

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M. Ing.

PAR
Radouen TOUHARA

ÉTUDE DE LA RÉSISTANCE EN FATIGUE DES MATÉRIAUX BITUMINEUX

MONTREAL, LE 1^{er} octobre 2012

©Tous droits réservés, Radouen touhara, 2012

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Daniel Perraton, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Alan Carter, codirecteur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Michel Vaillancourt, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Yannic Éthier, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 7 septembre 2012

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée au sein du Laboratoire sur les chaussées et matériaux bitumineux (LCMB) de l'École de Technologie Supérieure.

Je veux exprimer ici ma gratitude à l'ensemble des personnes qui m'ont permis de près ou de loin, par leur aide matérielle ou morale, de mener ce travail à terme.

Au début, j'aimerais remercier mon directeur de recherche, M. Daniel Perraton, pour la confiance qu'il m'a manifestée, pour avoir cru en moi, en mes connaissances et mes capacités de mener à terme ce projet de recherche. Je le remercie également pour le support moral et pour les conseils reçus sans oublier ses grandes qualités humaines.

Merci à mon codirecteur M. Alan Carter pour ses corrections et ses utiles commentaires. Merci à M. Francis Bilodeau pour son aide précieuse pour réaliser le travail expérimental et M. Sébastien Lamothe pour son savoir scientifique et ses discussions qui m'ont beaucoup aidé pour avancer.

Je remercie M. Michel Vaillancourt et M. Yannic Éthier d'avoir accepté d'être membres de mon jury.

Je veux remercier aussi, M. Frédéric Noël et Mme Anne-Marie Bégin de l'entreprise GÉCAN pour la réalisation d'une partie des essais de ce travail.

Je tiens également à remercier mes parents, mes frères et sœurs, qui malgré la distance ont pu m'encourager tout au long de mes études.

Finalement, je voudrais dédier ce mémoire à ma femme Sihem pour son soutien et sa patience sans limites et à mes étoiles Lina et Rayan.

ÉTUDE DE LA RÉSISTANCE EN FATIGUE POUR LES MATÉRIAUX BITUMINEUX

Radouen TOUHARA

RÉSUMÉ

Ce programme de recherche a pour but d'évaluer et caractériser le comportement en fatigue de deux enrobés bitumineux de même type GB20, mais confectionné avec deux bitumes différents. Un des enrobés étant formulés en laboratoire avec un bitume polymère PG64-28 et le deuxième prélevé en centrale d'enrobage et confectionné avec un bitume conventionnel PG58-28.

Pour évaluer la résistance de ces enrobés, deux essais de caractérisation homogènes en traction/compression sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques, un essai de module complexe dans le domaine de comportement viscoélastique linéaire (VEL), afin de déterminer sa performance et ses caractéristiques mécaniques et un essai de fatigue.

Les essais de fatigue ont été effectués selon un mode de sollicitation à déformation imposée, et ce, pour différents niveaux d'amplitudes. Tous les essais ont été réalisés à une seule fréquence de sollicitation de 10Hz et à différentes températures (10, 20 et 30 °C) de manière à analyser son incidence sur la réponse en fatigue de l'enrobé.

Après la présentation et la validation des résultats des essais réalisés, une analyse comparative selon la nature du bitume, l'influence de la température et la dispersion des durées de vie est exposée. Également, une méthode dite DGCB (Département de Génie Civil et Bâtiment) est appliquée pour l'analyse de la fatigue en calculant le taux d'endommagement par cycle suivi d'une étude menée sur les différents critères de rupture (N_f) visant à prédire la durée de vie en fatigue des enrobés bitumineux.

Mots-clés : Matériaux bitumineux, Fatigue, Module complexe, Endommagement.

ÉTUDE DE LA RÉSISTANCE EN FATIGUE POUR LES MATÉRIAUX BITUMINEUX

Radouen TOUHARA

ABSTRACT

The goal of this research program is to evaluate and characterize the fatigue behaviour of two GB20 hot mix asphalt made with two different bitumen. One of them is made in laboratory with a straight-run PG58-28 bitumen, while the second mix was made in an asphalt plant with a PG64-28 bitumen.

Two characterization tests, in homogeneous conditions, done in traction/compression on cylindrical specimens are used in this study. First, a complex modulus test performed in the linear viscoelasticity (LVE) domain is used to characterize the mixes and second, a fatigue test is done to evaluate the mixes performances.

The fatigue tests were done in strain controlled at different amplitude. All fatigue tests were performed at 10Hz, but at different temperatures (10, 20 and 30°C) in order to evaluate the effect of the temperature on the fatigue behaviour of those mixes.

In this document, the results are presented, and the analysis of the results as a function of the grade of bitumen, the tests' temperature and the dispersion of the results is performed. Also, the DGCB method is applied to the fatigue results to calculate the rate of damage per cycle followed by a study of the different failure criteria (N_f) to predict the fatigue life of asphalt mixes.

Keywords: bituminous materials, fatigue, complex modulus, Damage.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 GÉNÉRALITÉS SUR LES ENROBÉS BITUMINEUX	3
1.1 Définition d'une structure de chaussée	3
1.2 Définition des enrobés bitumineux	4
1.3 Constituants des enrobés bitumineux.....	4
1.3.1 Les granulats	4
1.3.2 Les liants hydrocarbonés.....	5
1.4 Propriétés rhéologiques des liants bitumineux	6
1.5 Classification des bitumes.....	7
1.6 Les types d'enrobés bitumineux	7
1.7 Détermination des propriétés mécaniques des matériaux bitumineux.....	8
1.7.1 Classification des essais suivant l'interprétation	8
1.7.1.1 Essais empiriques.....	8
1.7.1.2 Essais de simulation.....	8
1.7.1.3 Essais de détermination.....	9
1.7.2 Classification des essais suivant l'état de contrainte dans l'éprouvette.....	9
1.7.2.1 Les essais homogènes	9
1.7.2.2 Les essais non homogènes	10
1.8 Comportement des enrobés bitumineux dans les structures routières	10
1.8.1 Effet de trafic	10
1.8.2 Effet de la température.....	12
CHAPITRE 2 PHÉNOMÈNE DE LA FATIGUE	13
2.1 Généralités	13
2.1.1 Introduction.....	13
2.1.2 Phénomène de la fatigue	14
2.2 Interprétation d'un essai de fatigue.....	16
2.3 Méthodes d'analyse d'un essai de fatigue	17
2.3.1 Critère de rupture classique	17
2.3.2 Critère de fin de la phase II.....	18
2.3.2.1 Durée de vie établie à partir des courbes d'extensomètres	19
2.3.2.2 Durée de vie établie à partir de l'espace de Black.....	19
2.3.2.3 Synthèse	19
2.3.3 Mode de sollicitation.....	20
2.3.4 Droite de fatigue: droite de Wöhler	21
2.3.5 Dispersion des durées de vie.....	22
2.3.6 Limite d'endurance	23
2.4 Effets des paramètres de formulation sur la fatigue.....	24
2.4.1 Teneur en vides	24
2.4.2 Nature du liant.....	24

CHAPITRE 3	PROGRAMME DE RECHERCHE	25
3.1	Introduction	25
3.2	Phase I : Bilan des aspects de la métrologie	28
3.2.1	Préparation et sélection des éprouvettes	29
3.2.2	Synthèse des étapes essentielles pour la réalisation d'un essai de fatigue	29
3.3	Phase II : Campagne expérimentale.....	30
CHAPITRE 4	MATÉRIAUX UTILISÉS	33
4.1	Matériaux et formulation	33
4.2	Confection des éprouvettes	35
4.2.1	Compactage des plaques	35
4.2.2	Sciage et carottage	35
4.2.3	Compacité des éprouvettes	39
4.2.4	Entreposage des éprouvettes	40
CHAPITRE 5	CAMPAGNE EXPÉRIMENTALE	41
5.1	Programme d'essai.....	41
5.2	Essai de traction/compression sur éprouvette cylindrique.....	42
5.2.1	Principe de l'essai de traction/compression sur éprouvette cylindrique... ..	42
5.2.2	Dispositif expérimental	43
5.2.2.1	Presse hydraulique et système de pilotage et d'acquisition	43
5.2.2.2	Mesures réalisées au cours d'un essai.....	44
5.2.3	Mise en place de l'essai	45
5.2.3.1	Collage des casques	45
5.2.3.2	Mise en température.....	47
5.2.4	Acquisition des données et procédures expérimentales.....	48
5.2.5	Description des essais de caractérisation des enrobés	48
5.2.5.1	Procédure de l'essai de module complexe	48
5.2.5.2	Procédure de l'essai de fatigue	49
CHAPITRE 6	RÉSULTATS DES ESSAIS.....	51
6.1	Présentation des résultats de l'essai de module complexe.....	51
6.1.1	Courbe dans le plan de Cole-Cole	52
6.1.2	Courbe dans l'espace de Black	53
6.1.3	Les courbes maîtresses.....	54
6.1.4	Modélisation du comportement VEL des enrobés bitumineux à l'aide du modèle 2S2P1D	55
6.1.4.1	Présentation du modèle analogique 2S2P1D	55
6.1.4.2	Calage à effectuer pour la détermination des paramètres 2S2P1D	57
6.2	Présentation des résultats des essais de fatigue.....	58
6.3	Exemple du traitement des données.....	60
6.3.1	Traitement des signaux	60
6.3.2	Calcul des paramètres mécaniques	62
6.3.3	Présentation graphique des résultats	64

6.3.3.1	Évolution de la température.....	65
6.3.3.2	Évolution de la norme du module complexe.....	67
6.3.3.3	Détermination de la raideur initiale $ E_0^* $	70
6.3.3.4	Courbes des indices de qualités.....	71
6.3.3.5	Évolution de la déformation.....	73
6.3.3.6	Centre de déformation.....	80
6.3.3.7	Amplitude de contrainte.....	81
6.3.3.8	Centre de contrainte.....	83
6.3.3.9	Déphasage.....	84
6.3.3.10	Énergie dissipée.....	86
6.3.3.11	Présentation dans l'espace de Black.....	88
6.3.3.12	Bilan des critères de rupture.....	89
6.3.4	Validation d'un essai de fatigue.....	90
CHAPITRE 7 ANALYSE DES RÉSULTATS DES ESSAIS DE FATIGUE.....		91
7.1	Comparaison des résultats des essais de fatigue effectués à différents niveaux de déformation.....	91
7.1.1	Comparaison des résultats des essais de fatigue réalisés à 10°C.....	92
7.1.2	Comparaison des résultats des essais de fatigue réalisés à différentes températures.....	97
7.2	Relation entre les durées de vie et l'amplitude de déformation : Droites de fatigue.....	100
7.2.1	Effet du type de bitume.....	103
7.2.1.1	Influence du critère de rupture sur les coefficients de fatigue pour les essais réalisés sur l'enrobé GB20 confectionné avec un bitume standard (PG 58-28).....	103
7.2.1.2	Influence du critère de rupture sur les coefficients de fatigue pour les essais réalisés sur l'enrobé GB20 confectionné avec un bitume modifié PG 64-28.....	104
7.2.1.3	Comparaison entre l'enrobé GB20 confectionné avec un bitume standard PG58-28 et l'enrobé GB20 confectionné avec un bitume polymère PG64-28.....	105
7.2.2	Évolution de la performance en fatigue avec la température.....	109
7.2.2.1	Détermination du coefficient k_3	113
7.3	Dispersion des résultats.....	116
7.4	Prédiction de la durée de vie N_f selon l'approche DGCB.....	118
7.4.1	L'approche DGCB.....	120
7.4.2	Calcul du dommage corrigé, D_{IIIc}	123
7.4.3	Durée de vie selon le critère $N_{fII/III}^{DGCB}$	125
7.4.3.1	Comparaison entre les valeurs de $N_{fII/III}^{DGCB}$ et les durées de vie $N_{fII/III}$	127
CONCLUSION.....		131
ANNEXE I	Détermination de la teneur en vides.....	133

ANNEXE II	Caractéristiques des éprouvettes	135
ANNEXE III	Présentation des résultats de fatigue	139
ANNEXE IV	Prédiction de la durée de vie en fatigue	181
BIBLIOGRAPHIE	183

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 3.1	Illustration des différentes phases composant le programme expérimental.....27
Tableau 3.2	Détails des essais réalisés dans cette campagne expérimentale.....31
Tableau 4.1	Caractéristiques des enrobés bitumineux GB20 testés34
Tableau 5.1	Nombre d’acquisitions en fonction du nombre de cycles appliqués.....50
Tableau 6.1	Caractéristiques des éprouvettes utilisées pour les essais de module complexe51
Tableau 6.2	Constantes du modèle 2S2P1D calibrées.....58
Tableau 6.3	Tableau récapitulatif des essais de fatigue réalisés.....59
Tableau 6.4	La valeur du module initial selon la littérature70
Tableau 6.5	Bilan des valeurs des critères de rupture pour l’éprouvette P3-B2 en mode de déformation (GB20 PG58-28; $T_{\text{consigne}} = 10^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10 \text{ Hz}$; $\epsilon_0 = 120 \mu\text{def}$)89
Tableau 7.1	Résultats des essais de fatigue obtenus.....96
Tableau 7.2	Caractéristiques des droites de fatigue pour les différents essais réalisés.....102
Tableau 7.3	Comparaison entre les valeurs des deux critères de rupture108
Tableau 7.4	Valeurs de k_3116
Tableau 7.5	valeurs de SN118
Tableau 7.6	comparaison entre $N_{f_{II/III}}$ et $N_{f_{II/III}}^{DGC B}$ ($T_{\text{consigne}} = 10^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10 \text{ Hz}$).....128

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1.1	Illustration d'une chaussée bitumineuse au Québec.....	3
Figure 1.2	Classes de comportement du bitume en fonction de la déformation et de la température.....	6
Figure 1.3	Schématisation des sollicitations induites par le trafic	11
Figure 1.4	Problèmes de fatigue suite à l'action répétés du trafic	11
Figure 1.5	Schématisation des sollicitations induites par la température.....	12
Figure 2.1	Types de comportement des matériaux bitumineux	14
Figure 2.2	Illustration de l'évolution de la norme du module complexe $ E^* $ sous sollicitation cyclique suivant un essai en contrôle de déformation sur éprouvette cylindrique soumise à des efforts de traction/compression alternés autour de zéro.....	15
Figure 2.3	Distinction de trois phases différentes dans un essai de fatigue	17
Figure 2.4	Définition du critère classique de fatigue et détermination de la durée de vie.....	18
Figure 2.5	Chemins de sollicitation possibles et courbes enveloppes des cycles réponses obtenus en déformation imposée (a et b) et contrainte imposée (c et d)	21
Figure 2.6	Droite de Wöhler.....	22
Figure 2.7	Limite d'endurance ou limite de fatigue	23
Figure 4.1	Granulométrie des enrobés bitumineux testés	33
Figure 4.2	Compacteur MLPC	35
Figure 4.3	Scie utilisée pour la préparation des prismes pour fins de carottage	36
Figure 4.4	Plan de sciage (A, B, C et D) et de carottage (1, 2,3 et 4)	37
Figure 4.5	Carotteuse et carottes obtenues.....	38

Figure 4.6	Resurfaceuse et éprouvettes obtenues.....	38
Figure 5.1	Principe de sollicitation en traction/compression sur éprouvette cylindrique	42
Figure 5.2	Schéma de la presse hydraulique utilisée pour l'essai de traction/compression	43
Figure 5.3	Vue générale du dispositif expérimental.....	44
Figure 5.4	Dispositif de collage des casques.....	45
Figure 5.5	Montage de l'éprouvette dans l'enceinte thermique	47
Figure 6.1	Courbes isothermes de la norme du module complexe en fonction de la fréquence et de la température pour les deux enrobés testées	52
Figure 6.2	Présentation du module complexe dans le plan de Cole-Cole (GB20 PG58-28/P3-C3 et GB20 PG64-28/P1-D1).....	53
Figure 6.3	Présentation du module complexe dans l'espace de Black (GB20 PG58-28/P3-C3 et GB20 PG64-28/P1-D1)	54
Figure 6.4	Modélisation des courbes maîtresses (GB20 PG58-28/P3-C3 et GB20 PG64-28/P1-D1)	55
Figure 6.5	Représentation du modèle 2S2P1D	55
Figure 6.6	Fonction des chacun des paramètres.....	57
Figure 6.7	Signaux de contrainte et de déformation approximés pour les 110 ^{ème} et 111 ^{ème} cycles de l'essai P3-B2.....	61
Figure 6.8	Évolution de la température à la surface de l'éprouvette en fonction du nombre de cycles pour l'essai P3-B2 en mode de déformation (GB20 PG58-28; $T_{\text{consigne}} = 10^{\circ}\text{C}$; $F_r = 10 \text{ Hz}$; $\epsilon_0 = 120 \mu\text{def}$).....	66
Figure 6.9	Évolution de la température à la surface de l'éprouvette en fonction du nombre de cycles pour l'essai P2- D3, sollicité en mode de contrainte (GB20 PG64-28; $T_{\text{consigne}} = 10^{\circ}\text{C}$; $F_r = 10 \text{ Hz}$; $\sigma_0 = 0,9 \text{ MPa}$).....	67
Figure 6.10	Évolution de la raideur en fonction du nombre de cycles pour l'éprouvette P3-B2, testée en mode de déformation (GB20 PG58-28; $T_{\text{consigne}} = 10^{\circ}\text{C}$; $F_r = 10 \text{ Hz}$; $\epsilon_0 = 120 \mu\text{def}$)	68

Figure 6.11	Évolution de la raideur en fonction du nombre de cycles pour l'essai P2-D3 en mode de contrainte (GB20 PG64-28; $T_{\text{consigne}} = 10^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$; $\sigma_0 = 0,9\text{ MPa}$).....	68
Figure 6.12	Évolution de la raideur en fonction du nombre de cycles pour l'essai P3-C4 en mode de déformation (GB20 PG58-28; $T_{\text{consigne}} = 10^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$; $\epsilon_0 = 90\ \mu\text{def}$).....	69
Figure 6.13	Évolution des indices de qualité en fonction du nombre de cycles pour l'essai P3-B2 en mode de déformation (GB20 PG58-28; $T_{\text{consigne}} = 10^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$; $\epsilon_0 = 120\ \mu\text{def}$)	72
Figure 6.14	Évolution des indices de qualité en fonction du nombre de cycles pour l'essai P2-D3 en mode de contrainte (GB20 PG64-28; $T_{\text{consigne}} = 10^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$; $\sigma_0 = 0,9\text{ MPa}$).....	73
Figure 6.15	Évolution de l'amplitude des déformations en fonction du nombre de cycles pour l'essai P3-B2 en mode de déformation (GB20 PG58-28; $T_{\text{consigne}} = 10^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$; $\epsilon_0 = 120\ \mu\text{def}$)	74
Figure 6.16	Évolution de l'amplitude des déformations en fonction du nombre de cycles pour l'essai P2-D3 en mode de contrainte (GB20 PG64-28; $T_{\text{consigne}} = 10^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$; $\sigma_0 = 0,9\text{ MPa}$)	74
Figure 6.17	Écarts moyens de la déformation en fonction du nombre de cycles pour l'essai P3-B2 en mode de déformation (GB20 PG58-28; $T_{\text{consigne}} = 10^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$; $\epsilon_0 = 120\ \mu\text{def}$).....	77
Figure 6.18	Écarts moyens de la déformation en fonction du nombre de cycles pour l'essai P2-D3 en mode de contrainte (GB20 PG64-28; $T_{\text{consigne}} = 10^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$; $\sigma_0 = 0,9\text{ MPa}$).....	77
Figure 6.19	Illustration de l'effet d'accordéon observé lors de l'essai P2-C1 en contrôle de déformation (GB20 PG58-28; $T_{\text{consigne}} = 30^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$; $\epsilon_0 = 350\ \mu\text{def}$)	79
Figure 6.20	Déphasage entre les signaux de déformation observé lors de l'essai P2-C1 en contrôle de déformation (GB20 PG58-28; $T_{\text{consigne}} = 30^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$; $\epsilon_0 = 350\ \mu\text{def}$).....	79
Figure 6.21	Évolution du centre de la déformation en fonction du nombre de cycles pour l'essai P3-B2 en mode de déformation (GB20 PG58-28; $T_{\text{consigne}} = 10^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$; $\epsilon_0 = 120\ \mu\text{def}$)	80

Figure 6.22	Évolution du centre de la déformation en fonction du nombre de cycles pour l'essai P2-D3 en mode de contrainte (GB20 PG64-28; $T_{\text{consigne}} = 10^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$; $\sigma_0 = 0,9\text{ MPa}$).....	81
Figure 6.23	Évolution de l'amplitude du signal de contrainte en fonction du nombre de cycles pour l'essai P3-B2 en mode de déformation (GB20 PG58-28; $T_{\text{consigne}} = 10^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$; $\epsilon_0 = 120\ \mu\text{def}$)	82
Figure 6.24	Évolution de l'amplitude du signal de contrainte en fonction du nombre de cycles pour l'essai P2-D3 en mode de contrainte (GB20 PG64-28; $T_{\text{consigne}} = 10^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$; $\sigma_0 = 0,9\text{ MPa}$)	82
Figure 6.25	Évolution de l'amplitude du signal de contrainte en fonction du nombre de cycles pour l'essai P3-B2 en mode de déformation (GB20 PG58-28; $T_{\text{consigne}} = 10^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$; $\epsilon_0 = 120\ \mu\text{def}$)	83
Figure 6.26	Évolution de l'amplitude du signal de contrainte en fonction du nombre de cycles pour l'essai P2-D3 en mode de contrainte (GB20 PG64-28; $T_{\text{consigne}} = 10^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$; $\sigma_0 = 0,9\text{ MPa}$)	84
Figure 6.27	Évolution de l'angle de phase en fonction du nombre de cycles pour l'essai P3-B2 en mode de déformation (GB20 PG58-28; $T_{\text{consigne}} = 10^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$; $\epsilon_0 = 120\ \mu\text{def}$).....	85
Figure 6.28	Évolution de l'angle de phase en fonction du nombre de cycles pour l'essai P2-D3 en mode de contrainte (GB20 PG64-28; $T_{\text{consigne}} = 10^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$; $\sigma_0 = 0,9\text{ MPa}$).....	85
Figure 6.29	Évolution de l'énergie dissipée en fonction du nombre de cycles pour l'essai P3-B2 en mode de déformation (GB20 PG58-28; $T_{\text{consigne}} = 10^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$; $\epsilon_0 = 120\ \mu\text{def}$).....	87
Figure 6.30	Évolution de l'énergie dissipée en fonction du nombre de cycles pour l'essai P2-D3 en mode de contrainte (GB20 PG64-28; $T_{\text{consigne}} = 10^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$; $\sigma_0 = 0,9\text{ MPa}$).....	87
Figure 6.31	Présentation dans l'espace de Black pour l'essai P3-B2 en mode de déformation (GB20 PG58-28; $T_{\text{consigne}} = 10^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$; $\epsilon_0 = 120\ \mu\text{def}$).....	88
Figure 6.32	Présentation dans l'espace de Black pour l'essai P2-D3 en mode de contrainte (GB20 PG64-28; $T_{\text{consigne}} = 10^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$; $\sigma_0 = 0,9\text{ MPa}$).....	89

Figure 7.1	Évolution du rapport $ E^* / E_0^* $ en fonction du nombre de cycles à différents niveaux de déformation pour les deux enrobés (a) GB20/PG58-28 (b) GB20/PG64-28 à 10°C	92
Figure 7.2	Comparaison des raideurs initiales $ E_0^* $ pour les essais réalisés à 10°C et 10 Hz.....	97
Figure 7.3	Évolution du rapport $ E^* / E_0^* $ en fonction du nombre de cycles à différents niveaux de déformation pour l'enrobé GB20 PG64-28 à (a) 10°C, (b) 20°C et (c) 30°C.....	98
Figure 7.4	Évolution de la raideur en fonction de la température GB20 (PG 64-28)	99
Figure 7.5	Courbe de Wöhler dans le domaine $\log N_f$ vs $\log \epsilon_0$ (m/m)	101
Figure 7.6	Durée de vie de l'enrobé GB20 (PG58-28) testé à 10°C et 10 Hz déterminées avec (a) le critère classique et (b) le critère de la phase II/III et les droites de régression correspondantes dans les axes logarithmiques $\log(N)$ et $\log(\epsilon)$	103
Figure 7.7	Durée de vie de l'enrobé GB20 (PG64-28) testé à 10°C et 10 Hz déterminées avec (a) le critère classique et (b) le critère de la phase II/III et les droites de régression correspondantes dans les axes logarithmiques $\log(N)$ et $\log(\epsilon)$	105
Figure 7.8	Durées de vie déterminées par le critère classique ($N_{f50\%}$) pour deux enrobés GB20 PG58-28 et PG64-28 à 10°C et 10 Hz.	106
Figure 7.9	Durées de vie déterminées par le critère de transition de phase ($N_{II/III}$) pour deux enrobés GB20 avec PG58-28 et PG64-28 à 10°C et 10 Hz.....	107
Figure 7.10	Schéma illustrant l'effet de la température (θ_1 , θ_2 et θ_3) sur la durée de vie en fatigue mesurée en laboratoire en condition isotherme et suivant une fréquence de sollicitation donnée.....	109
Figure 7.11	Durées de vie de l'enrobé GB20 PG64-28 testé à 20°C et 10 Hz déterminées avec (a) le critère classique et (b) le critère de la phase II/III et les droites de régression correspondantes dans les axes logarithmiques $\log N$ et $\log \epsilon$	110
Figure 7.12	Durées de vie de l'enrobé GB20 PG64-28 testé à 30°C et 10 Hz déterminées avec (a) le critère classique et (b) le critère de la phase II/III et les droites de régression correspondantes dans les axes logarithmiques $\log N$ et $\log \epsilon$	111

Figure 7.13	Durées de vie déterminées par le critère classique pour un enrobé	112
Figure 7.14	Durées de vie déterminées par le critère de transition de phase II/III pour un enrobé GB20 PG 64-28 testé à 10, 20 et 30°C et 10 Hz	112
Figure 7.15	relation entre le coefficient c_1 , θ_1 et la norme du module complexe à la température considéré ($ E_0^* $)	114
Figure 7.16	Relation entre le log c_1 et le log $ E^* $ déterminé par le critère classique ($N_{f50\%}$) pour un enrobé GB20 PG 64-28 testé à 10, 20 et 30°C et 10 Hz.....	115
Figure 7.17	Relation entre le log c_1 et le log $ E^* $ déterminé par le critère de transition de phase II/III pour un enrobé GB20 PG 64-28 testé à 10, 20 et 30°C et 10 Hz.....	115
Figure 7.18	Dispersion des durées de vie pour l'enrobé bitumineux GB20 PG58-28 testé à 10°C et 10 Hz.....	117
Figure 7.19	Évolution du module de rigidité et de l'énergie dissipée en fonction du nombre de cycles de sollicitation dans le cadre d'un essai de fatigue en contrôle de déplacement (10°C; 10 Hz).....	121
Figure 7.20	Valeurs du dommage à la transition entre la phase II et III pour les tests en fatigue de tension/compression à déformation imposée : D_{III} non corrigé et D_{IIIc} corrigé des effets biaisant.....	123
Figure 7.21	Valeurs du dommage à la transition entre la phase II et III pour les tests en fatigue de tension/compression à déformation imposée : D_{III} non corrigé et D_{IIIc} corrigé des effets biaisant.....	125
Figure 7.22	Prédiction de la durée de vie en fatigue selon l'approche DGCB	126
Figure 7.23	Durées de vie des enrobés déterminées avec le critère phase II/III, le critère DGCB et les droites de régression correspondantes dans les axes logarithmiques log N et log ϵ testé à 10°C et 10 Hz (a) GB20 PG58-28 (b) GB20 PG64-28	127

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

%	Pourcentage
Σ	Sommation d'élément
§	Section
©	<i>Copyright</i>
°C	Degré Celsius
A	Amplitude du signal
a_F	Pente de fatigue
a_T	Facteur de translation dans l'essai de module complexe
a_T	Pente du module de l'essai
a_w	Pente de l'énergie dissipée de l'essai
b	Pente de la droite de fatigue
C_i	Coefficient de correction
c_1	Coefficient correspondant à la durée de vie du matériau pour une amplitude de déformation imposée de 1 m/m, à une température et une fréquence données.
c_2	Coefficient lié à la pente de la droite de fatigue pour un matériau donné
cm	Centimètre
D	Diamètre
D	Dommages
D_{III}	Dommages au début de la phase III
D_{IIIc}	Dommages au début de la phase III corrigés
DGCB	Département de génie civil et bâtiment
d_{mb}	Densité du mélange brut
d_{mm}	Densité maximale du mélange
E	Module élastique dû au chargement
E^*	Module complexe
E_0	Module initial
E_{00i}	Module initial de l'intervalle choisi extrapolé au premier cycle
E_{III}	Module au début de la phase III
EB	Enrobé bitumineux

XXIV

E_F	Module de fatigue
E_r	Erreur relative
E_N	Norme du module complexe du matériau au cycle N
ENTPE	École nationale des travaux publics de l'état
ÉTS	École de technologie supérieure
e	Épaisseur
F	Force horizontale
Fr	Fréquence
$G_{\text{mesuré}}$	Grandeur du signal mesuré
$G_{\text{calculé}}$	Grandeur du signal calculé
g	Gramme
GB	Grave bitume
H	Hauteur
Hz	Hertz
IQ	Indice de qualité
i	Période de calcul
Kg	Kilogramme
Km	Kilomètre
KN	Kilo Newton
L	Longueur
LC	Laboratoire des Chaussées du MTQ
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LCMB	Laboratoire sur les Chaussées et les Matériaux Bitumineux
l	Largeur
MLPC	Matériau du Laboratoire des Ponts et Chaussées
MMC	Mécanique des milieux continus
Moy	Moyenne
MPa	Méga Pascal
MR	Matériaux recyclés
MTQ	Ministère des Transports du Québec

MTS	<i>Materials Testing System</i>
m	Mètre
mm	Millimètre
N	Nombre de cycles
N	Nombre de giration
N_f	Nombre de cycle à la rupture
$N_{f50\%}$	Nombre de cycle à la moitié du module initial
$N_{II/III}$	Nombre de cycle au point de transition entre les phases II et III
N_{fDGCB}	Nombre de cycle à la rupture corrigé par la méthode DGCB
NQ	Normalisation Québec
n	Nombre de point analysés
n/d	Non déterminé
Pa	Pascal
PCG	Presse à cisaillement giratoire
PETT	Principe d'Équivalent Temps-Température
PG	Performance grade
p	Période de calcul
p	Pression moyenne
p.	Page
R^2	Coefficient de détermination
S_0	Section effective
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
SN	Écart-type
SETRA	Service d'études sur les Transports, les routes et leurs aménagements
STD	Standard
s	Seconde
T°	Température
TG	Total granulométrique
T_g	Température de transition
t	Temps de sollicitation

u	Déplacement du piston de la presse
V_{be}	Volume de bitume effectif
VAM	Vides comblés par le bitume
VCB	Vides comblés par le bitume
VEL	Viscoélastique linéaire
W_d	Énergie dissipée par cycle de chargement sinusoïdal
ε	Déformation
ε_0	Déformation initiale
ε_6	Déformation à 1 million de cycles
ε_A	Amplitude du signal de déformation
ε_{i0}	Valeur moyenne de la déformation
ε_{iA}	Amplitude des signaux de déformation pour les trois extensomètres
θ	Température
σ	Contrainte
σ_0	Contrainte initiale
σ_A	Amplitude du signal de contrainte
ν	Coefficient de poisson
φ_E	Angle de déphasage
φ_ε	Angle de phase du signal de la déformation
$\varphi_{\varepsilon i}$	Angle de phase du signal de la déformation pour les trois extensomètres
φ_σ	Angle de phase du signal de contrainte
μ_{def}	microdéformation
μm	micron
ω	Pulsation

INTRODUCTION

Au Québec, 90 % du réseau routier est composé de chaussées bitumineuses, avec une durée de vie moyenne de l'ordre de 15 à 20 ans (Meunier 2012). Les dépenses annuelles d'entretien, de réhabilitation et de construction routière avoisinent le milliard de dollars. Le budget du ministère des Transports du Québec (MTQ) en investissements sur les infrastructures routières en 2009-2010 s'établit à près de 3,7 milliards (Perraton *et al.* 2011).

Le phénomène de fatigue est considéré comme le phénomène d'endommagement prépondérant à température «moyenne» dans les structures de chaussées bitumineuses (Di Benedetto *et al.* 2005). Il est engendré par la répétition de sollicitations dont l'amplitude reste constamment inférieure à celle entraînant la rupture instantanée du matériau.

Au cours des cinq dernières années, le **Laboratoire sur les Chaussées et Matériaux Bitumineux**, le LCMB, a été confronté à des écarts significatifs entre les résultats d'essais de fatigue réalisés dans ses laboratoires. Le travail de ce mémoire a été réalisé de manière à cerner une meilleure compréhension des éléments qui gouvernent la performance en fatigue des matériaux bitumineux testés en laboratoire.

Outre cette introduction et une conclusion générale, ce mémoire comporte 7 chapitres.

La synthèse de la revue de la documentation est présentée dans les chapitres 1 et 2. Le premier est consacré à des généralités sur les matériaux bitumineux et le deuxième décrit le phénomène de la fatigue des enrobés bitumineux.

Dans la perspective de définir les étapes essentielles à une réalisation rigoureuse d'un essai de fatigue en laboratoire, au traitement des résultats et à leur exploitation, la méthodologie du programme de recherche est présentée au chapitre 3.

Cette méthodologie a été élaborée en deux phases : 1) les chapitres 4 et 5 décrivent respectivement le bilan des aspects de métrologie vis-à-vis la préparation et la réalisation des essais du module complexe et de fatigue, et 2) les chapitres 6 et 7 sont consacrés à la présentation et l'interprétation des résultats des essais issus de la campagne expérimentale suivies d'une analyse comparative selon la nature du bitume, l'influence de la température et la dispersion des durées de vie. Également, la méthode DGCB est appliquée pour l'analyse de la fatigue en calculant le taux d'endommagement par cycle suivi d'une étude menée sur les différents critères visant à prédire la durée de vie en fatigue des enrobés bitumineux.

CHAPITRE 1

GÉNÉRALITÉS SUR LES ENROBÉS BITUMINEUX

1.1 Définition d'une structure de chaussée

Le travail de recherche mené dans le cadre de ce mémoire porte sur la fatigue des matériaux bitumineux, caractéristique fondamentale dans la perspective du dimensionnement d'une chaussée bitumineuse. Dans ce contexte, il convient dans un premier temps de bien définir les aspects se rapportant à une structure de chaussée bitumineuse. Dans un deuxième temps, ce chapitre vise à définir les enrobés bitumineux et leurs constituants ainsi que la détermination des propriétés mécaniques et le comportement de ces dernières dans les structures routières.

La Figure 1.1 illustre les différentes couches qui constituent une structure d'une chaussée bitumineuse conventionnelle selon les termes utilisés au Québec.

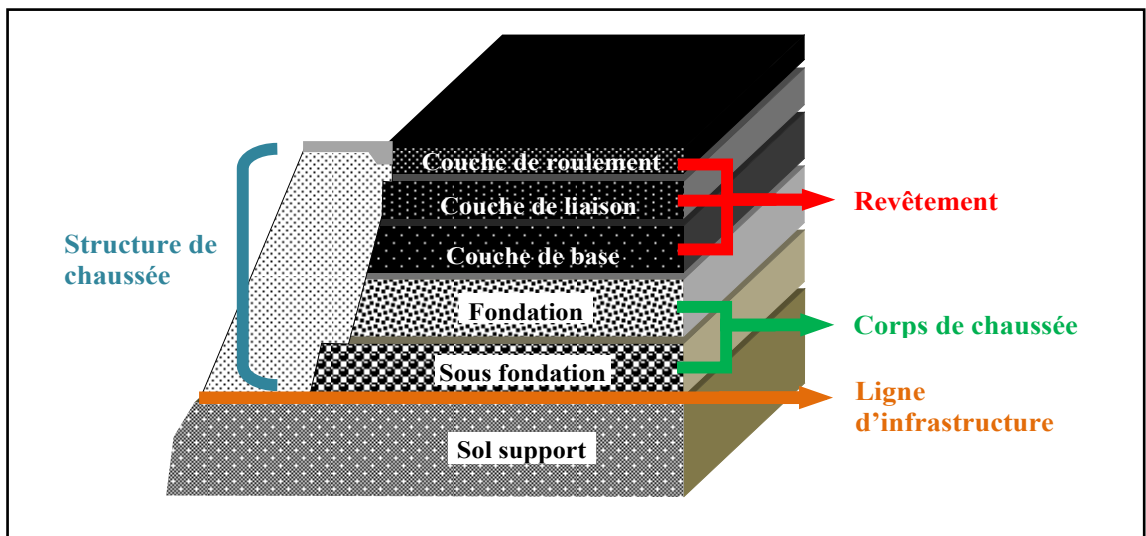


Figure 1.1 Illustration d'une chaussée bitumineuse au Québec
Adaptée de Meunier (2012, p. 1)

1.2 Définition des enrobés bitumineux

L'enrobé bitumineux est un matériau composite complexe constitué d'un mélange, dans une proportion choisie, de granulats (graves, sable et filler) et d'un liant hydrocarboné (bitume). Dans ce mélange, le liant hydrocarboné assure la cohésion du matériau à travers sa répartition en film mince autour des granulats, tandis que le squelette minéral (les granulats) assure la rigidité de l'ensemble (De La Roche 1996).

1.3 Constituants des enrobés bitumineux

1.3.1 Les granulats

Les propriétés mécaniques d'un enrobé bitumineux dépendent en grande partie de l'agencement granulaire et de la qualité des granulats, puisque ces derniers sont ses principaux composants et constituent en moyenne pour 95 % de sa masse (80-85 % du volume) (Di Benedetto *et al.* 2005).

Les granulats sont des particules (grains) qui peuvent provenir de roches meubles, consolidées ou de matériaux recyclés (MR). Ils sont de dimension, de forme et de nature diverses. Chaque particule peut être composée d'un ou de plusieurs minéraux (matière cristallisée), de matière vitrifiée ou d'un mélange de matière cristallisée et vitrifiée, d'agrégation de particules fragmentées liées par un liant hydrocarboné ou par un liant hydraulique (Perraton *et al.* 2010).

Les granulats sont définis suivant leur granularité (répartition dimensionnelle des particules) et suivant différentes classes granulaires (d/D). Ils sont classés selon leur résistance mécanique déterminée à partir des essais normalisés (Fragmentation, usure, polissage) et selon leurs caractéristiques liées à la production (angularité, propreté). Au Québec, les granulats sont classés suivant la norme NQ 2560-114 (Granulats) (MTQ 2011).

1.3.2 Les liants hydrocarbonés

Le bitume est une substance noire principalement composée d'un mélange d'hydrocarbures. Il est imperméable, très visqueux (à la température ambiante) et possède un grand pouvoir agglutinant (Perraton *et al.* 2010).

Le bitume se compose chimiquement de cinq éléments principaux, qui se combinent dans des proportions assez bien définies; soit : le carbone (82 à 85 %), l'hydrogène (8 à 11 %), l'oxygène, le soufre et l'azote (2 à 3 %) (Lelièvre 1994).

D'après Lelièvre (1994), le bitume se constitue physiquement de deux grandes familles :

- les asphaltènes : produit solide apportant au bitume sa cohésion et sa dureté et constituant entre 5 et 20 % du bitume. Ils représentent la fraction précipitée et ils sont constitués par des corps de poids moléculaires très élevés se présentant sous la forme d'une substance solide et noirâtre ;
- les maltènes : produit huileux (molécules moins grosses) dans lequel baignent les asphaltènes. Ils sont la partie dissoute et ils ont l'aspect d'une huile visqueuse de couleur foncée. Ils sont composés de : résines, huiles aromatiques et huiles saturées.

Globalement, on distingue principalement trois grandes familles de liants hydrocarbonés : 1) les liants naturels, 2) les goudrons et 3) les bitumes routiers. Ces derniers sont produits en raffinerie à partir de la distillation fractionnée de certains pétroles bruts (Lelièvre 1994).

La section 1.4 traitera les principales propriétés rhéologiques du bitume, étant donné que ce dernier joue un rôle déterminant vis-à-vis la rhéologie et notamment la résistance à la fatigue de l'enrobé bitumineux.

1.4 Propriétés rhéologiques des liants bitumineux

Les propriétés mécaniques du bitume varient fortement en fonction de la température, c'est un matériau dit thermosensible présentant une « susceptibilité thermique », et dont les caractéristiques changent en fonction de la vitesse de sollicitation de charge présentant ainsi une « susceptibilité cinétique » (Di Benedetto *et al* 2005). Également, on distingue différents types de comportement mécanique du bitume suivant qu'il soit sollicité en petite déformation (10^{-4}) ou en grande déformation (Olard 2003). La Figure 1.2 montre les principaux types de comportement mécanique du bitume selon l'amplitude de la déformation et selon la température.

Notamment, en petite déformation le bitume présente deux principaux types de comportements mécaniques : 1) linéaire élastique (aux basses températures $< T_g$), et 2) viscoélastique linéaire aux températures plus élevées. Notons également que sous la température de transition vitreuse (T_g) le matériau est fragile et qu'au-dessus, il est plutôt ductile. Par ailleurs, à grandes déformations, et à des températures de services, le bitume présente un comportement linéaire (Olard 2003).

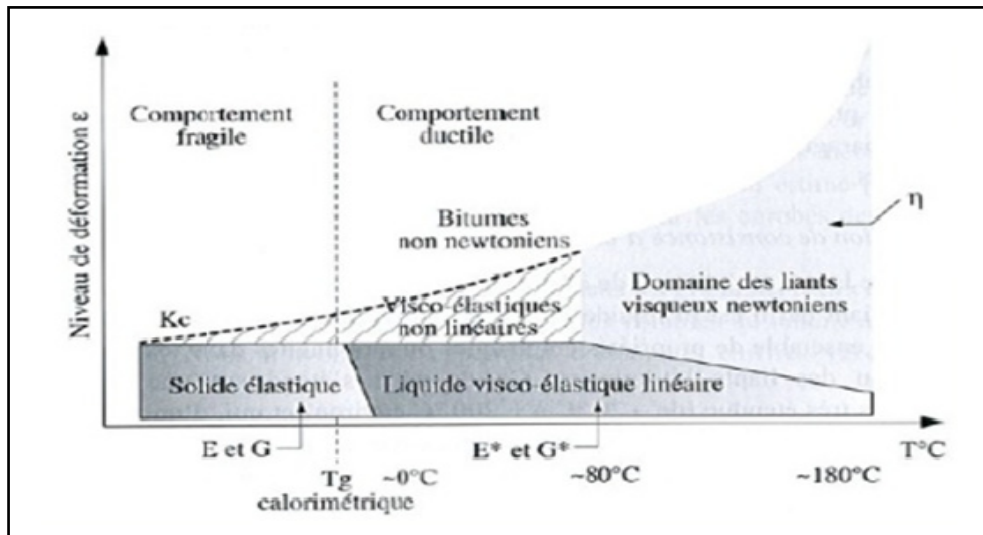


Figure 1.2 Classes de comportement du bitume en fonction de la déformation et de la température
Tirée d'Olard (2003, p. 25)

1.5 Classification des bitumes

Pour classifier les bitumes, on cherche à quantifier sa cohésion suivant des températures de référence (méthode européenne) ou, autrement, à déterminer les plages des températures pour des niveaux de cohésion de références (méthode SHRP «*Strategic Highway Research Program*»).

Pour les deux approches, les propriétés du bitume seront établies suivant des stades de conditionnement qui auront pour objectif de simuler l'évolution potentielle de la rhéologie du bitume en cours de mise en œuvre et en service.

1.6 Les types d'enrobés bitumineux

Il existe plusieurs types d'enrobés suivant les applications projetées. Le MTQ donne les différentes formulations établies selon la norme LC 4202 (Enrobés à chaud formulés selon la méthode de formulation du laboratoire des chaussées). La norme donne, pour une famille d'enrobé donné, les exigences quant à la classe de bitume (PG), la granularité et le volume de bitume effectif ciblé, lesquelles étant contraintes à des spécifications de performance liées à la mise en place (aptitude au compactage : PCG), à la stabilité (orniérage) et à la durabilité (résistance à l'eau).

Dans le cadre du travail de ce mémoire, essentiellement, les enrobés désignés graves bitumes (GB) seront caractérisés, puisqu'ils sont les plus importants vis-à-vis la fatigue en composant les couches de base du revêtement d'une chaussée bitumineuse.

Les graves bitumes

Les graves bitumes (GB) sont utilisés en une ou plusieurs couches en couche de base dans les chaussées bitumineuses, sur des épaisseurs variant entre 60 et 150 mm. La grosseur nominale maximale des graves bitumes est généralement comprise entre 20 à 28 mm et la teneur en bitume est relativement faible (de 3,0 à 4,5 % de la masse totale).

1.7 Détermination des propriétés mécaniques des matériaux bitumineux

Les essais de caractérisation des propriétés mécaniques des enrobés sont nombreux et divers. Il est néanmoins possible de distinguer deux approches de classification. Une première classification, selon Bonnot (Baaj 2002), qui distingue trois grandes catégories d'essai, lesquelles sont liées à l'interprétation de l'essai. Une seconde classification, proposée par Di Benedetto (1990), introduit deux catégories d'essai définies selon la nature du champ de contraintes au sein de l'éprouvette

1.7.1 Classification des essais suivant l'interprétation

Dans l'ensemble, trois catégories d'essai sont proposées pour départager les différents essais mécaniques utilisés pour caractériser le comportement mécanique d'un enrobé bitumineux, soit : 1) essais empiriques, 2) essais de simulation et 3) essais de détermination.

1.7.1.1 Essais empiriques

Le mode de sollicitation dans les essais empiriques est très différent de celui existant dans la chaussée. Ces essais ne permettent pas de déterminer une propriété intrinsèque du matériau et la relation entre la propriété d'usage et le résultat de l'essai ne peut pas être déterminée de façon théorique. Seules l'expérience et les comparaisons des nombreux cas permettent de tirer des conclusions (Neifar 1997). Un bon exemple d'un essai empirique est l'essai Marshall.

1.7.1.2 Essais de simulation

Cette catégorie d'essai consiste à utiliser des sollicitations les plus proches possible, bien qu'à échelle réduite, de celles existantes dans la chaussée. Ces essais restent néanmoins empiriques, car les sollicitations appliquées sont suffisamment complexes, notamment quant aux conditions limites, de sorte qu'il n'est pas possible d'en déduire de façon théorique la

réponse aux sollicitations réelles (Baaj 2002). Un bon exemple d'essai faisant partie de cette catégorie est l'essai d'orniérage.

1.7.1.3 Essais de détermination

Cette troisième catégorie d'essai intègre les essais dont les résultats obtenus permettent de passer, par une méthode théorique, à la propriété d'usage désirée. Cela nécessite une modélisation de la structure de la chaussée, et la connaissance des lois de comportement de l'enrobé. Ces essais emploient des sollicitations simples, parfaitement définies, et permettent de déterminer les propriétés intrinsèques des matériaux, c'est-à-dire indépendantes des conditions d'essai (Olard 2003).

1.7.2 Classification des essais suivant l'état de contrainte dans l'éprouvette

Di Benedetto (1990) propose de classer les essais mécaniques de laboratoire utilisés pour les matériaux bitumineux en deux catégories : 1) les essais homogènes et 2) les essais non homogènes.

1.7.2.1 Les essais homogènes

Les essais homogènes permettent d'avoir accès directement aux contraintes et déformations dans l'éprouvette, donc à la loi de comportement (Baaj 2002). Ils sont les seuls à fournir des éléments directement exploitables pour la détermination de la loi de comportement du matériau testé (Neifar 1997). L'essai de traction/compression simple sur éprouvette cylindrique est un bon exemple de ce type d'essai.

