circ}C$) (Conditionnement principal et nouveaux conditionnements)

Type de conditionnement		Eprouvette	E_{00} (MPa)	E_0 (MPa)	k	h	δ	τ (s)	β	ν_{00}	ν_0	$\gamma_{E/\nu}$	C1	C2	$\tau \nu$ (s)
Initial	0FT.DRY	SG2A1(7.7)D0FT	14	34240	0.20	0.63	2.25	0.05	30	0.46	0.17	0.40	39	235	0.12
		SG4B10(8.2)D0FT	25	34000				0.05		0.40	0.20				0.13
		SG6B4(7.1)D0FT	23	34920				0.05		0.35	0.22				0.13
	10FT.DRY	SG2A4(8)10FT	24	33300				0.05		0.47	0.22				0.11
		SG6B10(6.8)10FT	20	33800				0.04		0.49	0.22				0.10
	50FT.DRY	SG6B9(7.4)50FT	31	33000				0.05		0.37	0.18				0.12
		SG6B12(7.4)50FT	32	33700				0.05		0.45	0.20				0.14
Nouveaux	10HF.DRY	SG1A4(6.6)10HF	16	35500	0.19	0.60	2.40	0.05	60	0.45	0.20	0.20	39	235	0.24
		SG6B3(6.3)10HF	28	34500				0.06		0.43	0.24				0.28
	10HC.DRY	SG3B3(5.1)10HC	33	36500				0.06		0.45	0.22				0.32
Initial	A.0FT.DRY	SG1aB7(4.5)D0FT	29	38400	0.17	0.50	2.40	0.27	300	0.38	0.13	0.17	39	235	1.60
		SG3aB1(6)D0FT	18	36000				0.17		0.40	0.21				1.02
Nouveaux	A.10HF.DRY	SG3aB4(5.8)10HF	39	36500	0.15	0.45	2.60	0.25	700	0.44	0.20	0.15	39	235	1.49
		SG2aB3(6.6)10HF	65	36000				0.57		0.38	0.11				3.77
	A.10HC.DRY	SG2aB5(6.7)10HC	75	36700				1.55		0.46	0.23				10.51
		SG2aB12(6.6)10HC	55	37000				1.50		0.44	0.16				10.18

La Figure 5-5 présente la variation de constantes (E_0 , E_{00} , ν_0 , ν_{00} et τ_{E^*}) en fonction de la teneur en vide (TEV) des éprouvettes en début d'essai. Ces valeurs TEV ont été obtenues par les mesures sur les éprouvettes ayant subi les nouveaux conditionnements, et en appliquant les corrections expliquées dans le rapport N2 pour les éprouvettes ayant subi 10FT et 50FT (cf. Rapport N°2).