1.7.2.2 Les essais non homogènes

Les essais non homogènes peuvent être utilisés dans le cas où le comportement du matériau est simple (élasticité linéaire isotrope ou viscoélasticité linéaire isotrope) (Olard 2003). Selon Neifar (1997), ils correspondent à des essais de structure et les résultats de ces essais sont interprétés de manière totalement empirique ou déterminent une caractéristique de l'ouvrage grâce à l'utilisation de lois de similitude (modèle réduit). Cette détermination s'effectue, en général, en considérant une propriété d'usage donnée (Baaj 2002). L'essai de flexion 2 points est un bon exemple de ce type d'essai.

1.8 Comportement des enrobés bitumineux dans les structures routières

Les structures routières sont soumises à plusieurs sollicitations (Di Benedetto *et al.* 2005). Les principales sont liées aux contraintes imposées par le passage des véhicules (effet de la circulation) et aux effets générés par les changements climatiques (variations de température). Il s'agit sans contredit des deux effets les plus déterminants vis-à-vis la dégradation des chaussées bitumineuses en service.

D'autres effets, de moindre importance, sont : les dégradations liées à l'effet de l'eau ou du vieillissement des matériaux. Les paragraphes suivants traitent globalement des deux principaux effets : le trafic et la température.

1.8.1 Effet de trafic

Chaque couche de chaussée subit des écrasements et des flexions sous l'effet du trafic (Figure 1.3). Les amplitudes des cycles de chargement sont faibles, produisant des déformations de l'ordre de 10^{-4} (Di Benedetto *et al.* 2005). Le calcul des efforts et des déformations qui s'effectue traditionnellement en considérant un système multicouche élastique linéaire isotrope nécessite, en premier lieu, la connaissance du module de Young et du coefficient de Poisson des matériaux (Olard 2003).

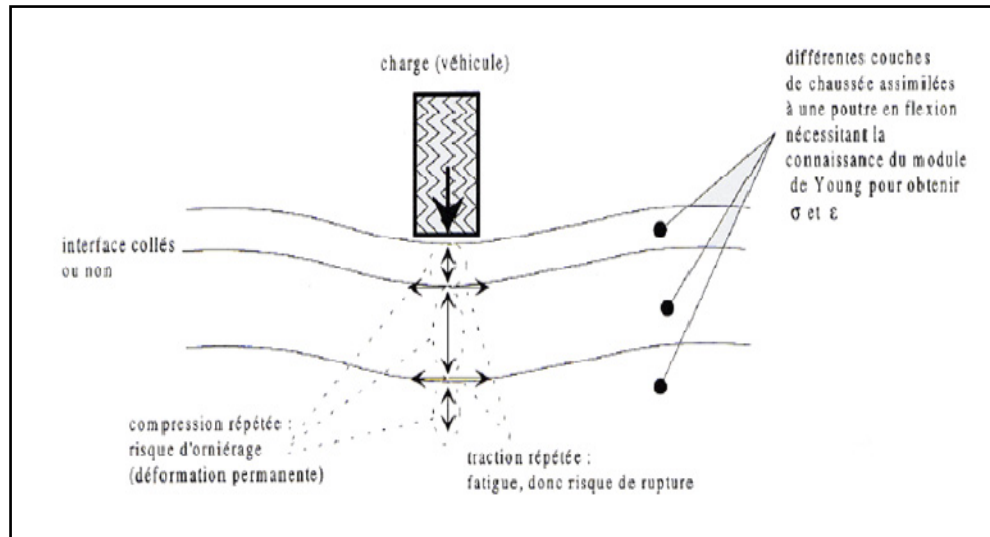


Figure 1.3 Schématisation des sollicitations induites par le trafic
Tirée de Baaj (2002, p. 43)

Sous les sollicitations cycliques du trafic, la base des couches du revêtement subit une traction répétée qui peut créer des micros dégradations et entraîner la ruine des couches. Ce phénomène de fatigue peut entraîner des fissures qui remontent au travers le revêtement (Figure 1.4). Dans le même temps, les couches de la partie supérieure du revêtement sont soumises à des efforts de compression répétés qui peuvent entraîner des déformations permanentes induisant un orniérage à la surface de la chaussée (Nguyen 2006).

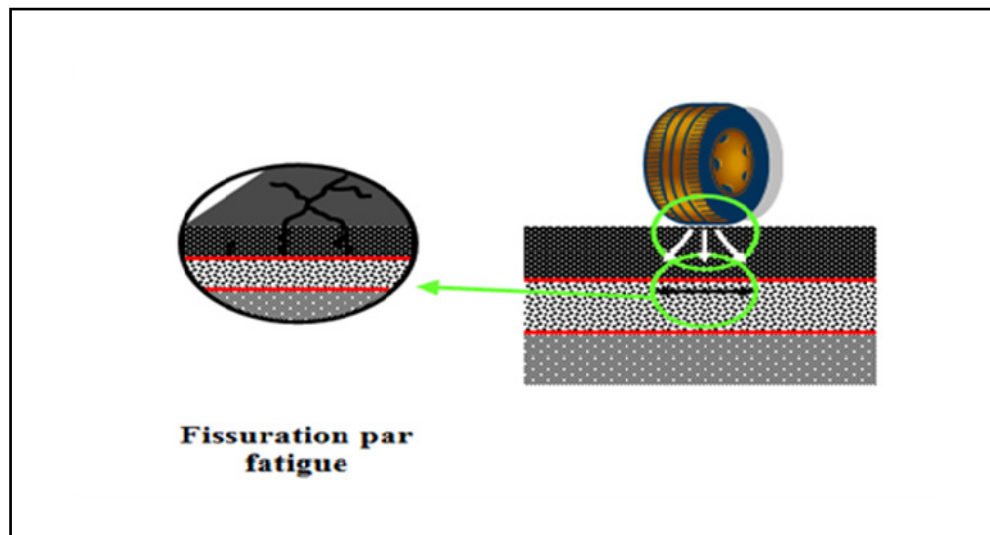


Figure 1.4 Problèmes de fatigue suite à l'action répétés du trafic

1.8.2 Effet de la température

D'après Di Benedetto (1998), outre le vieillissement du matériau, la température a deux effets mécaniques distincts : 1) changement de la raideur des matériaux bitumineux et, 2) apparition de gradients thermiques dans le revêtement. En effet, le comportement mécanique de l'enrobé hérite de celui du bitume, lequel présente des susceptibilités thermiques (thermosensible) et cinétiques (une réponse qui dépend de la vitesse de la sollicitation). À température basse, le matériau bitumineux est rigide et fragile tandis qu'à haute température la rigidité de l'enrobé chute et sa ductilité augmente.

Par ailleurs, les gradients thermiques dans le revêtement dus à la variation de la température ambiante induisent des contraintes et des déformations au sein du matériau en raison des différences des dilatations ou contractions thermiques entre les couches lors des changements de température (Figure 1.5).

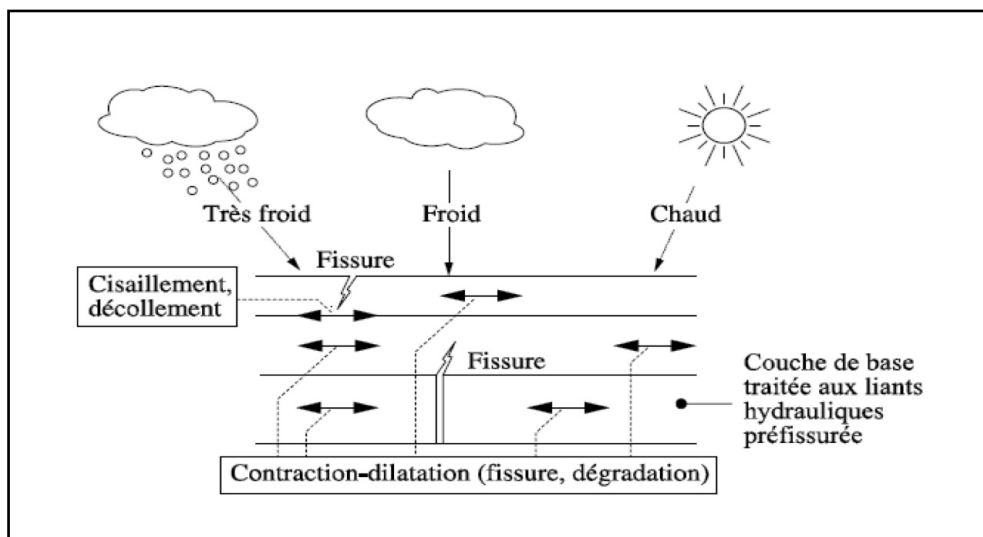


Figure 1.5 Schématisation des sollicitations induites par la température
Tirée de Di Benedetto *et al.* (2005, p. 78)

CHAPITRE 2

PHÉNOMÈNE DE LA FATIGUE

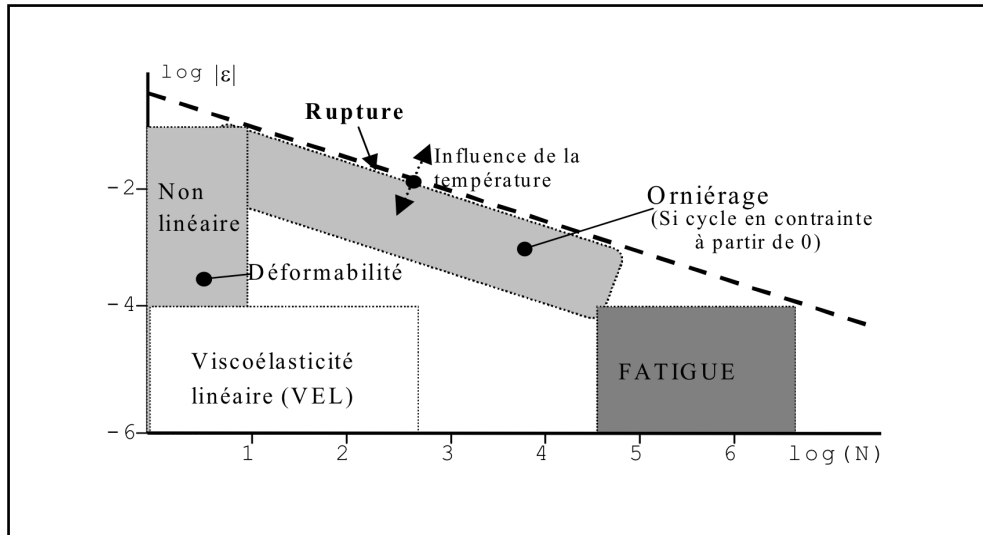
2.1 Généralités

2.1.1 Introduction

Les enrobés bitumineux présentent un comportement thermomécanique complexe. La Figure 2.1 montre qu'il est possible d'identifier quatre types de comportement principaux en considérant l'amplitude de la déformation et le nombre de cycles de chargement appliqué (Di Benedetto 1990), soit :

- sous l'action de déformations imposées de quelques pour cent et pour un faible nombre de chargements et des déformations, l'enrobé présente un comportement fortement non linéaire;
- sous l'action de faibles déformations ($<10^{-4}$) et pour des chargements comprenant quelques centaines de cycles, le comportement de l'enrobé est considéré, en première approximation, comme étant viscoélastique linéaire;
- sous l'action de faibles déformations et suivant un chargement de plusieurs milliers de cycles, l'enrobé s'endommage progressivement en cours de sollicitation, le matériau se fatigue;
- à des amplitudes et des cycles de chargement légèrement inférieurs à ceux entraînant la rupture, il se crée à la surface de l'enrobé une déformation graduelle et permanente. C'est ce que l'on appelle l'orniérage.

La Figure 2.1 fournit un ordre de grandeur des différents domaines de comportement mécanique type pour une température fixée. Les frontières indiquées, pour les différents comportements, peuvent varier sensiblement selon l'enrobé, la température et la direction du chemin de sollicitation (Di Benedetto *et al.* 2005).



2.1.2 Phénomène de la fatigue

Le travail de recherche de ce mémoire se concentre sur le phénomène de la fatigue. La fatigue est l'endommagement engendré par la répétition de sollicitations dont l'amplitude reste constamment inférieure à celle entraînant la rupture instantanée de l'enrobé. Lorsque la rupture se produit après un petit nombre de cycles (par exemple inférieur à 10^4) on l'appelle fatigue oligocyclique (Soltani 1998).

L'endommagement par fatigue correspond à l'apparition progressive de microfissuration au sein du matériau en cours de chargement. Cet endommagement se répartit de manière aléatoire au sein du matériau : on admet que la répartition de cette microfissuration est homogène.

Dans ce contexte, l'endommagement se traduit par une perte progressive de raideur du matériau en cours de sollicitation, et ce, proportionnellement à l'endommagement de sa microstructure. Pour quantifier l'endommagement lié à la fatigue du matériau, on peut ainsi recourir à la notion de milieu continu (MC) et se référer à la mesure d'une propriété globale du matériau, par une mesure à l'échelle macroscopique, notamment par la mesure de la raideur du matériau (module complexe). On a donc recours à la mesure du module complexe en cours d'essai pour suivre l'évolution de l'endommagement par fatigue sous sollicitations mécaniques cycliques.

Généralement, la mesure de l'évolution de la raideur du matériau en cours de sollicitation présente une chute de ce dernier, témoignant en partie du fait que le matériau s'endommage sous sollicitation. La Figure 2.2 montre l'évolution de la raideur du matériau en cours de sollicitations cycliques en imposant ici une déformation constante en cours d'essai. Au fur et à mesure que le matériau s'endommage et qu'apparaissent, au sein de sa microstructure, des microfissures, la section effective (S_0) sur laquelle la force appliquée se manifeste diminue et la force requise pour maintenir la déformation ciblée s'atténue (phase I et II).

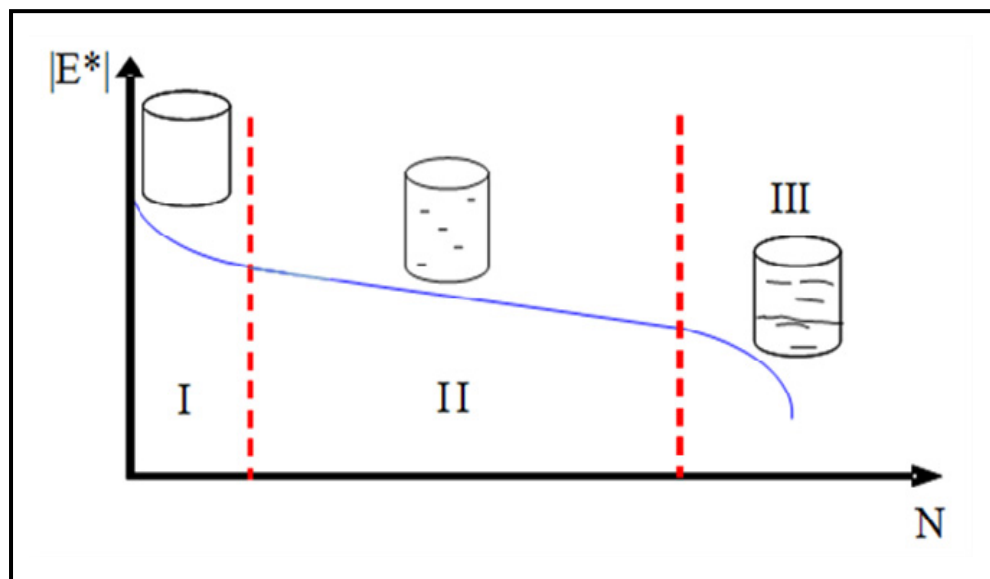


Figure 2.2 Illustration de l'évolution de la norme du module complexe $|E^*|$ sous sollicitation cyclique suivant un essai en contrôle de déformation sur éprouvette cylindrique soumise à des efforts de traction/compression alternés autour de zéro

Par ailleurs, avec le temps et l'addition des sollicitations cycliques, il arrive un point où la densité de microfissures donne lieu à l'apparition d'une macro fissure à laquelle s'associe une chute marquée de la raideur du matériau : c'est le début d'une nouvelle phase, phase III (Figure 2.2). Dès lors, l'évolution de l'endommagement ne peut plus être considérée comme étant un phénomène homogène et la mécanique des milieux continus (MMC) n'est plus applicable.

Pour décrire l'évolution de l'endommagement, il faut alors se référer à des notions liées à la propagation des fissures. Notons que dans un essai de fatigue, on vise essentiellement à déterminer le moment précis où le mode d'endommagement change, c'est-à-dire marquer la transition entre les phases II et III. Un des aspects critiques dans l'évaluation de la résistance en fatigue d'un matériau bitumineux, c'est donc de déterminer avec rigueur le moment précis où la phase III se manifeste, lequel est désigné $N_{II/III}$ (la durée de vie en fatigue de l'éprouvette). Cet aspect sera traité plus en détail à la section 2.3.2.

2.2 Interprétation d'un essai de fatigue

Dans un essai de fatigue, on distingue donc trois phases dans l'évolution de la raideur en fonction du temps ou du nombre de cycles de sollicitation (Figure 2.3) (Baaj 2002), soit :

- la première phase (phase d'adaptation) est marquée par une chute rapide du module. Cette décroissance n'est pas considérée exclusivement liée au phénomène de fatigue. L'échauffement du matériau et la thixotropie jouent des rôles importants. Ce sont des effets biaisant. La perte de module liée à ces phénomènes « parasites » est quasiment réversible lorsque l'essai de fatigue est arrêté;
- la deuxième phase est caractérisée par une décroissance du module plus modérée et quasi linéaire. Le rôle de la fatigue sur la chute de module est alors prédominant. Bien que l'influence des phénomènes biaisant (échauffement et thixotropie) soit faible pendant cette phase, ils doivent néanmoins être considérés;

- lors de la troisième phase, la valeur du module subit de nouveau une chute rapide. Elle correspond à l'apparition de macro fissures localisées par accumulation des microfissures en cours des phases I et II.

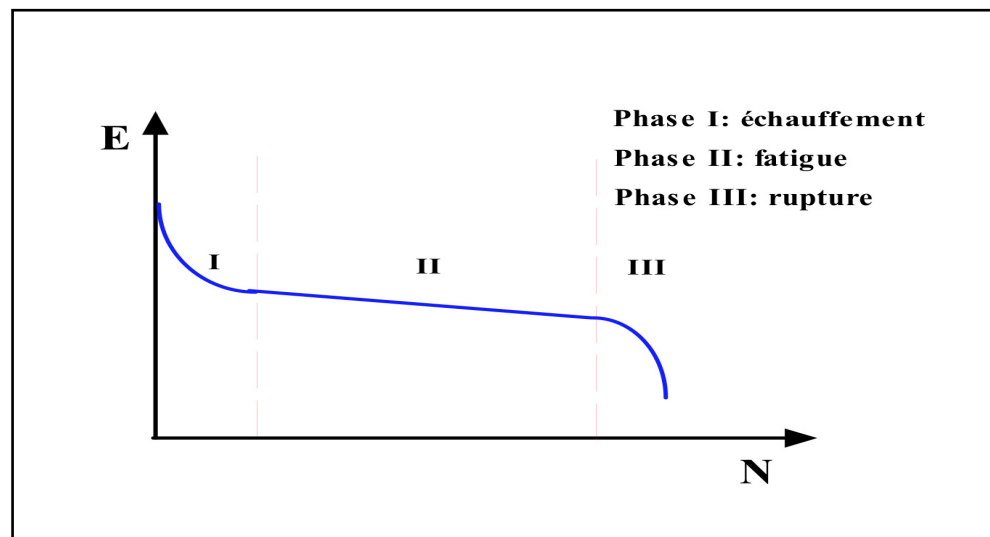


Figure 2.3 Distinction de trois phases différentes dans un essai de fatigue
Tirée de Baaj (2002, p. 61)

2.3 Méthodes d'analyse d'un essai de fatigue

D'après Baaj (2002), plusieurs méthodes sont proposées afin d'évaluer la résistance à la fatigue des enrobés bitumineux. Certaines méthodes visent la détermination d'une durée de vie de l'éprouvette, d'autres proposent des valeurs déterminant l'état d'avancement du dommage dans l'éprouvette. Quelques méthodes sont exposées dans le cadre de ce travail.

2.3.1 Critère de rupture classique

Le nombre de cycles correspondant à une perte de 50 % de la norme module complexe initial est très largement retenu comme critère classique pour fixer la durée de vie en fatigue du matériau $N_{50\%}$ (Figure 2.4).

Dans ce cas, l'éprouvette est considérée par définition en « rupture » si 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 $N_{f50\%}$ est donc le nombre de cycles correspondant à un module de rigidité égal à la moitié du module initial (Baaj 2002).

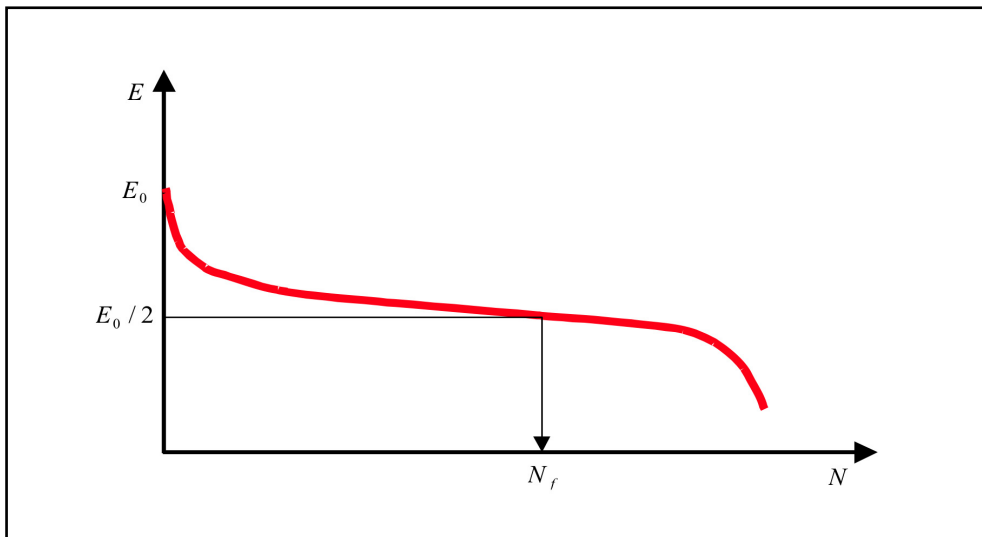


Figure 2.4 Définition du critère classique de fatigue et détermination de la durée de vie
Tirée de Baaj (2002, p. 62)

2.3.2 Critère de fin de la phase II

Ce critère propose de cerner le moment où le mode d'endommagement change et marque le début de la phase III. La durée de vie correspondante est annotée N_{fIII} et correspond au nombre de cycles associé au point de transition entre la phase II à la phase III de l'essai. La valeur de N_{fIII} n'est pas influencée ni par les différents phénomènes, non liés à la fatigue, ni par la phase de rupture liée à la propagation de la macro fissure au sein de l'éprouvette.

Pour cerner la valeur de N_{fIII} , deux éléments sont analysés : 1) les courbes d'évolution des écarts des extensomètres ($N_{f\Delta ext}$), et 2) les résultats de l'essai présentés dans l'espace de Black ($N_f(\sigma)$).

2.3.2.1 Durée de vie établie à partir des courbes d'extensomètres

Pour un essai de fatigue homogène sur éprouvette cylindrique, la valeur de la durée de vie N_{fIII} se détermine en étudiant l'état d'homogénéité du champ de déformation au sein de l'éprouvette en cours d'essai. En effet, le passage de la phase II à la phase III est marqué par la propagation des micros fissurations dans l'éprouvette et dès lors le champ de déformation devient non homogène. La valeur de N_{fIII} est établie en comparant les courbes d'évolution des écarts des amplitudes de déformation par rapport à la déformation moyenne des trois extensomètres répartis uniformément autour de l'éprouvette cylindrique. D'après Baaj (2002), un écart de plus de 25 % entre la déformation d'un des extensomètres à la valeur moyenne témoigne d'un champ de déformation non homogène au sein de l'éprouvette. Le nombre de cycles ainsi obtenu correspond à N_{fAext} .

2.3.2.2 Durée de vie établie à partir de l'espace de Black

Di Benedetto *et al.* (2004) ont montré qu'on peut utiliser l'espace de Black ou l'évolution de la courbe de la raideur en fonction de l'angle de phase pour cerner le point de transition entre la phase II et III. Cette analyse propose de suivre la norme du module de l'enrobé bitumineux en cours d'essai dans l'espace de Black pour estimer la durée de vie correspondant à la fin de la phase II et le début de la phase III ($N_{f\phi}$), qui est équivalente au nombre de cycles au point où la valeur de l'angle de phase commence à diminuer.

2.3.2.3 Synthèse

La valeur de la durée de vie au point de transition entre la phase II et III (N_{fIII}) sera considérée dans le travail de cette recherche comme la moyenne des deux valeurs estimées précédemment, soit : la durée de vie déterminée par rapport aux courbes des écarts des extensomètres (N_{fAext}) et la valeur cernée par l'espace de Black ($N_{f\phi}$).

Il existe d'autres critères (Baaj 2002), pour déterminer la valeur de la durée de rupture N_f , tels que les critères basés sur la variation de l'énergie dissipée et le critère de la courbe de Weibull, mais ils ne seront pas utilisés dans le cadre de ce travail.

2.3.3 Mode de sollicitation

La mesure de la résistance en fatigue des matériaux bitumineux peut être réalisée sous sollicitations cycliques soit en maintenant la force constante en cours d'essai, essais en contrôle de force, ou en maintenant le déplacement constant en cours d'essai, essai en contrôle de déplacement.

Dans le cas d'un essai conduit en déplacement contrôlé, le signal de sollicitation appliquée à l'éprouvette est un signal de déplacement avec une amplitude et une fréquence constantes. Or, la force nécessaire pour maintenir ce déplacement évolue au cours de l'essai due, entre autres, à l'endommagement progressif.

Par ailleurs, en cours d'essai, des effets biaisant entrent en jeu et contribuent en partie à la chute de la raideur du matériau, et ce, de manière particulièrement significative en début d'essai, sans pour autant que ce dernier n'en soit physiquement endommagé (présence de microfissures). Si le champ de déformation de l'éprouvette est homogène, la sollicitation est alors à « déformation imposée » (la déformation est identique en chaque point de l'éprouvette) (Soltani 1998).

Dans le cas d'un essai conduit en contrôle de force, l'essai est piloté en force et ce sont l'amplitude et la fréquence de ce signal qui restent constantes pendant l'essai. Pour ces essais, c'est le déplacement qui varie. Si, sous l'application de la force, le champ de contrainte dans l'éprouvette est homogène, alors la sollicitation est à « contrainte imposée » (la contrainte est identique en chaque point de l'éprouvette) (Soltani 1998).

Dans la Figure 2.5, les schémas (a) (b) et (c) représentent les chemins de sollicitation pouvant être utilisés pour caractériser le comportement en fatigue des matériaux bitumineux. Le chemin (d) introduit des déformations permanentes qui masquent la fatigue. La rupture est atteinte par l'accumulation des déformations permanentes et non par le phénomène de fatigue du matériau (Di Benedetto 1998).

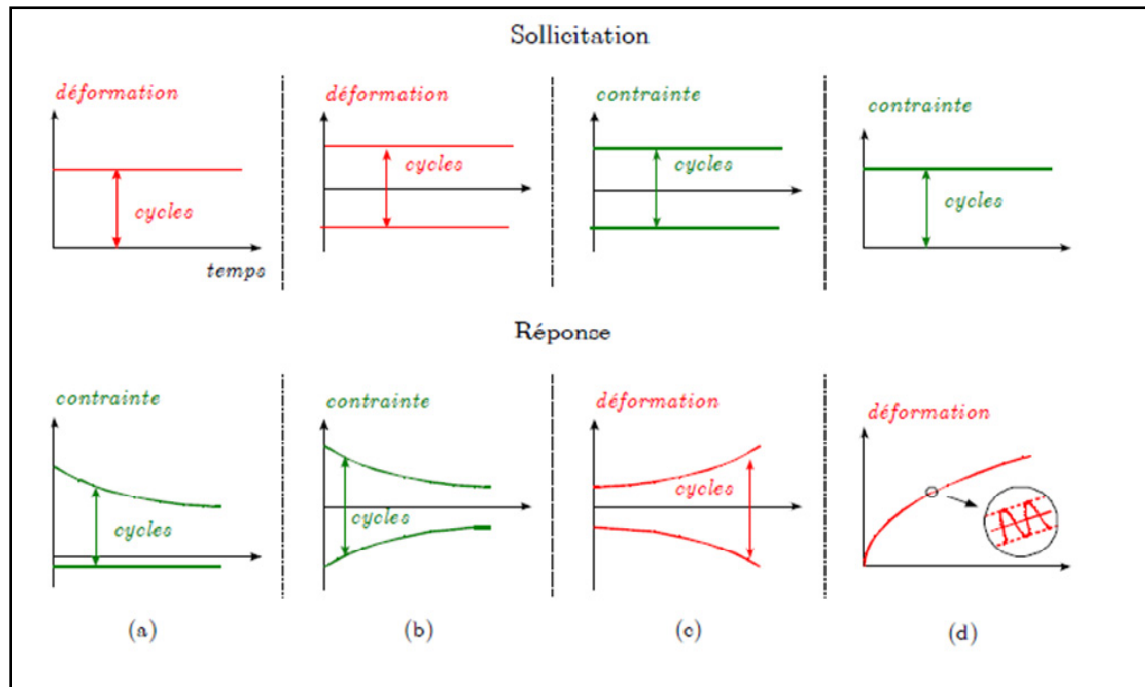


Figure 2.5 Chemins de sollicitation possibles et courbes enveloppes des cycles réponses obtenues en déformation imposée (a et b) et contrainte imposée (c et d)

Tirée de Nguyen (2010, p. 60)

2.3.4 Droite de fatigue: droite de Wöhler

Les premières études fondamentales du phénomène de fatigue en laboratoire ont été entreprises en 1852 par Wöhler sur les métaux (Baaj 2002). À l'heure actuelle, ce sont les matériaux pour lesquels on dispose des connaissances les plus étendues sur ce sujet. Également, la fatigue des bétons, des matériaux routiers et plus généralement d'un grand nombre de matériaux composites a fait l'objet de nombreuses études (De La Roche 1996).

L'essai classique permettant de caractériser le phénomène de fatigue consiste à soumettre une éprouvette de matériau à étudier à des sollicitations répétées et à noter le nombre de cycles entraînant la rupture de l'éprouvette (Baaj 2002), N_f , lequel est désigné durée de vie.

Suivant les durées de vie établies pour divers niveaux de sollicitation exercée (déformation ou contrainte), la représentation classique des résultats de l'essai est donnée par la droite de fatigue : droite de Wöhler (Figure 2.6).

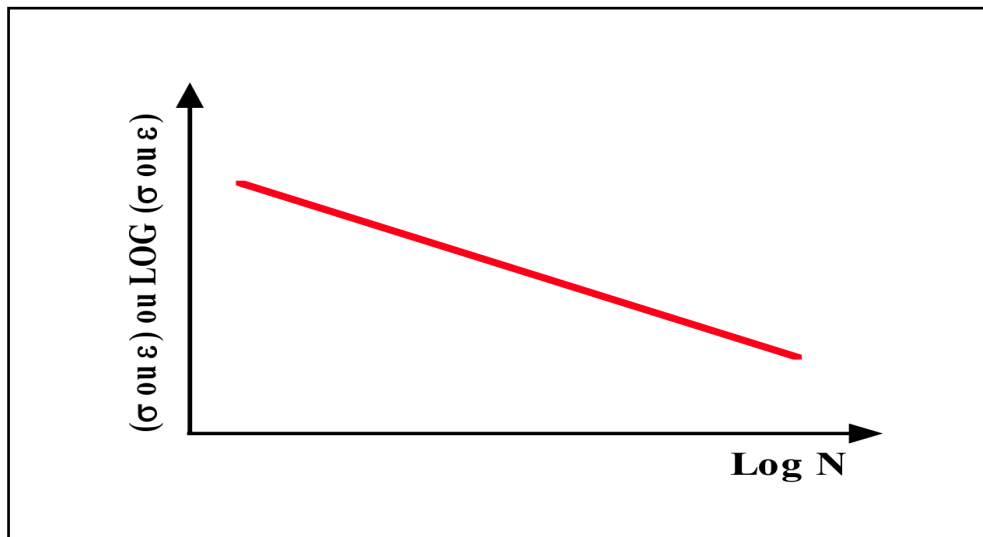


Figure 2.6 Droite de Wöhler
Tirée de Baaj (2002, p. 40)

2.3.5 Dispersion des durées de vie

Dans la réalité, les études des résultats de fatigue sur divers matériaux montrent qu'il existe une dispersion importante dans les résultats de durées de vie. Cela est dû à l'hétérogénéité du matériau et au phénomène de fatigue lui-même (Baaj 2002). Selon De La Roche (1996), si l'on répète plusieurs fois sur des éprouvettes identiques, le nombre de cycles à la rupture peut varier dans un rapport de 1 à 10 entre la plus faible et la plus forte des durées de vie pour les métaux. Ce rapport peut atteindre 1 à 30 pour les matériaux bitumineux et même 1 à 1000 pour certains matériaux traités aux liants hydrauliques (De La Roche 1996).

En pratique, il faut donc effectuer un grand nombre de répétitions pour un niveau de sollicitation donné pour obtenir un ensemble de valeurs de N_f représentatif du phénomène réel.

2.3.6 Limite d'endurance

Pour certains aciers et d'autres matériaux, il a été mis en évidence une certaine valeur limite de sollicitation en dessous de laquelle le matériau résiste infiniment, quel que soit le nombre de répétitions de la sollicitation (Baaj 2002). Cette valeur est appelée « limite d'endurance » ou limite de fatigue (Figure 2.7).

C'est le cas notamment pour les métaux, pour lesquels la limite d'endurance est comprise entre 0,3 à 0,6 fois la résistance à la rupture au premier chargement (De La Roche 1996).

Pour l'enrobé bitumineux, les études effectuées en ce sens n'ont jamais permis de trouver une limite d'endurance jusqu'à maintenant. Il semble donc que pour ce matériau, le phénomène de fatigue est toujours présent, quelle que soit l'amplitude de la sollicitation appliquée (Di Benedetto *et al.* 2005).

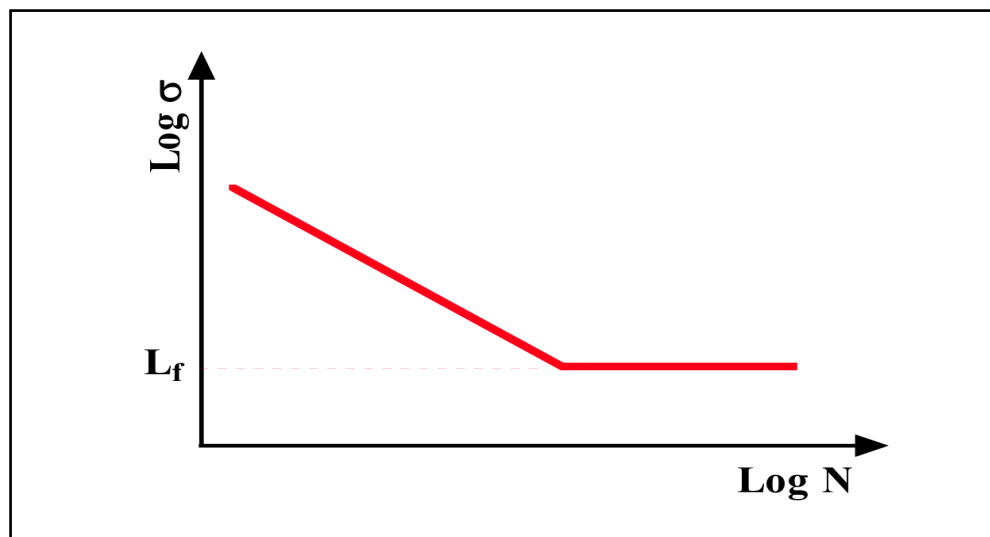


Figure 2.7 Limite d'endurance ou limite de fatigue
Tirée de Baaj (2002, p. 41)

2.4 Effets des paramètres de formulation sur la fatigue

Plusieurs études ont été réalisées afin de déterminer l'influence des paramètres de formulation sur le comportement des enrobés bitumineux à la fatigue. Parmi les paramètres les plus influant, on peut citer : 1) le type de granulats et la granulométrie, 2) la compacité ou la teneur en vides, 3) la nature du liant et sa teneur et 4) la teneur en fines (De La Roche 1996). Dans le cadre du travail de ce mémoire, deux éléments sont traités, soit : 1) la teneur en vides et 2) la nature du liant.

2.4.1 Teneur en vides

Selon Bazin *et al* (De La Roche 1996), les résultats de fatigue sont généralement meilleurs et moins dispersés lorsque la compacité augmente. Pour Soliman *et al* (Soltani 1998), la teneur en vides résulte de la formulation et de la mise en œuvre, et pour cela, on peut dire que c'est le facteur le plus important puisqu'il conditionne un grand nombre de qualités requises tels que l'imperméabilité à l'eau, la raideur, la bonne résistance à l'orniérage et à la fatigue.

2.4.2 Nature du liant

Toutes les études menées sur le sujet montrent que la nature du bitume a un rôle très important sur la résistance en fatigue de l'enrobé bitumineux (Baaj 2002). Selon De La Roche (1996), plus le bitume est dur, meilleur est la résistance en fatigue en force imposée.

D'après Baaj (2002), les résultats montrent que les enrobés bitumineux confectionnés avec des bitumes modifiés avec des polymères donnent des durées de vie plus élevées et des raideurs plus faibles par rapport aux bitumes conventionnels. Notons que, cet énoncé est réaliste pour des températures et des fréquences voisines de celles des essais de fatigue, alors qu'en basses températures, il pourrait être autrement.

CHAPITRE 3

PROGRAMME DE RECHERCHE

3.1 Introduction

Au cours des cinq dernières années, le Laboratoire sur les Chaussées et Matériaux Bitumineux (LCMB) de l'ÉTS a été confronté à des écarts significatifs entre les résultats d'essais de fatigue réalisés dans ses laboratoires. Le travail de ce mémoire a été réalisé de manière à cerner une meilleure compréhension des éléments qui gouvernent la performance en fatigue des matériaux bitumineux testés en laboratoire.

La mesure de la résistance en fatigue d'un matériau bitumineux nécessite une exécution minutieuse en laboratoire, et ce, aussi bien pour les aspects se rapportant à l'homogénéité dans la compacité des séries d'éprouvettes que pour ceux associés à leur préparation (uniformité et planéité des surfaces, alignement des casques au collage, etc.); au contrôle des conditions de sollicitation (température, déplacement et force) et à l'exploitation des résultats. Notamment, le recours à un critère de rupture cohérent, permettant de s'affranchir des effets biaisant, en vue de cerner la durée de vie (N_f) en fatigue, a une incidence marquée sur la droite de fatigue (droite de Wöhler), laquelle vise à décrire la performance en fatigue de l'enrobé.

Un programme de recherche a été élaboré en vue d'évaluer et de caractériser le comportement en fatigue de deux enrobés bitumineux de même type GB20, mais ils sont confectionnés avec deux bitumes différents. Un des enrobés étant formulé en laboratoire avec un bitume modifié par polymère PG64-28 et le deuxième prélevé en centrale d'enrobage et confectionné avec un bitume standard PG58-28.

Les essais de fatigue ont été effectués en déformation imposée, et ce, pour différentes amplitudes de sollicitation. Tous les essais ont été réalisés à une seule fréquence de sollicitation, soit à 10Hz et à différentes températures (10 °C, 20 °C et 30 °C). Les essais menés à différentes températures ont eu pour but de valider l'incidence de la température sur la réponse en fatigue de l'enrobé et la pertinence du modèle de fatigue à traduire cet effet sur la prédiction de la durée de vie du matériau. Le modèle de fatigue est présenté plus en détail à la section 7.2.2.1.

Par ailleurs, peu de résultats sont répertoriés dans la documentation pour juger de la dispersion des résultats lors de la répétition d'essais de fatigue réalisés sur éprouvettes cylindriques et soumises à une sollicitation alternée de traction/compression centrée sur zéro. Pour étudier cet aspect, quelques essais ont été réalisés en vue de constituer des échantillons d'éprouvettes soumises à une même amplitude de déformation de manière à déterminer leur écart type (SN) associé à la durée de vie en fatigue pour les enrobés étudiés suivant la méthode de calcul préconisée au LCMB.

Dans la perspective de définir les étapes essentielles à une réalisation rigoureuse d'un essai de fatigue en laboratoire, au traitement des résultats et à leur exploitation, ce programme de recherche a été élaboré en deux phases : 1) Bilan des aspects de métrologie vis-à-vis la préparation et la réalisation des essais de fatigue ainsi que le traitement des données récoltés, 2) Interprétation et analyse des résultats des essais de fatigue issus d'une campagne expérimentale élaborée en vue d'étudier l'effet du type de bitume et de la température.

Le Tableau 3.1 présente les grandes lignes des différentes étapes réalisées dans le cadre de cette recherche.

Tableau 3.1 Illustration des différentes phases composant le programme expérimental

<p>Phase I : Bilan des aspects de la métrologie</p>
<p>Objectif : synthétiser les éléments clés pour la réalisation rigoureuse d'un essai de fatigue en traction/compression en laboratoire en vue de déterminer une durée de vie représentative de la performance en fatigue d'un enrobé :</p>
<ol style="list-style-type: none"> 1. Préparation et sélection des éprouvettes <ol style="list-style-type: none"> a. Carottage, resurfaçage et mesurage b. Sélection et entreposage c. Collage et montage 2. Synthèse des étapes essentielles à la réalisation d'un essai de fatigue <ol style="list-style-type: none"> a. Contrôle des conditions de sollicitation (déplacement, force et température) b. Acquisition et traitement des données c. Calcul des paramètres mécaniques (σ, ϵ, E^* ...)
<p>Phase II : Campagne expérimentale</p>
<p>Objectif : Validation de la procédure d'essai établie en phase I appliquée à la caractérisation en fatigue d'un enrobé de base (GB20) et étude de l'influence du type de bitume et de la température.</p>
<ol style="list-style-type: none"> 1. exemple du traitement de données d'un essai de module complexe

2. exemple du traitement de données d'un essai de fatigue
 - a. présentation graphique des résultats
 - évolution de la température
 - évolution de la norme du module complexe
 - indices de qualité
 - écarts des extensomètres
 - b. bilan des critères de ruptures
 - c. validation de l'essai de fatigue

3. analyse des essais
 - a. comparaison des résultats des essais
 - influence du type de bitume (laboratoire versus chantier)
 - l'effet de la température sur la réponse en fatigue
 - b. dispersion des résultats
 - c. prédiction de la durée de vie selon la méthode développée au ENTPE dite la méthode DGCB
 - la loi de dommage
 - comparaison des durées de vie selon les différents critères.

3.2 Phase I : Bilan des aspects de la métrologie

La phase I est une étape essentielle dans ce programme de recherche. Elle consiste à synthétiser les éléments clés pour la réalisation des essais de fatigue en laboratoire en vue de déterminer la durée de vie d'un matériau bitumineux. On peut la subdiviser en deux grandes catégories, 1) les aspects liés à la préparation des éprouvettes et, 2) la réalisation des essais, l'acquisition et le traitement des données de l'essai de fatigue.

3.2.1 Préparation et sélection des éprouvettes

Dans le cadre de ce travail, un seul type d'enrobé est utilisé, soit un grave bitume de grosseur nominale maximale de 20 mm : un GB20. Par ailleurs, la confection de deux graves bitumes a été réalisée dans le cadre de cette étude. Un premier enrobé GB20 confectionné à partir d'un échantillonnage d'un enrobé en central d'enrobage (DJL construction) et destiné à la mise en œuvre d'une planche d'essai en milieu urbain en chantier (rue des Érables à Montréal). Cet enrobé a été confectionné avec un bitume de type PG58-28. Un deuxième enrobé GB20 formulé en laboratoire et confectionné avec un bitume de type PG64-28. La section 4.1 traitera en détail des aspects de formulation de ces enrobés.

Dans un premier temps, les enrobés sont compactés donnant des plaques puis sciés et carottés. Pour obtenir des éprouvettes homogènes, une bonne étude du plan de sciage et de carottage est respectée. Finalement, une resurfaeuse est utilisée pour avoir des éprouvettes avec des côtés bien lisses, ce qui assure le bon collage des casques. Un bon mesurage en utilisant un matériel adéquat est nécessaire pour avoir des bons résultats. La section 4.2 présente les méthodes suivies et le matériel utilisé pour réaliser un bon compactage, carottage et resurfaçage des éprouvettes.

Les éprouvettes obtenues du carottage sont sélectionnées en fonction de leur teneur en vides et conservées dans un bac de sable pour éviter la flexion et le fort vieillissement. Le détail se rapportant à la présélection et à la conservation des éprouvettes est traité à la section 4.2.4.

3.2.2 Synthèse des étapes essentielles pour la réalisation d'un essai de fatigue

Pour éviter les effets de torsion et de flexion dans l'éprouvette testée en fatigue, et ce, de manière à réaliser un essai en condition homogène en traction/compression, il est nécessaire d'avoir un bon plan de collage et de centrage (voir § 5.2.3.1).

Une presse hydraulique et un système de pilotage assisté par ordinateur sont utilisés pour réaliser les essais en laboratoire (voir § 5.2.2). Avant qu'un essai de fatigue soit lancé (voir § 5.2.5.2), un conditionnement de 4 heures est nécessaire pour atteindre la température cible au sein de l'éprouvette, cette température est mesurée en surface de celle-ci à partir de deux sondes thermiques de type PT 100 (voir § 5.2.3.2). L'homogénéité du champ de température au sein de l'éprouvette est requise pour obtenir des résultats représentatifs. Une analyse préliminaire est réalisée sur l'évolution des courbes de température, les indices de qualité et les écarts de mesure entre les trois extensomètres pour la validation de l'essai (voir § 6.3.3).

En cours d'essai, un système d'acquisition permet l'enregistrement du temps et le numéro de cycle appliqué, la force exercée sur l'éprouvette, le déplacement du piston de la presse, la déformation des 3 extensomètres et de la température de la surface de l'éprouvette (voir § 5.2.4). Les données sont enregistrées de manière à ce que chaque phase d'acquisition comporte deux cycles successifs échantillonnés sur 200 points et traité par une macro (voir § 6.3.1). Il est nécessaire de vérifier la qualité des signaux obtenus à l'aide des indices de qualités (inférieure à 15 %). La qualité des indices est un point crucial parmi d'autres pour s'assurer du bon fonctionnement de l'essai. Les points critiques pour valider un essai de fatigue sont traités à la section 6.3.4.

3.3 Phase II : Campagne expérimentale

La phase II est consacrée à la présentation et l'interprétation des résultats des essais issus de la campagne expérimentale, suivi d'une analyse comparative selon la nature du bitume, l'influence de la température et la dispersion des durées de vie. La méthode DGCB est appliquée pour l'analyse des résultats de fatigue de manière à prédire la durée de vie en fatigue des enrobés bitumineux en limitant la durée d'un essai à 300 000 cycles.

Les chapitres 6 et 7 traitent plus en détail les éléments présentés dans la phase II et le Tableau 3.2 donne un résumé des essais réalisés dans le cadre du travail de ce mémoire.