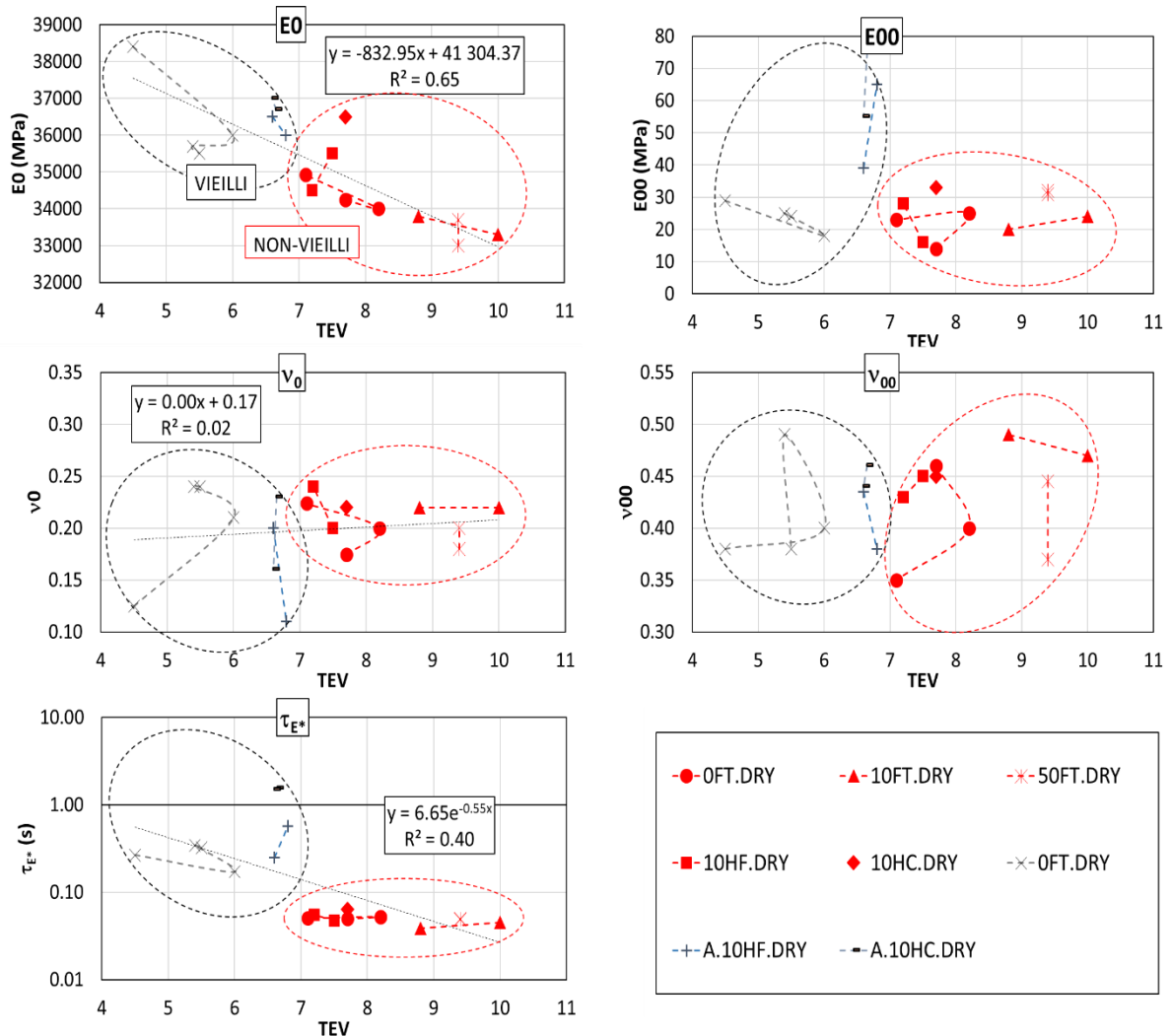


Figure 5-5. Constantes 2S2P1D en fonction de la teneur en vide en début d'essai (obtenue par mesures pour les éprouvettes avec 10HF et 10HC, après corrections pour les éprouvettes ayant subi les conditionnements 10FT et 50FT cf. rapport n°2)

Les résultats présentés montrent que E_0 semble évoluer en fonction de la teneur en vide selon une loi linéaire tandis que les variations des autres constantes E_{00} , ν_0 , ν_{00} et τ_{E^*} semblent indépendantes de la teneur en vide de l'éprouvette testée. En plus, les valeurs de τ_{E^*} semblent dépendant du vieillissement de matériau : plus le matériau vieilli plus τ_{E^*} augmente.

5.2.1.2.1 Éprouvettes non-vieillies (Conditionnement principal et nouveaux conditionnements)

La Figure 5-6 présente les courbes maîtresses des éprouvettes non-vieillies ayant subi 0FT, 10FT, 50FT, 10HF et 10HC. Pour la température de référence de 15°C, les courbes maîtresses de E^* et φ_{E^*} sont presque superposées aux fréquences supérieures à 1Hz ; et l'écart entre ces courbes augmente quand la fréquence diminue.

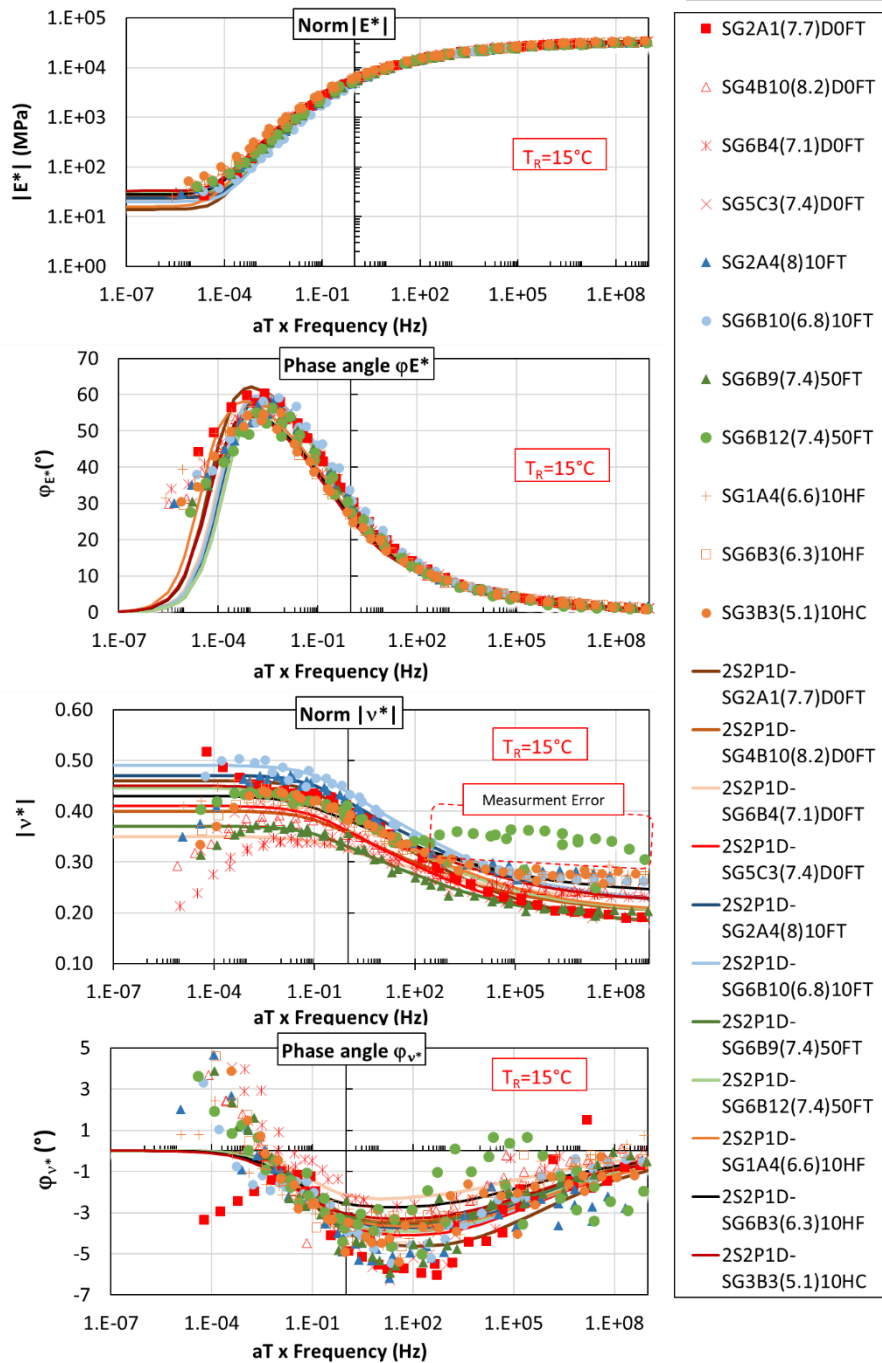


Figure 5-6. Courbes maîtresses de la norme et de l'angle de phase du module E^* et du coefficient ν^* des éprouvettes non-vieillies testées à l'état sec et courbes simulées avec le modèle 2S2P1D