Tableau 3.2 Détails des essais réalisés dans cette campagne expérimentale

Enrobé	Essai de module complexe	Essai de fatigue		
		Température (°C)	Déformation (μ def)	Répétition
GB20 (chantier) PG58-28	1 essai	10 °C	120	4
			90	3
GB20 (laboratoire) PG64-28	1 essai	10 °C	140	1
			160	4
			200	1
		20 °C	360	1
			400	1
			450	2
		30 °C	300	1
			350	1
			400	1
			500	1

CHAPITRE 4

MATÉRIAUX UTILISÉS

4.1 Matériaux et formulation

Dans ce chapitre, les étapes suivies et le matériel utilisé pour la préparation et la confection des éprouvettes seront exposés. Deux enrobés bitumineux ont été caractérisés dans le cadre de ce travail, soit un GB20 de provenance d'un fabricant (DJL construction) mis en œuvre sur la rue des Érables, à la ville de Montréal, et confectionné avec un bitume conventionnel PG58-28, et un GB 20 formulé en laboratoire avec un bitume modifié par polymère PG64-28. La formulation de ce dernier a été effectuée conformément à la norme 4202 « Enrobés à chaud formulés selon la méthode de formulation du laboratoire des chaussées » (MTQ 2011).

Les courbes granulométriques des deux enrobés utilisés dans le cadre de ce programme de recherche sont présentées à la Figure 4.1 et leurs paramètres caractéristiques sont donnés dans le Tableau 4.1.

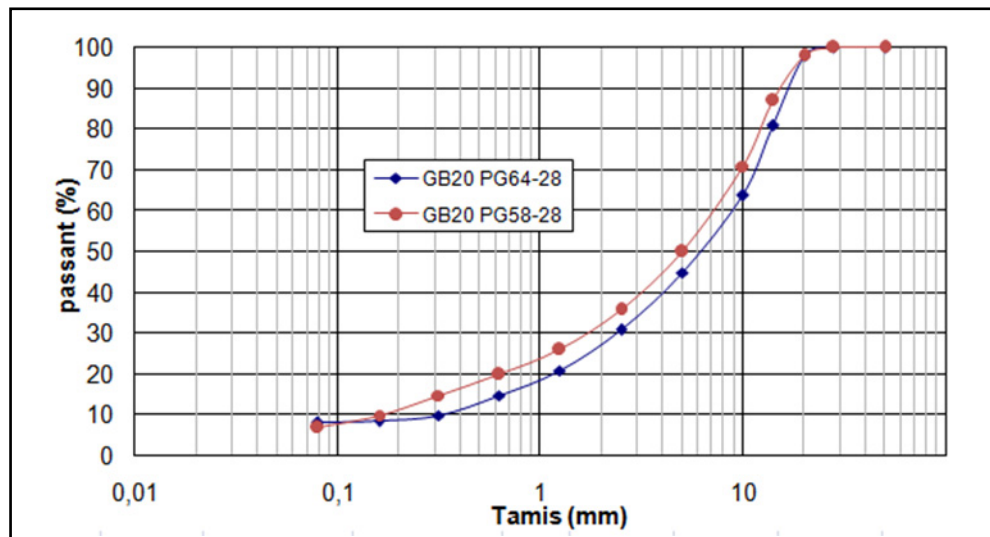


Figure 4.1 Granulométrie des enrobés bitumineux testés

Tableau 4.1 Caractéristiques des enrobés bitumineux GB20 testés

Enrobé		GB-20	
Type de bitume (PG)		58-28	64-28
Formulation		Usine	Laboratoire
Tamisat (%)	28 mm	100	100
	20 mm	98	98
	14 mm	87	81
	10 mm	71	64
	5 mm	50	45
	2,5 mm	36	31
	1,25 mm	26	21
	630 µm	20	15
	315 µm	15	10
	160 µm	10	9,0
	80 µm	6,9	8,3
Enrobés	Total granulométrique (TG)	420,0	382,3
	% de bitume	3,65	4,32
	Rapport bitume / TG	0,87	1,13
	Surface spécifique totale (m ² /kg)	6,32	7,2
	d _{mm}	2,592	2,642
	d _{mb}	2,517	n/d
	% de vides	2,9	n/d
	V _{be}	7,6	n/d
	VAM	10,3	n/d
	VCB	71,9	n/d

4.2 Confection des éprouvettes

4.2.1 Compactage des plaques

Dans un premier temps, les matériaux sont chauffés préalablement dans une étuve selon les températures définies dans la norme LC 26-400 (Fabrication d'éprouvettes au compacteur LCPC). Pour les deux enrobés, des plaques (400 x 600 x 125) mm ont été compactées au LCMB à l'aide du compacteur de plaques MLPC, composé d'un jumelage de roues pneumatiques exécutant des passages d'aller-retour à vitesse constante parallèlement à l'axe du moule selon un plan de balayage spécifié suivant les dispositions de la norme LC 26-400 (MTQ 2011) (Figure 4.2).



Figure 4.2 Compacteur MLPC

4.2.2 Sciage et carottage

À la suite du compactage d'une plaque, un délai de mûrissement de 2 semaines à la température de la pièce entre le moment de la confection de la plaque et celui du carottage est préconisé et respecté afin d'assurer une cure adéquate de l'enrobé bitumineux.

Chaque plaque est d'abord sciée au centre suivant l'axe transversal, en utilisant un outil approprié pour obtenir des faces parallèles (Figure 4.3), donnant deux prismes de $(400 \times 300 \times 125) \text{ mm}^3$. Ensuite, chaque moitié est également sciée en deux prismes de $(400 \times 125 \times 125) \text{ mm}^3$, où 50 mm d'épaisseur de chacun des deux bords de la plaque sont jetés. La Figure 4.3 montre clairement les extrémités rejetées et les prismes obtenus après sciage.

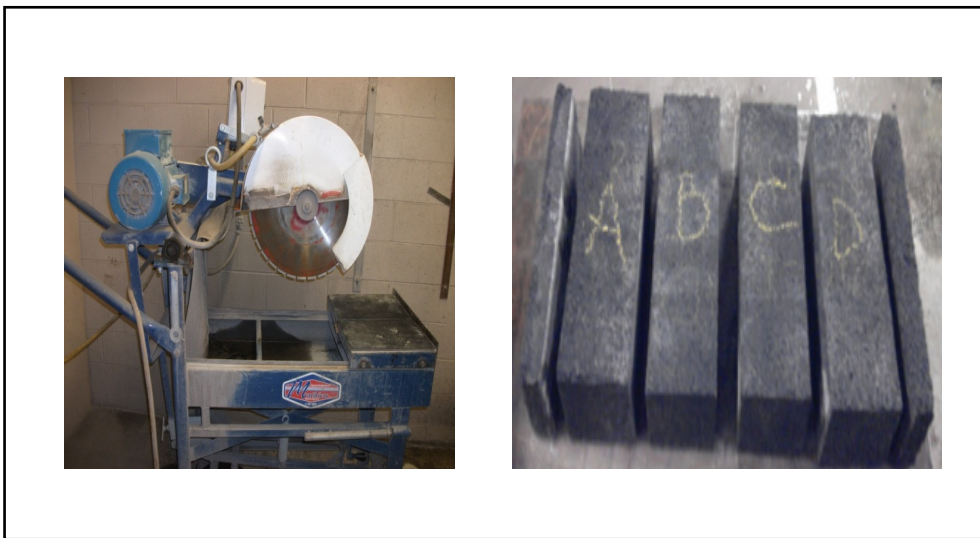


Figure 4.3 Scie utilisée pour la préparation des prismes pour fins de carottage

Selon Soltani (1998), pour s'assurer d'avoir des carottes relativement homogènes au niveau de leur compacité, il faut se limiter dans la mesure du possible à prélever seulement 3 éprouvettes de 80 mm de diamètre par prismes sciés. Par contre, pour obtenir le plus grand nombre d'éprouvettes de même compacité et réaliser ainsi le plus d'essais possible, 4 éprouvettes de 74 mm de diamètre par prisme sont carottées pour l'enrobé GB20 de type PG 58-28 et 4 éprouvettes de 80 mm de diamètre pour l'enrobé GB20 de type PG 64-28. La différence quant au diamètre des carottes pour les deux familles d'enrobé est due au fait que l'achat d'un carottier de même diamètre n'a pu être concrétisé. Il est présumé que cette différence n'a toutefois aucune incidence sur les résultats escomptés.

Les carottes sont extraites dans la direction normale aux plans de sciage, parallèlement à la surface compactée. Le plan de carottage retenu est indiqué à la Figure 4.4. Pour chaque plaque carottée, les carottes prélevées sont identifiées suivant la nomenclature illustrée à la Figure 4.4 et selon la forme suivante :

P1-A1

Où :

- P : Plaque ;
- 1 : Numéro de plaque ;
- A : Position selon le plan de sciage ;
- 1 : Position selon le plan de carottage.

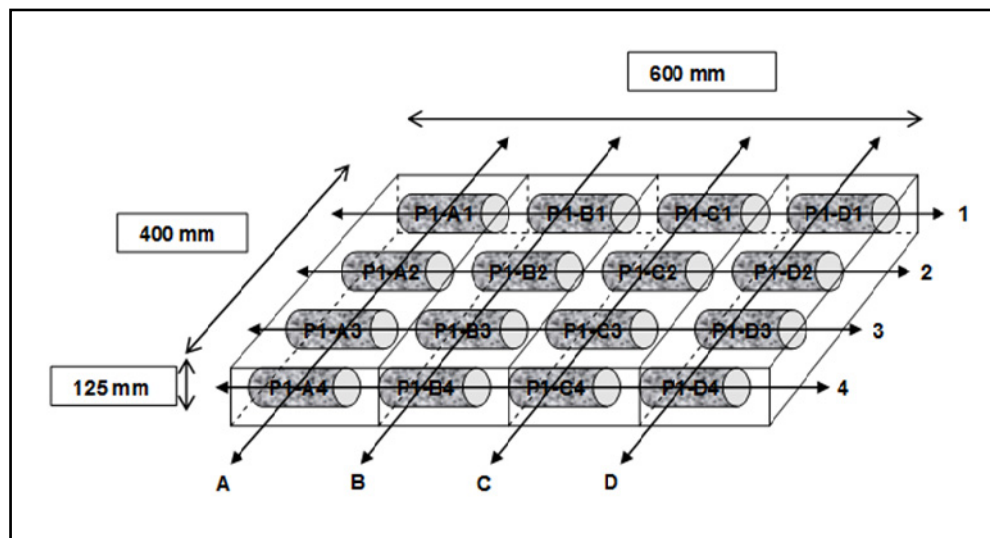


Figure 4.4 Plan de sciage (A, B, C et D) et de carottage (1, 2,3 et 4)

La Figure 4.5 illustre le système de carottage utilisé (photo de gauche) et le résultat du carottage d'un des prismes (photo de droite). La première carotte est extraite en partant de la partie centrale du prisme, à 1 cm de la surface compactée.

Les autres carottes sont extraites en minimisant l'espacement entre les forages, toujours à 1 cm de la surface, de manière à profiter au maximum de la zone homogène en densité dans la partie centrale du prisme, évitant ainsi les zones latérales assujetties aux effets de paroi.

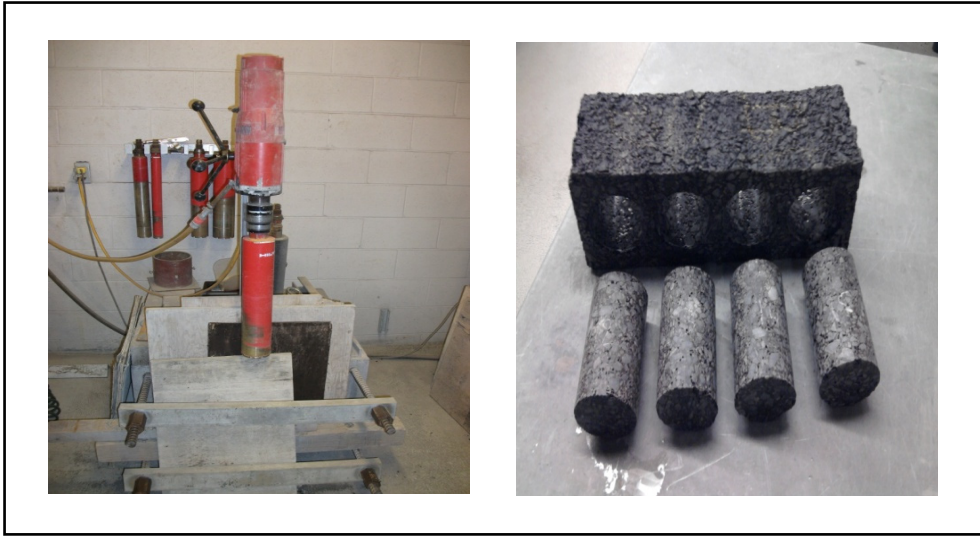


Figure 4.5 Carotteuse et carottes obtenues

Pour s'assurer, de la planéité des faces pour le collage des casques aux extrémités, une resurfaceuse a été utilisée. Le resurfaçage des bouts permet d'avoir des surfaces bien lisses (Figure 4.6), ce qui assure le bon collage des casques.



Figure 4.6 Resurfaceuse et éprouvettes obtenues

4.2.3 Compacité des éprouvettes

La méthode d'essai LC 26-320 (MTQ 2011) consiste à déterminer le pourcentage de vides et la compacité dans les enrobés compactés à chaud. La teneur en vides (V_i) peut être déterminée à partir de deux méthodes : 1) méthode hydrostatique ou 2) méthode volumétrique (voir Annexe I). Après la détermination, de la densité brute des enrobés (d_{mb}) selon la méthode d'essai LC 26-040 et la détermination de la densité maximale (d_{mm}) selon la méthode d'essai LC 26-045, le pourcentage de vides est calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$V(\%) = \left(1 - \frac{d_{mb}}{d_{mm}}\right) \times 100 \quad (4.1)$$

Où :

d_{mb} densité brute de l'enrobé compacté;
 d_{mm} densité maximale de l'enrobé.

La compacité se calcule par la relation ci-dessous :

$$\text{Compacité (\%)} = 100 - \text{pourcentage de vides (\%)} \quad (4.2)$$

Les caractéristiques et les valeurs obtenues pour la teneur en vides (V_i) pour toutes les éprouvettes sont présentées dans l'Annexe II. Les teneurs en vides calculées par la méthode hydrostatique sont choisies pour l'analyse des résultats, puisque ces valeurs sont moins dispersées et plus représentatives par rapport à la méthode volumétrique.

4.2.4 Entreposage des éprouvettes

Finalement, les carottes sont entreposées à l'horizontale dans un lit de sable jusqu'au moment du collage des casques d'aluminium, de manière à éviter leur gauchissement en cours d'entreposage, le tout dans une chambre à température contrôlée ($T^{\circ} = 20^{\circ}\text{C}$). Après le collage des casques, les éprouvettes sont à nouveau entreposées dans un lit de sable, et ce, jusqu'au jour de l'essai.

CHAPITRE 5

CAMPAGNE EXPÉRIMENTALE

5.1 Programme d'essai

La campagne expérimentale réalisée dans le cadre de cette recherche a pour but d'évaluer et caractériser le comportement en fatigue de deux enrobés bitumineux de type GB20, standard PG58-28 et modifié par polymère PG64-28.

Un essai de module complexe a été effectué sur chaque enrobé, afin de déterminer sa performance et leur caractéristique thermomécanique en petites déformations.

Les essais de fatigue ont été effectués en mode de déformation imposée et selon différentes amplitudes, à une seule fréquence de sollicitation de 10Hz et à des différentes températures de 10, 20 et 30 °C. Les essais testés à 10 °C ont été réalisés dans les laboratoires du LCMB, tandis que les essais réalisés à 20 et 30 °C ont été réalisés dans les laboratoires de l'entreprise GÉCAN (Saint-Hyacinthe).

Comme les résultats de fatigue sont divers et variés, quelques essais ont été réalisés pour une même amplitude de déformation imposée pour les deux enrobés GB20 testés à 10 °C et ce, afin de déterminer l'écart type correspondant à la durée de vie de fatigue pour ces enrobés suivant l'essai de traction/compression sur cylindre.

Les essais de traction/compression pratiqués au LCMB utilisent des éprouvettes cylindriques. Les paragraphes suivants présentent la mise en place et les deux protocoles d'essai suivis pour la mesure de la résistance à la fatigue et celle du module complexe.

5.2 Essai de traction/compression sur éprouvette cylindrique

L'essai de traction/compression sur éprouvette cylindrique est un essai homogène. Il permet d'obtenir directement les lois de comportement des matériaux testés. Deux types de comportement de l'enrobé bitumineux ont été étudiés dans le cadre de ce travail en utilisant ce type d'essai : le comportement viscoélastique linéaire (module complexe) et le comportement en fatigue.

5.2.1 Principe de l'essai de traction/compression sur éprouvette cylindrique

L'essai de traction/compression consiste à solliciter en traction et en compression une éprouvette cylindrique dont les dimensions sont H (hauteur) et D (diamètre). L'éprouvette est sollicitée de manière continue selon un signal sinusoïdal (traction/compression) centré sur zéro et appliqué suivant la direction axiale de l'éprouvette (Figure 5.1).

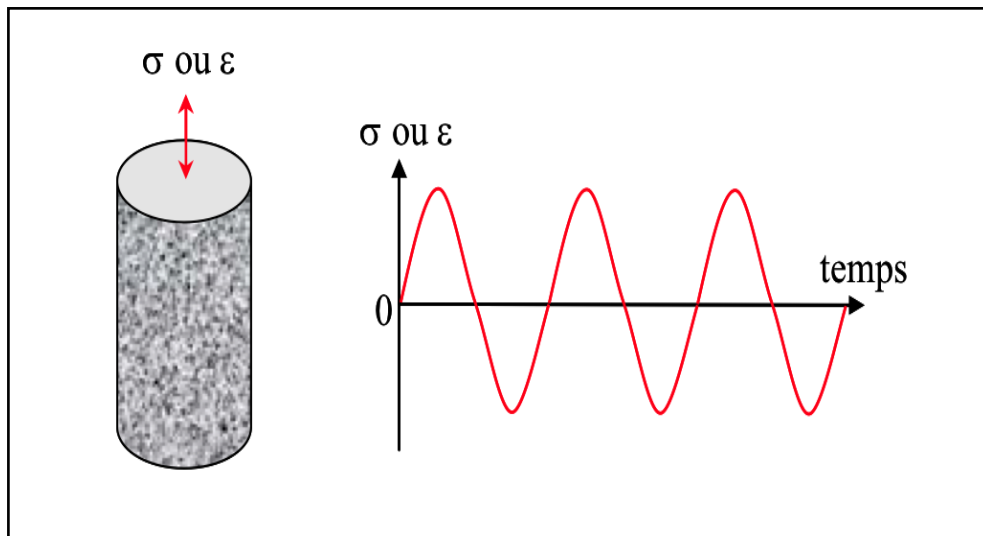


Figure 5.1 Principe de sollicitation en traction/compression sur éprouvette cylindrique
Tirée de Nguyen (2010, p. 100)

Le nombre de cycles de sollicitation est fonction du type d'essai. Dans le cas d'un essai de module complexe, un faible nombre de cycles est appliqué à différentes fréquences (0,01; 0,03, 0,1; 0,3; 1; 3 et 10 Hz). Dans le cas d'un essai de fatigue, un nombre important de cycles est appliqué (jusqu'à quelques millions de cycles), mais pour une seule fréquence de 10 Hz.

Les essais sont réalisés en condition isotherme. La température de sollicitation dépend également du type d'essai. Le module complexe est mesuré dans une large gamme de température, soit : -35, -25, -10, 0, 10, 20 et 35 °C. Pour les essais de fatigue, la température d'essai est généralement fixée à 10 °C. Par ailleurs, certains essais ont été réalisés à 20 °C et 30 °C.

5.2.2 Dispositif expérimental

5.2.2.1 Presse hydraulique et système de pilotage et d'acquisition

C'est une presse hydraulique MTS (*Materials Testing System*) disponible au LCMB, pilotée par un système électronique, série 8800, d'une pression nominale de fonctionnement de 210 bars, avec une cellule de force de 50 KN.

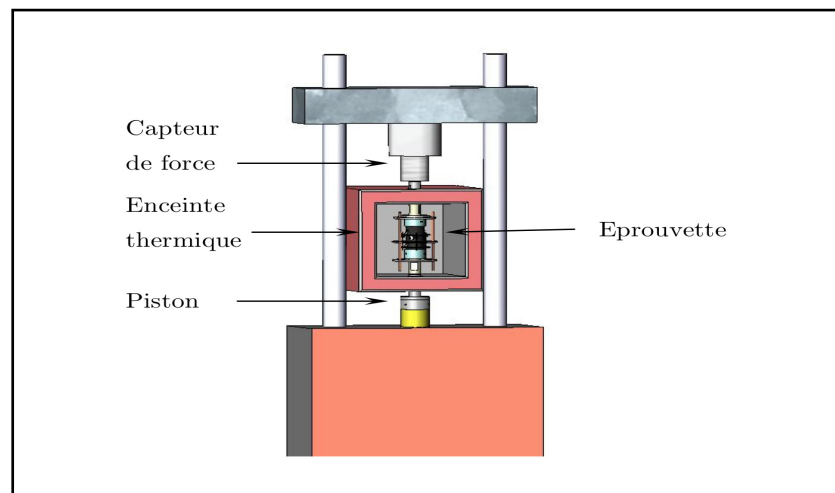


Figure 5.2 Schéma de la presse hydraulique utilisée pour l'essai de traction/compression
Tirée de Nguyen (2010, p. 101)

Le pilotage de la presse en mode manuel par le tableau de commande est uniquement utilisé pour le montage de l'éprouvette avant l'essai. En cours d'essai, la presse est principalement asservie en mode automatique grâce à un ordinateur utilisant le logiciel Test Star® II de MTS. On peut réaliser un asservissement en mode de contrôle de force sur le capteur de force ou en mode de contrôle de déformation sur la moyenne des trois extensomètres.



Figure 5.3 Vue générale du dispositif expérimental

5.2.2.2 Mesures réalisées au cours d'un essai

Plusieurs capteurs ont été utilisés en cours d'essai afin d'enregistrer l'évolution de la force, des déplacements et de la température :

- le capteur de force (F) et de déplacement du piston de la presse (u);
- trois extensomètres de mesure des déplacements axiaux;
- deux sondes de température de type PT100 fixée à la surface de l'éprouvette et donnant accès à la température moyenne de la surface.

5.2.3 Mise en place de l'essai

Les différentes étapes pour effectuer la mise en place d'un essai de traction/compression sont présentées dans les sous-sections suivantes.

5.2.3.1 Collage des casques

Pour éviter la flexion de l'éprouvette et réaliser un essai dans des conditions homogènes en traction/compression, un bon centrage de l'éprouvette est requis (Soltani 1998). Pour cette raison, une attention particulière est portée lors de cette opération.

Pour assurer une bonne adhérence entre les casques et l'éprouvette, les casques d'aluminium sont nettoyés à l'acétone, puis une mince couche uniforme d'époxy est appliquée sur les surfaces planes de l'éprouvette et celles des casques. L'ensemble est déposé et centré sur le banc du dispositif de collage disponible au LCMB (Figure 5.4). Ensuite un bon serrage est nécessaire pour avoir une bonne fixation. Le dispositif maintient les casques appuyés contre l'éprouvette et bien alignés pendant le durcissement de la colle (4 heures au minimum).

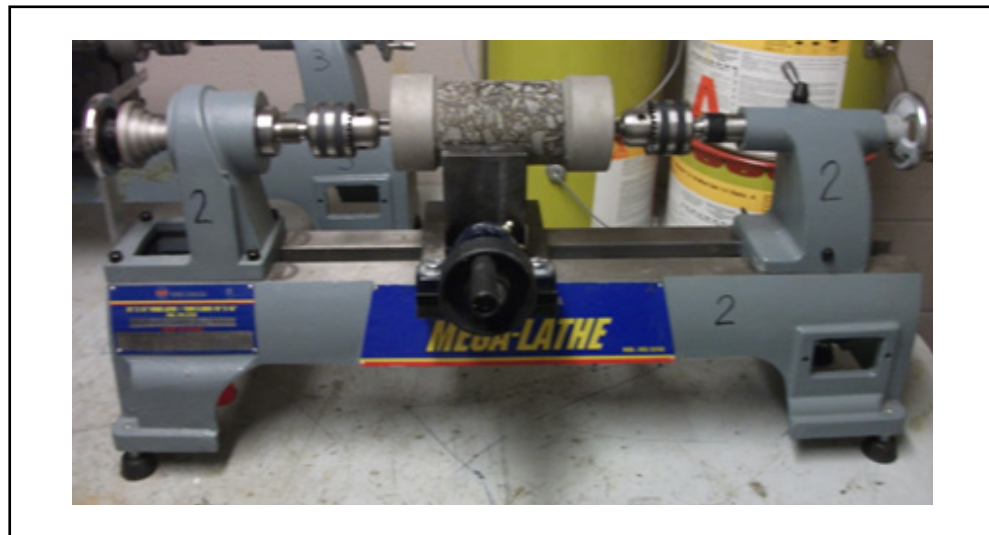


Figure 5.4 Dispositif de collage des casques

Avant d'installer l'éprouvette dans la chambre thermique de la presse, trois extensomètres de 50 mm de longueur sont positionnés sur la partie centrale de l'éprouvette suivant un espacement de 120 degrés les uns des autres. Les extensomètres sont maintenus en place par six ressorts de même calibre placés entre ces derniers.

La fixation de l'éprouvette au vérin de la presse et à la cellule de charge se fait par l'entremise des casques aux pièces de liaison de la presse MTS. La fixation doit se faire suivant une procédure d'installation bien définie, prenant en compte les précautions suivantes (Di Benedetto *et al.* 2001) :

- éviter toute torsion de l'éprouvette lors du serrage des pièces de liaison sur les casques;
- éviter toute sollicitation de l'éprouvette en traction ou en compression avant le début des sollicitations. Cette précaution exige de solidariser l'éprouvette avec la presse tout en gardant une force verticale nulle;
- après la mise à zéro de la cellule de force, l'éprouvette est fixée à celle-ci dans l'enceinte thermique en respectant les précautions suivantes : le piston est approché en mode de pilotage jusqu'à ce qu'il arrive en contact avec le casque inférieur. Le mode de pilotage en mode de force est alors activé en imposant une force nulle;
- le montage de l'éprouvette est réalisé tout d'abord en reliant le casque supérieur à l'axe qui permet la connexion au capteur de force. Puis l'axe qui fait la liaison avec le vérin hydraulique est vissé au casque inférieur.

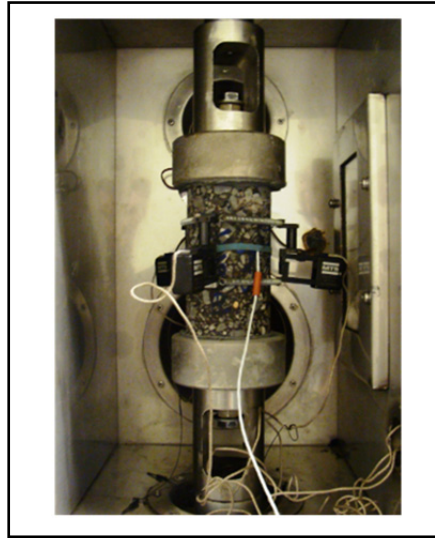


Figure 5.5 Montage de l'éprouvette dans l'enceinte thermique

5.2.3.2 Mise en température

Pour les essais réalisés au LCMB, deux sondes de température de type PT 100 sont placées à la surface de l'éprouvette afin de mesurer l'évolution thermique de la surface de l'éprouvette en cours d'essai. Notons que pour les essais réalisés dans les laboratoires de l'entreprise Sintra, aucune sonde de température n'a été placée en surface de l'éprouvette : seule la température de la chambre thermique a été enregistrée en cours d'essais pour ces essais.

Avant de lancer un essai, la force appliquée sur l'éprouvette est nulle et une durée de conditionnement de 4 heures est nécessaire pour atteindre la température cible au sein de l'éprouvette à tester. Cette durée est respectée lors de la réalisation des essais de ce programme expérimental.

5.2.4 Acquisition des données et procédures expérimentales

Lors de l'acquisition, la fréquence d'échantillonnage est déterminée en fonction de la fréquence de sollicitation afin d'obtenir 100 points d'acquisitions par cycle, et ce, pour l'ensemble des capteurs utilisés (cellule de force, sondes de températures [2] en surface et [1] dans la chambre, extensomètres [3], déplacement du vérin). Chaque acquisition consiste à enregistrer deux cycles consécutifs de sollicitation et à échantillonner ainsi 200 points de mesures pour chacun des capteurs. Le choix de deux cycles permet un calcul plus précis de l'amplitude et du déphasage du signal. Le système d'acquisition permet l'enregistrement des valeurs suivantes :

- le temps et le numéro de cycle appliqué;
- la force (F) exercée sur l'éprouvette;
- le déplacement du piston de la presse;
- la déformation axiale (ϵ) des 3 extensomètres;
- la température de la surface de l'éprouvette;
- la température de l'enceinte.

5.2.5 Description des essais de caractérisation des enrobés

Comme souligné précédemment, deux types d'essais de caractérisation ont été réalisés dans le cadre du programme expérimental, soit : 1) l'essai de module complexe et 2) l'essai de fatigue. La synthèse de la procédure suivie pour la réalisation de ces essais est présentée à la section suivante.

5.2.5.1 Procédure de l'essai de module complexe

L'essai de module complexe est un essai homogène non destructif. Il consiste à appliquer des sollicitations sinusoïdales à l'éprouvette suivant différentes fréquences et différentes températures.

Chaque éprouvette testée est soumise à 7 niveaux de température (-35, -25, -10, 0, 10, 20 et 35 °C) pour lesquels 7 niveaux de fréquence de sollicitations sont appliqués (0,01; 0,03; 0,1; 0,3; 1; 3; et 10 Hz) et une déformation imposée de 50 μ def. À chaque palier de température, un temps de conditionnement de 4 heures est imposé permettant d'atteindre une température homogène au sein de l'éprouvette. La séquence des paliers de températures est appliquée de la plus basse à la plus haute. Par ailleurs, pour chaque palier de température, la sollicitation est appliquée pour les différentes fréquences ciblées en passant de la plus rapide à la plus lente. À chaque fréquence, un nombre de cycles limité est effectué.

5.2.5.2 Procédure de l'essai de fatigue

L'essai de fatigue consiste à solliciter une éprouvette à une seule température, le plus souvent fixée à 10 °C, et suivant une sollicitation cyclique sinusoïdale de fréquence constante, fixée dans le cadre des essais de ce travail à 10Hz. Exemption faite d'un seul essai, les essais de fatigue ont été réalisés en mode de déformation imposée à des intensités maintenues constantes en cours d'essai, mais différentes suivant l'éprouvette testée. Pour un essai de fatigue, un grand nombre de cycles de sollicitation est appliqué jusqu'à la « rupture » de l'éprouvette.

Pour déterminer le comportement à la fatigue d'un enrobé, c'est-à-dire définir la droite de Wöhler, un minimum de 4 éprouvettes a été testé à différents niveaux de déformation pour une condition d'essai ciblée (type d'enrobé versus température d'essai).

En raison du nombre de cycles de sollicitation important pour un essai de fatigue, l'acquisition des données doit être adaptée en cours d'essai. Autrement, rapidement on obtient une saturation de la mémoire du système d'acquisition menant à la perte d'informations pertinentes et essentielles pour l'analyse d'un essai. Afin d'observer au mieux les variations du module complexe au cours de l'essai et juger ainsi de l'évolution de l'endommagement, la durée allouée entre l'acquisition des cycles varie au cours de l'essai (Tableau 5.1).

Cette durée est très courte au début de l'essai où le module évolue très vite et augmente par la suite. Les 100 premiers cycles sont tous enregistrés, ensuite l'intervalle entre deux acquisitions augmente. Le Tableau 5.1 fournit le programme d'acquisition au cours d'un essai de fatigue. Un point de mesure correspond à deux cycles de chargement (Baaj 2002).

Tableau 5.1 Nombre d'acquisitions en fonction du nombre de cycles appliqués
Tirée de (Baaj 2002, p. 101)

Numéros de cycles	Fréquence d'acquisition	Nombre de points de mesure
du cycle 1 à 120	tous les cycles	60
du cycle 120 à 1000	une mesure tous les 15 cycles	60
du cycle 1000 à 10 000	une mesure tous les 150 cycles	60
du cycle 10 000 à 100 000	une mesure tous les 1000 cycles	90
du cycle 100 000 à 300 000	une mesure tous les 2500 cycles	100
du cycle 300 000 jusqu'à la fin de l'essai	une mesure tous les 5000 cycles	dépendant de la fin de l'essai

CHAPITRE 6

RÉSULTATS DES ESSAIS

Dans la perspective de montrer les étapes à suivre pour traiter avec rigueur les résultats d'un essai de fatigue et pour faciliter et alléger la présentation, un exemple des résultats d'un essai en mode de déformation réalisé dans le cadre du programme expérimental est exposé avant d'analyser l'ensemble au chapitre suivant. Notons que l'ensemble des résultats des essais de fatigue a été rigoureusement traité suivant la démarche qui sera présentée dans ce chapitre. Par ailleurs, les résultats d'un essai réalisé en mode de contrainte sont également traités dans le cadre de ce chapitre. Ces derniers permettent de comparer l'allure des courbes obtenues entre les deux modes de sollicitation préconisés pour la mesure de la résistance à la fatigue des enrobés bitumineux. Avant de présenter les différentes étapes traitant les résultats d'un essai de fatigue, la section suivante présente les résultats des essais de module complexe réalisés sur les deux enrobés testés.

6.1 Présentation des résultats de l'essai de module complexe

Pour connaître le comportement viscoélastique linéaire en petites déformations des enrobés utilisés, un essai de module complexe a été réalisé pour chaque enrobé. Et comme ce dernier est non destructif, les éprouvettes ont été utilisées ensuite pour des essais de fatigue. Le Tableau 6.1 présente les caractéristiques des éprouvettes utilisées pour la mesure du module complexe des enrobés bitumineux.

Tableau 6.1 Caractéristiques des éprouvettes utilisées pour les essais de module complexe

Enrobé	Éprouvette	Dimension (mm)		d_{mb}	d_{mm}	% vide
		diamètre	hauteur			
GB20 PG58-28	P3-C3	73,97	121,5	2,460	2,578	4,6
GB20 PG64-28	P1-D1	78,81	119,46	2,56	2,64	3,1

Les différentes composantes du module complexe varient avec la température et la fréquence de sollicitation. Les résultats expérimentaux $|E^*|$, φ , E_1 , E_2 sont généralement exprimés à l'aide des courbes isothermes qui sont obtenues en traçant la norme du module complexe $|E^*|$ en fonction de la fréquence Fr pour chacune des températures d'essais T , généralement en coordonnées bi logarithmique tel que présenté à la Figure 6.1.

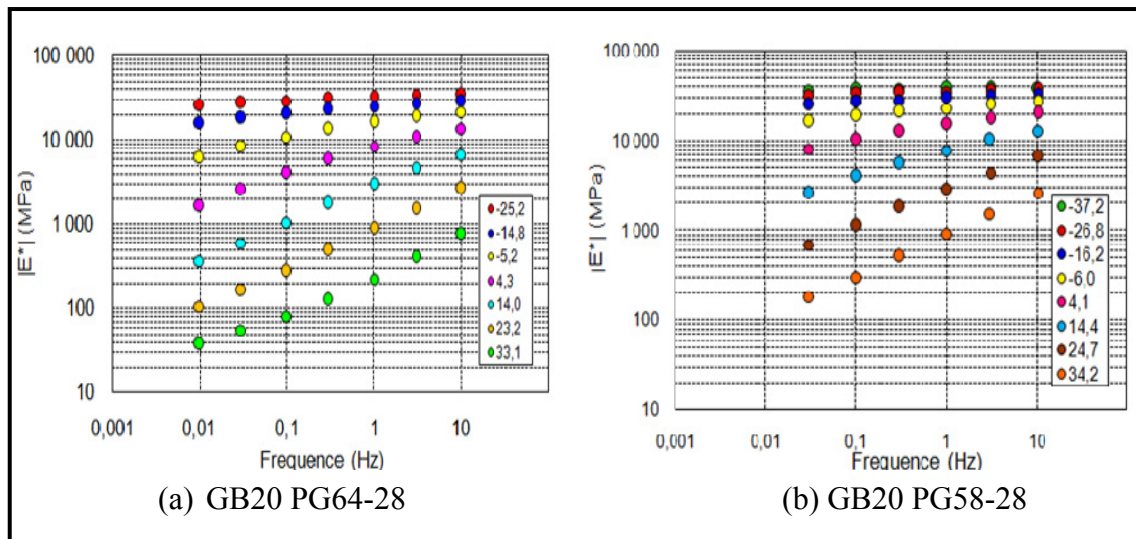


Figure 6.1 Courbes isothermes de la norme du module complexe en fonction de la fréquence et de la température pour les deux enrobés testées

6.1.1 Courbe dans le plan de Cole-Cole

Les résultats des essais de module complexe peuvent être également représentés dans un plan complexe : « le plan Cole-Cole ». Cette représentation consiste à porter la partie réelle du module complexe E_1 en abscisse et la partie imaginaire E_2 en ordonnée. La courbe obtenue est caractéristique du matériau étudié, elle peut être utilisée pour caler un modèle de comportement rhéologique (2S2P1D) qui sera présenté à la section 6.1.4. Dans le cas d'un matériau qui satisfait au principe d'équivalence temps-température (PETT), la courbe obtenue est unique et décrit une forme parabolique.

Notons également que pour satisfaire le PETT, il convient que la relation demeure également unique dans l'espace de Black.

La Figure 6.2 montre les courbes des modules complexes dans le plan Cole-Cole pour les deux éprouvettes testées, soit l'éprouvette P3-C3 confectionnée à partir de l'enrobé GB20 (PG 58-28) et l'éprouvette P1-D1 représentative de l'enrobé GB20 (PG 64-28).

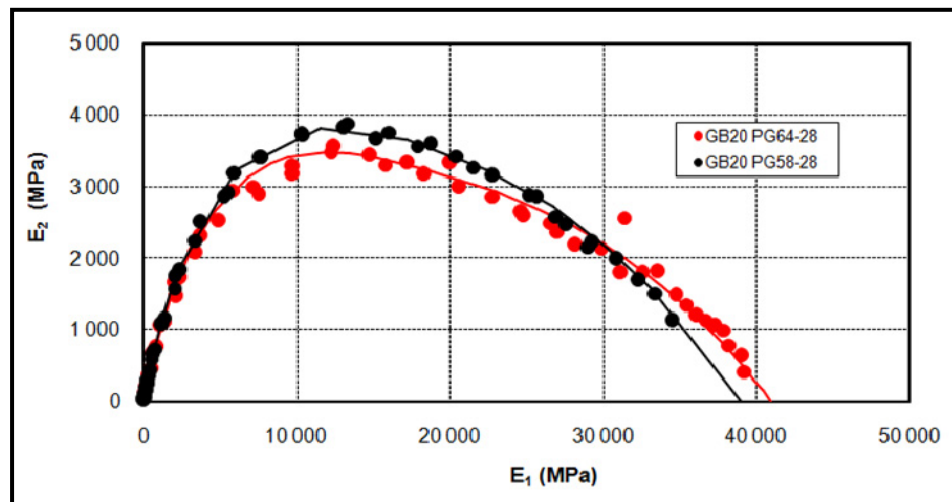


Figure 6.2 Présentation du module complexe dans le plan de Cole-Cole (GB20 PG58-28/P3-C3 et GB20 PG64-28/P1-D1)

6.1.2 Courbe dans l'espace de Black

La représentation des résultats de module complexe dans l'espace de Black consiste à tracer le logarithme de la norme du module complexe $|E^*|$ en fonction de l'angle de phase φ correspondant. La représentation dans l'espace de Black est souvent utilisée pour visualiser la zone des modules de faibles amplitudes et en particulier la diminution d'angle de phase pour les hautes températures.

La Figure 6.3 montre une présentation des courbes des modules complexes dans l'espace de Black pour les deux éprouvettes testées, soit l'éprouvette P3-C3 confectionnée à partir de l'enrobé GB20 (PG58-28) et l'éprouvette P1-D1 d'un enrobé GB20 (PG 64-28). Il est important de souligner que les résultats obtenus pour l'enrobé GB20 PG58-28 présentent une courbe unique dans l'espace de Black alors que l'enrobé GB20 PG64-28 présente plusieurs courbes et satisfait partiellement au principe d'équivalence temps-température (Olard 2003). Soulignons que ce dernier est confectionné à partir d'un bitume polymère.

Di Benedetto *et al.* (2005) considèrent que les enrobés avec bitume polymère ne satisfait que partiellement au principe d'équivalence temps-température.

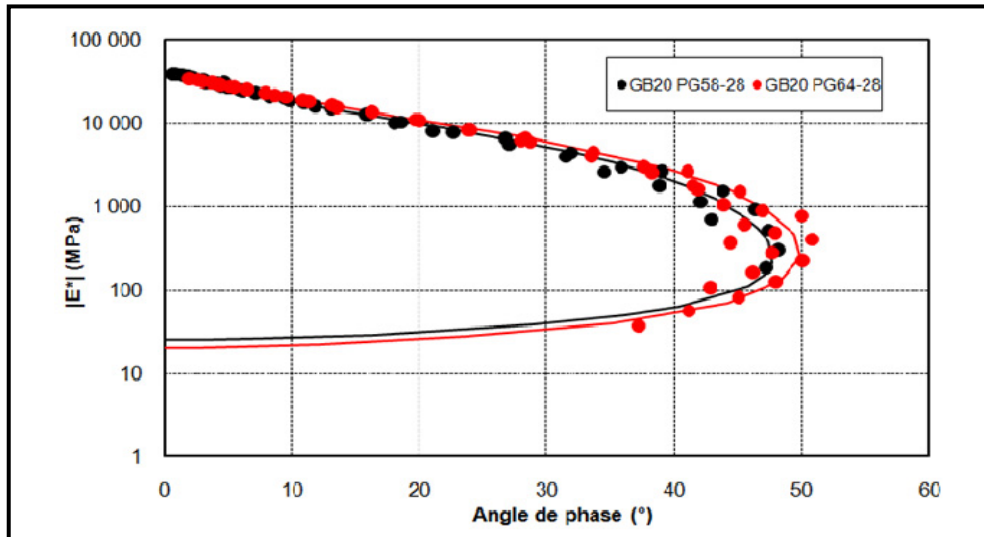


Figure 6.3 Présentation du module complexe dans l'espace de Black (GB20 PG58-28/P3-C3 et GB20 PG64-28/P1-D1)

6.1.3 Les courbes maîtresses

L'utilisation de la propriété d'équivalence temps-température (PETT) permet de construire une courbe unique ($\log|E^*|$, $\log [Fr]$) pour une température de référence (T_r) choisie arbitrairement. La courbe maîtresse de la norme du module complexe permet d'obtenir des valeurs de module pour des fréquences et des températures inaccessibles par l'expérimentation.

Dans la Figure 6.4, les deux courbes maîtresses pour les deux éprouvettes utilisées aux essais de module complexe (GB20 PG58-28/P3-C3 et GB20 PG64-28/P1-D1) sont tracées pour les températures de référence T_r respectivement 4,3 et 4,1 °C.

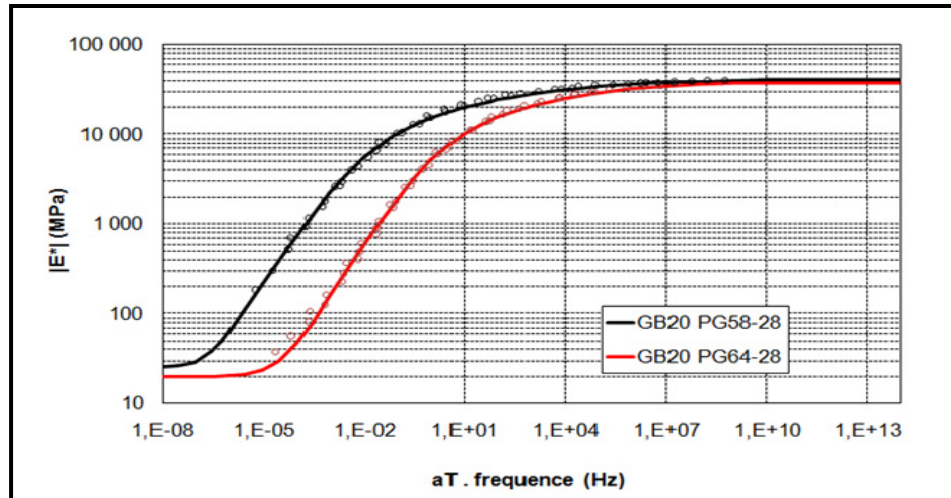


Figure 6.4 Modélisation des courbes maîtresses
(GB20 PG58-28/P3-C3 et GB20 PG64-28/P1-D1)

6.1.4 Modélisation du comportement VEL des enrobés bitumineux à l'aide du modèle 2S2P1D

6.1.4.1 Présentation du modèle analogique 2S2P1D

Le modèle 2S2P1D (2 Springs, 2 Parabolic et 1 Dashpot), développé au laboratoire DGCB de l'ENTPE (Olard 2003), est une combinaison d'éléments simples (ressort, amortisseur, et amortisseur à fluage parabolique). La Figure 6.5 illustre l'agencement de ces éléments.

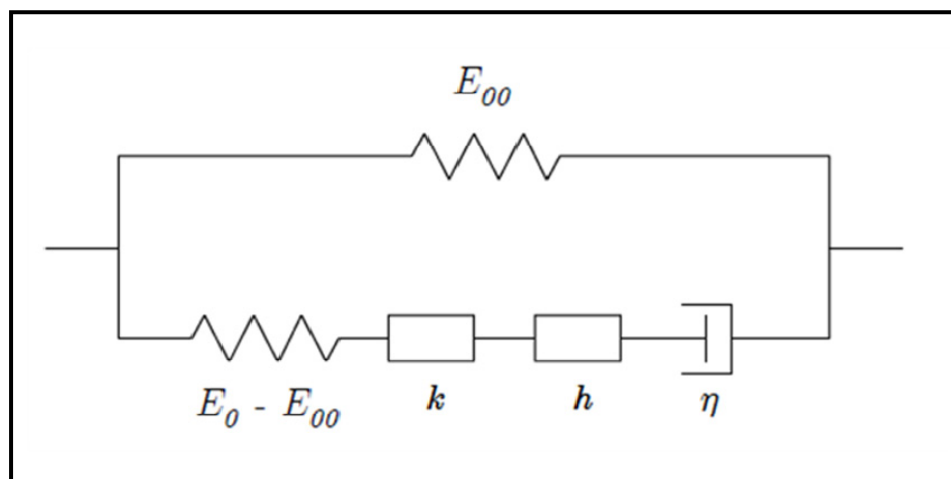


Figure 6.5 Représentation du modèle 2S2P1D
Tirée de Nguyen (2010, p. 132)

Ce modèle est utilisé pour modéliser le comportement viscoélastique linéaire (modules complexes E^*) des enrobés bitumineux (Nguyen 2010).

Par ailleurs, le module complexe du modèle 2S2P1D s'exprime sous la forme :

$$E_{2S2P1D}^* = E_{00} + \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta(i\omega\tau_E)^{-k} + (i\omega\tau_E)^{-h} + (i\omega\beta\tau_E)^{-1}} \quad (6.1)$$

Avec :

- i : Nombre complexe défini par $i^2 = -1$;
- E_{00} : Module statique (valeur minimale du module, enrobés soumis à des basses fréquences ($\omega \rightarrow 0$) et des hautes températures) ;
- E_0 : Module instantané ou vitreux (valeur maximale du module, enrobés soumis à des très hautes fréquences ($\omega \rightarrow \infty$) et/ou des basses températures) ;
- ω : Pulsation = $2 \pi F_r$;
- F_r : Fréquence ;
- τ_E : Paramètre ayant la dimension de temps et qui s'apparente à un temps de retard dont la valeur varie avec la température ;
- δ : Constante ;
- h, k : Paramètres (constantes) des éléments paraboliques du modèle ($0 < k < h < 1$) ;
- β : Constante sans dimensions ;
- η : Viscosité newtonienne, $\eta = (E_0 - E_{00}) \beta \tau$ quand $\omega \rightarrow 0$.

6.1.4.2 Calage à effectuer pour la détermination des paramètres 2S2P1D

Afin de déterminer les différentes valeurs des constantes du modèle 2S2P1D en vue de modéliser le comportement viscoélastique de l'enrobé, il convient de caler les valeurs calculées à partir du modèle à celles mesurées. Pour réaliser le calage, il faut donc changer les valeurs de chacun des paramètres (constantes) afin que la modélisation coïncide avec les résultats d'essai. La Figure 6.6 illustre la répercussion de chacun des paramètres sur la modélisation.

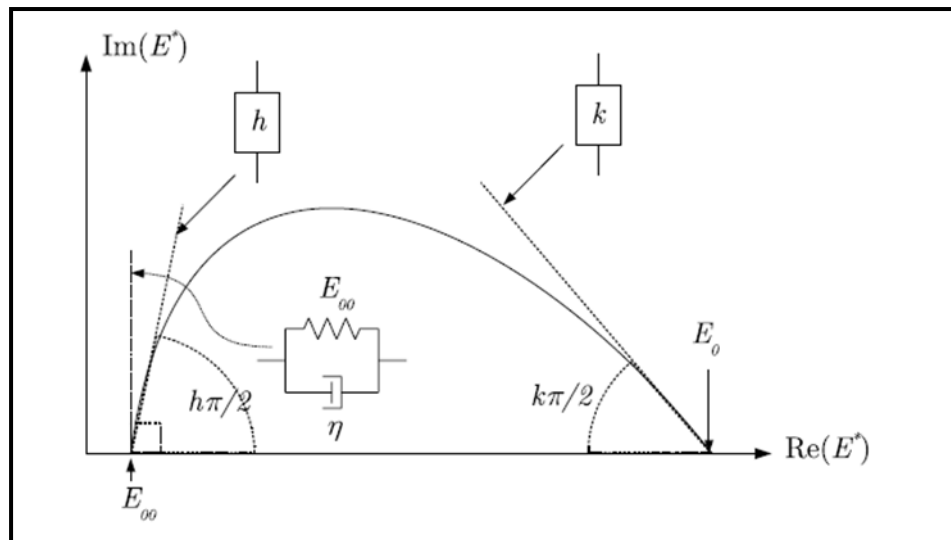


Figure 6.6 Fonction des chacun des paramètres
Tirée de Nguyen (2010, p. 134)

Par ailleurs, pour prendre en compte l'effet de la température, on fait référence au modèle de William, Landel et Ferry (WLF). L'équation 6.2 présente le modèle WLF. La détermination des constantes C_1 et C_2 du modèle de WLF est établie à l'aide de l'outil *solveur* sur Excel en considérant les valeurs de τ établies pour les différentes températures d'essai. Le Tableau 6.2 résume les paramètres présentés dans la Figure 6.6 et déterminés pour les 2 enrobés testés présentés aux Figures 6.2 et 6.3.

$$\tau(T) = a_T(T) \times \tau_0 = \tau_0 \times 10^{\frac{-C_1(T-T_r)}{C_2+(T-T_r)}} \quad (6.2)$$

Avec :

$a_T(T)$: Facteur de calage à la température T ;

$\tau_0 = \tau(T_r)$: Temps de retard déterminé à la température de référence T_r , habituellement 10 °C pour les enrobés et 25 °C pour les bitumes ;

T_r : Température de référence (constante) ;

C_1, C_2 : Constantes.

Tableau 6.2 Constantes du modèle 2S2P1D calibrées

Enrobé	E*							WLF		
	E ₀₀ (MPa)	E ₀ (MPa)	k	h	δ	τ (E, τ _{ref})	β	T _{ref}	C ₁	C ₂
GB20 PG58-28	25	41 000	0,17	0,56	2,25	1,5	400	4,1	25,89	178,84
GB20 PG64-28	20	39 000	0,19	0,60	2,15	0,1	400	4,3	21,62	154,15

6.2 Présentation des résultats des essais de fatigue

Les essais de fatigue ont été effectués à une seule température de 10 °C pour l'enrobé GB20 (PG58-28) et à trois températures (10, 20 et 30 °C) pour l'enrobé GB20 (PG64-28). Le Tableau 6.3 présente une liste des séries d'essais effectuées et retenues pour analyse.

Tableau 6.3 Tableau récapitulatif des essais de fatigue réalisés

Enrobé	Nom de l'essai	% de vide	Date de l'essai	Température (°C)	Déformation moy (μdef)
GB20 PG58-28 (chantier)	P3-B4	4,9	17/04/2011	10	90
	P3-C1	5,0	25/04/2011		90
	P3-D2	5,0	06/05/2011		90
	P3-B1	4,8	14/02/2011		120
	P3-B2	4,2	27/01/2011		120
	P3-B3	4,3	11/02/2011		120
	P3-C3	4,2	04/02/2011		120
GB20 PG64-28 (laboratoire)	P1-C1	1,8	16/11/2010	10	140
	P1-A1	3,0	28/10/2010		160
	P2-A2	2,3	19/04/2011		160
	P1-C2	1,8	01/12/2010		160
	P2-A4	2,3	18/12/2010		160
	P1-C3	1,5	27/11/2010		200
	P2-A1	3,1	25/03/2011	20	360
	P2-C2	1,5	12/05/2011		400
	P1-D3	2,5	15/04/2011		450
	P2-A3	2,1	21/04/2001		450
	P2-B1	4,4	14/10/2011	30	300
	P2-C1	1,7	20/09/2011		350
	P2-C4	1,7	15/07/2011		450
	P2-C3	1,9	11/07/2011		500

6.3 Exemple du traitement des données

6.3.1 Traitement des signaux

Les données d'acquisitions sont enregistrées de façon à ce que chaque acquisition de 200 points permette de décrire deux cycles successifs de sollicitation. Ces points expérimentaux ne sont pas situés exactement sur une courbe sinusoïdale en raison des écarts expérimentaux et de la non-linéarité du comportement des enrobés bitumineux. Les données expérimentales liées à la force et aux déplacements mesurés respectivement par une cellule de charge et par trois extensomètres sont alors assimilées à des courbes sinusoïdales approchées définies par l'équation suivante :

$$y = y_0 + y_A \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (6.3)$$

Ainsi, à part la fréquence qui est constante, les autres paramètres de l'équation sont calculés par la méthode des moindres carrés.

Dans le fichier de traitement, le signal de la contrainte est obtenu à partir de la force enregistrée en divisant cette valeur par la section initiale de l'éprouvette. Ceci reste valable du fait que l'essai est conduit en condition homogène. Par ailleurs, le signal de déformation retenu pour le calcul des modules complexes est la moyenne des signaux de trois extensomètres de déplacements. L'ensemble des données d'acquisition est stocké par bloc de 200 lignes en séquence pour chaque couple de cycles de sollicitation et de colonnes dédiées aux différentes variables : temps, contrainte, déformation et température dans un fichier Excel. À l'aide d'une macro de calcul développée avec Microsoft Excel, les données stockées sont traitées par la méthode des moindres carrée pour calculer les signaux sinusoïdaux approchés de contrainte, des trois déformations des extensomètres et de la déformation moyenne.

Chaque traitement donne alors un point de résultat dans le fichier de traitement qui définit à la fois les paramètres des signaux approchés et les caractéristiques mécaniques du matériau, et ce pour chaque couple de cycles analysé.

La Figure 6.7 montre un exemple de l'évolution de la contrainte et celle de la déformation moyenne calculée à partir des trois extensomètres pour le couple de cycles 110 et 111 de l'essai réalisé sur l'éprouvette cylindrique P3-B2 (enrobé GB20 PG58-28), en traction/compression alternée, en contrôle de déformation, pour une déformation imposée de $120 \mu\text{def}$. Les valeurs ponctuelles correspondent aux points de mesure acquisitionnés alors que les courbes en trait continu représentent le signal approché à partir de la méthode des moindres carrés.

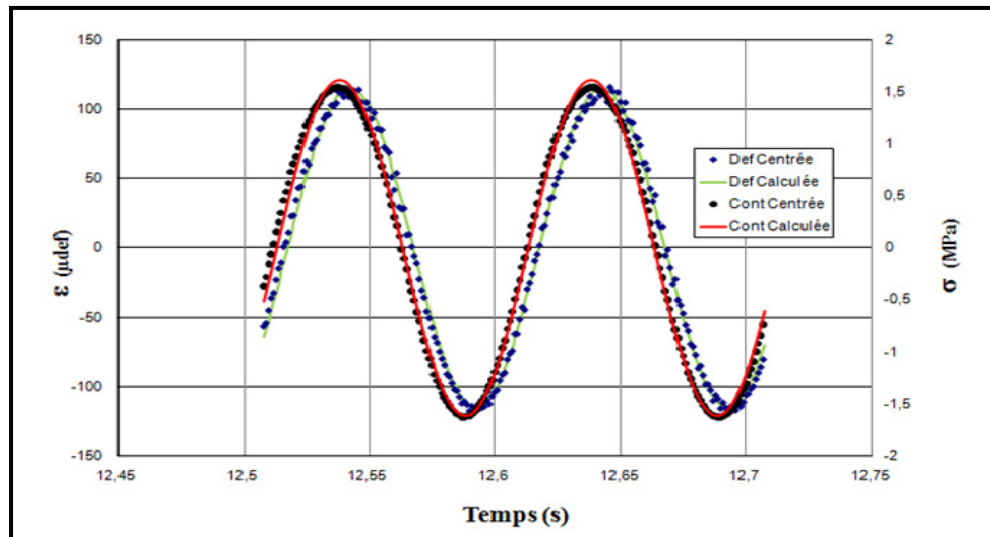


Figure 6.7 Signaux de contrainte et de déformation approximés pour les 110^{ème} et 111^{ème} cycles de l'essai P3-B2 (GB20 PG58-28; $T_{\text{consigne}} = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$; $Fr = 10 \text{ Hz}$; $\epsilon_0 = 120 \mu\text{def}$)

6.3.2 Calcul des paramètres mécaniques

Pour la représentation graphique des résultats d'un essai de fatigue, les valeurs suivantes sont déterminées à chaque couple de cycle de sollicitation :

- pour le signal de contrainte : l'amplitude σ_A , la valeur moyenne σ_0 et l'angle de phase φ_σ .
- pour les signaux de déformation :
 - pour les trois extensomètres, on a : l'amplitude ε_{iA} , la valeur moyenne ε_{i0} , et l'angle de phase φ_{ei} et ce, pour les trois extensomètres ($i=1, 2$ ou 3);
 - pour la déformation moyenne, on a : l'amplitude ε_A , la valeur moyenne ε_0 et l'angle de phase φ_ε . Ces valeurs correspondent à la moyenne des trois mesures précédentes.

À partir de ces résultats, les caractéristiques mécaniques sont calculées en supposant que le matériau est linéaire, ce qui n'est vrai qu'en première approximation. La norme du module complexe, $|E^*|$, est calculée à partir de l'amplitude de la contrainte et l'amplitude de la déformation moyenne des trois extensomètres par l'équation suivante (Baaj 2002) :

$$|E^*| = \sigma_A / \varepsilon_A \quad (6.4)$$

L'angle de phase φ_E est le déphasage entre le signal de contrainte et de la déformation moyenne.

$$\varphi_E = \varphi_\sigma - \varphi_\varepsilon \quad (6.5)$$

Les composantes E_1 et E_2 du module complexe sont calculées à partir des équations suivantes :

$$E_1 = |E^*|. \cos \varphi_E \quad (6.6)$$

$$E_2 = |E^*|. \sin \varphi_E \quad (6.7)$$

L'énergie dissipée (W_d) par cycle de chargement sinusoïdal est calculée pour le signal de la déformation moyenne à partir de l'équation suivante :

$$W_d = \pi \cdot \epsilon_A \cdot \sigma_A \cdot \sin \varphi_E \quad (6.8)$$

Les valeurs calculées lors du traitement des fichiers d'acquisition sont rassemblées dans un seul fichier appelé « résultats de l'essai ». Ce fichier contient les résultats traités de l'essai et utilisés pour obtenir les valeurs permettant de caractériser le phénomène de fatigue. Chaque ligne dans ce fichier correspond aux résultats d'un cycle de sollicitation et contient :

- numéro de cycle traité (N);
- amplitude du signal de contrainte σ_A ;
- amplitude du signal de déformation ϵ_A ;
- la valeur moyenne de la contrainte (centre du signal de contrainte) σ_0 ;
- la valeur moyenne de la déformation (centre du signal de déformation) pour les trois extensomètres et pour la déformation moyenne $\epsilon_0, \epsilon_{i0}$;
- norme du module complexe $|E^*|$;
- angle de phase φ_E ;
- amplitudes des signaux de déformation pour les trois extensomètres ϵ_{iA} ;
- les composantes E_1 et E_2 du module complexe;
- l'énergie dissipée par cycle de chargement W_d ;
- l'écart des amplitudes de déformation pour les trois extensomètres par rapport à la déformation moyenne $(\epsilon_{iA} - \epsilon_A) / \epsilon_A$ 100 %;
- la température T de l'éprouvette;
- les indices de qualités (IQ).

6.3.3 Présentation graphique des résultats

Plusieurs courbes sont utilisées pour la présentation graphique des résultats d'un essai de fatigue. Ces courbes servent dans un premier temps à vérifier la validité de l'essai et dans un deuxième temps à observer l'évolution des caractéristiques mécaniques de l'éprouvette en fonction des cycles de sollicitation. Également, l'analyse graphique permet d'avoir une idée sur le nombre de cycles correspondant à l'initiation et la propagation des fissures au sein de l'éprouvette, laquelle vise de cerner sa durée de vie en fatigue.

Les courbes suivantes sont utilisées dans cette présentation :

- $(N - T)$: la courbe d'évolution de la température en fonction du nombre de cycles;
- $(N - |E^*|)$: la courbe d'évolution de la norme du module complexe en fonction du nombre de cycles;
- $(N - IQ)$: les courbes des indices des qualités (IQ) pour les signaux de la contrainte, la déformation et les trios extensomètres. Ces courbes permettent de valider l'essai;
- $(N - \epsilon_{iA})$ et $(N - \epsilon_A)$: les courbes d'évolution de l'amplitude de déformation pour les trois extensomètres et la déformation moyenne, en fonction du nombre de cycles;
- $(N - \text{écarts des amplitudes de déformation})$: les courbes d'évolution des écarts de l'amplitude de déformation des trois extensomètres par rapport à l'amplitude de la déformation moyenne;
- $(N - \epsilon_{i0})$ et $(N - \epsilon_0)$: les courbes d'évolution du centre de déformation pour les trois extensomètres et celle de la déformation moyenne, en fonction du nombre de cycles;
- $(N - \sigma_A)$: la courbe d'évolution de l'amplitude de contrainte en fonction du nombre de cycles;
- $(N - \sigma_0)$: la courbe d'évolution du centre de contrainte (valeur moyenne) en fonction du nombre de cycles;
- $(N - \varphi)$: la courbe d'évolution de l'angle de phase en fonction du nombre de cycles;

- $(N - W_d)$: la courbe d'évolution de l'énergie dissipée par cycle de sollicitation en fonction du nombre de cycles;
- $(\varphi - |E^*|)$: la courbe d'évolution de la norme du module complexe en fonction de l'angle de phase (Espace de BLACK).

De manière à mettre en perspective l'importance des différentes étapes suivies pour l'analyse de chacun des essais de fatigue réalisés, les sections suivantes vont reprendre un à un les différentes courbes citées précédemment telles que compilées pour un essai type réalisé dans le cadre de cette recherche, soit les résultats de l'éprouvette P3-B2 de l'enrobé GB20 PG58-28 testée en mode de déformation et comparé en même temps avec les résultats de l'éprouvette P2-D3 de l'enrobé GB20 PG64-28 testée en mode de contrainte.

Au fur et à mesure de la présentation de ces courbes, des commentaires pertinents sont donnés relativement à leur interprétation. Au besoin, quelques résultats atypiques observés sont présentés également dans le cadre de l'analyse des résultats des essais de fatigue. À noter que l'ensemble des courbes obtenues pour chacun des essais réalisés est donné à l'annexe III.

6.3.3.1 Évolution de la température

La Figure 6.8 présente l'évolution de la température mesurée à la surface de l'éprouvette en fonction du nombre de cycles pour l'éprouvette P3-B2. Bien que la température de l'enceinte ait été thermo régulée à 10 °C (T_{consigne}), on observe, dans le cas de cet essai, un échauffement rapide, de l'ordre de 0,4 °C, au début, et ce, jusqu'au cycle 50 000. Par la suite, la température se stabilise durant la deuxième phase de l'essai à environ 10,3 °C.

Pour les essais de fatigue en mode de déformation et après une première phase d'échauffement, la majorité des essais présentent une phase de refroidissement ou une stabilisation de la température (Baaj 2002).

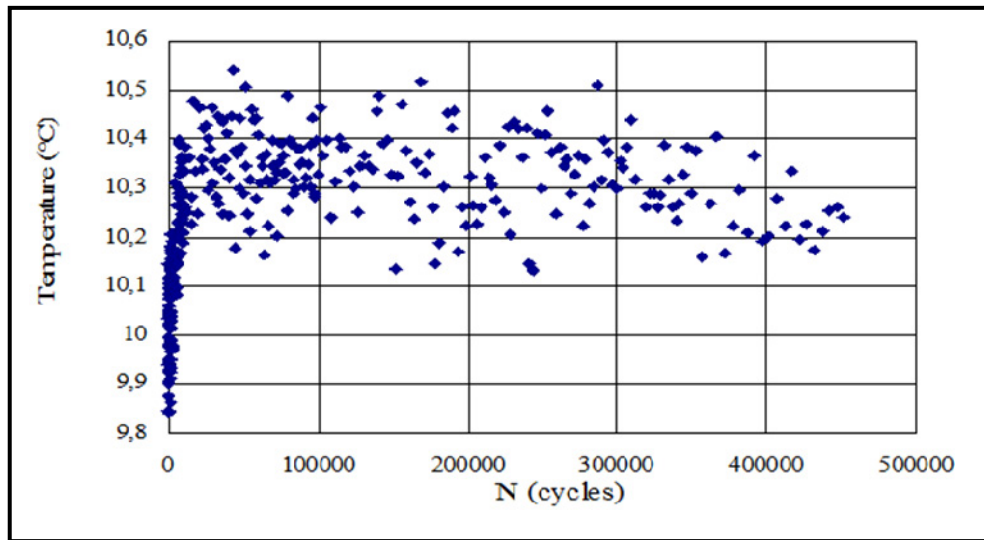


Figure 6.8 Évolution de la température à la surface de l'éprouvette en fonction du nombre de cycles pour l'essai P3-B2 en mode de déformation (GB20 PG58-28; $T_{\text{consigne}} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10 \text{ Hz}$; $\epsilon_0 = 120 \text{ }\mu\text{def}$)

La Figure 6.9 présente l'évolution de la température à la surface de l'éprouvette en fonction du nombre de cycles pour une autre éprouvette, l'éprouvette P2-D3, soumise à la même température de consigne, en l'occurrence $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$, mais pour un mode de sollicitation en contrôle de contrainte. L'éprouvette P2-D3 est confectionnée à partir de l'enrobé GB20 PG64-28, lequel est confectionné avec un bitume polymère.

Les résultats présentés à la Figure 6.9 montrent clairement que pour l'essai de fatigue en mode de contrainte, la température augmente rapidement pendant la première phase de l'essai et demeure croissante, mais avec une vitesse plus modérée pendant la deuxième phase. Pour un essai conduit en contrôle de contrainte, on observe effectivement un échauffement continu du début à la fin de l'essai.

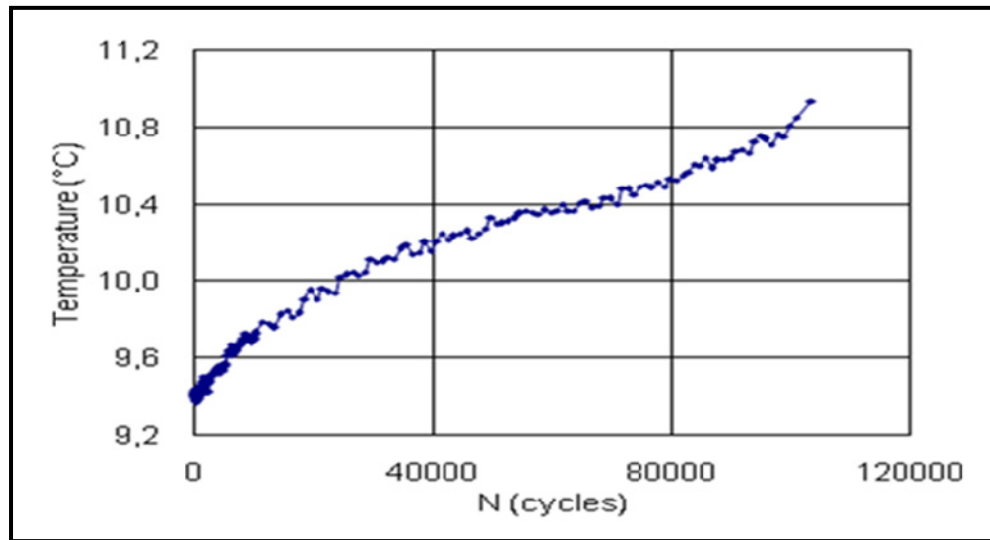


Figure 6.9 Évolution de la température à la surface de l'éprouvette en fonction du nombre de cycles pour l'essai P2- D3, sollicité en mode de contrainte (GB20 PG64-28; $T_{\text{consigne}} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10 \text{ Hz}$; $\sigma_0 = 0,9 \text{ MPa}$)

6.3.3.2 Évolution de la norme du module complexe

En cours d'essai de fatigue, les acquisitions de données permettent de calculer et de tracer en continu l'évolution de la raideur de l'éprouvette en cours de sollicitation.

D'une part, la Figure 6.10 présente la courbe de la norme du module complexe en fonction du nombre de cycles pour un essai de fatigue réalisé sur l'éprouvette P3-B2 en contrôle de déformation.

D'autre part, la Figure 6.11 présente la courbe de la norme du module complexe en fonction de nombre de cycles pour un essai de fatigue réalisé en contrôle de contrainte sur l'éprouvette P2-D3.

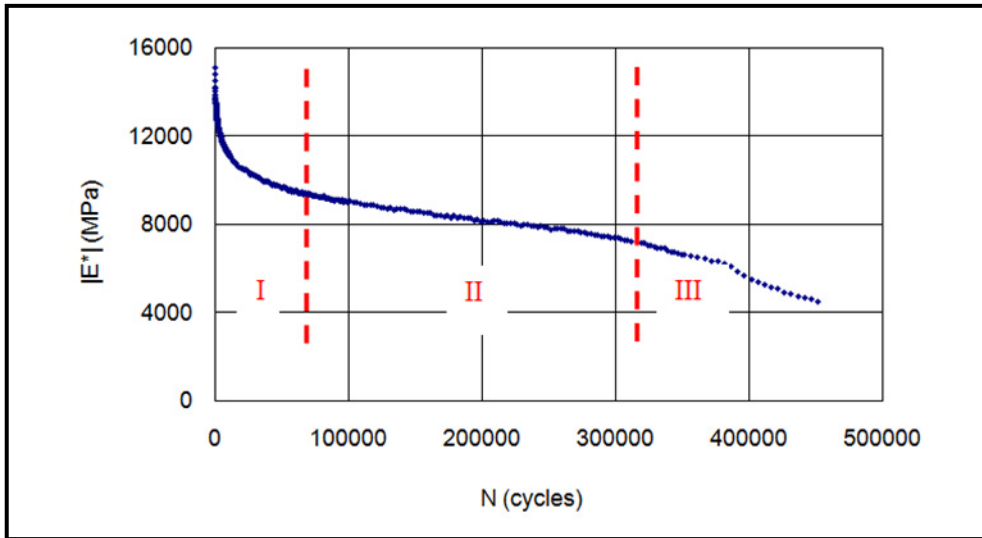


Figure 6.10 Évolution de la raideur en fonction du nombre de cycles pour l'éprouvette P3-B2, testée en mode de déformation (GB20 PG58-28; $T_{\text{consigne}} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$; $\epsilon_0 = 120\text{ }\mu\text{def}$)

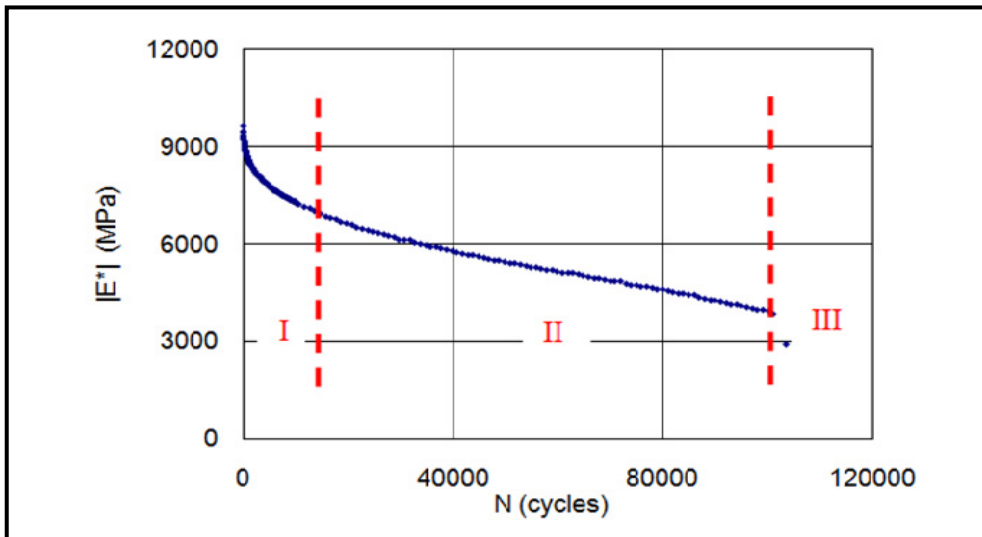


Figure 6.11 Évolution de la raideur en fonction du nombre de cycles pour l'essai P2-D3 en mode de contrainte (GB20 PG64-28; $T_{\text{consigne}} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$; $\sigma_0 = 0,9\text{ MPa}$)

Pour les deux modes d'essais, l'évolution de la raideur de l'éprouvette en cours de sollicitation présente trois phases distinctes. Une première phase (I), au début de l'essai, marquée par une chute rapide de la raideur de l'éprouvette à vitesse décroissante liée aux effets biaisant, suivie par une deuxième phase (II) où la décroissance est nettement plus modérée et quasi linéaire. Finalement, une troisième phase (III) où la valeur de la raideur subit de nouveau une chute rapide avec une vitesse croissante.

Par ailleurs, pour certains des essais de fatigue, seulement deux phases, les phases I et II, sont observées. La Figure 6.12 montre une rupture soudaine de l'éprouvette en cours de sollicitations.

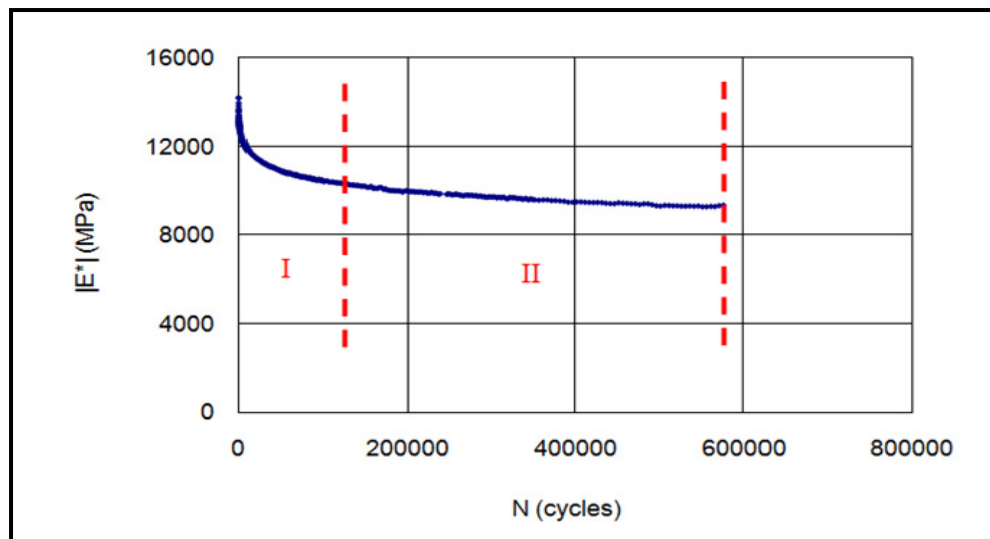


Figure 6.12 Évolution de la raideur en fonction du nombre de cycles pour l'essai P3-C4 en mode de déformation (GB20 PG58-28; $T_{\text{consigne}} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$; $Fr = 10 \text{ Hz}$; $\epsilon_0 = 90 \text{ } \mu\text{def}$)

6.3.3.3 Détermination de la raideur initiale $|E_0^*|$

Pour bien analyser un essai de fatigue, il faut impérativement connaître la valeur de la raideur du matériau au premier cycle, laquelle est désignée raideur initiale et annotée $|E_0^*|$. La valeur de $|E_0^*|$ n'est pas simple à cerner. En effet, en début d'essai l'atteinte d'une stabilisation de la sollicitation imposée (déformation ou contrainte) nécessite un certain nombre de cycles.

Plusieurs auteurs ont défini des critères spécifiques pour fixer la valeur de $|E_0^*|$. Le Tableau 6.4 présente les différentes approches proposées en vue de cerner la valeur de $|E_0^*|$.

Tableau 6.4 La valeur du module initial selon la littérature

Détermination de $ E_0^* $	Référence
<ul style="list-style-type: none"> la valeur du module initial est associée à la valeur de la raideur suivant une extrapolation logarithmique des 100 premiers cycles ; 	Di Benedetto 2001
<ul style="list-style-type: none"> la valeur du module initial correspond à la raideur mesurée au 1^{er} cycle de sollicitation ; 	Baaj 2002
<ul style="list-style-type: none"> la valeur du module au 100^{ème} cycle ; 	Di Benedetto 2004
<ul style="list-style-type: none"> la valeur du module initial est associée à la valeur de la raideur extrapolée linéairement en considérant les valeurs du module des cycles 50 à 300 ; 	Nguyen 2010
<ul style="list-style-type: none"> la valeur du module initial est associée à la valeur de la moyenne de la raideur mesurée au cours des 100 premiers cycles de sollicitation. 	Noël 2011

Comme en témoigne le Tableau 6.4, la notion du module initial $|E_0^*|$ n'est pas unique et diffère d'un auteur à l'autre. Il est clair qu'indépendamment du type d'essai, il est tout à fait nécessaire d'écartier les premiers cycles de sollicitations, car l'atteinte de la consigne de sollicitation n'est pas stabilisée : il faut quelques cycles pour atteindre la valeur désirée (contrainte ou déformation) à cause du temps d'adaptation de la presse hydraulique lors du démarrage de l'essai.

En ce qui concerne les essais réalisés dans ce travail, la norme de $|E_0^*|$ est définie comme étant la valeur de l'ordonnée d'origine des 50 premiers cycles pour les essais réalisés dans le LCMB et l'ordonnée d'origine des 200 premiers cycles pour les essais réalisés en entreprise (GÉCAN). Cette différence entre les deux laboratoires est justifiée du fait que la stabilisation de la valeur de déformation imposée est obtenue plus rapidement sur les presses du LCMB, en raison des réglages et ajustements qui sont différents entre les deux presses hydrauliques.

En définitive, on s'est intéressé à la valeur du module initial, parce que c'est la valeur utilisée pour déterminer la durée de vie de l'éprouvette en regard au critère classique. Notons que pour les résultats présentés à la Figure 6.10, la valeur du module initial $|E_0^*|$ pour l'éprouvette P3-B2 est 14 994 MPa correspond à une durée de vie en fatigue suivant le critère classique $N_{50\%}$ de 286 600 cycles.

6.3.3.4 Courbes des indices de qualités

Pour évaluer la qualité des signaux pour la contrainte, la déformation et les trois extensomètres et valider ainsi la qualité d'un essai, le calcul des indices de qualité (IQ) est introduit pour chaque cycle analysé. L'indice de qualité vise à quantifier l'écart moyen des valeurs mesurées à celles calculées pour deux cycles consécutifs. Dans le cas d'une sollicitation de qualité, cet écart tend vers zéro.

Les indices de qualité pour un essai donné se calculent à partir de la relation suivante :

$$IQ (\%) = \sum_{i=1}^n * \frac{G_{\text{mesuré}} - G_{\text{calculé}}}{n * A} * 100 \quad (6.9)$$

Avec :

$G_{\text{mesuré}}$: Grandeur du signal mesuré;

$G_{\text{calculé}}$: Grandeur du signal calculé;

n : Nombre de points analysés (200 points);

A : Amplitude du signal.

Les Figures 6.13 et 6.14 présentent respectivement les courbes des indices de qualités en fonction du nombre de cycles pour l'essai de fatigue de l'éprouvette P3-B2, mené en contrôle de déformation, et pour l'essai de fatigue de l'éprouvette P2-D3, mené en contrôle de contrainte. Notons que la valeur limite a été fixée à 15 %. Au-delà de cette valeur limite, l'essai est rejeté et les cycles subséquents ne sont plus considérés valables. Par exemple, à partir de 410 000 cycles sur la Figure 6.13 et à partir de 101 000 cycles sur la Figure 6.14.

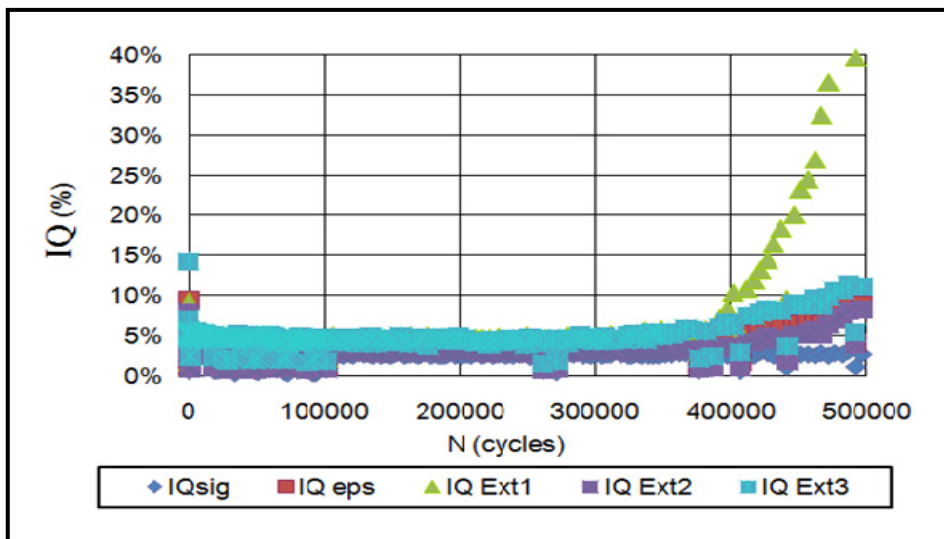


Figure 6.13 Évolution des indices de qualité en fonction du nombre de cycles pour l'essai P3-B2 en mode de déformation (GB20 PG58-28; $T_{\text{consigne}} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10 \text{ Hz}$; $\epsilon_0 = 120 \text{ }\mu\text{def}$)

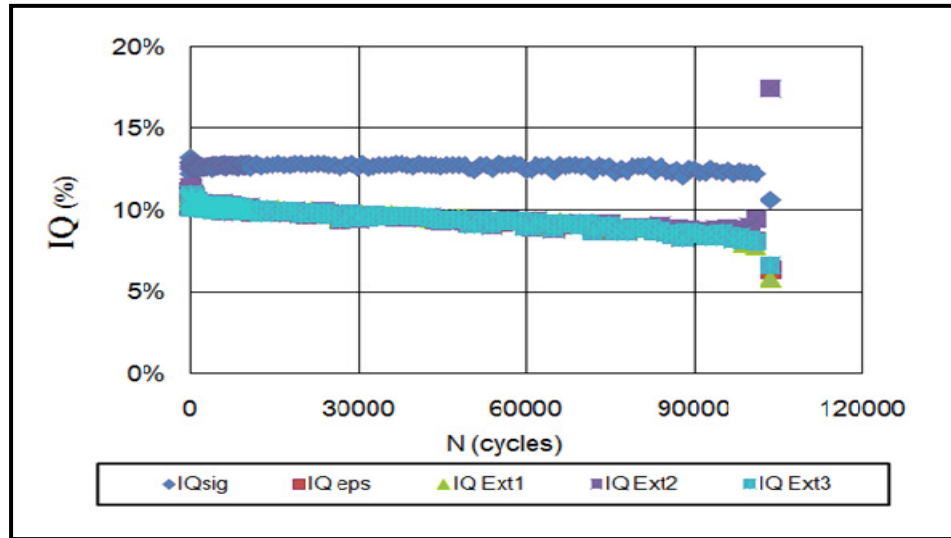


Figure 6.14 Évolution des indices de qualité en fonction du nombre de cycles pour l'essai P2-D3 en mode de contrainte (GB20 PG64-28; $T_{\text{consigne}} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10 \text{ Hz}$; $\sigma_0 = 0,9 \text{ MPa}$)

6.3.3.5 Évolution de la déformation

La Figure 6.15 présente une évolution typique de l'amplitude des déformations axiales en fonction du nombre de cycles lors d'un essai de fatigue en mode de déformation (éprouvette P3-B2) alors que la Figure 6.16 présente l'évolution de l'amplitude des déformations axiales en fonction du nombre de cycles lors d'un essai de fatigue en mode de contrainte (éprouvette P2-D3).

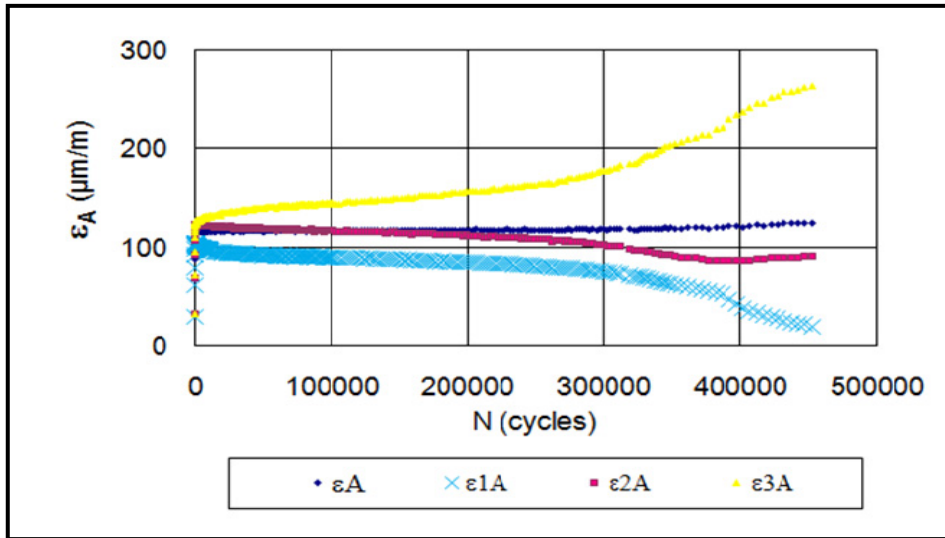


Figure 6.15 Évolution de l'amplitude des déformations en fonction du nombre de cycles pour l'essai P3-B2 en mode de déformation (GB20 PG58-28; $T_{\text{consigne}} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$; $\epsilon_0 = 120\text{ }\mu\text{def}$)

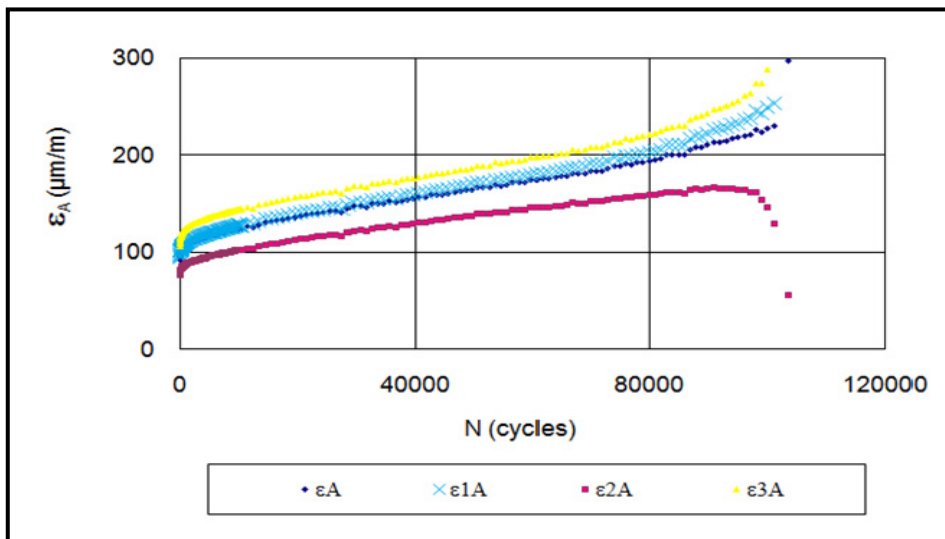


Figure 6.16 Évolution de l'amplitude des déformations en fonction du nombre de cycles pour l'essai P2-D3 en mode de contrainte (GB20 PG64-28; $T_{\text{consigne}} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$; $\sigma_0 = 0,9\text{ MPa}$)

Soulignons qu'au cours de la plupart des essais de fatigue réalisés, le pilotage s'est effectué en contrôle de déformation, en considérant la moyenne des trois déformations axiales. La Figure 6.15 montre clairement que l'amplitude de déformation moyenne (ϵ_A) est maintenue constante tout au long de l'essai. En revanche, les amplitudes de la déformation mesurées par chacun des trois capteurs axiaux (ϵ_{iA}) peuvent évoluer distinctement en cours d'essai. Les différences entre les amplitudes de ces trois capteurs axiaux et la moyenne évoluent avec l'avancement de l'essai.

Pour l'essai de fatigue en mode de contrainte (Figure 6.16), la déformation est la réponse à la sollicitation imposée en contrôle de force. Au début de l'essai, la déformation augmente très rapidement en raison de la chute de la raideur du matériau. Par la suite, la déformation continue sa croissance avec une vitesse beaucoup plus modérée. À la fin de l'essai, les différences entre les trois amplitudes de déformation augmentent considérablement, influencées par l'apparition des macros fissurations associées à la phase III.

Notons que, les écarts quant à l'évolution des déformations mesurées par les capteurs axiaux sont liés entre autres à un endommagement non homogène au sein de l'éprouvette en cours de sollicitations. Dans la grande majorité des essais, on s'assure de bien mettre à zéro les extensomètres avant le lancement des sollicitations de sorte que les mesures soient centrées ($\epsilon_{i0} = 0$). Cependant sous sollicitation, une excentricité liée à un mauvais alignement de l'éprouvette ou à un mauvais parallélisme des surfaces planes de collage des casques va inévitablement se traduire par un champ de sollicitation non homogène au sein de l'éprouvette, et donner lieu à une évolution différente des déformations mesurées par les trois capteurs en cours d'essai.

Également, l'hétérogénéité intrinsèque quant à la compacité au sein de l'éprouvette influence les mesures de déformation. Bien que lors de la fabrication des plaques, une attention particulière est portée quant aux étapes de malaxage de l'enrobé, de mise en œuvre et lors du carottage des éprouvettes permettant de maximiser l'homogénéité de la plaque d'enrobé, et par le fait même celle des éprouvettes qui en seront carottées, il subsiste des gradients de compacité au sein de la plaque.

À cet égard, il est important de carotter les éprouvettes selon un plan de carottage bien étudié qui permet de s'affranchir au maximum des effets de bord de la plaque.

Par ailleurs, pour éviter l'excentricité de la force appliquée, il est important d'effectuer le sciage et le carottage très soigneusement afin d'obtenir des éprouvettes parfaitement cylindriques, exemptes d'irrégularité, avec des surfaces planes bien parallèles. Évidemment, lors du collage des casques, il faut faire attention quant au centrage de l'éprouvette.

Pour juger de la qualité d'un essai de fatigue en regard à l'homogénéité des champs de contrainte-déformation au sein de l'éprouvette en cours d'essai, l'évolution de l'écart des amplitudes de déformation de chacun des extensomètres par rapport à la déformation moyenne est analysée.

Les Figures 6.17 et 6.18 montrent respectivement l'évolution de ces écarts obtenus pour l'éprouvette P3-B2 en mode de déformation et celle pour l'éprouvette P2-D3 en mode de contrainte.

Notons que dans le processus d'interprétation d'un résultat d'essai de fatigue, l'analyse de l'évolution des écarts a une grande importance, car elle permet de juger de l'état d'homogénéité du champ de déformation dans l'éprouvette au cours de l'essai. Plus ces écarts sont élevés, plus le champ de déformation est non homogène. Avec l'avancement de l'essai, les écarts deviennent très souvent de plus en plus importants. La valeur limite qui correspond à $\pm 25\%$ d'écart (Baaj 2002) et qui est associée à la durée de vie ($N_{f\Delta ext}$) dans le cas de cet essai pour l'éprouvette P3-B2 est 133 769 cycles (Figure 6.17).

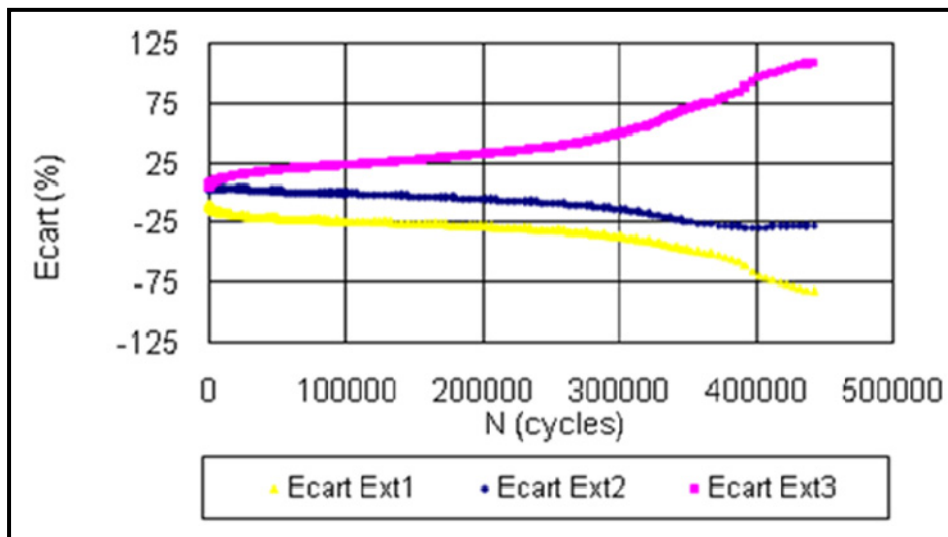


Figure 6.17 Écarts moyens de la déformation en fonction du nombre de cycles pour l'essai P3-B2 en mode de déformation (GB20 PG58-28; $T_{\text{consigne}} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$; $\epsilon_0 = 120\text{ }\mu\text{def}$)

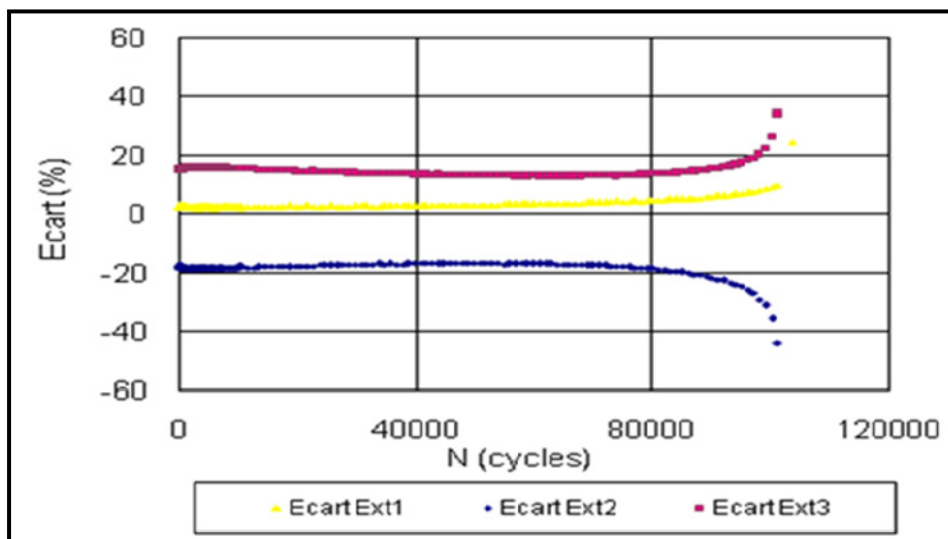


Figure 6.18 Écarts moyens de la déformation en fonction du nombre de cycles pour l'essai P2-D3 en mode de contrainte (GB20 PG64-28; $T_{\text{consigne}} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$; $\sigma_0 = 0,9\text{ MPa}$)

Dans quelques-uns des essais de fatigue, un phénomène particulier est observé quant à l'évolution des amplitudes de déformation des extensomètres. En effet, bien qu'il soit attendu que l'évolution de la déformation d'un extensomètre progresse de façon continue, il arrive dans certains cas un changement marqué d'une singularité dans l'évolution de l'amplitude de la déformation en cours d'essai.