5.2.1.2.2 Éprouvettes vieilles (Conditionnement principal et nouveaux conditionnements)

La Figure 5-7 présente les courbes maîtresses des éprouvettes vieilles ayant subi des 0FT, 10HF et 10HC. Les courbes maîtresses de E^* et φ_{E^*} des éprouvettes de la plaque 1a et 3a sont superposées d'une part et celles de la plaque 2a d'autre part malgré les conditionnements appliqués. Ce résultat montre que les effets de 10 cycles HF et HC ne sont pas significatifs sur les éprouvettes vieilles. Les différences observées peuvent être expliquées par le fait que les plaques d'enrobés pourraient avoir subi des niveaux de vieillissement différents lors de la fabrication.

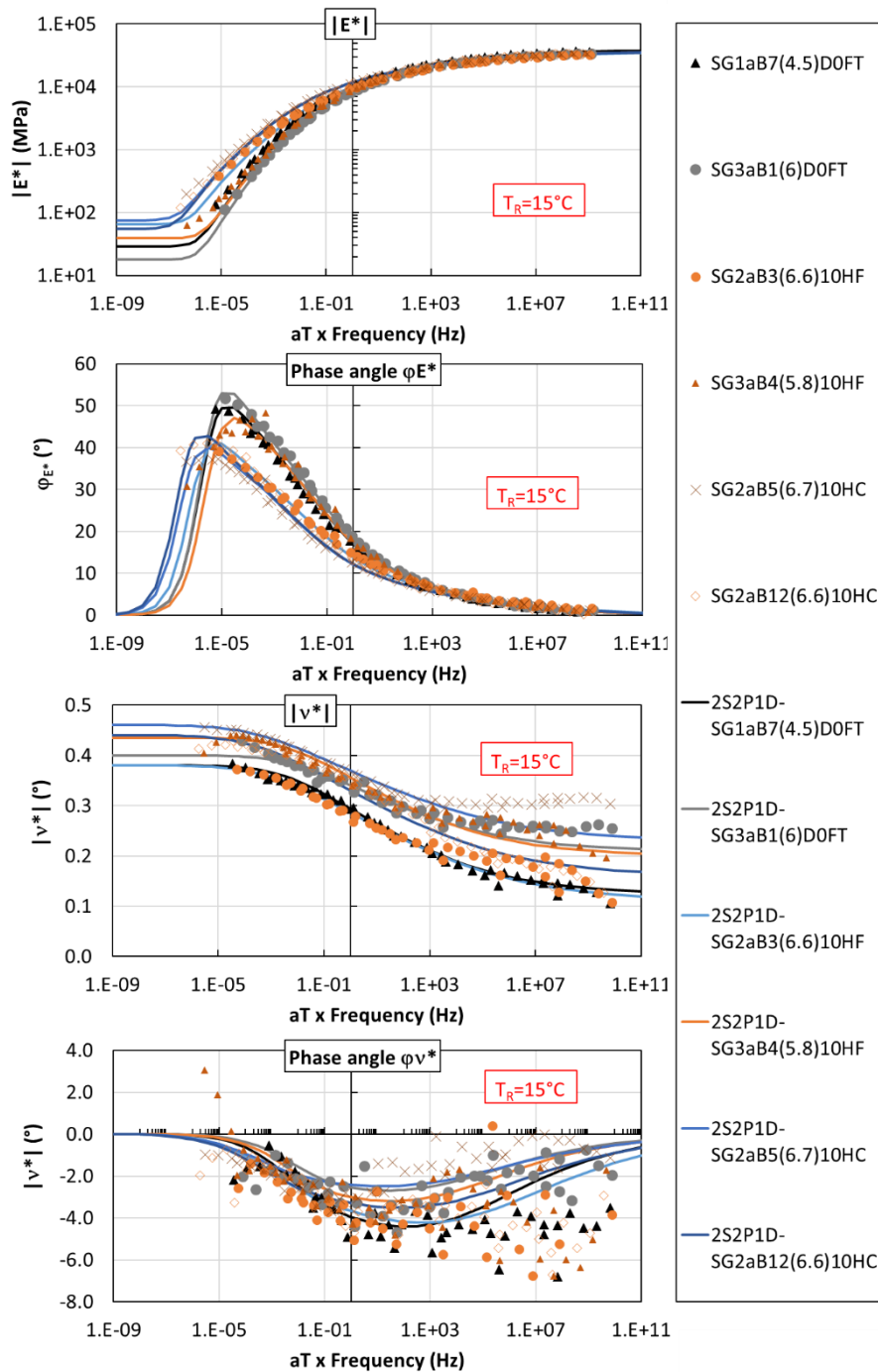


Figure 5-7. Courbes maîtresses de la norme et de l'angle de phase du module E^* et du coefficient v^* des éprouvettes vieilles testées à l'état sec et courbes simulées avec le modèle 2S2P1D

5.2.1.3 Comparaison des résultats de module complexe normalisé (conditionnement principal et nouveaux conditionnements)

La Figure 5-8 et la Figure 5-9 présentent les résultats expérimentaux normalisés des essais avec le conditionnement principal et les nouveaux conditionnements. Les courbes simulées à l'aide du modèle 2S2P1D sont aussi tracées sur les mêmes figures.

On constate premièrement que le modèle décrit correctement les résultats obtenus sur toute la gamme des fréquences et températures. Il y a 4 courbes de simulation différentes sur la Figure 5-9. Ces 4 courbes sont déterminées par 4 valeurs différentes de quadruplets (k , h , δ , β). Selon les résultats de la littérature confirmés par nos résultats déjà présentés dans le rapport N°2, ces constantes du modèle sont directement liées à la nature du bitume.

On constate aussi que les courbes normalisées des éprouvettes non-vieilles avec les cycles HF et HC ont tendance à « rapprocher » de celles des éprouvettes vieilles. Ceci confirme l'hypothèse formulée ci-dessus : les nouveaux conditionnements avec les cycles introduisant un échauffement (HF ou HC) ont vieilli le bitume. Cette hypothèse ne peut être vérifiée que pour le matériau non-vieilli. Les cycles HF et HC n'ayant pas d'effet significatif sur le matériau qui a déjà vieilli.

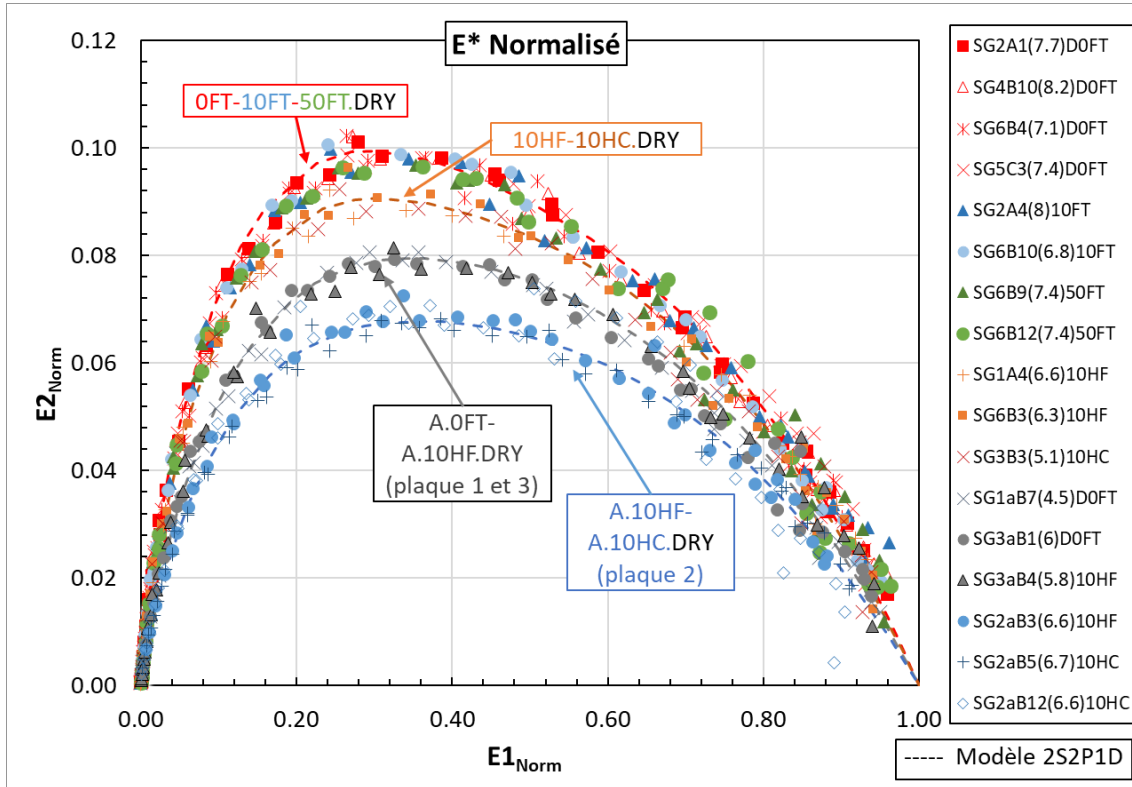


Figure 5-8. Résultats expérimentaux de E^* normalisé

En supposant que cette hypothèse est validée, on pourrait remarquer que plus le matériau vieillit, plus k , h diminue et δ augmente (cf. Figure 5-9).

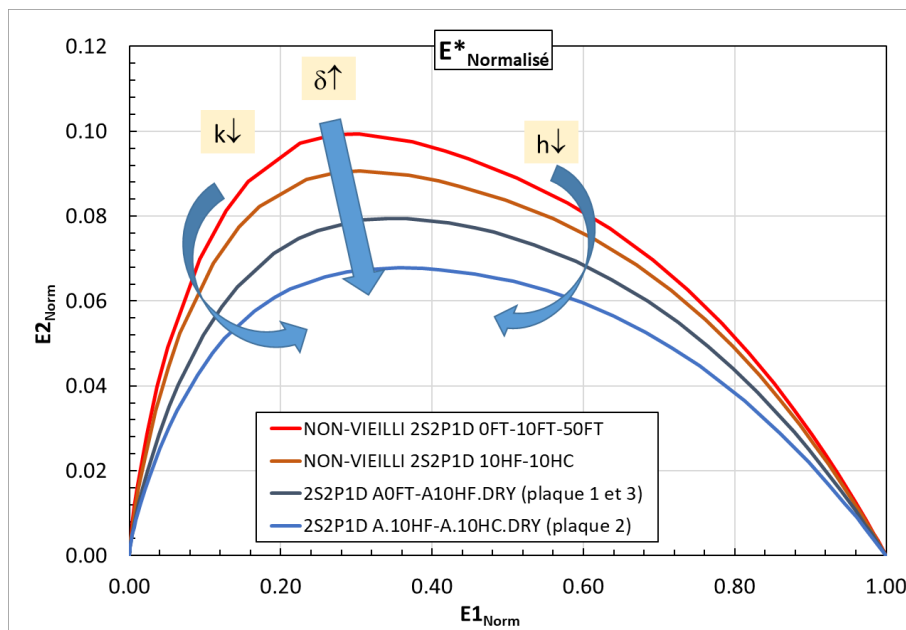


Figure 5-9. Courbes 2S2P1D de E^* normalisé

5.2.2 Essais TSRST

Le Tableau 5-5 indique tous les nouveaux essais TSRST complémentaires à ceux présentés dans le rapport N°2. Il y a 3 essais sur des éprouvettes ayant subi 50 cycles FT et 10 essais sur des éprouvettes conditionnées avec 10 cycles HF ou 10 cycles HC.