La Figure 6.19 présente un tel cas. Le même phénomène a été observé par Nguyen (2010) suivant des essais de fatigue, lequel a été désigné « effet d'accordéon ».

La Figure 6.19 montre que l'évolution de l'amplitude de la déformation axiale de l'extensomètre 1 (ϵ_{1A}) en fonction du nombre de cycles diminue progressivement pour atteindre une valeur nulle avant de remonter. Ce phénomène peut être expliqué par un champ de contrainte-déformation non homogène au sein de l'éprouvette (Nguyen 2010). Cette dernière est déformée différemment d'un côté à l'autre. Le côté le mieux compacté se déforme moins que les autres côtés. À partir d'un moment où la valeur de déformation mesurée par l'extensomètre 1 devient presque nulle, l'éprouvette se comporte comme l'accordéon : cette déformation continue à évoluer, mais dans le sens inverse. En fait, le signal de cette déformation (extensomètre 1) est déphasé par rapport aux deux autres signaux comme en témoigne la Figure 6.20.

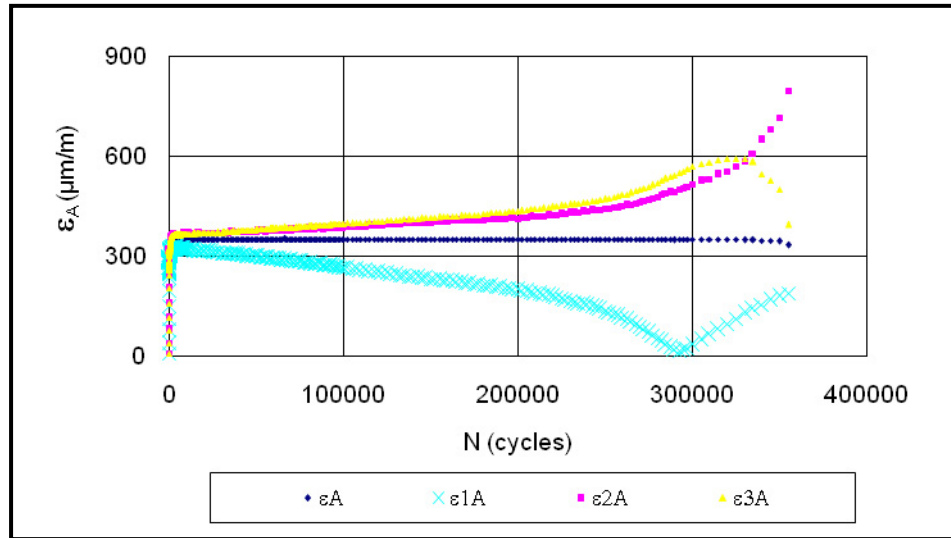


Figure 6.19 Illustration de l'effet d'accordéon observé lors de l'essai P2-C1 en contrôle de déformation (GB20 PG58-28; $T_{\text{consigne}} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10 \text{ Hz}$; $\epsilon_0 = 350 \text{ }\mu\text{def}$)

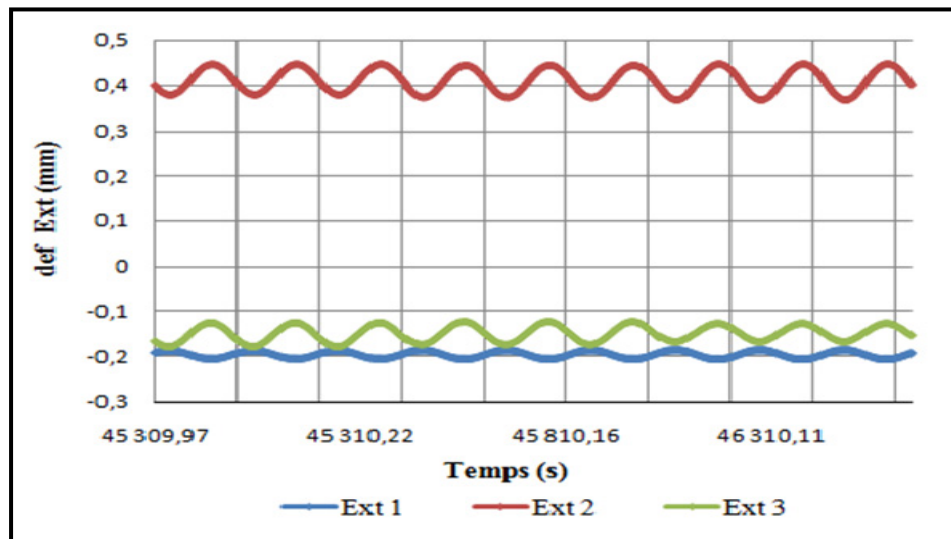


Figure 6.20 Déphasage entre les signaux de déformation observé lors de l'essai P2-C1 en contrôle de déformation (GB20 PG58-28; $T_{\text{consigne}} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10 \text{ Hz}$; $\epsilon_0 = 350 \text{ }\mu\text{def}$)

6.3.3.6 Centre de déformation

Lors d'un essai de fatigue, on vise une sollicitation centrée. Pour valider un essai, on doit analyser également l'évolution de la valeur moyenne du signal de déformation et celles de la déformation des extensomètres en fonction du nombre de cycles. La Figure 6.21 montre un exemple des résultats pour l'essai de fatigue de l'éprouvette P3-B2 conduit en mode de déformation et la Figure 6.22 montre un exemple des résultats pour l'essai de fatigue de l'éprouvette P2-D3 conduit en mode de contrainte.

Les résultats présentés à la Figure 6.21 montrent que le centre du signal désiré (ε_0) est maintenu par la presse à une valeur nulle tout au long de l'essai. Par ailleurs, les valeurs moyennes des signaux de déformation des trois extensomètres évoluent en cours d'essai.

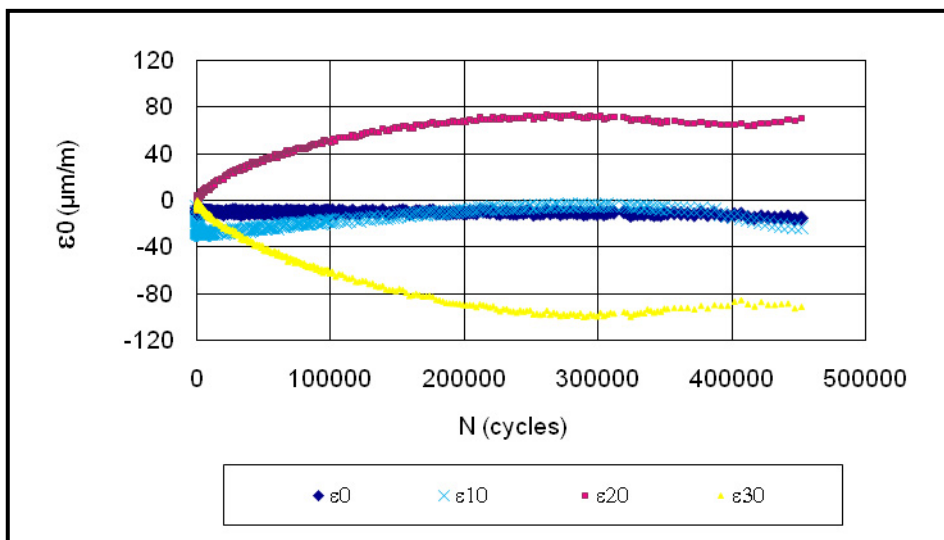


Figure 6.21 Évolution du centre de la déformation en fonction du nombre de cycles pour l'essai P3-B2 en mode de déformation (GB20 PG58-28; $T_{\text{consigne}} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$; $\varepsilon_0 = 120\text{ }\mu\text{def}$)

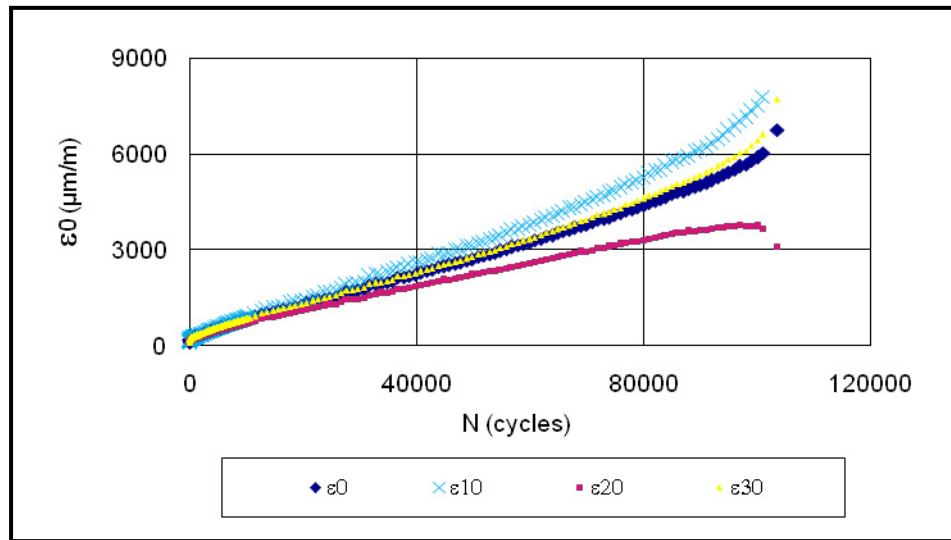


Figure 6.22 Évolution du centre de la déformation en fonction du nombre de cycles pour l'essai P2-D3 en mode de contrainte (GB20 PG64-28; $T_{\text{consigne}} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10 \text{ Hz}$; $\sigma_0 = 0,9 \text{ MPa}$)

Dans le cas d'un essai de fatigue en mode de contrainte, la déformation permanente atteint des valeurs plus élevées que dans le cas d'un essai en mode de déformation. La déformation pour ces essais est la réponse du matériau à la sollicitation en force.

6.3.3.7 Amplitude de contrainte

L'endommagement par fatigue d'une éprouvette est quantifié par le calcul de la raideur de l'éprouvette en cours d'essai. Pour calculer cette valeur, il convient notamment de connaître l'évolution de la contrainte appliquée pour maintenir la déformation imposée ciblée. La Figure 6.23 montre l'évolution de l'amplitude du signal de contrainte en fonction du nombre de cycles pour un essai de fatigue mené en mode de déformation pour l'éprouvette P3-B2. Puisque l'amplitude de la déformation est maintenue constante, l'amplitude de la contrainte subit une chute au début de l'essai due aux effets biaisant (échauffement, thixotropie et non-linéarité) et à l'endommagement par fatigue. Puis cette diminution se modère par la suite jusqu'à la fin de la phase II. La fin de l'essai est marquée par une nouvelle chute significative.

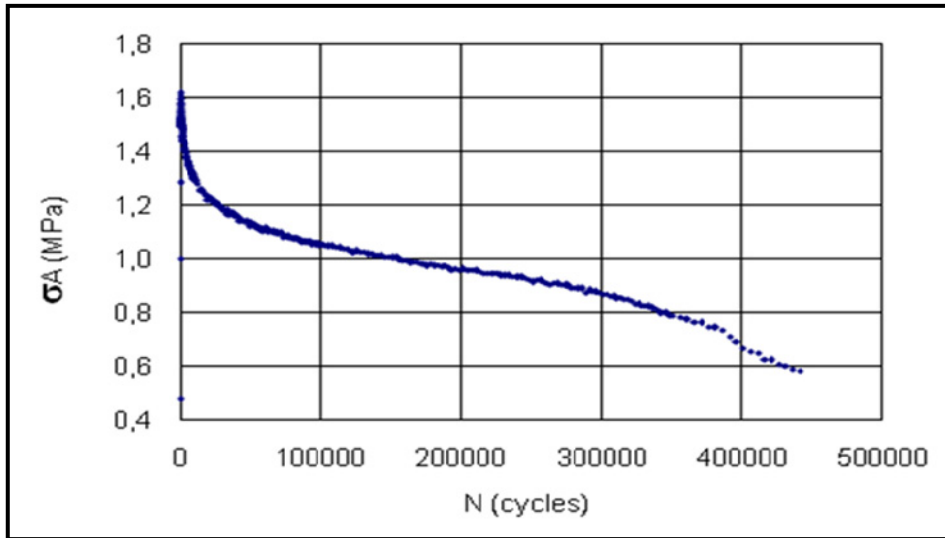


Figure 6.23 Évolution de l'amplitude du signal de contrainte en fonction du nombre de cycles pour l'essai P3-B2 en mode de déformation (GB20 PG58-28; $T_{\text{consigne}} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$; $Fr = 10 \text{ Hz}$; $\epsilon_0 = 120 \text{ }\mu\text{def}$)

Pour l'essai P2-D3 conduit en mode de contrainte, l'amplitude reste quasi constante tout au long de l'essai (Figure 6.24). Cette courbe est importante pour vérifier la qualité de l'asservissement en force.

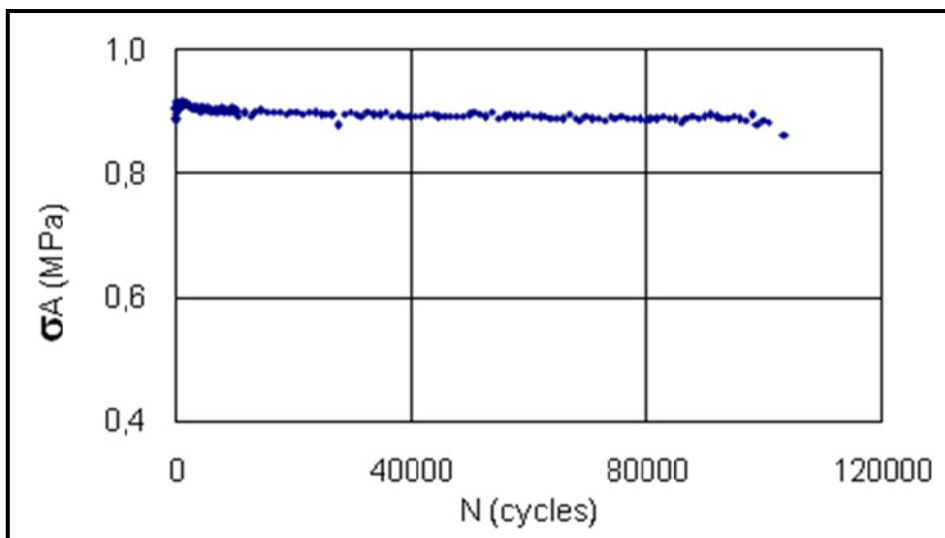


Figure 6.24 Évolution de l'amplitude du signal de contrainte en fonction du nombre de cycles pour l'essai P2-D3 en mode de contrainte (GB20 PG64-28; $T_{\text{consigne}} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$; $Fr = 10 \text{ Hz}$; $\sigma_0 = 0,9 \text{ MPa}$)

6.3.3.8 Centre de contrainte

Les Figures 6.25 et 6.26 présentent respectivement l'évolution du centre de la contrainte pour un essai de fatigue en mode de déformation et en mode de contrainte. En mode de déformation, la contrainte est la réponse du matériau à la sollicitation. Le centre du signal de force évolue très rapidement au début de l'essai pour se stabiliser vers le 100^{ème} cycle selon les résultats de la Figure 6.25. Les valeurs du centre de force sont très proches de zéro, ce qui montre que l'échantillon se relaxe au cours de l'essai.

Pour l'essai en mode de contrainte, le centre du signal de contrainte devait être maintenu constant, mais la consigne n'a pas été bien respectée par la presse (Figure 6.26). Les valeurs obtenues sont très proches de la valeur visée (zéro), avec de très faibles fluctuations, probablement dues au bruit électrique de la cellule de charge.

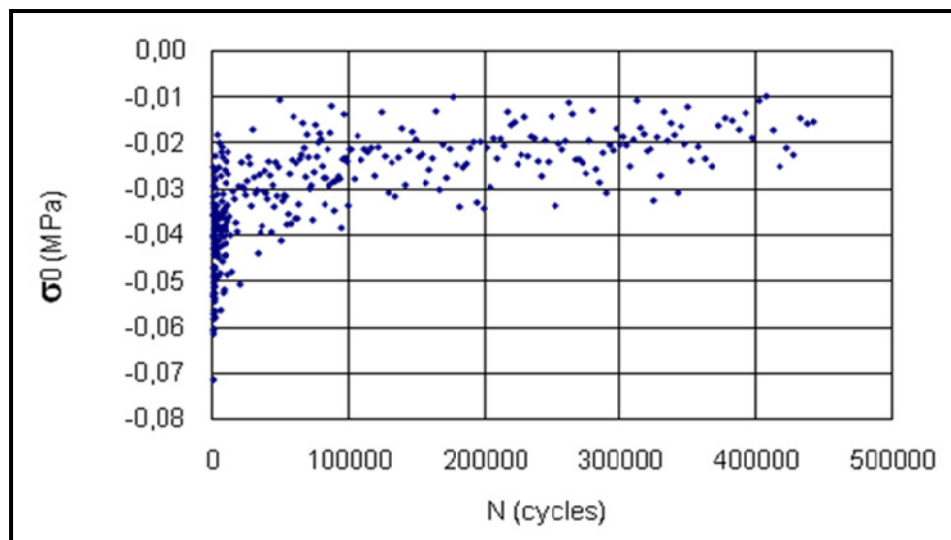


Figure 6.25 Évolution de l'amplitude du signal de contrainte en fonction du nombre de cycles pour l'essai P3-B2 en mode de déformation (GB20 PG58-28; $T_{\text{consigne}} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$; $Fr = 10 \text{ Hz}$; $\epsilon_0 = 120 \text{ }\mu\text{def}$)

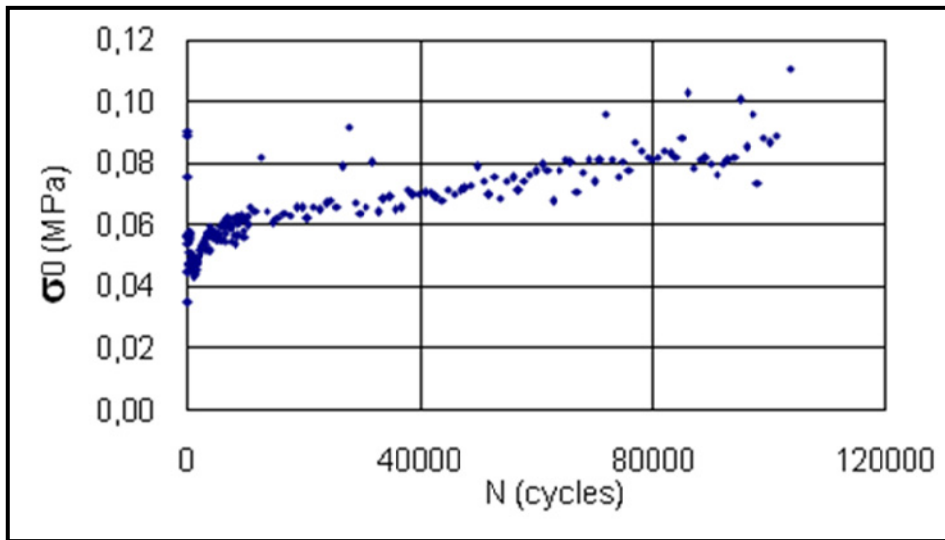


Figure 6.26 Évolution de l'amplitude du signal de contrainte en fonction du nombre de cycles pour l'essai P2-D3 en mode de contrainte (GB20 PG64-28; $T_{\text{consigne}} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10 \text{ Hz}$; $\sigma_0 = 0,9 \text{ MPa}$)

6.3.3.9 Déphasage

Les Figures 6.27 et 6.28 présentent respectivement l'évolution de l'angle de phase du module complexe en fonction du nombre de cycles pour un essai en mode de déformation et un essai en mode de contrainte. Au cours de l'essai, pour les deux modes, l'angle de phase augmente rapidement au début (phases I et II), puis plus lentement par la suite. La fin de l'essai est marquée par une augmentation ou une diminution rapide du déphasage qui traduit la gravité de l'endommagement. La seule différence entre les deux modes se distingue dans la suite de l'essai où l'évolution de l'angle de phase devient plus modérée et l'augmentation du déphasage est plus importante en mode de contrainte qu'en mode de déformation.

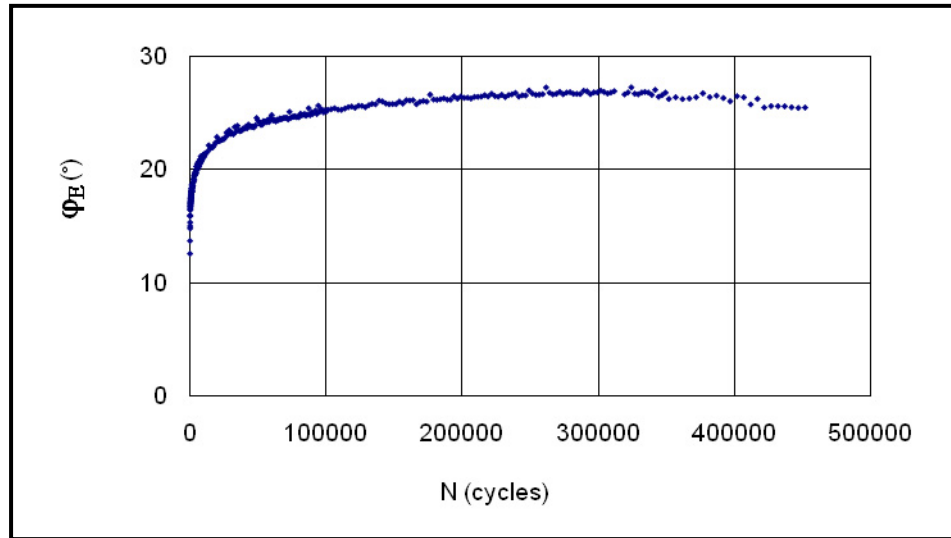


Figure 6.27 Évolution de l'angle de phase en fonction du nombre de cycles pour l'essai P3-B2 en mode de déformation (GB20 PG58-28; $T_{\text{consigne}} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$; $Fr = 10 \text{ Hz}$; $\epsilon_0 = 120 \text{ }\mu\text{def}$)

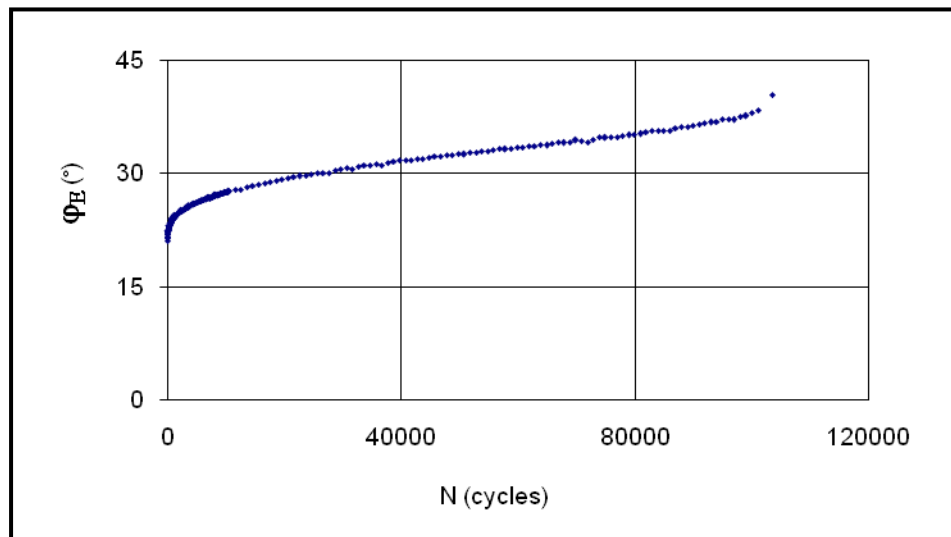


Figure 6.28 Évolution de l'angle de phase en fonction du nombre de cycles pour l'essai P2-D3 en mode de contrainte (GB20 PG64-28; $T_{\text{consigne}} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$; $Fr = 10 \text{ Hz}$; $\sigma_0 = 0,9 \text{ MPa}$)

6.3.3.10 Énergie dissipée

Comme indiqué auparavant, le critère de rupture en utilisant l'énergie dissipée n'est pas étudié dans ce travail de recherche, mais le paramètre lui-même sera utilisé dans la méthode DGCB. L'énergie dissipée a un rôle important dans les essais de fatigue puisqu'elle se transforme en chaleur et augmente la température de l'éprouvette. Son évolution dépend de la contrainte, de la déformation et de l'angle de phase. Les courbes de cette évolution en fonction du nombre de cycles sont présentées dans la Figure 6.29 pour l'essai P3-B2 conduit en mode de déformation et à la Figure 6.30 pour l'essai P2-D3, conduit en mode de contrainte.

Généralement en mode de déformation, l'angle de phase augmente au cours de l'essai, l'amplitude moyenne de déformation est maintenue constante par la presse et l'amplitude de la contrainte ne cesse pas de diminuer durant l'essai, et ce, jusqu'à la phase de rupture, alors que l'énergie dissipée est une fonction décroissante du nombre de cycles.

Pour les essais en mode de contrainte, comme l'amplitude de la contrainte est maintenue constante durant tout l'essai, l'angle de phase et l'amplitude de déformation augmentent constamment dans les phases I et II de l'essai et par conséquent l'énergie dissipée augmente durant toute ces phases.

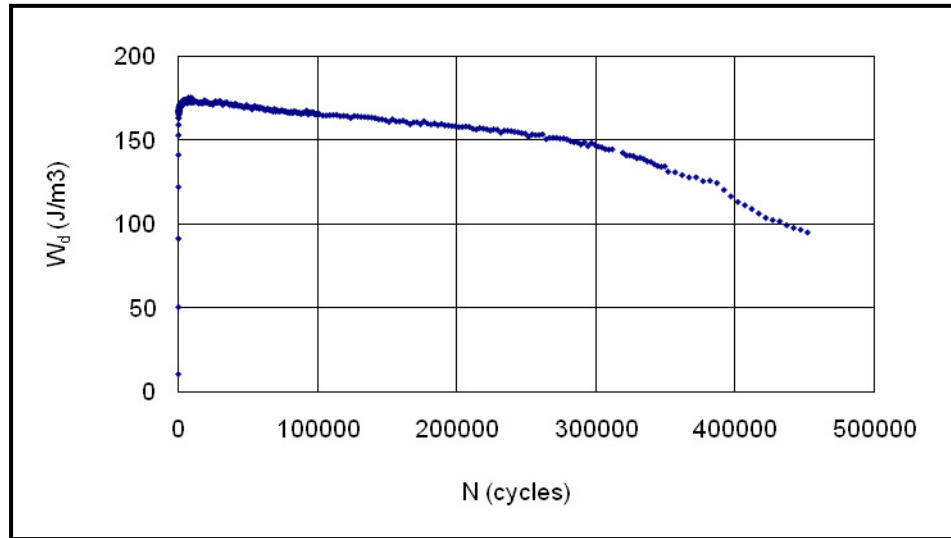


Figure 6.29 Évolution de l'énergie dissipée en fonction du nombre de cycles pour l'essai P3-B2 en mode de déformation (GB20 PG58-28; $T_{\text{consigne}} = 10\text{ °C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$; $\epsilon_0 = 120\text{ }\mu\text{def}$)

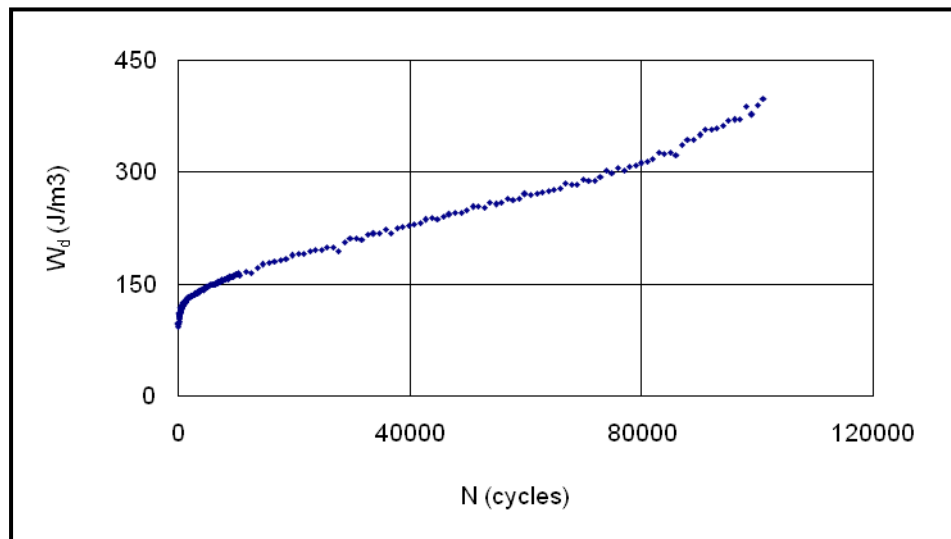


Figure 6.30 Évolution de l'énergie dissipée en fonction du nombre de cycles pour l'essai P2-D3 en mode de contrainte (GB20 PG64-28; $T_{\text{consigne}} = 10\text{ °C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$; $\sigma_0 = 0,9\text{ MPa}$)

6.3.3.11 Présentation dans l'espace de Black

La présentation du module complexe dans l'espace de Black est considérée pour cerner la durée de vie en fatigue de l'éprouvette. Notamment, la fin de la phase II qui est le début de la phase III est associée à la diminution de l'angle de phase (voir § 2.3.2.3) (Di Benedetto *et al.* 2004). Le module complexe est présenté dans l'espace de Black en fonction de l'angle de phase en échelle normale et non logarithmique pour l'essai mené en mode de déformation (Figure 6.31) et pour l'essai mené en mode de contrainte (Figure 6.32).

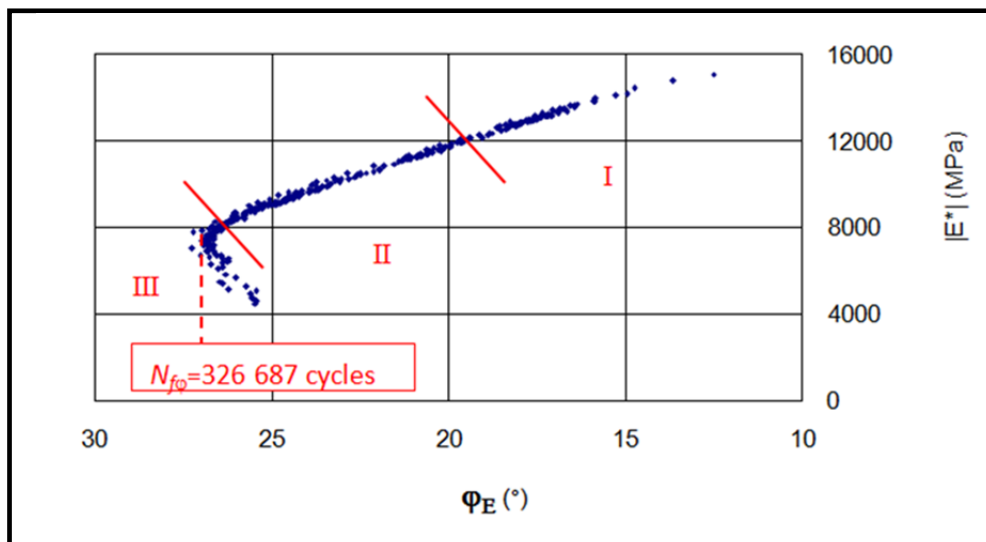


Figure 6.31 Présentation dans l'espace de Black pour l'essai P3-B2 en mode de déformation (GB20 PG58-28; $T_{\text{consigne}} = 10$ °C; $Fr = 10$ Hz; $\epsilon_0 = 120$ μdef)

Suivant les résultats présentés à la Figure 6.31, la durée de vie de l'éprouvette établie ($N_{f\phi}$) est de l'ordre de 326 687 cycles, soit, le nombre de cycles à partir du moment où l'angle de phase commence à diminuer.

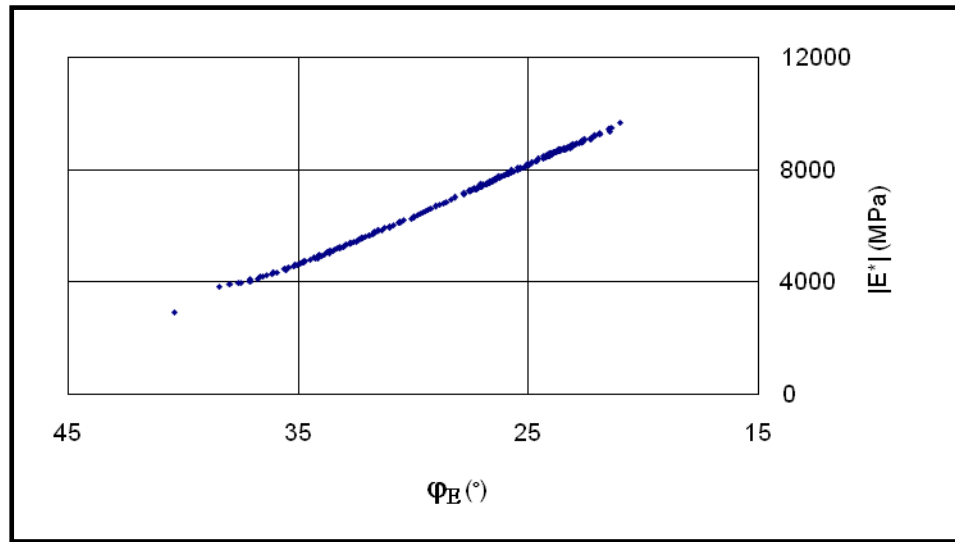


Figure 6.32 Présentation dans l'espace de Black pour l'essai P2-D3 en mode de contrainte (GB20 PG64-28; $T_{\text{consigne}} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10 \text{ Hz}$; $\sigma_0 = 0,9 \text{ MPa}$)

6.3.3.12 Bilan des critères de rupture

Faisant suite au traitement des signaux d'un essai de fatigue, on obtient les valeurs de rupture (durée de vie N_f) suivant les critères présentés aux sections 2.3.1 et 2.3.2. Le Tableau 6.5 donne la synthèse des durées de vie pour l'éprouvette P3-B2 testée à $120 \mu\text{def}$ et à $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ est mise en relief tout au long de la section 6.3.

Tableau 6.5 Bilan des valeurs des critères de rupture pour l'éprouvette P3-B2 en mode de déformation (GB20 PG58-28; $T_{\text{consigne}} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10 \text{ Hz}$; $\epsilon_0 = 120 \mu\text{def}$)

Critères	Fig. REF	Durée de vie
$N_{f50\%}$	6.10	286 600
Écart moyen entre extenso : $N_{f\Delta ext}$	6.17	133 769
Espace de Black : $(N_f\phi)$	6.31	326 687
$N_{fIII} = (N_f\phi + N_{f\Delta ext})/2$	n/d	230 228

Les valeurs des durées de vie présentées dans le Tableau 6.5 sont courtes, cela est dû à l'intensité élevée des déformations imposées en cours des essais réalisés afin d'atteindre rapidement la rupture de l'éprouvette ou la phase III.

Après l'analyse des résultats, on a souligné précédemment que la valeur de $N_{f50\%}$ dépend directement de la valeur du module initial qui n'est pas associé automatiquement à la valeur de la raideur mesurée au 1^{er} cycle de sollicitation (Section 6.3.3.3).

Par contre, pour cerner la valeur de la durée de vie au point de transition entre la phase II et III, les courbes qui présentent le champ d'homogénéité d'un essai de fatigue (l'espace de Black et les courbes des écarts moyens entre extensomètres) sont utilisées pour déterminer cette valeur en prenant la moyenne des deux résultats issus de ces présentations.

6.3.4 Validation d'un essai de fatigue

Un essai de fatigue doit être réalisé dans les règles de l'art. Notamment trois facteurs sont essentiels pour la bonne réalisation et l'analyse d'un essai de fatigue :

- 1) s'assurer du fait que le champ de contrainte-déformation est bien homogène au sein de l'éprouvette : l'écart limite maximum des amplitudes de déformation par rapport à la déformation moyenne doit être inférieur à 25 % et les indices de qualité doivent être inférieurs à 15 %;
- 2) s'assurer d'avoir un contrôle minutieux de la température en cours de l'essai ($\pm 0,5$ °C);
- 3) atteindre un nombre de cycles minimal de sollicitation. À cet égard, il est de mise de soumettre l'éprouvette à 60 000 cycles pour juger de sa performance en fatigue (Di Benedetto *et al.* 2004). Ce dernier point met en relief l'importance de l'amplitude de sollicitation imposée. En effet, dans certains essais, l'intensité de la déformation imposée réduit largement la durée de vie. Dès lors, on ne peut plus parler de fatigue de l'éprouvette.

CHAPITRE 7

ANALYSE DES RÉSULTATS DES ESSAIS DE FATIGUE

L'analyse des résultats des essais de fatigue réalisés sur les enrobés bitumineux testés au cours de ce travail est présentée dans ce chapitre. D'abord, tous les essais retenus sont présentés dans un tableau récapitulatif puis ils sont analysés avec les différents critères retenus (critère de rupture classique et critère de la fin de la phase II) pour les différentes conditions d'essais imposées. Une étude comparative selon la nature du bitume, l'influence de la température et la dispersion des durées de vie est présentée. Également, les durées de vie mesurées sont comparées aux durées de vie projetées en appliquant la méthode DGCB.

7.1 Comparaison des résultats des essais de fatigue effectués à différents niveaux de déformation

L'ensemble des étapes suivies est évoqué aux sections précédentes pour, d'une part, valider la réalisation d'un essai de fatigue et, d'autre part, cerner la durée de vie de chacune des éprouvettes testées. La rigueur scientifique avec laquelle l'ensemble des résultats d'essais de fatigue réalisés est traité dans le cadre de cette recherche est ainsi montrée.

Pour chacun des essais réalisés dans le cadre de cette campagne expérimentale, chacune des étapes visait à préciser la durée de vie en fatigue d'une éprouvette, et ce, suivant une méthodologie minutieuse. Les résultats des essais de fatigue réalisés et qui ont été jugés pertinents seront analysés dans les sections suivantes. Pour faciliter la comparaison de l'ensemble des résultats, l'évolution relative de la raideur de chaque éprouvette testée est calculée. C'est-à-dire que chacune des courbes de l'évolution de la raideur d'une éprouvette est tracée en référence de la valeur de la norme du module complexe initiale correspondante.

7.1.1 Comparaison des résultats des essais de fatigue réalisés à 10 °C

La Figure 7.1 illustre la relation entre la norme relative du module complexe et le nombre de cycles de sollicitation pour les essais de fatigue réalisés à divers niveaux d'amplitude de déformation imposée sur les deux types d'enrobés bitumineux testés dans ce programme expérimental, soit : a) les résultats de l'enrobé GB20 PG58-28 présentés à la Fig. 7.1 (a) et les résultats de l'enrobé GB20 PG64-28 présentés à la Fig. 7.1 (b).

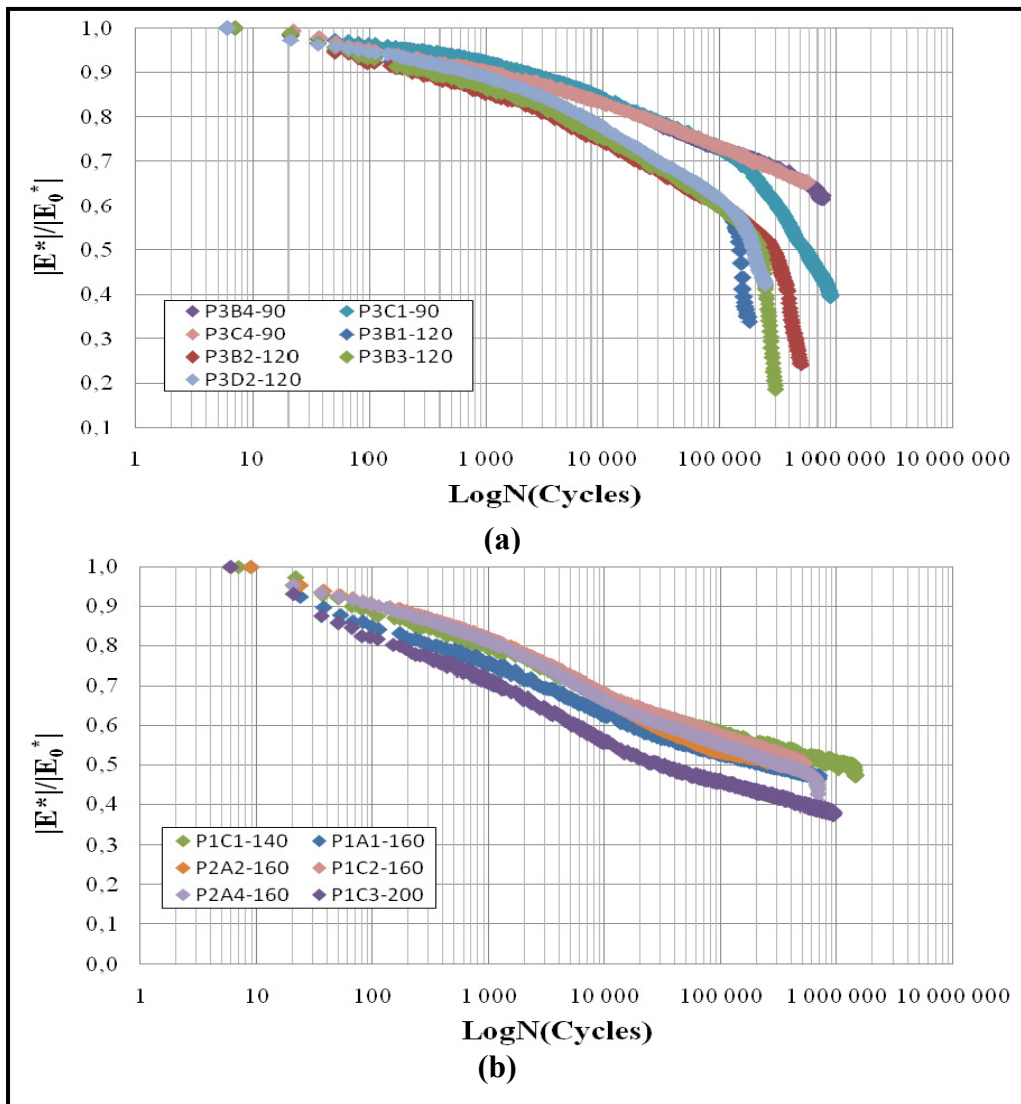


Figure 7.1 Évolution du rapport $|E^*|/|E_0^*|$ en fonction du nombre de cycles à différents niveaux de déformation pour les deux enrobés (a) GB20/PG58-28 (b) GB20/PG64-28 à 10 °C

La Figure 7.1 compare les résultats des différents essais réalisés. La Figure 7.1 (a) montre que les courbes des éprouvettes de l'enrobé GB20 PG 58-28 sont bien distinctes les unes des autres pour les différents niveaux de déformations imposés. Pour cette série d'essais, on observe clairement le changement de comportement associé à la transition entre les phases II et III du processus d'endommagement. À noter que le module complexe diminue plus rapidement avec l'augmentation de l'amplitude de déformation.

La Figure 7.1 (b) présente les courbes de l'évolution de la norme des modules normalisés pour l'enrobé bitumineux GB20 confectionné avec un bitume modifié (PG64-28) et testé à une température de 10 °C et à différents niveaux de déformation. Pour certaines des courbes de cette série d'essais, par exemple, l'essai P4-B3 (GB20 PG64-28; $T_{\text{consigne}} = 10 \text{ °C}$; $Fr = 10\text{Hz}$; $\epsilon_0 = 160\mu\text{def}$), on remarque une chute radicale de la raideur du matériau autour de 600 000 cycles, point marquant correspondant au changement de type d'endommagement (transition phases II et III).

La valeur de la durée de vie en fatigue correspondante à chacune des éprouvettes testées est déterminée. Le Tableau 7.1 présente la synthèse des durées de vie établies à partir des résultats obtenus pour les essais de fatigue réalisés sur les deux enrobés selon les différentes déformations et températures d'essai. De même, la raideur $|E_0^*|$ correspondante à chacune des éprouvettes testées est donnée au Tableau 7.1. Rappelons que la durée de vie correspond au nombre de cycles qui représente la rupture de l'éprouvette. À cet égard, soulignons que la notion de rupture fait ici référence au changement de type d'endommagement au sein de l'éprouvette sous sollicitation, c'est-à-dire lorsque l'endommagement passe d'un phénomène de microfissuration progressif, considéré comme relativement homogène, à celui d'un endommagement plus singulier, associé à la formation de macro fissures (voir §2.1.2).

Par ailleurs, les valeurs du module complexe calculées par le modèle 2S2P1D, avec lequel, on peut calculer la valeur de la norme du module complexe initiale pour les conditions correspondantes à l'essai de fatigue (T_i et 10 Hz) (voir § 6.1), sont présentées dans le Tableau 7.1. Elles sont tout à fait comparables aux valeurs déterminées en cours des essais.

Rappelons également que deux critères ont été utilisés pour déterminer la durée de vie en fatigue des enrobés bitumineux testés: 1) le critère classique ($N_{f50\%}$) et 2) le Critère de changement de phase II/III ($N_{fII/III}$).

Le critère classique ($N_{f50\%}$) est très largement retenu pour fixer la durée de vie en fatigue de l'enrobé bitumineux. Il correspond à une perte de 50 % de la norme du module complexe initiale. Notons que dans le cas où la rupture de l'éprouvette se manifeste instantanément, la valeur de $N_{f50\%}$ est alors associée au nombre de cycles à la rupture même si la norme du module complexe n'atteint pas les 50 %.