Tableau 5-5. Nouvelles éprouvettes TSRST testées

Type de conditionnement	Eprouvette	Degré de saturation avant cycles (%)	Cycles (Nombre + Type)	TEV début d'essai	Degré de saturation en début d'essai (%)	Etat pendant essai	
50FT.DRY	SG7D2(5.1)	78.2	50FT	7.30	0	SEC	
	SG7D8(5.2)	76.0		6.70			
	SG7D4(5.2)	75.5		7.30			
10HF.DRY	SG8D2(6.5)	86.6	10HF	7.10	7.1	Quasiment SEC	
	SG8D4(6.2)	85.8		7.10	13.1		
10HC.DRY	SG2A13(7.1)	83.4	10HC	7.50	10.7		
	SG8D1(7.0)	81.7		7.30	12.6		
	SG8D3(6.6)	79.5		7.10	16.3		
A.10HF.DRY	SG4aD6(6.5)	78.5	10HF	6.60	6.8		
	SG4aD10(6.4)	79.5		6.60	5.6		
A.10HC.DRY	SG4aD1(6.4)	80.4	10HC	6.70	0		SEC
	SG4aD5(6.2)	76.1		6.20	0		SEC
	SG4aD7(6.4)	74.2		6.10	12.2		Quasiment SEC

Il faut noter que toutes ces éprouvettes ont été séchées sous vide avec un gel de silice pendant au moins 7 jours avant l'essai. Certaines éprouvettes n'étaient pas complètement séchées après l'étape de séchage. Cependant, le degré de saturation en début d'essai est toujours inférieur 16.5%.

5.2.2.1 Éprouvettes non-vieillies

La Figure 5-10 présent les évolutions de la contrainte (σ) et de la déformation radiale (ϵ_{rad}) en fonction de la température (T) mesurée à la surface durant l'essai jusqu'à la rupture des éprouvettes subies 0FT, 10FT et 50FT.

Les résultats montrent qu'il n'y a pas de différence observable entre 10FT et 50FT. Un nombre de cycles FT inférieure de 50 n'influence donc pas significativement les courbes T- σ et T- ϵ_{rad} .

La Figure 5-11 présent les résultats des éprouvettes ayant subies 0FT, 10FT, 10HF et 10HC. D'après les résultats obtenus, il n'y a pas de différence entre les 2 nouveaux types de conditionnement (10HF et 10HC). En outre, les éprouvettes avec 10FT ont des courbes très proches de celles avec 10HF et 10HC.

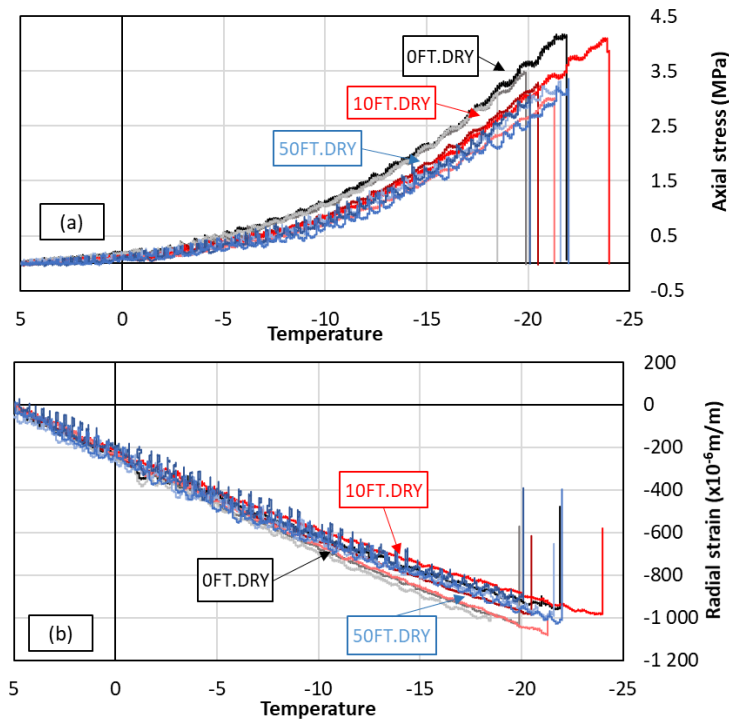


Figure 5-10. Contrainte vs Température (a); Déformation radiale vs Température (b) pendant l'essai TSRST sur les éprouvettes non-vieilles ayant subi 0FT, 10FT et 50FT (conditionnement initial)

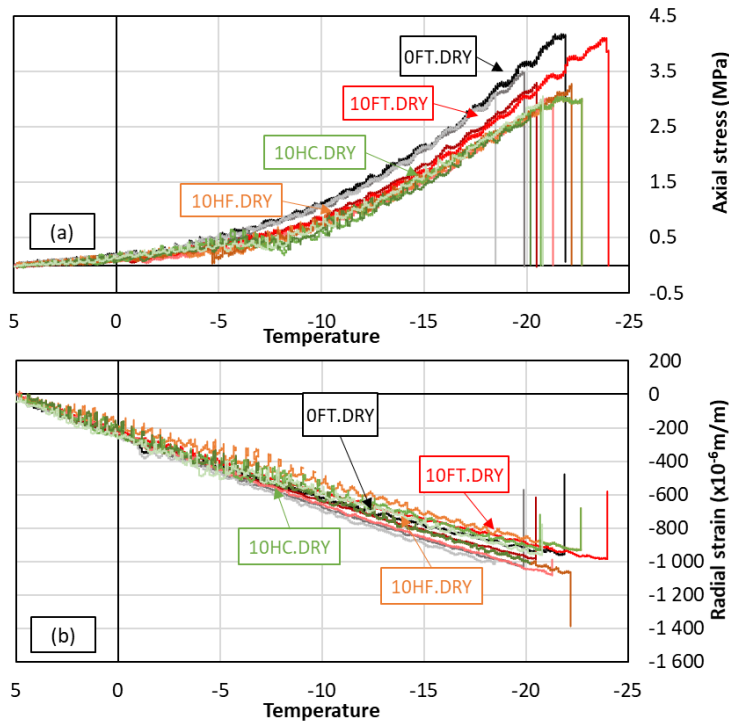


Figure 5-11. Contrainte vs Température (a); Déformation radiale vs Température (b) pendant l'essai TSRST sur les éprouvettes non-vieilles (conditionnement initial et nouveaux conditionnements)

5.2.2.2 Éprouvettes vieilles

Les courbes $T-\sigma$ et $T-\varepsilon_{rad}$ des éprouvettes vieilles ayant subi les nouveaux conditionnements sont tracées dans la Figure 5-12. On remarque également que les effets des cycles 10HF et 10HC ne sont pas significativement différents.

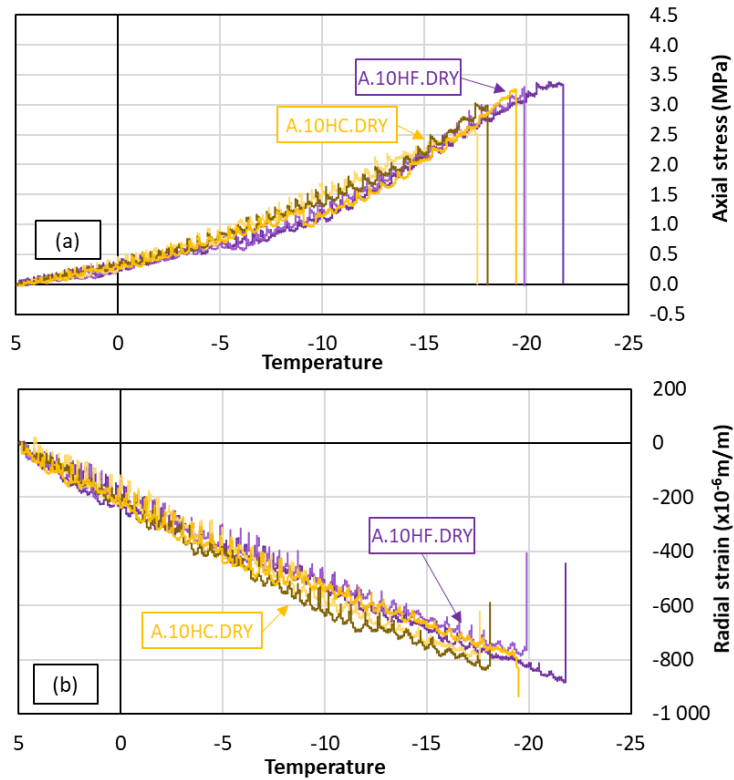


Figure 5-12. Contrainte vs Température (a); Déformation radiale vs Température (b) pendant l'essai TSRST sur les éprouvettes vieilles ayant subi 10 cycles de HF et HC (nouveaux conditionnement)

5.2.2.3 Comparaison des résultats des essais TSRST

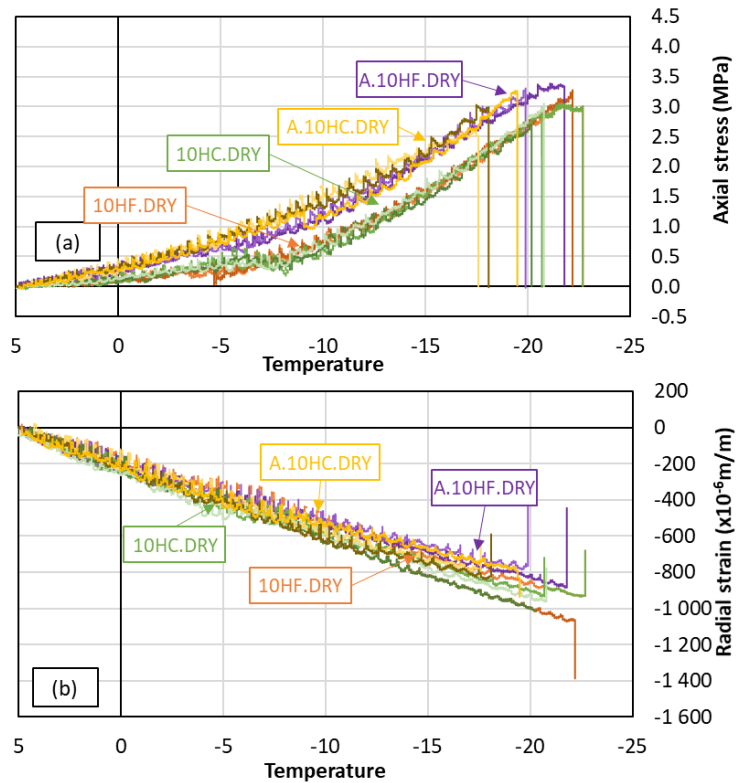


Figure 5-13. Contrainte vs Température (a); Déformation radiale vs Température (b) pendant l'essai TSRST sur les éprouvettes non-vieilles et vieilles (nouveaux conditionnements)

La Figure 5-13 présente les résultats des essais avec les nouveaux conditionnements. Les résultats montrent que les courbes T- σ des éprouvettes non-vieilles sont toujours en dessous de celles des éprouvettes vieilles. Cela signifie que les éprouvettes vieilles ont une contrainte plus élevée que celle de l'éprouvette non-vieille à la même température pendant l'essai TSRST.