Par ailleurs, la méthode utilisée pour cerner le nombre de cycles au point de transition entre la phase II et III ($N_{fII/III}$) a été exposée à la section 2.3.2. À cet égard, la valeur de $N_{fII/III}$ est déterminée suivant l'analyse des résultats dans l'espace de Black tout en considérant l'écart moyen des extensomètres en cours d'essai. Pour mettre en perspective les écarts entre les durées de vie établies suivant le critère classique à celle correspondante au changement des phases II et III. L'erreur relative est calculée par la relation 7.1.

$$Er (\%) = \left[\frac{N_{fII/III} - N_{f50\%}}{N_{fII/III}} \right] * 100 \quad (7.1)$$

Les résultats sont reportés au Tableau 7.1. Une valeur de l'erreur relative voisine de zéro témoigne d'un écart nul entre les deux critères. Des valeurs négatives témoignent que le critère classique surestime la durée de vie en fatigue, alors que des valeurs positives témoignent que la durée de vie est sous-estimée.

Les valeurs des durées de vie présentées dans le Tableau 7.1 sont courtes, et cela dû à l'intensité élevée des déformations imposées durant les essais afin d'atteindre la phase III rapidement.

Soulignons que bien d'autres critères peuvent être définis pour établir la durée de vie en fatigue. La valeur de $N_{f50\%}$ n'apparaît qu'indirectement liée à l'apparition de la macro fissure. En outre, l'évolution de la norme du module complexe est fortement tributaire de phénomènes biaisants (non linéarité, échauffement et thixotropie), lesquels jouent un rôle prépondérant notamment dans les premiers cycles de sollicitation.

À cet effet, Di Benedetto *et al.* (2010), ont récemment mis en évidence, que pour des enrobés bitumineux sollicités en mode de déformation sous chargement cyclique sinusoïdal en traction/compression sur éprouvette cylindrique suivant des amplitudes de déformation comprises entre 40 et 120 $\mu\text{m/m}$ est pour une fréquence de sollicitation de 10 Hz, l'endommagement par fatigue est non significatif au cours des 30 000 premiers cycles, et ce, malgré des chutes de la norme du module complexe pouvant atteindre 20 %. Il a été mis en relief que l'effet de la thixotropie contribue à plus de 50 % de la réduction de la norme du module complexe au cours de cette phase de sollicitation (Di Benedetto *et al.* 2010).

Tableau 7.1 Résultats des essais de fatigue obtenus

Enrobé	Nom de l'essai	Vide (%)	T (°C)	$\epsilon_{\text{moy réel}}$ (μdef)	Module initial			$N_{f50\%}$ (cycles)	$N_{f\text{lim}}$ (cycles)	Erreur relative Er (%)
					$ E_0^* $ (MPa)	Moy (MPa)	2S2P1D (MPa)			
GB20 PG58-28	P3B4	4,9	10	90	15 029	15 006	15 844	766 900	766 900	0
	P3C1	4,9		90	15 361			551 684	546 678	-0,9
	P3C4	5,0		88	14 294			577 010	577 010	0
	P3B1	4,7		118	15 023			148 783	146 278	-1,7
	P3B2	4,2		117	14 994			286 600	230 228	-24,5
	P3B3	4,3		116	15 691			218 993	161 540	-35,6
	P3D2	4,8		121	14 650			193 707	178 678	-8,4
GB20 PG64-28	P1C1	1,7	10	136	10 239	9797	10 112	767 166	1 187 631	35,4
	P1A1	3,0		157	9046			266 610	647 128	58,8
	P2A2	2,3		162	9614			306 417	526 659	41,8
	P1C2	1,8		162	9987			591 455	541 413	-9,2
	P2A4	2,3		163	10 380			323 667	661 470	51,1
	P1C3	1,4		195	9514			28 801	386 835	92,6
	P2A1	3,0	20	357	4168	4162	4224	1349	454 999	99,7
	P2C2	1,4		415	3403			2422	161 138	98,5
	P1D3	2,5		458	4467			95	117 499	99,9
	P2A3	2,1		458	4608			239	66 999	99,6
	P2B1	4,4	30	298	1458	1712	1329	18 999	749 999	97,5
	P2C1	1,7		346	1258			38 999	104 999	62,9
	P2C4	1,7		449	2486			1649	157 499	99,0
	P2C3	1,9		499	1645			689	459 999	99,9

La Figure 7.2 présente une comparaison entre les raideurs initiales pour les éprouvettes de l'enrobé bitumineux GB20 confectionné avec un bitume de type PG58-28 et celles des éprouvettes de l'enrobé bitumineux GB20 avec un PG64-28 testés à une température de 10 °C et une fréquence de 10 Hz.

Notons que les amplitudes des déformations sont dans certains cas relativement importantes et supérieures à ce qui est généralement appelé « le domaine des petites déformations (10^{-4}) » (Di Benedetto *et al.* 2005). Quoi qu'il en soit, les résultats présentés à la Figure 7.2 montrent que la raideur initiale des éprouvettes, $|E_0^*|$, est relativement constante sur l'ensemble de la plage des déformations imposées, ce qui veut dire que lors des premiers cycles, l'enrobé testé demeure dans la région élastique linéaire de son comportement. Par ailleurs, les valeurs de $|E_0^*|$ pour les éprouvettes de l'enrobé GB20 confectionné avec un bitume standard PG58-28 sont plus importantes que celles des éprouvettes de l'enrobé GB20, confectionné avec un bitume modifié PG 64-28.

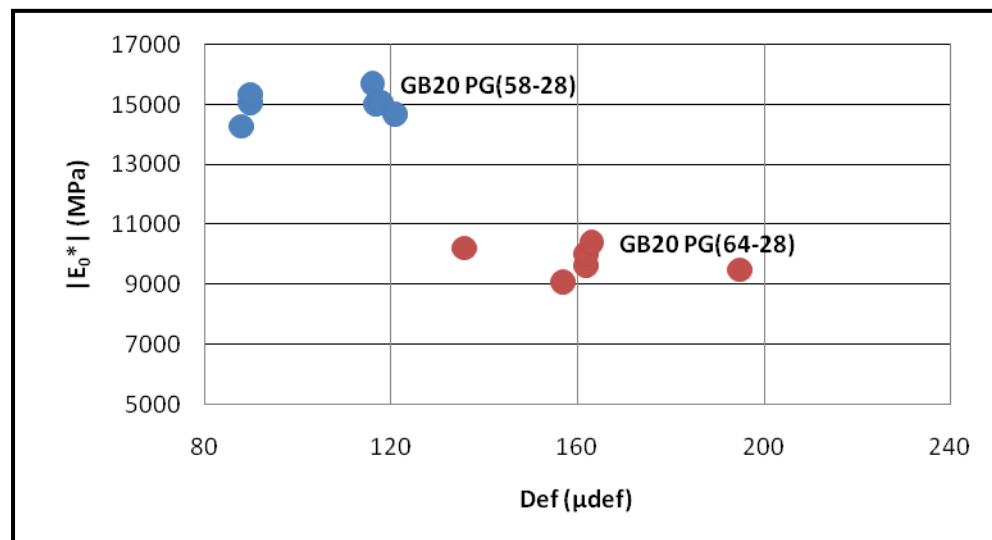


Figure 7.2 Comparaison des raideurs initiales $|E_0^*|$ pour les essais réalisés à 10 °C et 10 Hz

7.1.2 Comparaison des résultats des essais de fatigue réalisés à différentes températures

La Figure 7.3 présente les courbes des modules normalisés pour l'enrobé bitumineux GB20 PG64-28 testé à différentes températures (10, 20 et 30 °C), à une fréquence de 10 Hz et à différents niveaux de déformation en fonction du nombre de cycles.

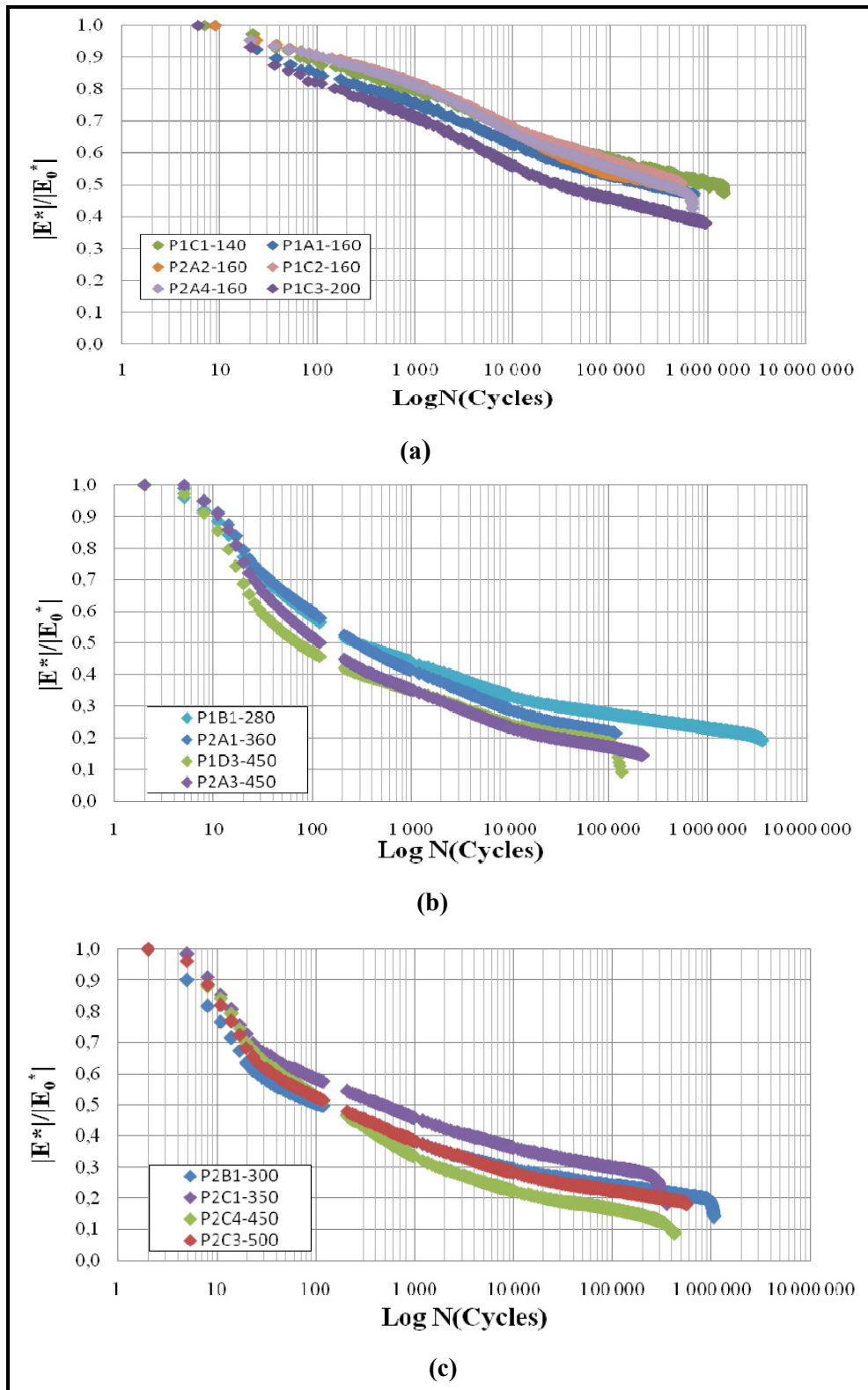


Figure 7.3 Évolution du rapport $|E^*/E_0^*|$ en fonction du nombre de cycles à différents niveaux de déformation pour l'enrobé GB20 PG64-28 à (a) 10 °C (b) 20 °C et (c) 30 °C

Avant de commencer la série d'essais de fatigue pour la température de 20 °C, on ne connaissait pas les niveaux de déformations qu'il fallait imposer. Dans un premier temps, on a réalisé plusieurs essais à des faibles niveaux de déformations qui se sont avérés relativement longs et pour lesquels le point de transition entre les phases II et III n'a pas été observé. À cet effet, l'essai P1-B1, testé à une déformation imposée de 280 μ def, a été arrêté à près de 4 millions de cycles de sollicitation (Fig. 7.3.b), et ce, sans avoir pu observer la transition entre les phases II et III.

Par ailleurs, les sauts observés entre les cycles 100 et 200 dans les courbes présentées aux Figures 7.3 (b) et (c) sont dus à la procédure d'acquisition des données utilisée en entreprise GECAN.

Finalement, la Figure 7.4 montre l'influence de la température d'essai sur la valeur de la raideur initiale, cette dernière chute de façon marquée avec l'augmentation de la température.

En fixant la température de référence à 10 °C, les résultats de la Figure 7.4 suggèrent que la chute de la raideur de l'enrobé avec la température est de l'ordre de 5,6 % par degré Celsius. Cette valeur est tout à fait comparable à celle relevée dans la littérature, établie à 5 % (Di Benedetto *et al.* 2005).

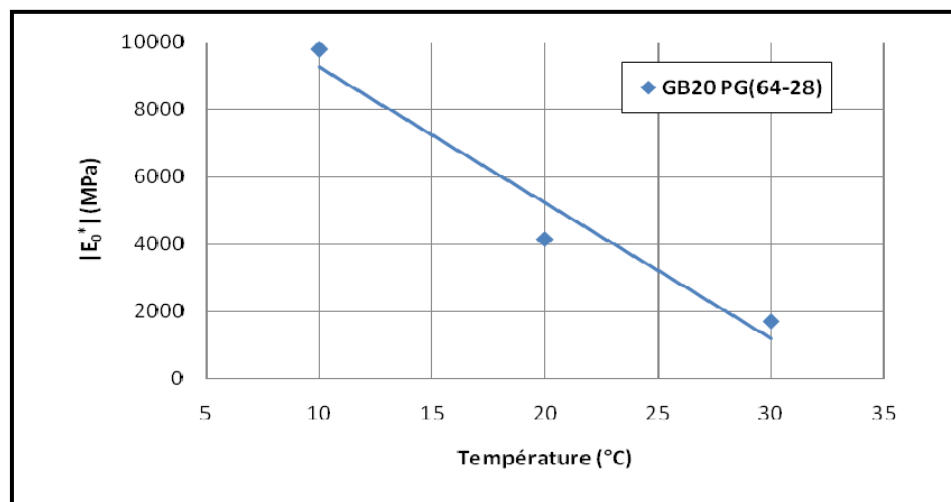


Figure 7.4 Évolution de la raideur en fonction de la température GB20 (PG 64-28)

7.2 Relation entre les durées de vie et l'amplitude de déformation : Droites de fatigue

À partir de chacun des essais de fatigue réalisés, la relation entre la durée de vie en fatigue et l'amplitude de la déformation, pour les différentes séries d'essais réalisées, est précisée de manière à définir la loi de comportement en fatigue à partir de la courbe de Wöhler (Log N versus Log ϵ). La droite de fatigue (courbe de Wöhler) qui décrit le comportement en fatigue du matériau se définit à partir de 2 critères essentiels, soit : 1) la pente (c_2) et 2) l'ordonnée à l'origine (c_1). La loi de fatigue vise à définir la durée de vie en fatigue du matériau suivant l'amplitude de la déformation auquel il est soumis. La durée de vie s'exprime alors :

$$N_f = c_1 (\epsilon_0)^{-c_2} \quad (7.2)$$

Avec :

N_f : Nombre de cycles à la rupture ;

ϵ_0 : Amplitude de la déformation cyclique imposée (m/m) à une température donnée (θ_i) et une fréquence donnée (Fr_i) ;

c_1 : Coefficient correspondant à la durée de vie du matériau pour une amplitude de déformation imposée de 1 m/m, à une température et une fréquence données ;

c_2 : Coefficient lié à la pente de la droite de fatigue pour un matériau donné (sans unité).

L'équation (7.2) est le modèle classique de fatigue qui décrit la droite de Wöhler et qui permet de mettre en relation la durée de vie du matériau à l'amplitude de sollicitation auquel il est soumis.

En portant en graphique la relation entre la durée de vie et l'amplitude de déformation, on détermine ainsi les deux coefficients c_1 et c_2 du modèle classique de fatigue. Pour chacune des séries d'essais réalisées dans le cadre de ce programme expérimental, ces deux coefficients associés à la droite de Wöhler sont donc précisés. La Figure 7.5 montre la relation type obtenue dans le système d'axes $\log(N_f)$ vs $\log(\epsilon_0)$ pour des essais de fatigue réalisés à différentes amplitudes de sollicitation.

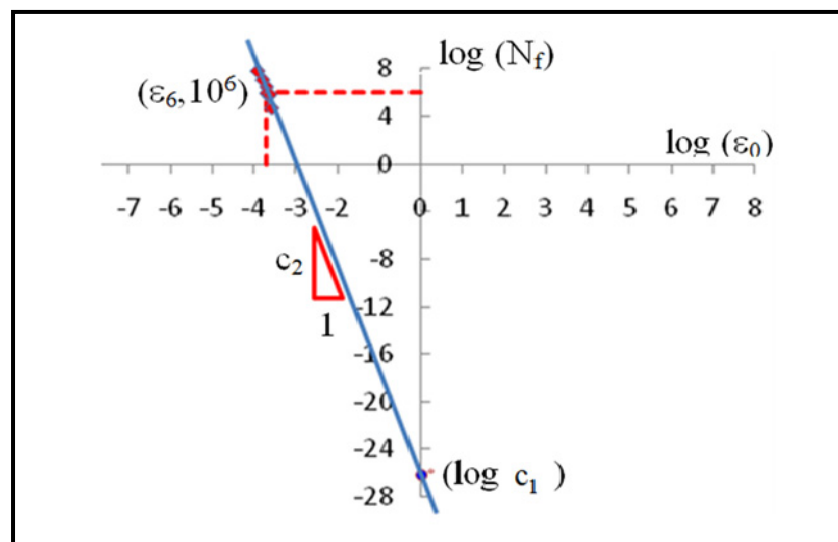


Figure 7.5 Courbe de Wöhler dans le domaine $\log N_f$ vs $\log \epsilon_0$ (m/m)
Tirée de Perraton *et al.* (2011, p. 41)

Les coefficients c_1 et c_2 sont tributaires du matériau et, a priori, de la température et de la fréquence d'essai (Perraton *et al.* 2011). Pour la méthode française de dimensionnement, on définit la droite de fatigue dans le système d'axe $\log(\epsilon_0)$ vs $\log(N_f)$ à partir du coefficient ϵ_6 et du coefficient b . Le coefficient b se rapporte à la pente de la droite dans le système d'axe considéré. La valeur de b , établie dans le système d'axe $\log(\epsilon_0)$ vs $\log(N_f)$, équivaut donc à $-1/c_2$ dans le système d'axe $\log(N_f)$ vs $\log(\epsilon_0)$. Par ailleurs, ϵ_6 , désigne la déformation pour laquelle la durée de vie de l'enrobé est égale à 1 million de cycles de sollicitation pour un enrobé donné et testé suivant une température et une fréquence de sollicitation fixée au préalable.

Pour les valeurs correspondantes à chaque enrobé bitumineux, les droites de fatigue (courbe de Wöhler) ont alors été tracées dans les axes ($\log(N) - \log(\epsilon)$) et la valeur du coefficient de détermination R^2 a été déterminée. À partir de ces droites, il est possible de déterminer les constantes de la loi de fatigue. La synthèse des résultats est présentée dans le Tableau 7.2 pour les différentes séries d'essais réalisées.

Notons que les coefficients du modèle de fatigue vont dépendre du critère retenu pour déterminer la durée de vie de chacune des éprouvettes testées en fatigue. C'est pourquoi le Tableau 7.2 donne deux séries de coefficients pour chacune des séries d'essais réalisées : une première série en considérant le critère classique de rupture ($N_{f50\%}$) et une deuxième série de valeurs en considérant les durées de vie associées à la transition entre les phases II et III ($N_{II/III}$). Pour simplifier et faciliter l'analyse de manière à mettre en perspective de façon plus étayée les écarts entre ces résultats, ces derniers sont traités suivant 2 axes : 1) Effet du type de bitume et 2) Effet de la Température.

Tableau 7.2 Caractéristiques des droites de fatigue pour les différents essais réalisés

Enrobé	T (°C)	Nombre d'essai	Critère de rupture	c_1	c_2	ϵ_6	b	R^2
GB20 PG58-28	10	7	$N_{f50\%}$	5,15E-11	3,97	80,37	-0,252	0,88
			$N_{II/III}$	4,78E-13	4,47	80,28	-0,224	0,93
GB20 PG64-28	10	6	$N_{f50\%}$	1,39E-29	9,04	142,71	-0,111	0,80
			$N_{II/III}$	1,14E-06	3,09	139,60	-0,323	0,91
	20	4	$N_{f50\%}$	8,30E-30	9,42	242,37	-0,106	0,54
			$N_{II/III}$	7,88E-18	6,60	316,61	-0,151	0,92
	30	4	$N_{f50\%}$	2,21E-22	7,45	170,25	-0,134	0,84
			$N_{II/III}$	5,91E+00	1,38	352,99	-0,725	0,15

7.2.1 Effet du type de bitume

Pour mettre en perspective l'influence du type de bitume sur le comportement en fatigue de l'enrobé, les résultats seront traités de manière à évaluer l'influence du critère de rupture ($N_{f50\%}$ et $N_{II/III}$) sur les coefficients c_1 et c_2 de la loi de fatigue pour les deux familles d'enrobés testées soit, l'enrobé GB20 confectionné avec un bitume standard PG58-28 et l'enrobé GB20 confectionné avec un bitume modifié PG64-28.

7.2.1.1 Influence du critère de rupture sur les coefficients de fatigue pour les essais réalisés sur l'enrobé GB20 confectionné avec un bitume standard (PG 58-28)

La Figure 7.6 présente la relation entre les valeurs des durées de vie déterminées suivant les deux critères retenus pour préciser la durée de vie en fatigue des éprouvettes ($N_{f50\%}$ et $N_{II/III}$), en fonction des déformations réelles imposées et les droites de fatigue correspondantes pour l'enrobé GB20 confectionné avec un bitume standard PG58-28.

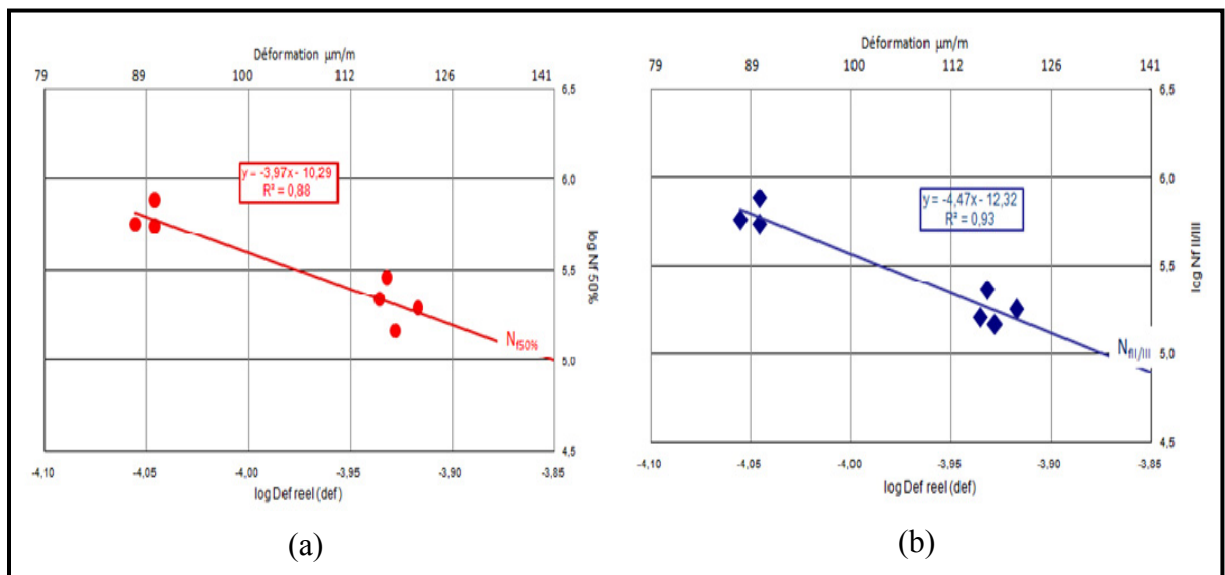


Figure 7.6 Durée de vie de l'enrobé GB20 (PG58-28) testé à 10 °C et 10 Hz déterminées avec (a) le critère classique et (b) le critère de la phase II/III et les droites de régression correspondantes dans les axes logarithmiques log (N) et log (ϵ)

Les résultats présentés à la Figure 7.6 montrent que les valeurs des durées de vie déterminées par les deux critères pour cet enrobé bitumineux sont relativement similaires. Ce constat indique que le critère classique est relativement acceptable pour juger de la durée d'une éprouvette en fatigue dans le cas d'un enrobé bitumineux confectionné à partir d'un bitume standard.

7.2.1.2 Influence du critère de rupture sur les coefficients de fatigue pour les essais réalisés sur l'enrobé GB20 confectionné avec un bitume modifié PG 64-28

Les relations entre la durée de vie et l'amplitude de la déformation imposée pour les essais réalisés à 10 °C (10 Hz) avec l'enrobé GB20 confectionné avec un bitume modifié PG64-28 sont présentées à la Figure 7.7. Les résultats de la Figure 7.7 montrent que l'écart entre les valeurs de la durée de vie déterminée suivant le critère N_{fIII} et celles correspondantes aux durées de vie déterminées suivant le critère classique ($N_{f50\%}$) augmente avec l'intensité des amplitudes des déformations imposées. Les valeurs des coefficients c_1 et c_2 établies suivant les deux critères de rupture considérés sont nettement différentes (Tableau 7.2).

La différence est particulièrement marquée au niveau de la pente, le coefficient c_2 , pour lequel on observe un facteur multiplicateur de l'ordre de 3. Cet écart est fort important et témoigne de la précarité du critère classique à bien cerner la durée de vie en fatigue de certains essais. Notons que la présence de polymère dans un bitume a pour effet d'intensifier l'importance des effets biaisant quant à la perte de raideur du matériau, laquelle s'avère être nettement significative au cours de la phase I d'un essai de fatigue. La bonne résistance en fatigue d'un bitume polymère a pour effet d'accroître considérablement la durée de vie en fatigue du matériau pour un niveau de déformation donnée.

Pour espérer réaliser des essais de fatigue dans des temps relativement acceptables, les amplitudes de la déformation imposée doivent être significativement majorées. Dès lors, l'énergie dissipée à chaque cycle de sollicitation est accrue et la perte de raideur associée à l'échauffement interne de l'éprouvette est plus significative.

En ne prenant pas en compte la perte de raideur associée à l'échauffement et au phénomène de thixotropie, on observe rapidement, en cours d'essai, une perte de 50 % de la raideur du matériau, et ce, sans pour autant avoir atteint la rupture, a proprement parlé, en fatigue de l'éprouvette. Par ailleurs, au fur et à mesure que l'on continue les cycles de sollicitation le système se stabilise et le recours au critère $N_{II/III}$ permet de cerner une valeur représentative de la durée en fatigue de l'éprouvette.

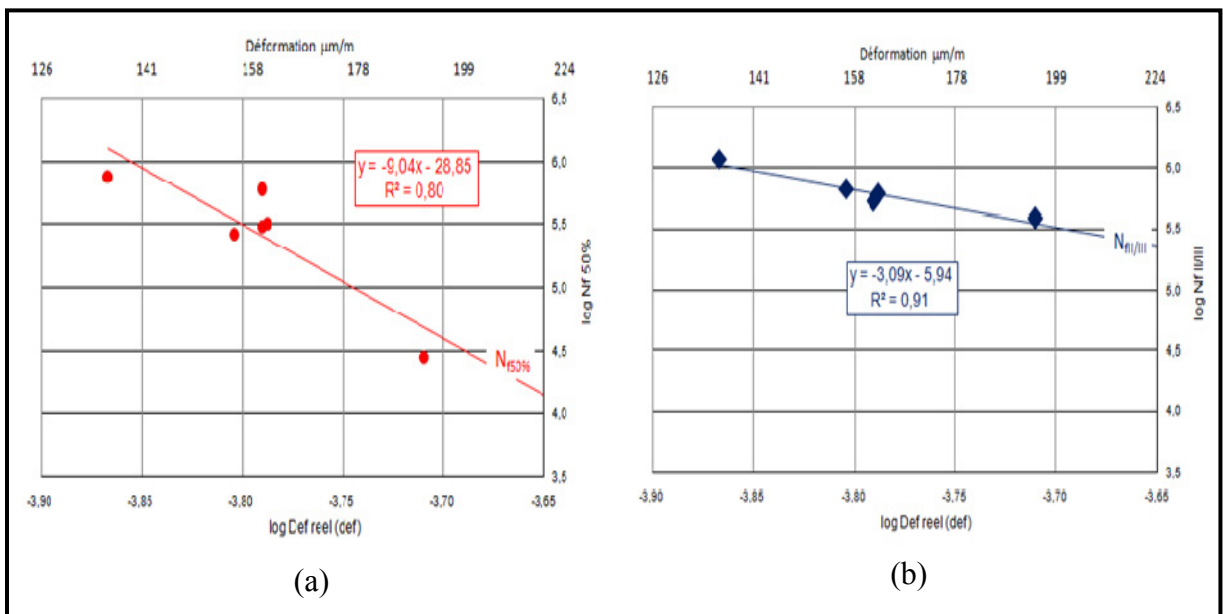


Figure 7.7 Durée de vie de l'enrobé GB20 (PG64-28) testé à 10 °C et 10 Hz déterminées avec (a) le critère classique et (b) le critère de la phase II/III et les droites de régression correspondantes dans les axes logarithmiques log (N) et log (ϵ)

7.2.1.3 Comparaison entre l'enrobé GB20 confectionné avec un bitume standard PG58-28 et l'enrobé GB20 confectionné avec un bitume polymère PG64-28

Dans la littérature, toutes les études réalisées montrent que le rôle du type de bitume est très important sur la résistance en fatigue de l'enrobé. La Figure 7.8 présente une comparaison entre les valeurs des durées de vie déterminées avec le critère classique ($N_{50\%}$) pour les deux enrobés bitumineux GB20 testées : PG58-28 versus PG64-28.

La différence entre les deux séries d'essais est fort significative (Fig. 7.8) : La pente de l'enrobé GB20 PG64-28 est nettement plus grande que celle de l'enrobé GB20 PG58-28. Pour de petites déformations imposées, les résultats de la Figure 7.8 montrent que l'application du critère classique va conduire à un sous dimensionnement des couches au sein d'une chaussée bitumineuse puisqu'il y'a une intersection entre les deux droites de fatigue.

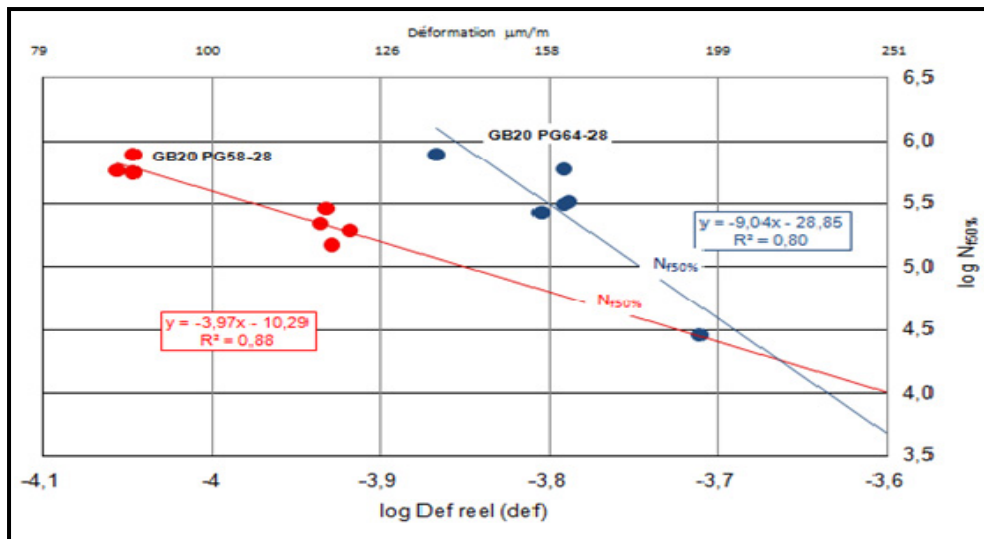


Figure 7.8 Durées de vie déterminées par le critère classique ($N_{50\%}$) pour deux enrobés GB20 PG58-28 et PG64-28 à 10 °C et 10 Hz.

La Figure 7.9 présente une comparaison entre les valeurs des durées de vie déterminées suivant le critère de la transition entre les phases II et III ($N_{II/III}$) pour les deux enrobés bitumineux GB20 testés. Les résultats montrent que l'enrobé bitumineux GB20 confectionné avec un bitume modifié PG64-28 présente des durées de vie plus élevées que pour celles de l'enrobé GB20 confectionné avec un bitume standard PG58-28, mais qu'il en est tout autrement en ce qui regarde les modules de rigidité de ces enrobés (Tableau 7.1).

Ce résultat est particulièrement important du point de vue de la résistance en fatigue des matériaux bitumineux dans la perspective de la chaussée. En effet, une meilleure résistance en fatigue mesurée en laboratoire ne signifie pas automatiquement une meilleure performance en service de l'enrobé.

En effet, il faut prendre en compte l'évolution de la raideur des enrobés qui va conditionner le niveau des déformations dans les matériaux des différentes couches de la structure de la chaussée : un matériau plus mou se voit soumis à de plus grandes déformations pour un même chargement modifiant ainsi l'évolution de son endommagement sous sollicitations répétées.

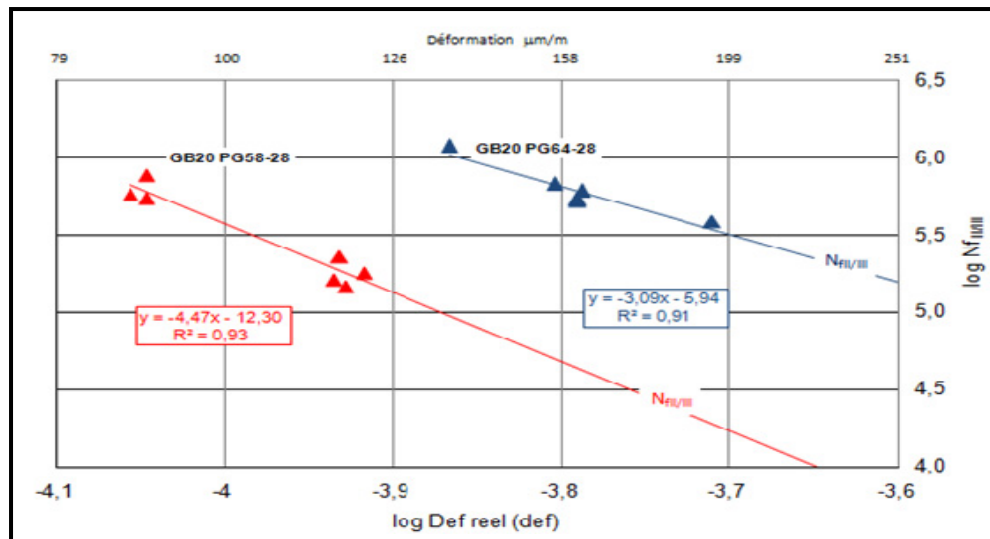


Figure 7.9 Durées de vie déterminées par le critère de transition de phase ($N_{II/III}$) pour deux enrobés GB20 avec PG58-28 et PG64-28 à 10 °C et 10 Hz

L'importance que joue le critère de la transition entre les phases II et III vis-à-vis des résultats de fatigue est très importante. Pour mettre en relief la différence entre les résultats de fatigue en considérant les deux critères de rupture, les durées de vie sont calculées en utilisant l'équation (7.2) en considérant des amplitudes de déformation semblable et les coefficients des droites de fatigue préalablement établie. La synthèse des valeurs calculées est regroupée au Tableau 7.3.

Tableau 7.3 Comparaison entre les valeurs des deux critères de rupture

Enrobé	Déformation imposée (μdef)	$N_{f\text{-calculé}}$ (cycles)		Erreur relative Er (%)
		En considérant les coefficients c_1 et c_2 établis à partir de $N_{f50\%}$	En considérant les coefficients c_1 et c_2 établis à partir de $N_{fII/III}$	
GB20 PG 58-28	100	398 398	372 868	-6,8
	140	104 684	82 779	-26,5
	180	38 578	26 898	-43,4
GB20 PG 64-28	100	2 031 045	5 420 561	-274,7
	140	969 481	959 227	-1,1
	180	99 939	440 712	77,3

L'erreur relative est calculée par la relation suivante :

$$\text{Er (\%)} = \left[\frac{N_{fII/III} - N_{f50\%}}{N_{fII/III}} \right] * 100 \quad (7.3)$$

On observe d'après les valeurs exposées dans le Tableau 7.3 que les durées de vie déterminées par le critère de transition entre les phases II et III ($N_{fII/III}$) sont plus courtes que celles déterminées par le critère classique $N_{f50\%}$ avec des erreurs relatives assez importantes. Comme déjà mentionnée, cette situation conduit à un dimensionnement incohérent des couches bitumineuses au sein de la chaussée, puisqu'en utilisant le critère classique, la durée de vie du matériau de la chaussée est surestimée. La situation nécessite une attention particulière.

7.2.2 Évolution de la performance en fatigue avec la température

La température est un paramètre déterminant vis-à-vis du comportement mécanique de l'enrobé bitumineux en général. En effet, le liant entrant dans la composition de l'enrobé bitumineux est thermo-susceptible, c'est-à-dire que ses propriétés dépendent fortement de sa température : l'enrobé voit donc ses propriétés mécaniques évoluer avec la température. Notamment, à haute température, l'enrobé bitumineux présente un faible module et une déformabilité importante sous charge. Il ne serait en être autrement en ce qui concerne la résistance en fatigue de l'enrobé bitumineux.

La durée de vie en fatigue d'un matériau bitumineux évolue avec la température (Di Benedetto *et al.* 2005). Pour le calcul de la durée de vie en fatigue des matériaux bitumineux, la température a pour effet de translater la droite de fatigue, modifiant ainsi le coefficient c_1 , sans en affecter la pente c'est-à-dire le coefficient c_2 . La Figure 7.10 montre l'évolution attendue de la résistance en fatigue d'un enrobé lorsqu'on change la température de sollicitation.

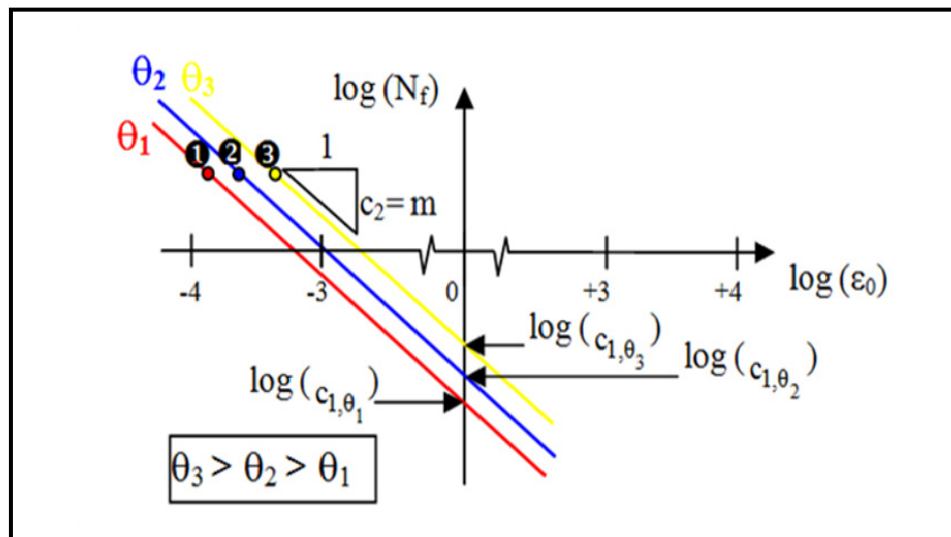


Figure 7.10 Schéma illustrant l'effet de la température (θ_1 , θ_2 et θ_3) sur la durée de vie en fatigue mesurée en laboratoire en condition isotherme et suivie une fréquence de sollicitation donnée

Tirée de Perraton *et al.* (2011, p. 42)

À partir des différentes séries d'essais réalisées dans le cadre du programme expérimental à 20 et 30 °C, les Figures 7.11 et 7.12 montrent les droites de Wöhler obtenues pour l'enrobé GB20 confectionné avec un bitume modifié PG64-28 et ce, pour les deux critères retenus pour déterminer la durée de vie des éprouvettes. En générale, d'après les résultats présentés aux Figures 7.11 et 7.12, l'écart entre les valeurs de $N_{II/III}$ et $N_{50\%}$ s'accroît nettement avec la température.

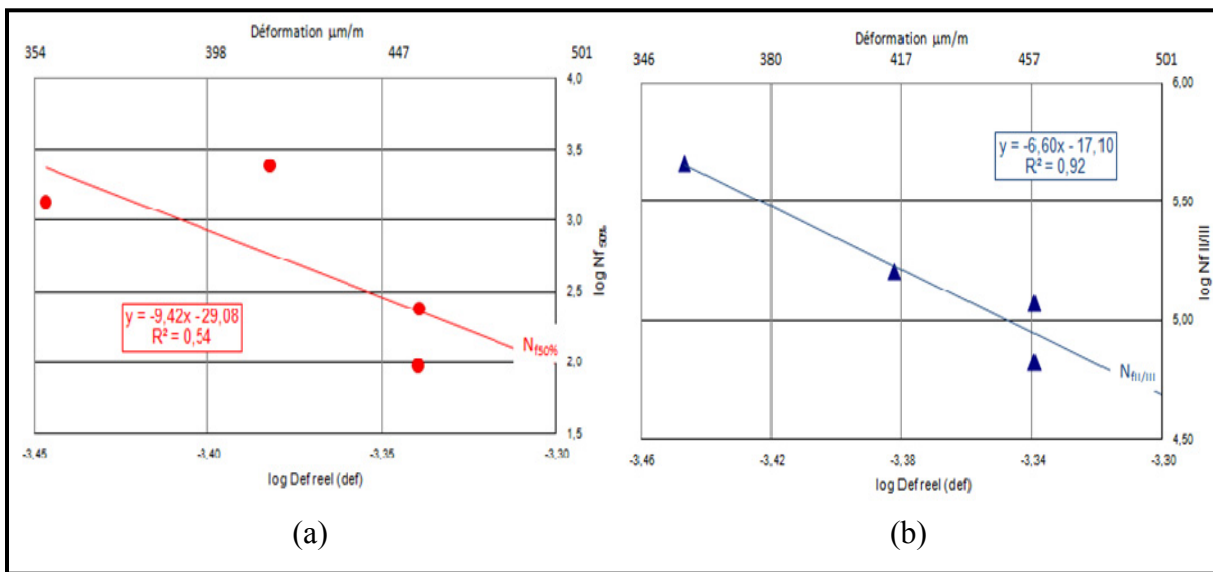


Figure 7.11 Durées de vie de l'enrobé GB20 PG64-28 testé à 20 °C et 10 Hz déterminées avec (a) le critère classique et (b) le critère de la phase II/III et les droites de régression correspondantes dans les axes logarithmiques log N et log ε

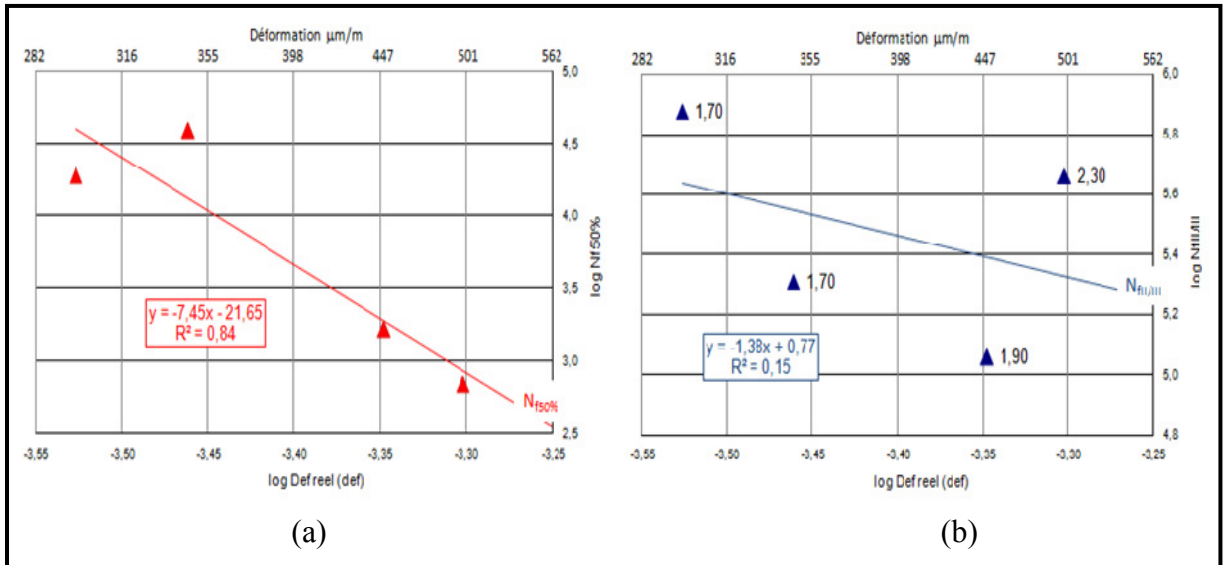


Figure 7.12 Durées de vie de l'enrobé GB20 PG64-28 testé à 30 °C et 10 Hz déterminées avec (a) le critère classique et (b) le critère de la phase II/III et les droites de régression correspondantes dans les axes logarithmiques log N et log ϵ

La Figure 7.13 présente une comparaison entre les valeurs des durées de vie déterminées avec le critère classique ($N_{150\%}$) et la Figure 7.14 présente une comparaison entre les valeurs des durées de vie déterminées avec le critère de la transition entre les phases II/III ($N_{II/III}$) pour un enrobé bitumineux GB20 confectionné avec un bitume modifié PG64-28 et testé à différentes températures d'essai (10, 20 et 30 °C) et à 10 Hz. À première vue, on constate que les droites de fatigue demeurent relativement parallèles dans le cas du critère classique alors qu'avec le critère $N_{II/III}$, il en est tout autrement.