La Figure 5-14 présente l'ensemble des valeurs à la rupture (contrainte, déformation radiale, et température) des essais TSRST et les écarts-types.

Les résultats montrent que :

- Pour les éprouvettes non-vieilles testées à l'état sec : Les conditionnements avec 50FT 10HF ou 10HC ont tendance à diminuer la contrainte à la rupture par rapport aux conditionnement 0FT et 10FT. Cependant, ces conditionnements ne semblent pas avoir influencé les valeurs à la rupture de température et de déformation radiale.
- Pour les éprouvettes non-vieilles testées à l'état saturé : La température de rupture est significativement différente entre les éprouvettes sèches et saturées n'ayant subi aucun cycle de FT.
- Pour les éprouvettes vieilles testées à l'état sec : la différence entre 10HF et 10HC n'est pas significative. En comparant avec les résultats des éprouvettes non-vieilles ayant subi le même conditionnement, la déformation radiale à la rupture est plus élevée, tandis que la contrainte et la température à la rupture restent identiques.

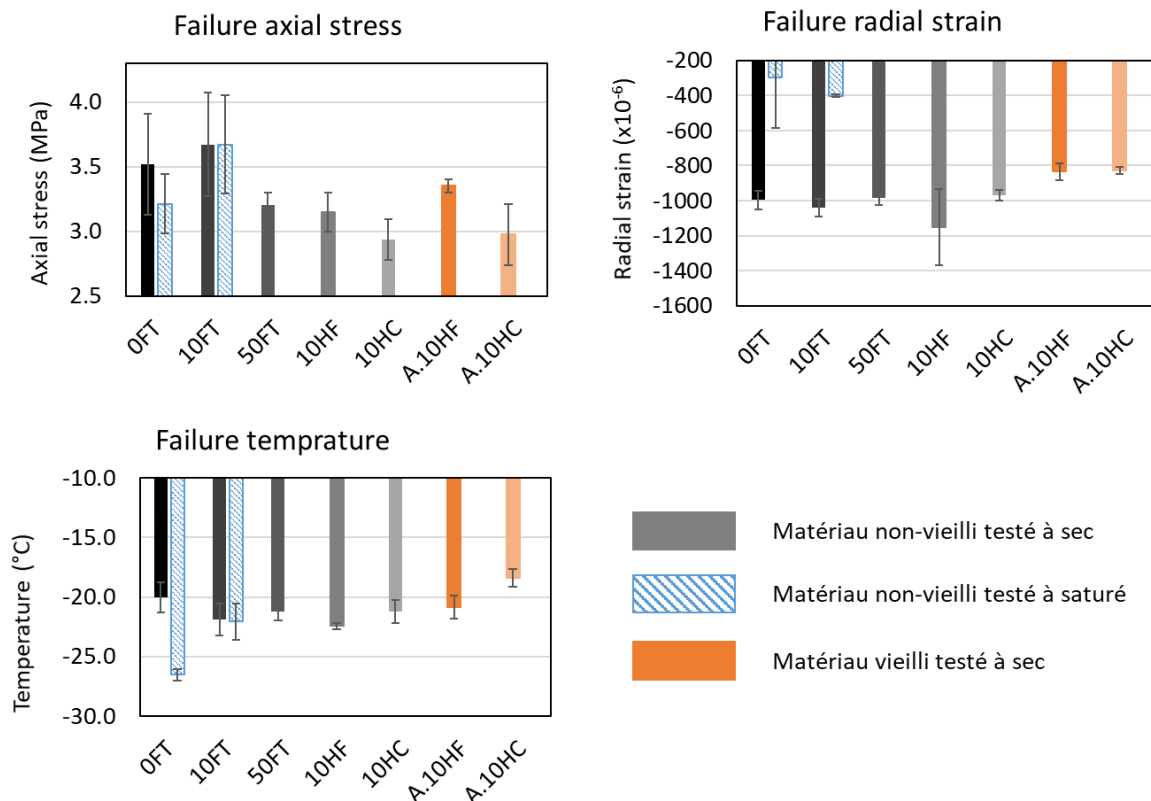


Figure 5-14. Résultats à la rupture des essais TSRST

6 Conclusion

Des résultats expérimentaux obtenus dans le cadre du projet DVDC et de la thèse de D.T. Tran ont été présentés. Ils concernent la campagne principale avec le conditionnement prévu initialement (cycles FT), et la campagne complémentaire avec des cycles HF et HC.

Les résultats des essais E^* à l'état sec montrent que :

- Les effets des cycles FT avec $N_{FT} \leq 50$ ne sont pas significatifs pour les matériaux testés.
- Les effets des cycles HF et HC sont similaires. Il semble que l'échauffement crée un vieillissement du bitume des éprouvettes non-vieillies tandis qu'il n'est pas observé sur les éprouvettes vieilles. La caractérisation de ce phénomène peut être identifiée à l'aide des constantes k , h , δ du modèle 2S2P1D.

Les résultats des essais de fatigue montrent que :

- Les cycles FT avec $N_{FT} \leq 50$ et l'état des éprouvettes au début des essais de fatigue (sèc ou saturé) n'influencent pas le comportement en fatigue du matériau testé.