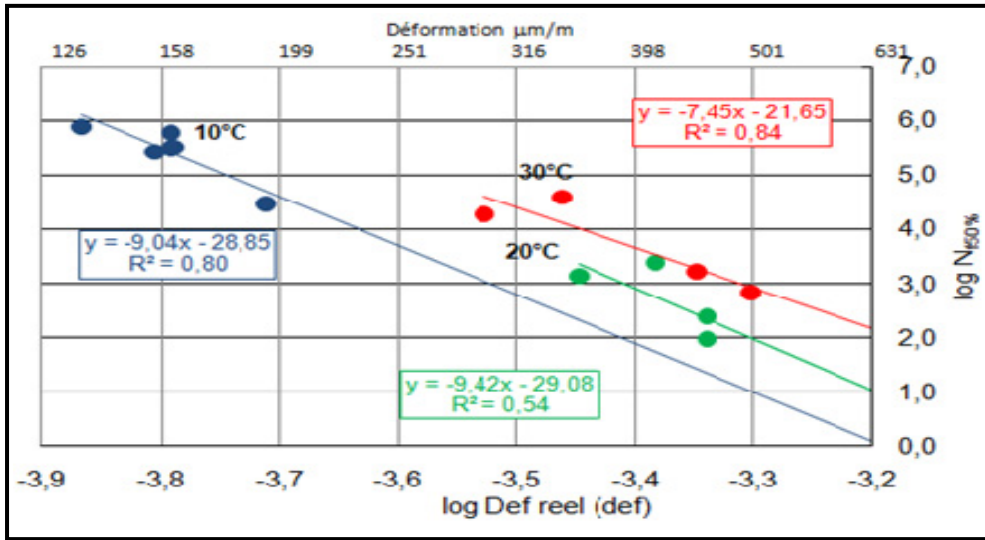


Figure 7.13 Durées de vie déterminées par le critère classique pour un enrobé GB20 PG 64-28 testé à 10, 20 et 30 °C et 10 Hz

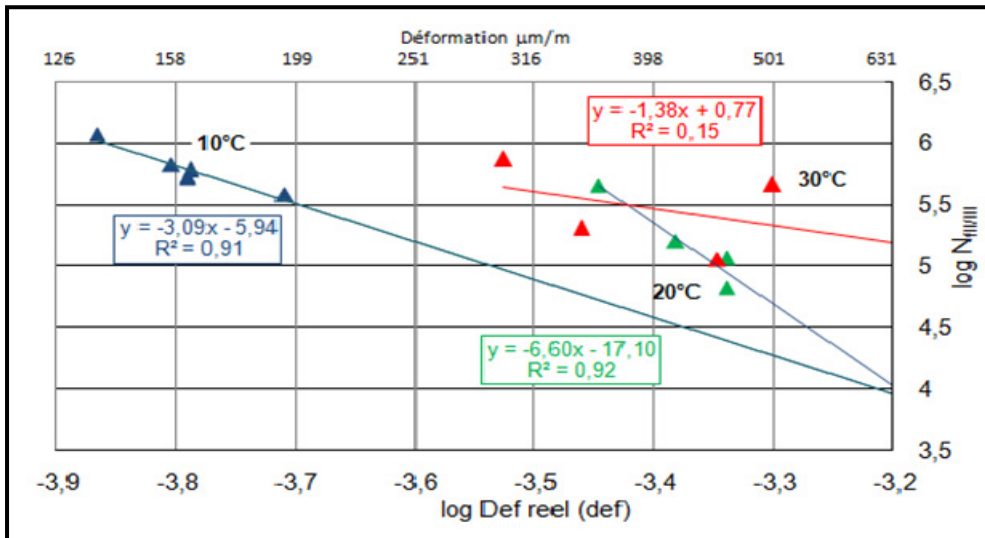


Figure 7.14 Durées de vie déterminées par le critère de transition de phase II/III pour un enrobé GB20 PG 64-28 testé à 10, 20 et 30 °C et 10 Hz

7.2.2.1 Détermination du coefficient k_3

Pour rendre compte de l'effet de la température sur la prédiction de la durée de vie en fatigue des enrobés bitumineux, le modèle classique de fatigue est modifié en intégrant un facteur de translation basé sur la raideur de l'enrobé. Comme évoqué précédemment, les matériaux bitumineux sont thermosensibles et l'effet de la température modifie notamment la norme de son module complexe. Pour prendre en compte la variation de la durée de vie en fatigue du matériau (N_f) avec la température, on va ainsi se référer à celle de la norme de son module complexe. Un facteur de translation de la droite de Wöhler, fonction de la norme du module complexe et traduisant l'effet de la température, est ainsi intégré dans la loi de la durée de vie en fatigue de Wöhler. L'équation (7.4) peut alors s'écrire sous la forme :

$$N_{f,\theta_i} = c_{1,\theta_{ref}} (\varepsilon_0)^{-c_2} \left[\frac{|E_{\theta_i}^*|}{|E_{\theta_{ref}}^*|} \right]^{-k_3} \quad (7.4)$$

Avec $c_{1,\theta_{ref}}$ correspondant à la durée de vie en fatigue du matériau pour une déformation imposée de 1 m/m à une température et une fréquence de référence (θ_{ref}), $|E_{\theta_i}^*|$ et $|E_{\theta_{ref}}^*|$ correspondant respectivement aux normes du module complexe à la température considérée (θ_i) et à la température de référence (θ_{ref}). Le coefficient k_3 représente la pente de la droite de la relation $\log c_{1,\theta_i}$ versus $\log |E_{\theta_i}^*|$ tel que schématisé à la Figure 7.15.

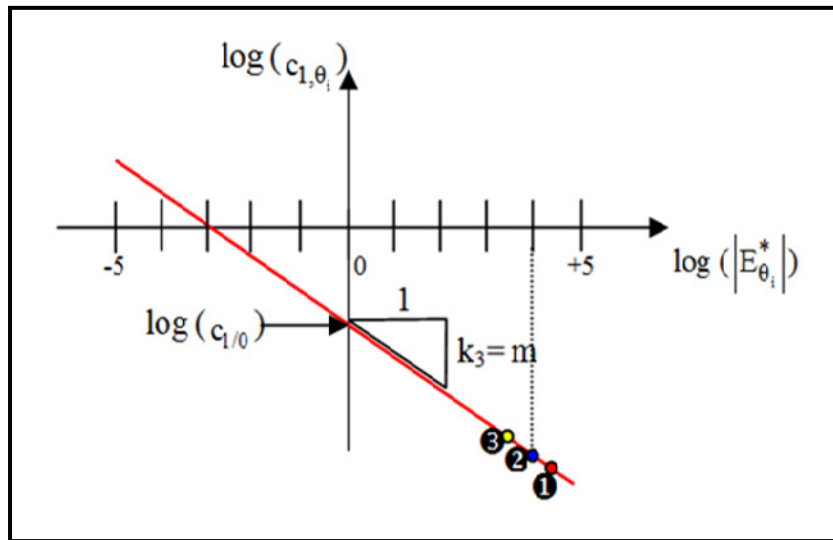


Figure 7.15 relation entre le coefficient c_1 , θ_i et la norme du module complexe à la température considérée ($|E_{\theta_i}^*|$)

Tirée de Perraton *et al.* (2012, p.42)

On peut donc quantifier la valeur de k_3 , en considérant une variation linéaire de la relation $\log |E^*|$ versus $\log c_1$ établie pour des essais de fatigue réalisés en condition isotherme pour diverses températures. Les résultats obtenus pour les essais de fatigue réalisés à 10, 20 et 30 °C sont ici utilisés pour cerner la valeur de k_3 . Pour l'enrobé GB20 confectionné avec un bitume modifié (PG 64-28), la relation $\log |E^*|$ versus $\log c_1$ a été tracée à la Figure 7.16 en considérant les valeurs déterminées suivant le critère classique ($N_{f50\%}$) et à la Figure 7.17 en considérant les valeurs déterminées suivant le critère de transition des phases II/III ($N_{fII/III}$).

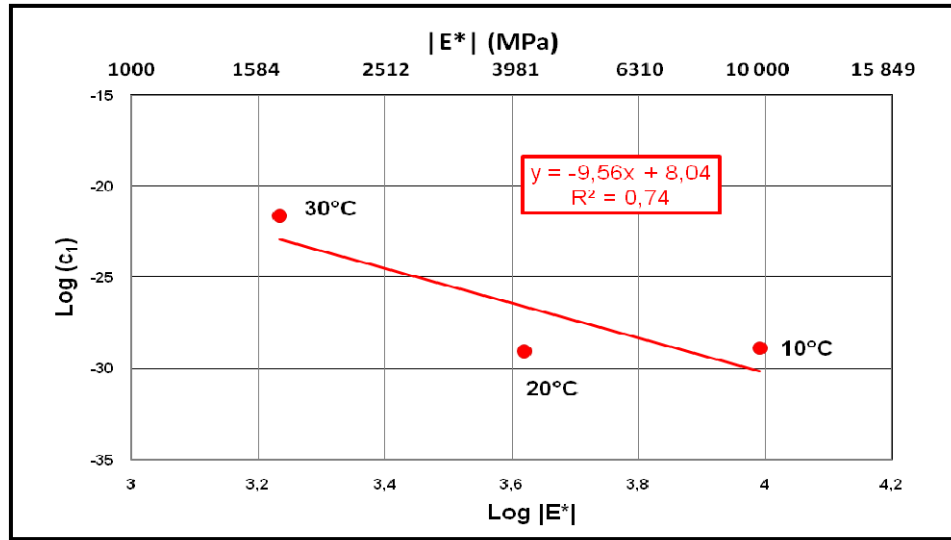


Figure 7.16 Relation entre le log c_1 et le log $|E^*|$ déterminé par le critère classique ($N_{f50\%}$) pour un enrobé GB20 PG 64-28 testé à 10, 20 et 30 °C et 10 Hz

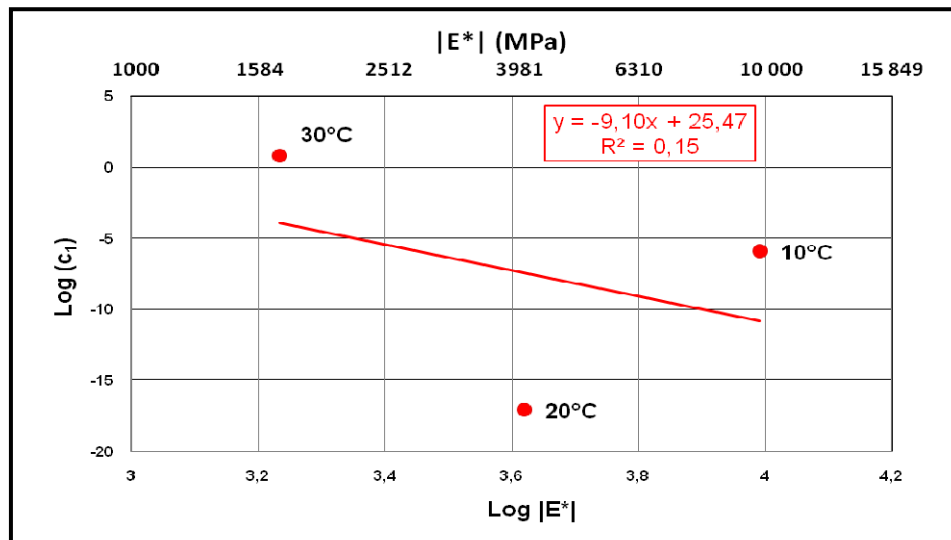


Figure 7.17 Relation entre le log c_1 et le log $|E^*|$ déterminé par le critère de transition de phase II/III pour un enrobé GB20 PG 64-28 testé à 10, 20 et 30 °C et 10 Hz

Les courbes présentées aux Figures 7.16 et 7.17 permettent de déduire les valeurs de k_3 . Le Tableau 7.4 présente les valeurs synthèses.

Tableau 7.4 Valeurs de k_3

	Critère	k_3	Réf.
Essai LCMB	$N_{f50\%}$	9,56	Selon nos résultats
	$N_{fII/III}$	9,10	
SETRA-LCPC	$N_{f50\%}$	2,5	Perraton <i>et al.</i> (2011)
Annexe 6	$N_{f50\%}$	0,50-0,75	

En France (SETRA 2004), la valeur de c_2 est largement prise pour une valeur fixe de 5 pour des enrobés bitumineux conventionnels. En considérant l'équation 7.6, on obtient la valeur de k_3 égale à 2,5.

Par ailleurs, en considérant les données présentées à l'annexe 6 du guide technique de dimensionnement, Perraton *et al.* (2011) ont montré que la valeur de k_3 peut se situer autour de 0,5 et 0,75. Les valeurs calculées en utilisant les résultats des essais réalisés dans le cadre de ce travail, sont plus thermosensible comparant aux valeurs présentées précédemment, ce qui montre que les enrobés bitumineux testés au cours de cette campagne expérimentale ont une performance à la température différente que celle des enrobés utilisés en France. Notons que les résultats déterminés à partir du $N_{fII/III}$ ne sont pas retenus à cause des valeurs obtenues des séries d'essais réalisées à l'entreprise GECAN qui ne sont pas représentatives.

7.3 Dispersion des résultats

Plusieurs répétitions d'essai de fatigue pour un niveau de sollicitation donné ont été effectuées pour obtenir un ensemble de valeurs de la durée de vie N_f de manière à cerner le niveau de dispersion des résultats de fatigue conduit à partir d'un essai de traction/compression, en calculant un écart type SN caractéristique de cette dispersion. Pour ce faire, on a appliqué quatre répétitions d'essai de fatigue suivant une amplitude de déformation imposée de $120\mu\text{def}$ et trois répétitions à $90\mu\text{def}$.

La Figure 7.18 présente la droite de fatigue (courbe de Wöhler) obtenue pour l'enrobé bitumineux GB20 confectionné avec un bitume standard PG58-28 testé à une température de 10 °C et à une fréquence de 10 Hz tracée avec les valeurs des durées de vie déterminées à partir des répétitions des essais de fatigue testés suivant les déformations imposées.

Notons que les valeurs présentées en étiquette représentent les pourcentages des vides des éprouvettes.

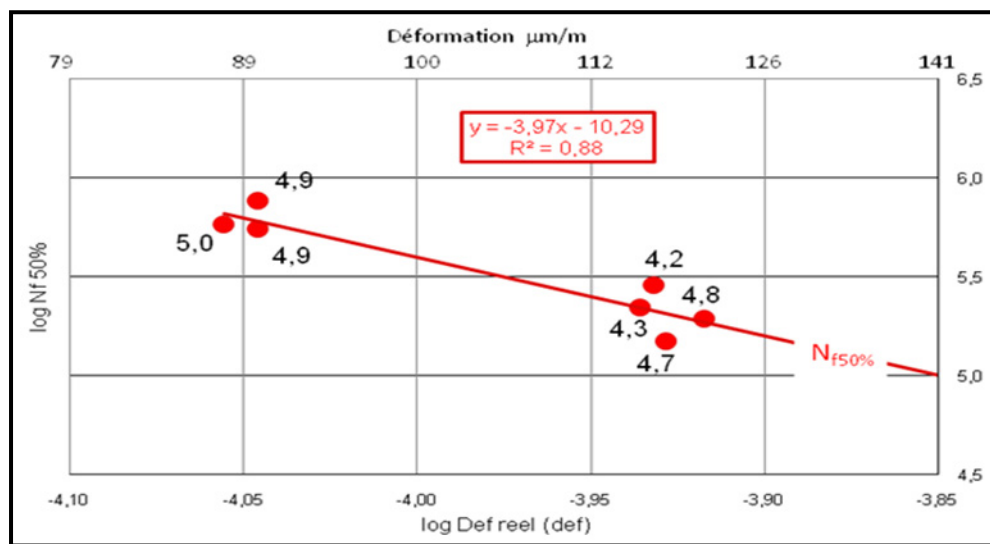


Figure 7.18 Dispersion des durées de vie pour l'enrobé bitumineux GB20 PG58-28 testé à 10 °C et 10 Hz

Selon la Figure 7.18, les résultats confirment les études présentées dans la littérature et prouvent que le pourcentage de vide ou la compacité joue un rôle très important dans la dispersion des valeurs des durées de vie, on observe que ces dernières sont plus grandes quand la compacité augmente.

Le Tableau 7.5 donne des écarts types (SN) déterminés à partir des répétitions des essais de fatigue réalisés dans le cadre du travail de ce mémoire et celles utilisées dans la méthode française de dimensionnement.

Tableau 7.5 valeurs de SN

Référence	Classes d'enrobé	Déformation (μdef)	c_2		SN	
			$N_{f50\%}$	$N_{fII/III}$	$N_{f50\%}$	$N_{fII/III}$
SETRA - LCPC	BBSG	100	5	n/d	0,25	n/d
	GB1	70	5	n/d	0,4	n/d
	GB2	80	5	n/d	0,3	n/d
	GB3	90	5	n/d	0,3	n/d
	EME1	100	5	n/d	0,3	n/d
	EME2	130	5	n/d	0,25	n/d
ÉTS - LCMB	GB20 PG58-28	120	4	4,5	0,12	0,08
		90	4	4,5	0,08	0,08
	GB20 PG64-28	160	9	3	0,15	0,05

Soulignons qu'au LCPC les répétitions sont faites selon la valeur de l'amplitude de ε_6 , alors que les répétitions au LCMB ont été faites selon des valeurs d'amplitude imposée ε_0 . Le Tableau 7.5 montre que les valeurs de SN déterminées au sein du LCMB sont significatives et plus basses par rapport à celles déterminées au LCPC, ce qui conduit à dire que les essais réalisés au LCMB ont des résultats moins dispersés.

7.4 Prédiction de la durée de vie N_f selon l'approche DGCB

La section précédente a présenté les résultats des essais de fatigue obtenus du programme expérimental. Pour être en mesure d'obtenir avec rigueur la droite de fatigue, il faut réaliser plusieurs essais, pour lesquels certains ont des durées importantes (1 à 2 semaines).

Le chapitre 2 évoque une nouvelle méthode pour traiter les résultats de fatigue en prenant en compte les effets biaisant : la méthode DGCB. Elle permet entre autres de prédire la valeur de la durée de vie d'une éprouvette à partir d'un nombre de cycles de sollicitation restreint (300 000 cycles), c'est-à-dire sans nécessité d'atteindre la phase III.

Di Benedetto *et al.* (2004) ont montré qu'au cours des sollicitations, la durée de vie d'une éprouvette est tributaire d'un seuil d'endommagement bien défini au sein de l'éprouvette. En effet, en considérant que l'endommagement par fatigue (D) est isotrope, et se manifeste au niveau de chaque élément de volume du matériau dans la zone centrale d'une éprouvette cylindrique sollicitée en traction/compression, Di Benedetto *et al.* (2004) écrit :

$$D = 1 - \frac{|E_N^*|}{|E_0^*|} \quad (7.5)$$

Où :

D : endommagement global de l'éprouvette (matériau sain : D = 0 et matériau en rupture : D=1) ;

$|E_N^*|$: Norme du module complexe du matériau au cycle N ;

$|E_0^*|$: Norme du module complexe initial du matériau non endommagé au premier cycle.

Pour les essais homogènes, tels que l'essai de traction/compression, la fin de la phase II, qui marque aussi le début de la phase III, correspond à l'apparition et à la propagation de macro fissures dans l'éprouvette. Les critères qui conduisent à identifier avec rigueur cette transition, laquelle correspond à la valeur de N_{fIII} , sont clairement établis précédemment. Les valeurs des paramètres du dommage au point de transition annoté D_{III} , pour les essais de fatigue, sont de prime abord données par l'équation :

$$D_{III} = \frac{|E_0^*| - |E_{III}^*|}{|E_0^*|} \quad (7.6)$$

Où E_0 est la raideur initiale de l'éprouvette et E_{III} et la raideur au point de transition entre les phases II et III. Or, le calcul du dommage à partir de l'équation (7.6) pour des essais de fatigue montre que la valeur de D_{III} change suivant l'amplitude de la déformation imposée, et ce, pour un même matériau.

De fait, en augmentant l'amplitude de déformation, l'écart entre la raideur initiale et celle à la transition des phases II/III n'est pas essentiellement lié à l'endommagement par fatigue, mais plutôt à la juxtaposition d'un effet couplé lié à l'endommagement par fatigue et aux effets biaisant. Di Benedetto propose alors le calcul d'un « dommage corrigé, D_{IIIc} » permettant de départager la perte de raideur imputable aux effets biaisant à celle associée à l'endommagement du matériau a proprement parlé, lié à la fatigue. Dans la perspective de bien préciser le calcul du dommage lié essentiellement à la fatigue, désigné D_{IIIc} , il convient a priori d'exposer l'approche DGCB.

7.4.1 L'approche DGCB

L'approche DGCB vise à soustraire de l'analyse les premiers cycles de sollicitation (phase I) au cours desquels les effets biaisant sont manifestement marqués et difficiles à quantifier et de se concentrer spécifiquement sur la phase II. Bien qu'au cours de cette dernière les effets biaisant soient toujours existants, le phénomène se présente de façon relativement proportionnelle. En travaillant sur les résultats associés à la phase II, Di Benedetto *et al.* (2001) ont proposé une correction de la raideur calculée par cycle en proportionnalité à l'énergie dissipée par cycle de sollicitation ($W_{d(N)}$) pour tenir compte des effets biaisant.

La procédure consiste à considérer des intervalles de cycles dans la phase II de l'essai et pour lesquels on admet une variation proportionnelle de la raideur. L'analyse est effectuée sur les intervalles suivants :

- intervalle -1 : [30 000-60 000 cycles] ;
- intervalle 0 : [40 000-80 000 cycles] ;
- intervalle 1 : [50 000-150 000 cycles] ;
- intervalle 2 : [150 000-300 000 cycles].

Les intervalles 1 et 2 sont ceux utilisés pour l'analyse de l'endommagement par Soltani (1998). L'intervalle 0 a été introduit par Baaj (2002) afin de pouvoir analyser des essais dont la rupture est atteinte avant 150 000 cycles. L'intervalle -1 est introduit par Di Benedetto *et al.* (2004) pour analyser des essais dont la rupture est atteinte avant 80 000 cycles.

La Figure 7.19 présente les différents paramètres de la méthode DGCB.

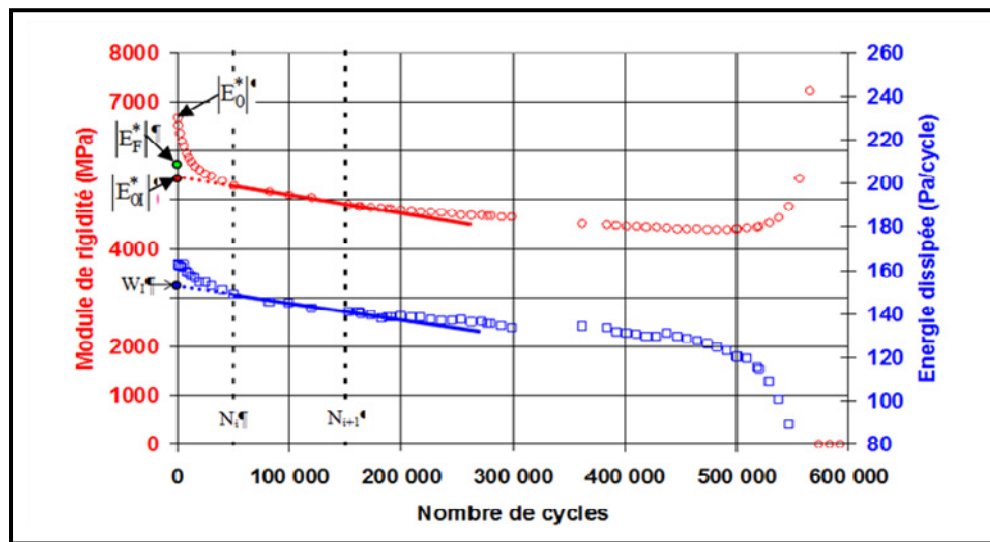


Figure 7.19 Évolution du module de rigidité et de l'énergie dissipée en fonction du nombre de cycles de sollicitation dans le cadre d'un essai de fatigue en contrôle de déplacement (10 °C; 10 Hz)
Tirée de Perraton *et al.* (2011, p. 46)

À partir des résultats expérimentaux et pour chacun de ces quatre intervalles, plusieurs paramètres sont calculés afin de déterminer le taux d'endommagement par cycle de chargement sur chacun de ces intervalles, soit :

- $|E_{0}^*|$: Module initial de l'éprouvette (Figure 7.19);
- $|E_{00i}^*|$: Module initial de l'intervalle i ($i = -1, 0, 1$ ou 2) : valeur extrapolée au premier cycle : c'est l'ordonnée à l'origine de la droite des moindres carrée des valeurs expérimentales du module dans l'intervalle des cycles choisi (Figure 7.19);

- $(\varepsilon_{i-1}, \varepsilon_{i0}, \varepsilon_{i1}, \varepsilon_{i2})$: Amplitude de la déformation dans les intervalles -1, 0, 1 et 2 : chaque valeur est calculée comme la moyenne des amplitudes de déformation de l'intervalle considéré;
- (a_{Ti}) : Pente normalisée de l'essai : c'est la pente de la droite des moindres carrées approchée du module dans l'intervalle choisi i ($i = -1, 0, 1$ ou 2) et dans les axes $(E/E_{00i}, N)$ (Figure 7.19);
- (W_{00i}) : Énergie dissipée initiale de l'intervalle i ($i = -1, 0, 1$ ou 2) extrapolée au premier cycle : c'est l'origine de la droite des moindres carrées des valeurs expérimentales de l'énergie dissipée par cycle de chargement dans l'intervalle choisi (Figure 7.19);
- (a_{wi}) Pente normalisée de l'énergie dissipée : c'est la pente de la droite des moindres carrées approchée de l'énergie dissipée par cycle dans l'intervalle choisi ($i = -1, 0, 1$ ou 2) et dans les axes (N, W_d) normalisée en fonction de W_{00i} (Figure 7.19);
- (a_{Fi}) : Pente de fatigue : c'est la pente obtenue après la correction de la non-linéarité de l'endommagement. Elle est calculée par l'équation suivante :

$$a_F = a_T + \frac{a_w \cdot C_i \cdot \Delta E_i}{|E_{00i}^*|} \quad (7.7)$$

Où, ΔE_i correspond à la différence entre le module initial $|E_{00i}^*|$ et le module initial sur l'intervalle considéré $|E_{00i}^*|$.

C_i est un coefficient de correction pour traduire la non-linéarité de l'endommagement. La valeur du coefficient de correction C_i ne dépend pas de l'essai, mais dépend de l'intervalle choisi. Les valeurs de C_i sont les suivantes :

- L'intervalle -1 : $C_{-1} = 5/6$
- L'intervalle 0 : $C_0 = 4/5$
- L'intervalle 1 : $C_1 = 3/4$
- L'intervalle 2 : $C_2 = 2/3$

Les coefficients C_1 et C_2 sont ceux utilisés pour l'analyse de l'endommagement par Soltani (1998). Le coefficient C_0 a été introduit par Baaj (2002) afin de pouvoir analyser des essais dont la rupture est atteinte avant 150 000 cycles. Le coefficient C_{-1} est introduit par Di Benedetto *et al.* (2004) pour analyser des essais dont la rupture est atteinte avant 80 000 cycles.

7.4.2 Calcul du dommage corrigé, D_{IIIc}

Di Benedetto *et al.* (2004) ont montré que sur la base d'une analyse classique, le dommage D_{III} associé au point de transition entre les phases II et III varie suivant les amplitudes de déformation (Figure 7.20). Cependant en considérant les effets biaisant et en définissant le dommage corrigé, D_{IIIc} , il a montré que les valeurs de D_{IIIc} semblent être indépendantes du niveau de déformation (Figure 7.20). Ce constat est fort important puisqu'il suggère une valeur seuil du dommage à partir duquel l'endommagement par fatigue au sein de l'éprouvette engendre la présence de macro fissures.

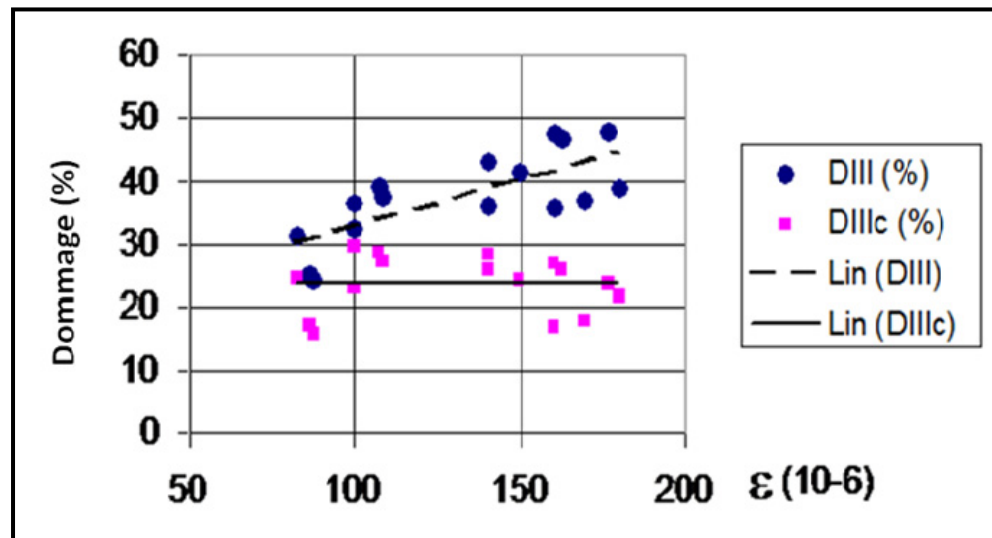


Figure 7.20 Valeurs du dommage à la transition entre la phase II et III pour les tests en fatigue de tension/compression à déformation imposée :

D_{III} non corrigé et D_{IIIc} corrigé des effets biaisant

Tirée de Di Benedetto *et al.* (2004, p. 17)

D_{IIIc} est le dommage à la transition des phases II et III, imputable essentiellement à la fatigue : c'est le dommage corrigé des effets biaisant, soit :

$$D_{IIIc} = D_{III} - \frac{C_i(|E_0^*| - |E_{00i}^*|)}{|E_0^*|} \quad (7.8)$$

La correction $C_i(|E_0^*| - |E_{00i}^*|)$ introduit le module E_{00i} , (la raideur initiale pour l'intervalle i considéré), dans le calcul du dommage. Cette correction permet de quantifier les effets biaisant liés à l'échauffement et à la thixotropie.

Bien que Di Benedetto *et al.* (2004) aient utilisé les valeurs associées à l'intervalle 0 (40 000 80 000 cycles) pour déterminer et tracer la courbe du dommage corrigé présentée à la Figure 7.20, plutôt, l'intervalle 2 (150 000 300 000 cycles) est utilisé pour déterminer et tracer la courbe du dommage corrigé présentée à la Figure 7.21, puisque ce dernier est le plus près de la phase III, pour valider le concept de dommage corrigé tel que proposé par Di Benedetto *et al.* (2004).

La Figure 7.21 présente les valeurs de D_{III} et D_{IIIc} calculées pour tous les essais réalisés en cours de cette recherche. Les résultats présentés à la Figure 7.21 montrent que le dommage D_{III} augmente continuellement avec l'amplitude de la déformation imposée. D'autre part, l'évolution des dommages corrigés, D_{IIIc} , reste pratiquement invariable avec l'amplitude de la déformation et aussi avec la température. Il apparaît qu'une valeur moyenne de 23 % du dommage corrigé représente le seuil critique qui détermine la transition entre les phases II et III d'un essai de fatigue. Ce résultat confirme les propos de Di Benedetto *et al.* (2004) à cet égard. Notons que l'écart type pour les valeurs du dommage corrigé est de 5 %.

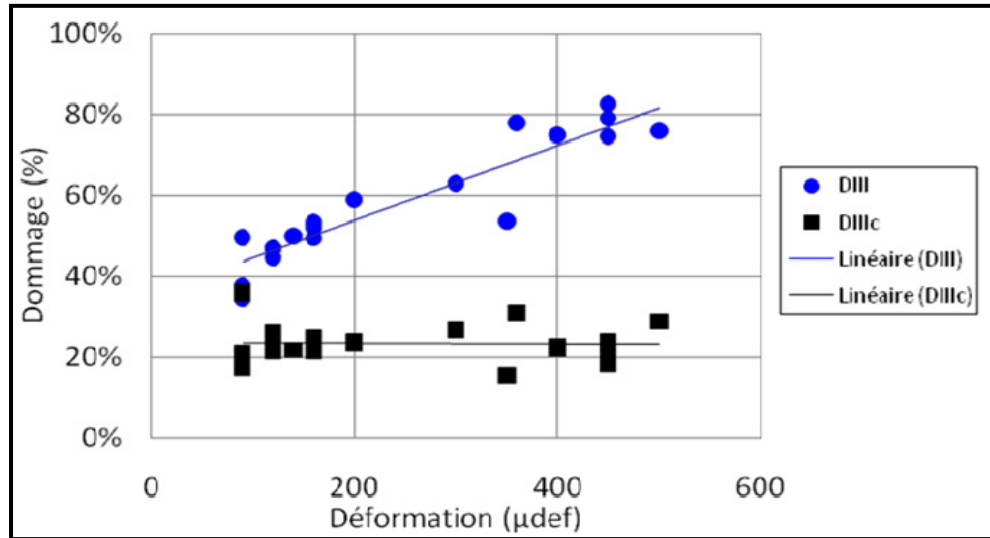


Figure 7.21 Valeurs du dommage à la transition entre la phase II et III pour les tests en fatigue de tension/compression à déformation imposée : D_{III} non corrigé et D_{IIIc} corrigé des effets biaisant.

7.4.3 Durée de vie selon le critère $N_{fil/III}^{DGCB}$

Plusieurs difficultés sont présentes lors de la réalisation des essais de fatigue en laboratoire, et qui nécessite un temps de travail important: variation de la température en cours d'essai due à un système de climatisation inapproprié; alignement au collage; homogénéité des éprouvettes; bruits dans les signaux de mesure; arrêts inopinés du groupe hydraulique; etc.

Très souvent, suivant ces problèmes d'exécution, l'essai ne peut être exploité : on doit refaire l'essai pour les conditions imposées. Le temps est critique dans les mesures de la résistance en fatigue des matériaux. Or, la méthode DGCB, proposée par Di Benedetto, se présente comme un outil de premier plan pour permettre d'accroître l'efficacité dans le cadre de la mesure de la résistance en fatigue des matériaux bitumineux. En effet, en considérant une évolution linéaire de la perte de raideur du matériau suivant des intervalles bien définis en cours de phase II de l'essai, on peut, en admettant qu'il existe une valeur seuil du dommage corrigé, extrapoler la durée de vie escomptée de l'éprouvette, et ce, en se limitant à un nombre restreint de cycles de sollicitation.

La Figure 7.22 illustre cette approche. En considérant l'équation 7.8, on peut écrire pour une évolution linéaire de la perte de la raideur au cours de l'intervalle « i » la relation 7.9 par simple règle de trois, soit :

$$N_{fII/III}^{DGCB} = \frac{|E_{00i}^*| - |E_{F00i}^*| + D_{IIIc} |E_0^*|}{a_{Ti} \cdot |E_{00i}^*|} \quad (7.9)$$

Le détail relatif à l'équation (7.9) est donné à l'annexe IV.

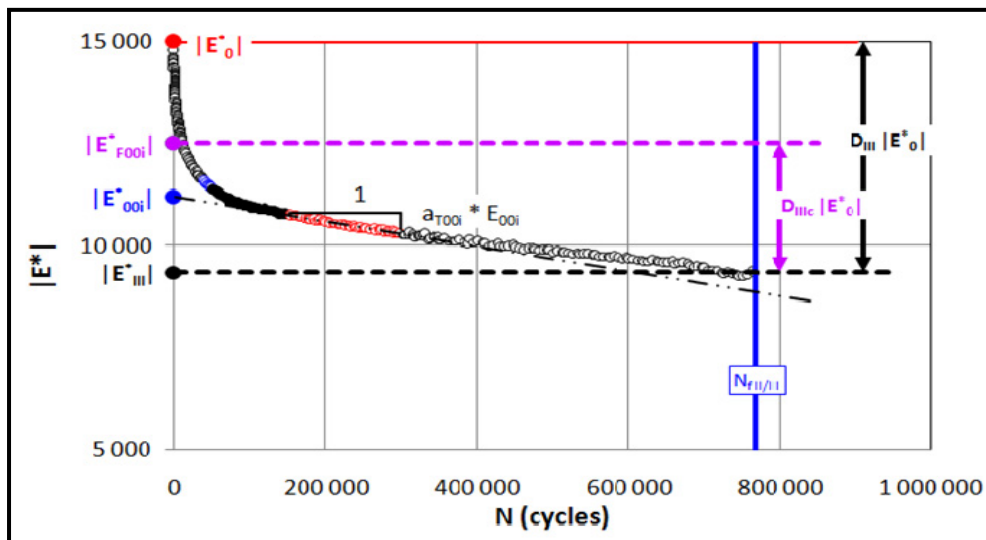


Figure 7.22 Prédiction de la durée de vie en fatigue selon l'approche DGCB

Dans le but de valider cet énoncé, l'ensemble des résultats de fatigue sont traités en ne considérant que les 300 000 premiers cycles de sollicitation. En se référant à la méthode de DGCB, les valeurs prédites ($N_{fII/III}^{DGCB}$) calculées à partir de l'équation (7.8) en remplaçant le dommage corrigé avec la valeur déterminée précédemment (23 %) sont comparées aux valeurs réelles correspondantes (N_{fIII}). Pour ce faire, les raideurs mesurées ont ainsi été corrigées suivant la méthode DGCB pour tous les essais de fatigue réalisés à 10 °C sur les deux enrobés GB20.

7.4.3.1 Comparaison entre les valeurs de $N_{fII/III}^{DGCB}$ et les durées de vie $N_{fII/III}$

La Figure 7.23 présente les différentes droites de fatigue tracées avec les durées de vie établies suivant le critère de rupture ($N_{fII/III}$) et celles suivant les durées de vie prédites ($N_{fII/III}^{DGCB}$).

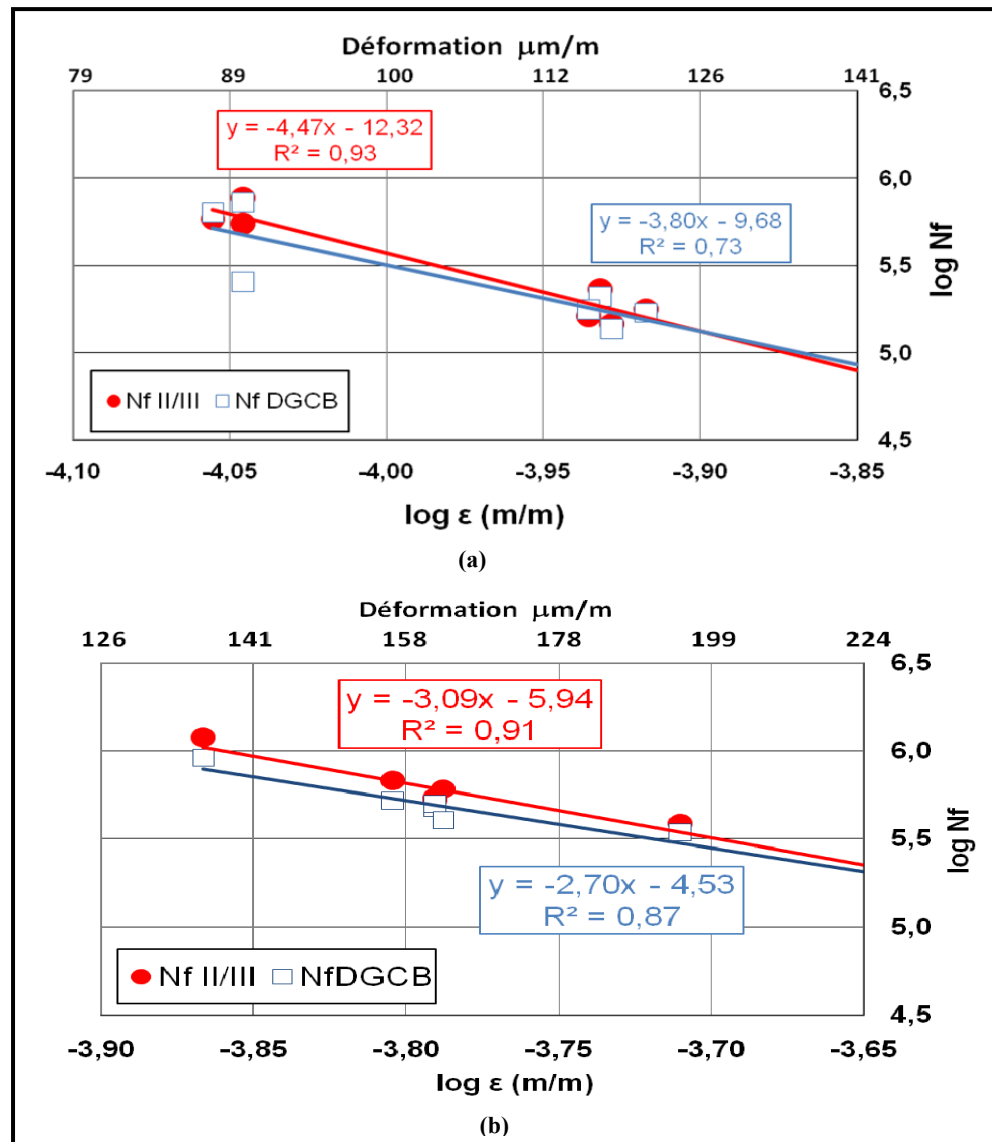


Figure 7.23 Durées de vie des enrobés déterminées avec le critère phase II/III, le critère DGCB et les droites de régression correspondantes dans les axes logarithmiques $\log N$ et $\log \epsilon$ testé à 10 °C et 10 Hz (a) GB20 PG58-28 (b) GB20 PG64-28

Comme il n'est pas simple, selon la Figure 7.23, de distinguer la différence entre les valeurs des durées de vie déterminées par le critère de transition entre les phases II et III ($N_{fII/III}$) et les valeurs de durées de vie prédites ($N_{fII/III}^{DGCB}$), le Tableau 7.6 expose ces valeurs et les erreurs relatives entre elles.

Tableau 7.6 comparaison entre $N_{fII/III}$ et $N_{fII/III}^{DGCB}$ ($T_{consigne} = 10\text{ °C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$)

Enrobés	Nom de l'essai	$N_{fII/III}$	$N_{fII/III}^{DGCB}$	Erreur relative Er (%)
GB20 PG58-28	P3B2	230 228	208 298	9,5
	P3B3	161 540	174 718	8,3
	P3B1	146 278	135 254	7,5
	P3D2	178 678	169 968	4,9
	P3C4	577 010	633 126	9,7
	P3B4	766 900	717 249	6,5
GB20 PG64-28	P1C1	1 187 631	909 331	23,4
	P1A1	647 128	517 718	20,0
	P2A2	526 659	472 963	10,2
	P1C2	541 413	497 344	8,1
	P1C3	386 835	341 289	11,8

L'erreur relative est calculée par la relation suivante :

$$Er (\%) = \left[\frac{N_{fII/III} - N_{fII/III}^{DGCB}}{N_{fII/III}} \right] * 100 \quad (7.10)$$

Les valeurs des durées de vie des essais présentées dans le Tableau 7.6 sont comparables, avec des erreurs relatives acceptables, ce qui permet de généraliser ce calcul sur d'autres essais pour valider cette prédiction et caractériser le comportement en fatigue d'un enrobé à 300 000 cycles de sollicitation (seulement 8 heures de sollicitation à une fréquence de 10Hz). Pour améliorer les erreurs relatives, entre $N_{fII/III}$ et $N_{fII/III}^{DGCB}$, il est nécessaire de choisir des éprouvettes de qualité avec des teneurs en vides comparable.

Avant de choisir l'intervalle 2 (150 000 à 300 000 cycles) pour prédire la durée de vie en fatigue, une comparaison a été faite entre tous les résultats en utilisant les quatre intervalles, et on a opté pour utiliser cet intervalle puisqu'il donne les meilleures prédictions.

La valeur du dommage corrigé de 23 % utilisée dans la formule de prédiction de la durée de vie est la moyenne de tous les dommages corrigés issus de tous les essais réalisés sur les deux enrobés testés.

CONCLUSION

Les enrobés bitumineux ont un comportement fort complexe. Dans le cadre de ce mémoire, une réflexion particulière est concentrée sur le phénomène de la fatigue, qui est l'endommagement engendré par la répétition de sollicitation dont l'amplitude reste constamment inférieure à celle entraînant la rupture instantanée du matériau.

Pour être en mesure de réaliser des essais de fatigue en traction/compression en laboratoire avec rigueur et cerner les éléments clés en vue de déterminer une durée de vie représentative de la performance en fatigue d'un enrobé, plusieurs points sont à respecter. Des éprouvettes homogènes avec une bonne étude du plan de sciage et de carottage avec des côtés bien lisses sont nécessaires pour assurer le bon collage des casques et aussi l'utilisation d'un matériel adéquat pour avoir un bon mesurage. Le pourcentage de vide ou la compacité des éprouvettes joue un rôle important dans la dispersion des valeurs de durée de vie, la durée de vie augmente avec l'augmentation de la compacité. Alors, les éprouvettes sont sélectionnées en fonction de leur teneur en vides et conservées dans un bac de sable pour éviter la flexion et limiter le vieillissement.

Dans la littérature, toutes les études réalisées sur la fatigue montrent que le rôle du type de bitume est très important sur la résistance en fatigue de l'enrobé. Les résultats issus de la campagne expérimentale réalisée dans ce mémoire montrent aussi que l'enrobé bitumineux préparé avec un bitume polymère (PG 64-28) donne des durées de vie plus élevées et nettement meilleures en fatigue malgré que leurs modules de rigidité sont plus faibles par rapport à l'enrobé bitumineux préparé avec un bitume standard (PG 58-28), et plus particulièrement pour les hauts niveaux de sollicitation. Cette conclusion correspond aux résultats obtenus avec le critère classique et avec le critère de transition entre les phases II et III.

Ce résultat est fort important. En effet, il semble que l'utilisation d'un bitume polymère a pour effet de mitiger la notion du critère classique. Bien que ce résultat soit étonnant, il

demeure tout à fait réaliste puisque les effets biaisant qui atteignent la raideur de l'éprouvette sous sollicitations sont nettement plus marqués pour les bitumes polymères, d'où la nécessité de réfléchir à l'introduction d'un autre critère tel que celui déterminé au point de transition entre la phase II et III qui semble plus réaliste et plus représentatif en termes de fatigue que le critère classique pour le dimensionnement des chaussées.

La durée de vie en fatigue d'un matériau bitumineux évolue avec la température (Di Benedetto *et al.* 2005). Les essais de fatigue réalisés selon trois températures différentes, ont pu vérifier l'hypothèse que l'effet de la température translate simplement la droite de fatigue pour les matériaux bitumineux, sans en affecter énormément la pente. Cette dernière est juste suivant les résultats du critère classique. L'autre point important est que l'augmentation de la température n'influence pas le dommage corrigé des effets biaisant.

Plusieurs difficultés sont présentes lors de la réalisation des essais de fatigue, la plus importante, est le temps éminent pour caractériser un enrobé bitumineux, et dans ce sens, la méthode DGCB a été utilisée pour prédire la durée de vie en fatigue en réalisant 300 000 cycles seulement (8 heures). La comparaison des résultats donne des erreurs relatives assez faibles, ce qui encourage à appliquer cette méthode sur d'autres enrobés bitumineux pour en avoir une conclusion plus générale.

En vue d'étendre ou d'approfondir ce travail, on peut envisager les quelques points évoqués ci-dessous :

- on doit approfondir les recherches afin de valider le critère du point de la transition entre les phases II et III qui est plus représentatif et basé sur le comportement en fatigue
- la méthode de prédiction de la durée de vie proposée dans cette recherche est prometteuse et doit être effectuée sur un grand nombre d'essais de fatigue sur différents enrobés bitumineux pour réaliser un gain de temps appréciable sur la caractérisation de ces derniers.

ANNEXE I

Détermination de la teneur en vides

La teneur en vides (V_i) peut être déterminée à partir de deux méthodes : 1) méthode hydrostatique ou 2) méthode volumétrique. Selon la méthode LC 26-320, la teneur en vides (V_i) est :

$$V(\%) = \left(1 - \frac{d_{mb}}{d_{mm}}\right) \times 100 \quad (\text{A I-1})$$

Où :

- d_{mb} Densité brute de l'enrobé compacté;
- d_{mm} Densité maximale de l'enrobé.