Les résultats des essais de TSRST montrent que :

- Pour les éprouvettes non-vieillies testées à l'état sec : Les conditionnements avec 50FT 10HF ou 10HC ont tendance à diminuer la contrainte à la rupture par rapport aux conditionnement 0FT et 10FT. Cependant, ces conditionnements ne semblent pas avoir influencé les valeurs de la température et de la déformation radiale à la rupture.
- Pour les éprouvettes non-vieillies n'ayant subi aucun cycle FT, la température de rupture est significativement moins élevée pour les éprouvettes sèches que pour celles saturées.
- Pour les éprouvettes vieilles testées à l'état sec, la différence entre 10HF et 10HC n'est pas significative. Seule la déformation radiale à la rupture est plus élevée pour ces éprouvettes par rapport aux éprouvettes non-vieillies ayant subi le même conditionnement. La contrainte et la température à la rupture restent identiques.

L'ensemble des résultats obtenus et des analyses complémentaires seront présentés dans le mémoire de thèse de D.T. Tran (soutenance prévue durant l'été 2020).

Références

- Di Benedetto, H. & Corté, J. F., 2005. Matériaux Routiers Bitumineux II. *Hermès Lavoisier éditions, Paris*, Volume II.
- Kim, Y. R., Little, D. N. & Lytton, R. L., 2003. Fatigue and Healing Characterization of Asphalt Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(1), pp. 75-83.
- Mangiafico, S., 2014. Linear viscoelastic properties and fatigue of bituminous mixtures produced with Reclaimed Asphalt Pavement and corresponding binder blends. *PhD Thesis, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE)- Université de Lyon, France*.
- NF EN 12697-24, 2012. Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange - Partie 24 : Résistance à la fatigue. *Association Française de Normalisation - AFNOR*.
- Ramirez Cardona, A. D., 2016. Characterisation of Thermomechanical Properties of Bituminous Mixtures Used for Railway Infrastructures. *PhD Thesis, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE)- Université de Lyon, France*.
- Tran, D. T., Sauzéat, C. & Di Benedetto, H., 2019. Rapport N°2: Etude de l'endommagement des enrobés bitumineux à l'eau et au gel - Présentation de la campagne expérimentale et premiers résultats. *DVDC Rapport LC/18/DVDC/45*.

Liste des Symboles et Abréviations

Symbole	Signification
ϵ_0	Amplitude de déformation
ϵ_i	Amplitude de déformation mesurée par l'extensomètre i
ϵ_{i0}	Amplitude de déformation mesurée par l'extensomètre i au cycle 60ème dans l'essai de fatigue
φ_i	Angle de phase de déformation mesurée par l'extensomètre i
Φ	Angle de phase de déformation moyenne
φ_v^*	Angle de phase du coefficient de Poisson complexe
φ_E^*	Angle de phase du module complexe
a_T	Coefficient de translation en température
ν^*	Coefficient de Poisson complexe
A	Constante de la fonction représentant la régression de la courbe Wöhler
k, h	Constantes du modèle 2S2P1D - Exposant des éléments paraboliques
δ, β	Constantes du modèle 2S2P1D sans dimension
E_{00}, ν_{00}	Constants du modèle 2S2P1D - Module statique et coefficient de Poisson statique quand $\omega \rightarrow 0$
E_0, ν_0	Constants du modèle 2S2P1D - Module vitreux et coefficient de Poisson vitreux quand $\omega \rightarrow \infty$
C1, C2	Constantes de la loi WLF
σ	Contrainte
σ_{rup}	Contrainte à la rupture de de l'essai TSRST
N_{f-Co}	Critère de fatigue basé sur le changement de concavité de la courbe $- E^* $ vs N
$N_{f-\varphi_{max}}$	Critère de fatigue basé sur le point de valeur maximale de φ_E^*
$N_{f-\Delta\varphi}$	Critère de fatigue basé sur les écarts d'angles de phase
$N_{f-\Delta\epsilon_i}$	Critère de fatigue basé sur les écarts relatifs des amplitudes de 3 extensomètres
$N_{f-50\%}$	Critère de fatigue classique
N_{f-moy}	Critère moyen de fatigue
ϵ	Déformation
ϵ_6	Déformation admissible pour 10^6 cycles de sollicitation sinusoïdale
ϵ_{rup}	Déformation radiale à la rupture de de l'essai TSRST
$\Delta\epsilon_i$	Ecart relatif de déformation mesurée par l'extensomètre i
F	Fréquence de sollicitation sinusoïdale (Hz)
B	Pente de la régression linéaire de la courbe Wöhler
μ_{def}	Micro déformation ou $\mu m/m$ ou $10^{-6}m/m$
E^*	Module complexe
I	Nombre complexe $i^2=-1$
N	Nombre de cycles de sollicitation
$ \nu^* $	Norme du coefficient de Poisson complexe
$ E^* $	Norme du module complexe
Ω	Pulsation de sollicitation sinusoïdale ($2\pi f$)
τ_v	Temps caractéristique du coefficient de Poisson complexe
τ, τ_E^*	Temps caractéristique du module complexe
T	Température ($^{\circ}C$)
T_{rup}	Température à la rupture de l'essai TSRST

T_{ref}, T_R	Température de référence
T	Temps
H	Viscosité

Abréviation Signification

TSRST	Essai de retrait thermique empêché (Thermal Stress Restrained Specimen Test)
GD	Gel/Dégel
FT	Gel/Dégel (Freezing-Thaw)
2S2P1D	Modèle rhéologique " Two Springs - Two Parabolic Elements - One Daspot"
DVDC	Nome du projet "Durée de Vie Des Chaussées"
PETT	Principe d'équivalence temps-température
HF	Réchauffement-Gel (Heating - Freezing)
HC	Réchauffement- Refroidissement (Heating - Cooling)
TEV	Teneur en vide
WLF	Williams - Landel -Ferry