Méthode hydrostatique, détermination de la densité brute du mélange (D_{mb})

Cette méthode est préconisée pour les enrobés denses ($V_i < 10\%$) (Méthode d'essai LC 26-040). Il s'agit de peser l'élément à l'état sec dans l'air, à l'état SSS (saturée à surface sèche) dans l'air et dans l'eau afin de connaître sa densité brute (D_{gb}). Si la température de l'eau est de $25 \pm 1^\circ\text{C}$, l'équation est :

$$d_{mb} = \frac{A}{B-C} \quad (\text{A I-2})$$

Sinon, pour une température de $25 \pm 3^\circ\text{C}$, elle est :

$$d_{mb} = \frac{A}{B-C} \times \frac{d_w}{0,99704} \quad (\text{A I-3})$$

Où :

- d_{mb} Densité brute de l'enrobé compacté;
- A Masse dans l'air de l'éprouvette sèche (g);
- B Masse dans l'air de l'éprouvette saturée à surface sèche (g);
- C Masse de l'éprouvette dans l'eau (g);
- d_w Masse volumique de l'eau à la température de l'essai (g/cm^3);
- 0,99704 Masse volumique de l'eau à 25°C (g/cm^3).

À partir de la valeur de d_{mb} , la masse volumique de l'élément est :

$$\text{Masse volumique} = d_{mb} \times d_{w25} \quad (\text{A I-4})$$

Où :

$$d_{w25} \quad \text{Masse volumique de l'eau à } 25^{\circ}\text{C (0,99704 g/cm}^3 \text{ ou } 997,044 \text{ kg/cm}^3\text{)}.$$

Méthode volumétrique, détermination de la masse volumique

Cette méthode est préconisée pour les enrobés ouverts ($V_i \geq 10\%$) (Méthode d'essai LC 26-040). Le volume doit être calculé à partir des dimensions de l'échantillon, chaque dimension étant égale à la moyenne de trois mesures, effectuées à 120° les unes des autres pour la hauteur, et à 60° pour le diamètre. Ces mesures doivent être exprimées avec une précision de trois chiffres significatifs. La masse volumique est :

$$MV = \frac{M_{sec}}{V} \quad (\text{A I-5})$$

Où :

MV	Masse volumique (g/cm ³);
M _{sec}	Masse à l'état sec (g);
V	Volume (cm ³).

Ensuite, la masse volumique (MV) est transformée en densité brute (d_{mb}) en la divisant par la masse volumique de l'eau à $25^{\circ}\text{C (0,99704 g/cm}^3\text{)}$.

ANNEXE II

Caractéristiques des éprouvettes

GB20 PG58-28

#	Hauteur (mm)			Diamètre (mm)			dmm : 2,578										
							Masse	dmb	% vides	compacité %	Msèche	Meau	Mss	T° eau	dmb	% vides	compacité %
P3A1	121,20	121,18	121,23	73,92	73,95	73,90	1271,50	2,444	5,176	94,824	1271,50	754,30	1273,30	20,20	2,449	4,973	95,027
		121,203		73,923													
P3A2	121,82	121,53	121,51	73,96	73,95	73,93	1273,40	2,439	5,367	94,633	1273,40	754,70	1275,20	20,30	2,446	5,103	94,897
		121,553		73,947													
P3A3	121,87	121,82	121,83	73,95	73,96	73,97	1276,50	2,439	5,394	94,606	1276,50	757,30	1278,80	20,30	2,447	5,055	94,945
		121,840		73,960													
P3A4	121,91	121,94	121,88	73,98	73,92	73,95	1257,20	2,401	6,853	93,147	1257,20	743,70	1263,00	20,40	2,421	6,092	93,908
		121,910		73,950													
P3B1	121,84	121,83	121,82	73,99	73,92	73,95	1281,20	2,448	5,021	94,979	1281,20	760,30	1282,10	20,40	2,455	4,758	95,242
		121,830		73,953													
P3B2	121,05	121,09	121,14	73,97	73,93	73,94	1279,30	2,460	4,567	95,433	1279,30	761,70	1279,80	20,50	2,469	4,218	95,782
		121,093		73,947													
P3B3	118,92	118,91	118,91	73,94	73,96	73,94	1256,40	2,460	4,557	95,443	1256,40	748,10	1257,40	20,60	2,467	4,305	95,695
		118,913		73,947													
P3B4	119,82	119,62	119,61	73,95	73,95	73,96	1255,60	2,444	5,196	94,804	1255,60	745,30	1257,70	20,80	2,450	4,945	95,055
		119,617		73,953													
P3C1	118,64	118,62	118,63	73,98	73,97	73,95	1244,50	2,441	5,287	94,713	1244,50	738,00	1246,10	20,70	2,449	4,986	95,014
		118,630		73,967													
P3C2	122,25	122,24	122,23	73,97	73,96	73,96	1282,80	2,461	4,508	95,492	1282,80	771,60	1293,60	20,80	2,477	3,924	96,076
		122,240		73,963													
P3C3	121,53	121,49	121,46	73,98	73,97	73,96	1284,70	2,460	4,558	95,442	1284,70	765,20	1285,40	20,80	2,470	4,196	95,804
		121,493		73,977													
P3C4	122,93	122,89	122,94	73,97	73,97	73,97	1290,00	2,442	5,259	94,741	1290,00	764,10	1290,80	20,80	2,449	4,988	95,012
		122,920		73,970													
P3D1	120,69	120,72	120,65	73,96	73,97	73,96	1250,60	2,410	6,505	93,495	1250,60	741,20	1255,90	20,80	2,430	5,742	94,258
		120,753		73,970													
P3D2	122,62	122,65	122,59	73,99	73,96	73,97	1284,40	2,437	5,448	94,552	1284,40	761,20	1285,80	20,90	2,448	5,019	94,981
		122,620		73,973													
P3D3	120,25	120,18	120,27	73,97	73,99	73,97	1254,00	2,427	5,862	94,138	1254,00	741,10	1255,40	21,00	2,438	5,408	94,592
		120,233		73,977													
P3D4	120,73	120,68	120,70	73,96	73,97	73,95	1253,80	2,418	6,201	93,799	1253,80	739,50	1255,30	21,10	2,431	5,696	94,304
		120,703		73,960													

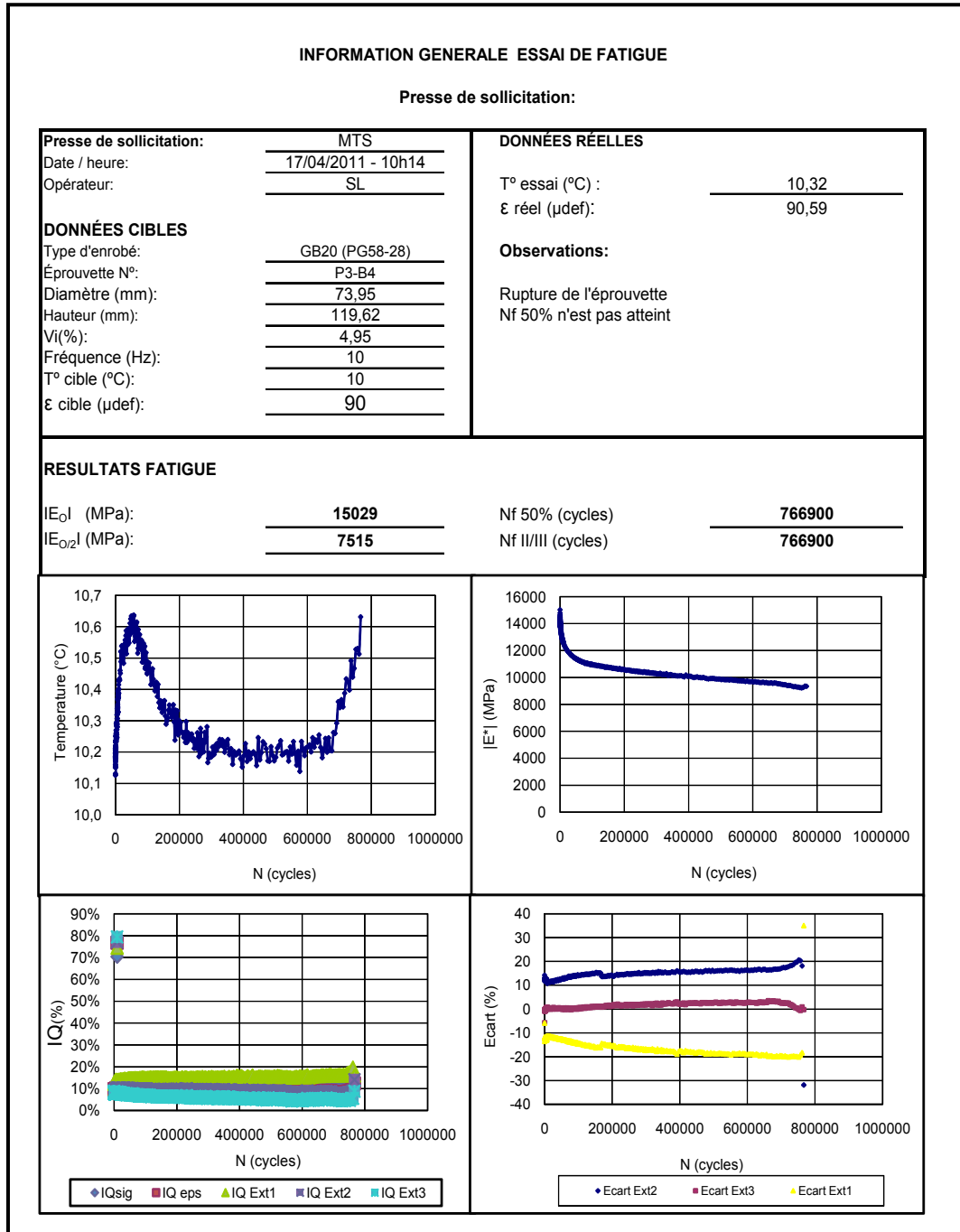
GB20 PG64-28 (Plaque 2)

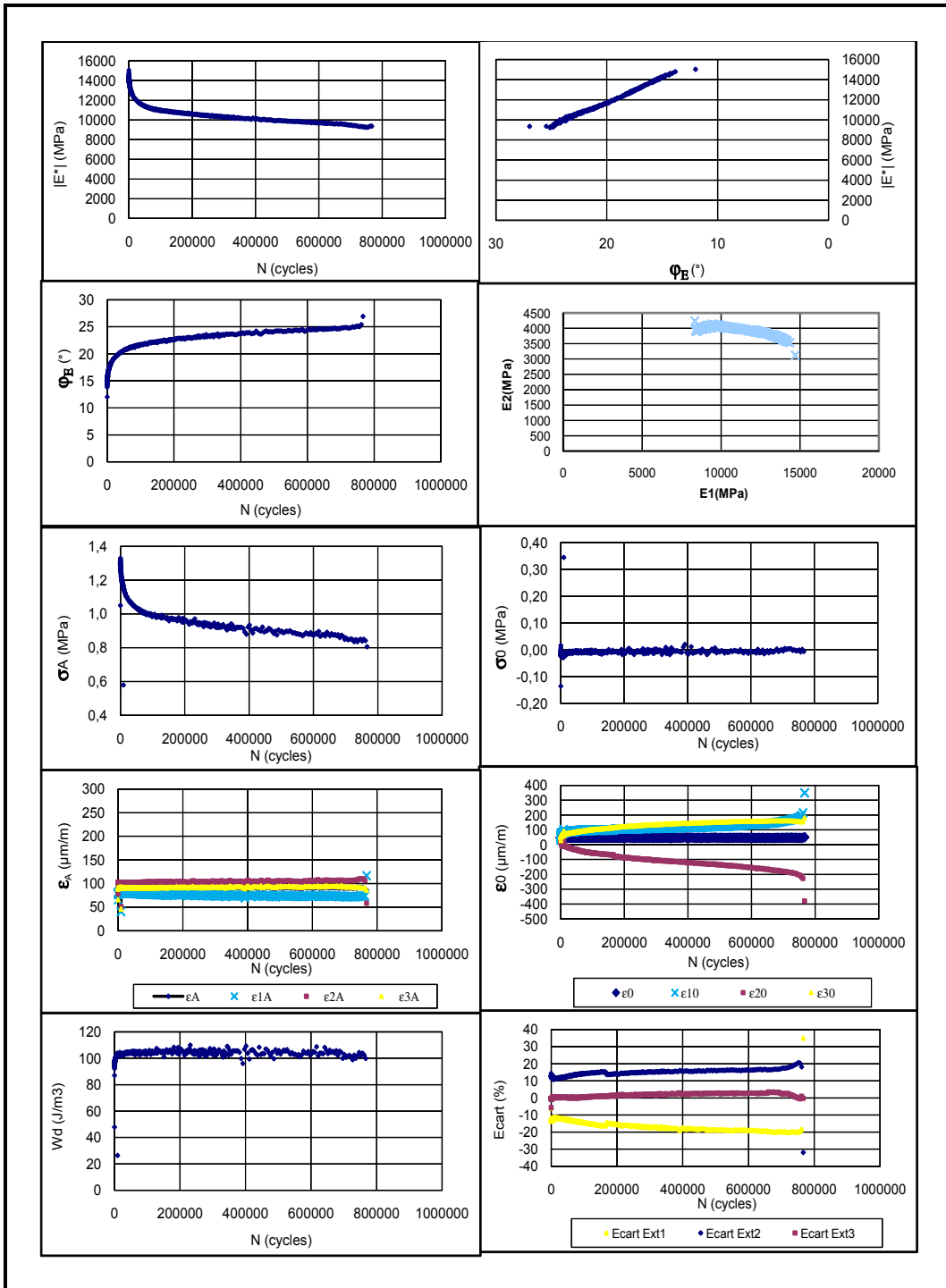
#	Hauteur (mm)		Diamètre (mm)		dmm : 2,642												
					Masse	dmb	% vides	compacité %	Mssèche	Meau	Msss	T° eau	dmb	% vides	compacité %		
P2A1	119,91	120,23	120,30	78,43	78,70	78,77	1487,90	2,550	3,478	96,522	1487,90	909,00	1489,95	21,00	2,561	3,060	96,940
		120,147		78,633													
P2A2	121,95	121,77	122,00	78,38	78,82	78,51	1523,00	2,577	2,470	97,530	1523,00	935,17	1525,40	21,00	2,580	2,333	97,667
	125,23	125,43	125,23	78,80	78,50	78,60	1570,20	2,585	2,160	97,840	1570,20	965,73	1572,83	21,00	2,586	2,105	97,895
P2A3		125,297		78,567			1549,50	2,580	2,338	97,662	1549,50	951,56	1551,87	21,00	2,581	2,303	97,697
	124,22	124,27	124,29	78,37	78,43	78,53	1508,50	2,514	4,834	95,166	1508,50	913,46	1510,89	21,00	2,525	4,429	95,571
P2B1	123,41	123,64	123,18	78,65	78,77	78,61	1482,80	2,536	4,016	95,984	1482,80	900,73	1485,17	21,00	2,537	3,969	96,031
		123,410		78,677													
P2B2	120,24	120,13	119,78	76,74	76,79	78,72	1502,10	2,521	4,566	95,434	1502,10	905,07	1504,65	21,00	2,505	5,176	94,824
	122,98	123,15	122,88	78,67	78,56	78,42	1476,80	2,514	4,840	95,160	1476,80	893,59	1479,00	21,00	2,523	4,516	95,484
P2B3		122,937		78,550			1480,50	2,553	3,372	96,628	1480,50	902,79	1482,37	21,00	2,554	3,314	96,686
	121,12	121,01	121,51	78,60	78,48	78,57	1481,20	2,586	2,120	97,880	1481,20	914,64	1483,72	21,00	2,603	1,484	98,516
P2B4		119,257		78,687			1479,80	2,591	1,933	98,067	1479,80	911,23	1482,12	21,00	2,592	1,889	98,111
	119,28	119,06	119,43	76,54	76,77	78,75	1564,10	2,595	1,794	98,206	1564,10	964,82	1566,93	21,00	2,598	1,677	98,323
P2C1		118,277		78,523			1519,20	2,552	3,415	96,585	1519,20	927,43	1522,38	21,00	2,553	3,350	96,650
	118,09	118,13	118,61	78,43	78,54	78,60	1512,80	2,550	3,467	96,533	1512,80	922,52	1514,58	21,00	2,555	3,287	96,713
P2C2		118,17	117,73	78,47	78,64	78,31	1548,10	2,561	3,066	96,934	1548,10	947,37	1550,61	21,00	2,566	2,865	97,135
	124,79	124,77	124,87	78,44	78,47	78,35	1545,90	2,534	4,071	95,929	1545,90	937,70	1547,13	21,00	2,537	3,988	96,012
P2C3		124,810		78,420			1519,20	2,552	3,415	96,585	1519,20	927,43	1522,38	21,00	2,553	3,350	96,650
	123,13	123,10	123,02	78,41	78,51	78,51	1512,80	2,550	3,467	96,533	1512,80	922,52	1514,58	21,00	2,555	3,287	96,713
P2C4		123,083		78,477			1548,10	2,561	3,066	96,934	1548,10	947,37	1550,61	21,00	2,566	2,865	97,135
	122,54	122,69	122,29	78,40	78,77	78,38	1545,90	2,534	4,071	95,929	1545,90	937,70	1547,13	21,00	2,537	3,988	96,012
P2D1		122,507		78,517			1545,90	2,534	4,071	95,929	1545,90	937,70	1547,13	21,00	2,537	3,988	96,012
	124,64	124,41	124,57	78,46	78,73	78,65	1545,90	2,534	4,071	95,929	1545,90	937,70	1547,13	21,00	2,537	3,988	96,012
P2D2		125,77	126,57	78,64	78,57	78,42	1545,90	2,534	4,071	95,929	1545,90	937,70	1547,13	21,00	2,537	3,988	96,012
	125,77	125,33	126,57	78,64	78,57	78,42	1545,90	2,534	4,071	95,929	1545,90	937,70	1547,13	21,00	2,537	3,988	96,012
P2D3		125,880		78,543			1545,90	2,534	4,071	95,929	1545,90	937,70	1547,13	21,00	2,537	3,988	96,012
	125,77	125,33	126,57	78,64	78,57	78,42	1545,90	2,534	4,071	95,929	1545,90	937,70	1547,13	21,00	2,537	3,988	96,012
P2D4		125,880		78,543			1545,90	2,534	4,071	95,929	1545,90	937,70	1547,13	21,00	2,537	3,988	96,012
	125,77	125,33	126,57	78,64	78,57	78,42	1545,90	2,534	4,071	95,929	1545,90	937,70	1547,13	21,00	2,537	3,988	96,012

ANNEXE III

Présentation des résultats de fatigue

GB 20 PG 58-28 (10°C)





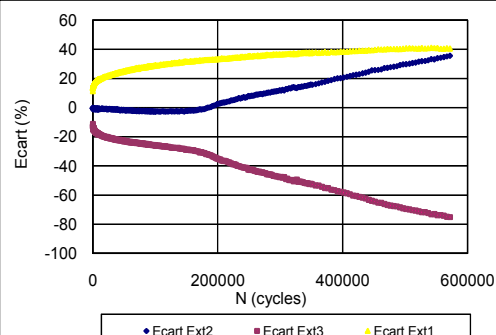
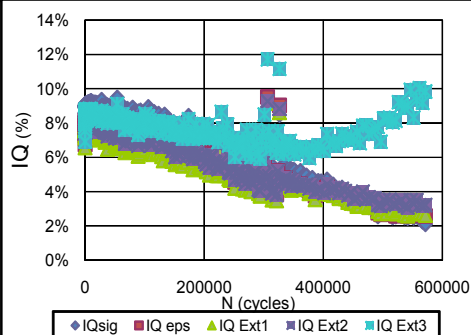
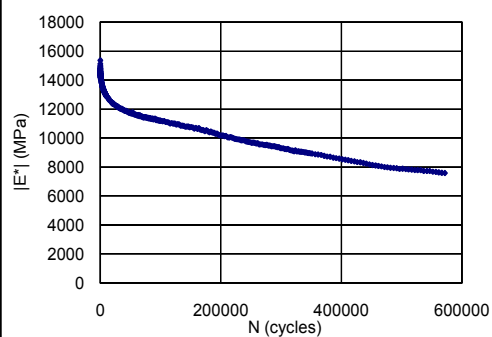
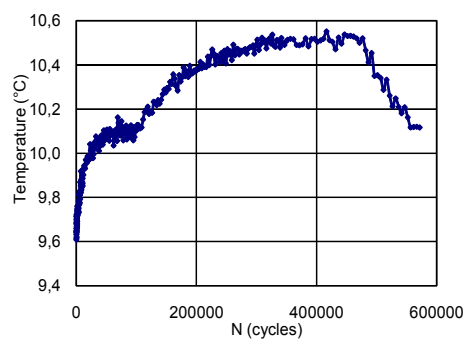
INFORMATION GENERALE ESSAI DE FATIGUE

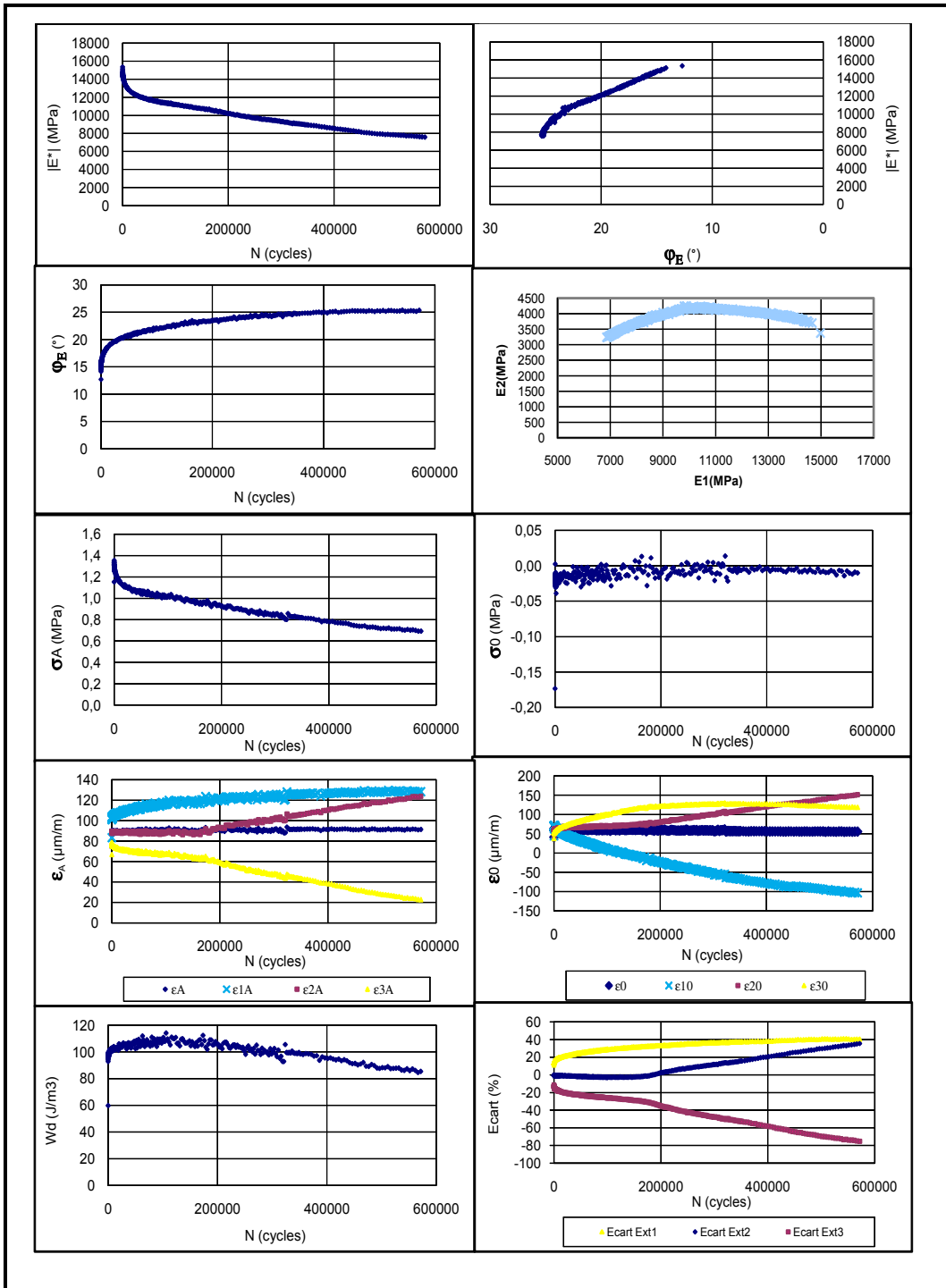
Presse de sollicitation:

Presse de sollicitation:	MTS	DONNÉES RÉELLES	
Date / heure:	25/04/2011 - 11h50	Fréquence (Hz):	
Opérateur:	RT	T° essai (°C):	10,06
		ε réel (µdef):	91,43
DONNÉES CIBLES		Observations:	
Type d'enrobé:	GB20 (PG 58-28)		
Éprouvette N°:	P3-C1		
Diamètre (mm):	73,97		
Hauteur (mm):	118,63		
V _i (%):	4,99		
Fréquence (Hz):	10		
T° cible (°C):	10		
ε cible (µdef):	90		

RESULTATS FATIGUE

IE ₀₁ (MPa):	15361	Nf 50% (cycles)	551684
IE ₀₂ (MPa):	7681	Nf II/III (cycles)	546678





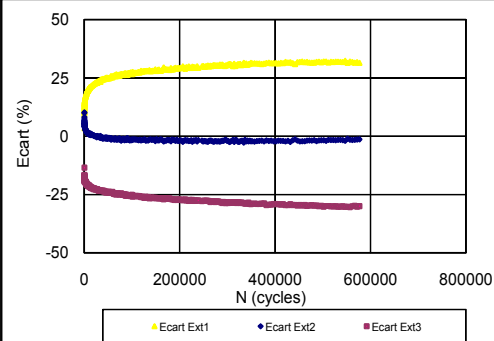
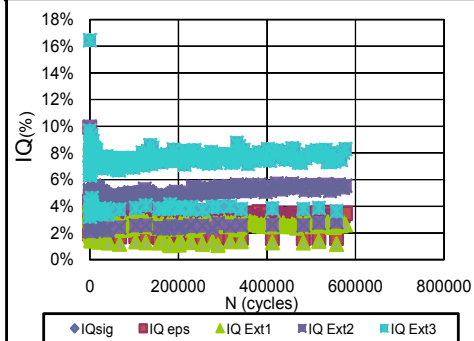
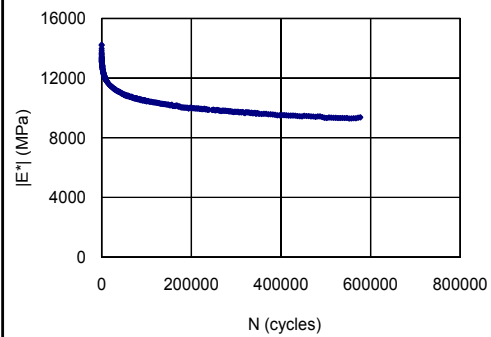
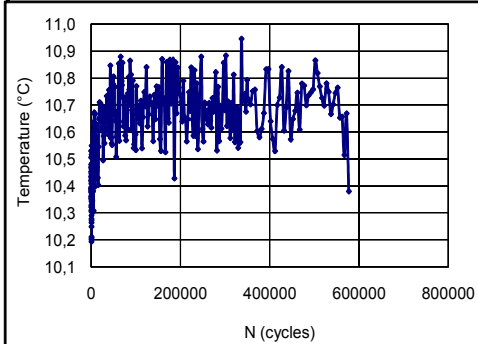
INFORMATION GENERALE ESSAI DE FATIGUE

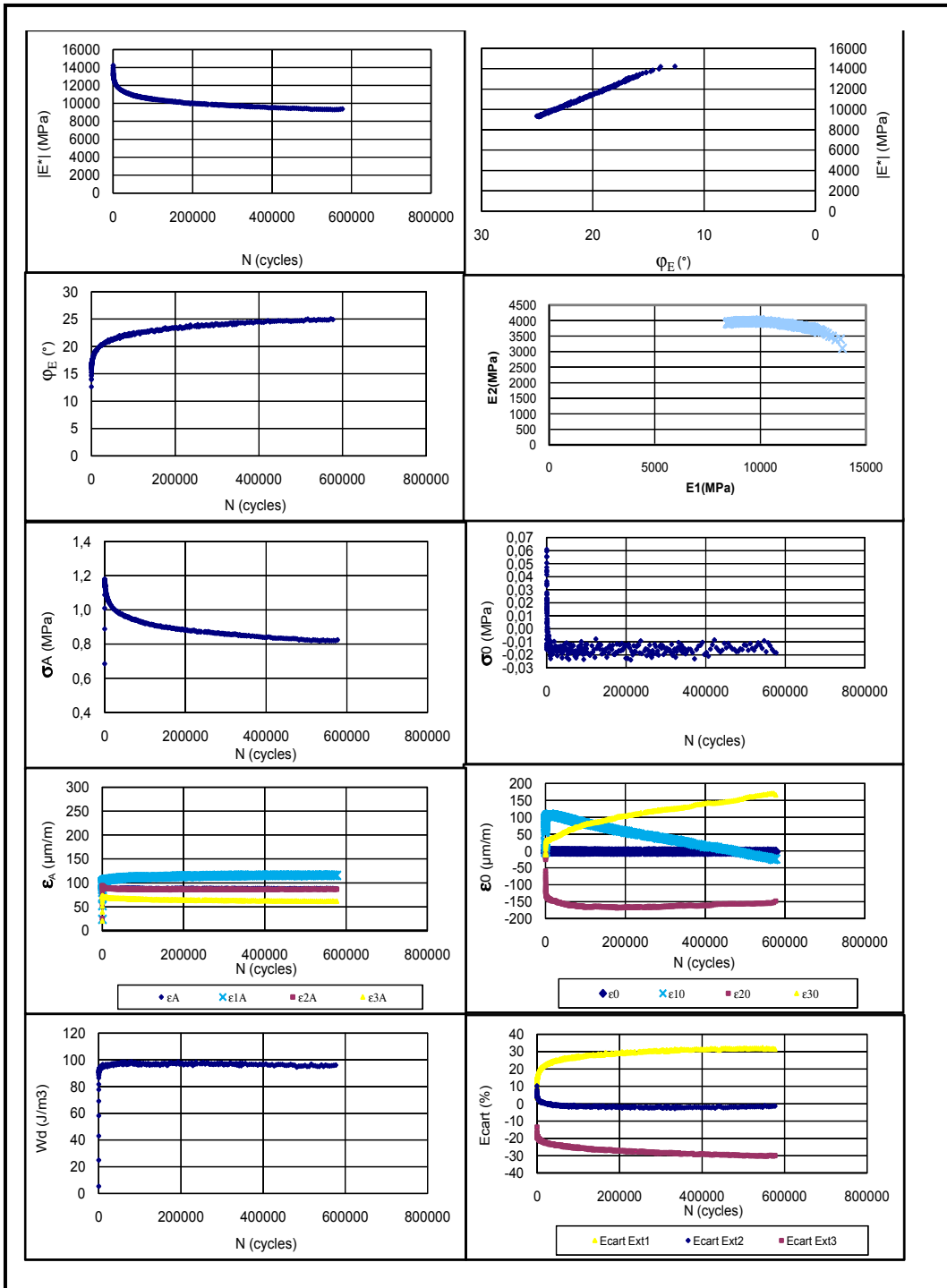
Presse de sollicitation:

Presse de sollicitation: Presse Bionix Date / heure: 06/04/2011 - 12h14 Opérateur: RT	DONNÉES RÉELLES T° essai (°C): 10,59 ε réel (μdef): 87,86 Observations: Rupture de l'éprouvette Nf 50% n'est pas atteint
DONNÉES CIBLES Type d'enrobé: GB20 Éprouvette N°: P3-C4 Diamètre (mm): 73,977 Hauteur (mm): 122,92 Vi(%): 4,95 Fréquence (Hz): 10 T° cible (°C): 10 ε cible (μdef): 90	

RESULTATS FATIGUE

IE ₀₁ (MPa): 14294	Nf 50% (cycles): 577010
IE ₀₂ (MPa): 7147	Nf II/III (cycles): 577010





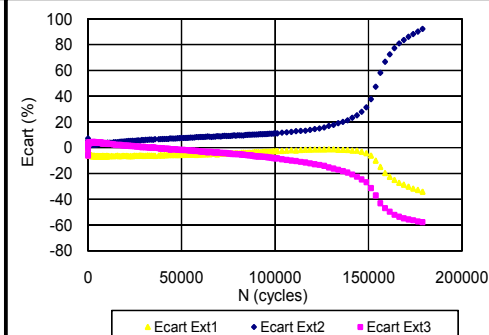
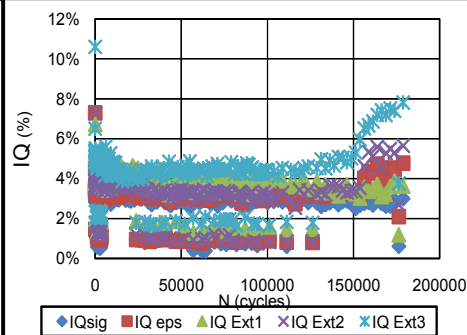
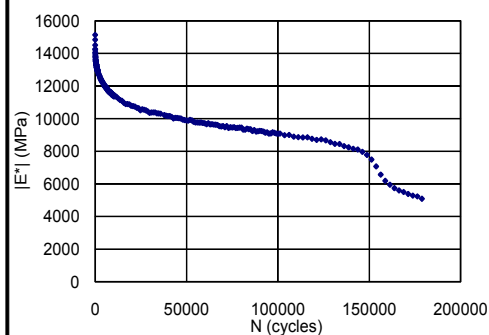
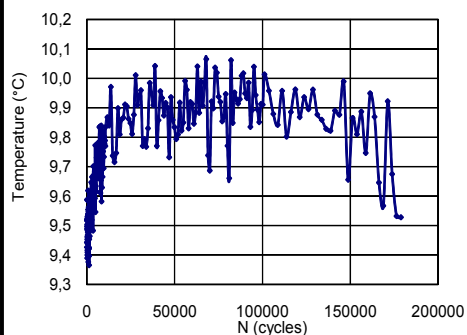
INFORMATION GENERALE ESSAI DE FATIGUE

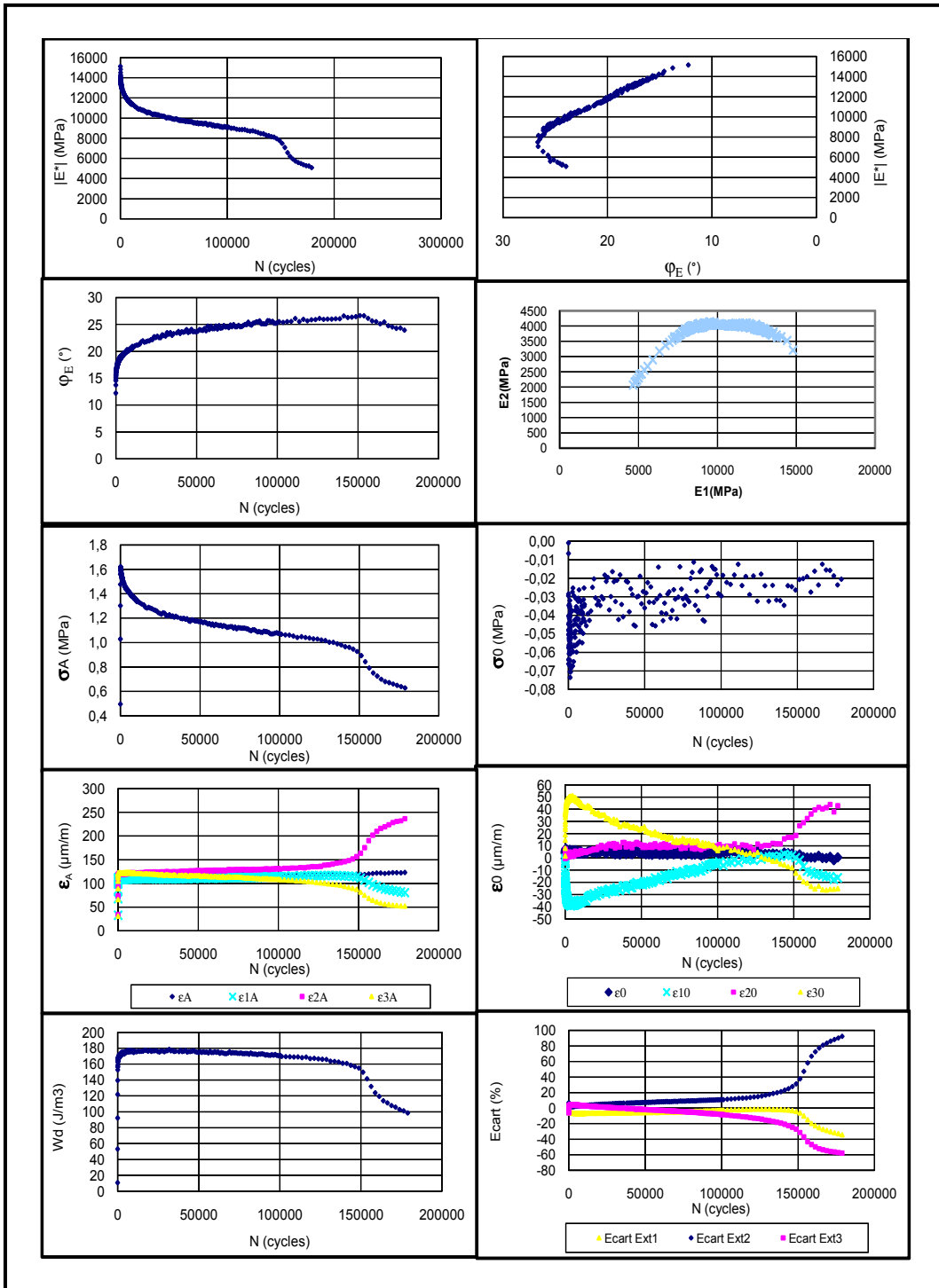
Presse de sollicitation:

Presse de sollicitation:	Presse Bionix	DONNÉES RÉELLES			
Date / heure:	14/02/2011 - 14h41			T° essai (°C) :	9,72
Opérateur:	RT			ε réel (μdef):	117,03
DONNÉES CIBLES					
Type d'enrobé:	GB20	Observations:			
Éprouvette N°:	P3-B1				
Diamètre (mm):	73,953				
Hauteur (mm):	121,83				
Vi(%):	4,76				
Fréquence (Hz):	10				
T° cible (°C):	10				
ε cible (μdef):	120				

RESULTATS FATIGUE

IE ₀₁ (MPa):	15023	Nf 50% (cycles)	148783
IE ₀₂ (MPa):	7512	Nf II/III (cycles)	146278





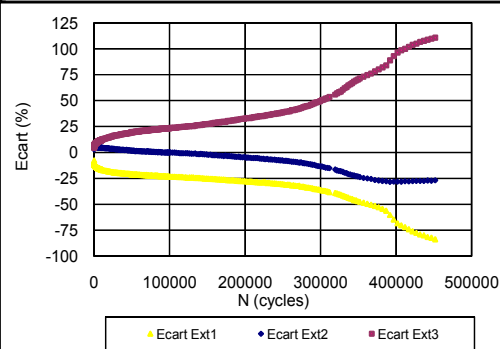
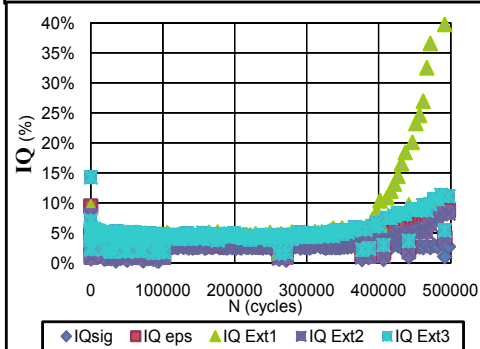
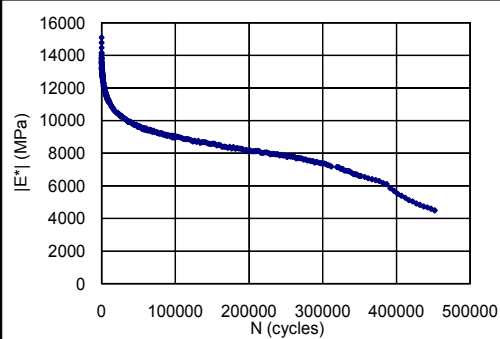
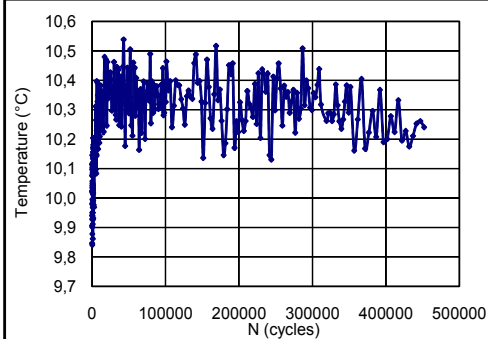
INFORMATION GENERALE ESSAI DE FATIGUE

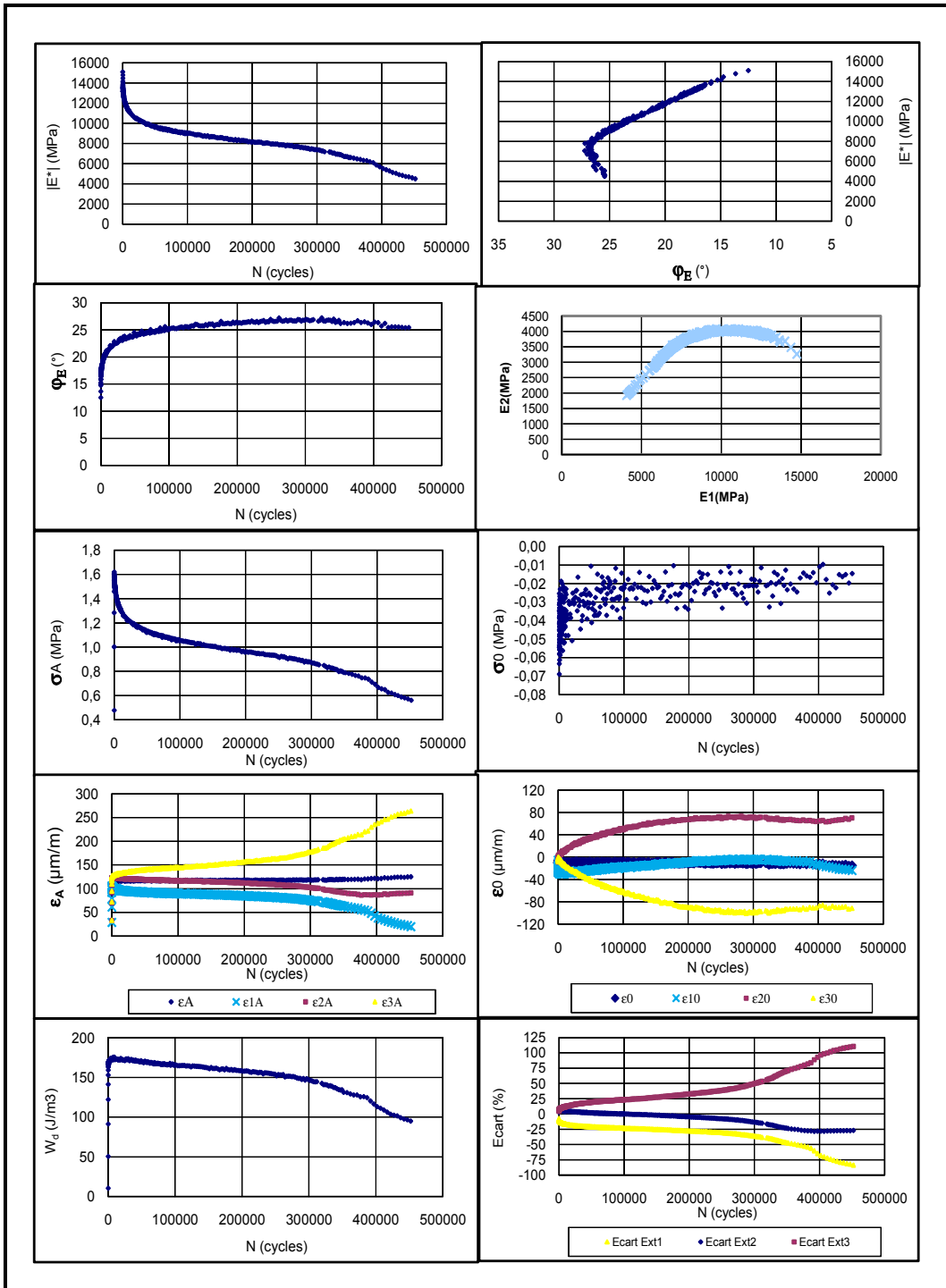
Presse de sollicitation:

Presse de sollicitation: <u>Presse Bionix</u> Date / heure: <u>27/01/2011 - 13h28</u> Opérateur: <u>RT</u>	DONNÉES RÉELLES T° essai (°C): <u>10,25</u> ε réel (µdef): <u>117,28</u>
DONNÉES CIBLES Type d'enrobé: <u>GB20 (PG 58-28)</u> Éprouvette N°: <u>P3-B2</u> Diamètre (mm): <u>73,947</u> Hauteur (mm): <u>121,09</u> Vi(%): <u>4,22</u> Fréquence (Hz): <u>10</u> T° cible (°C): <u>10</u> ε cible (µdef): <u>120</u>	Observations:

RESULTATS FATIGUE

IE ₀ I (MPa): <u>14994</u>	Nf 50% (cycles): <u>286600</u>
IE _{0/2} I (MPa): <u>7497</u>	Nf II/III (cycles): <u>230228</u>





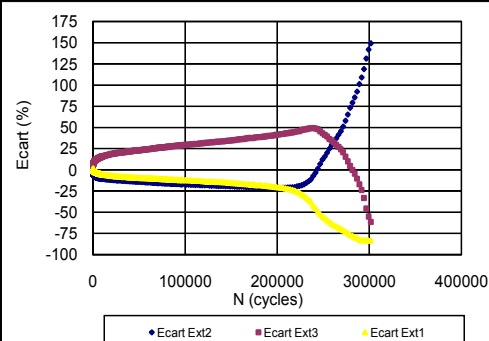
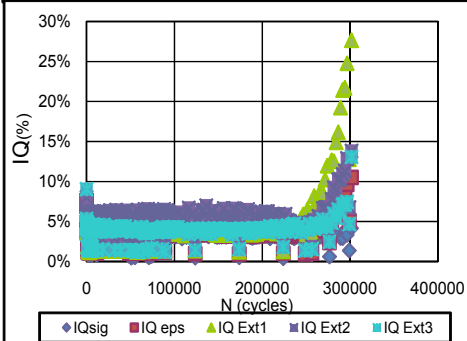
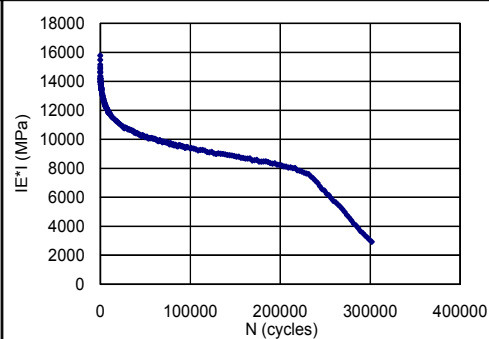
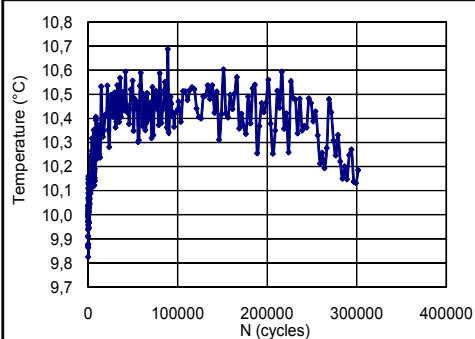
INFORMATION GENERALE ESSAI DE FATIGUE

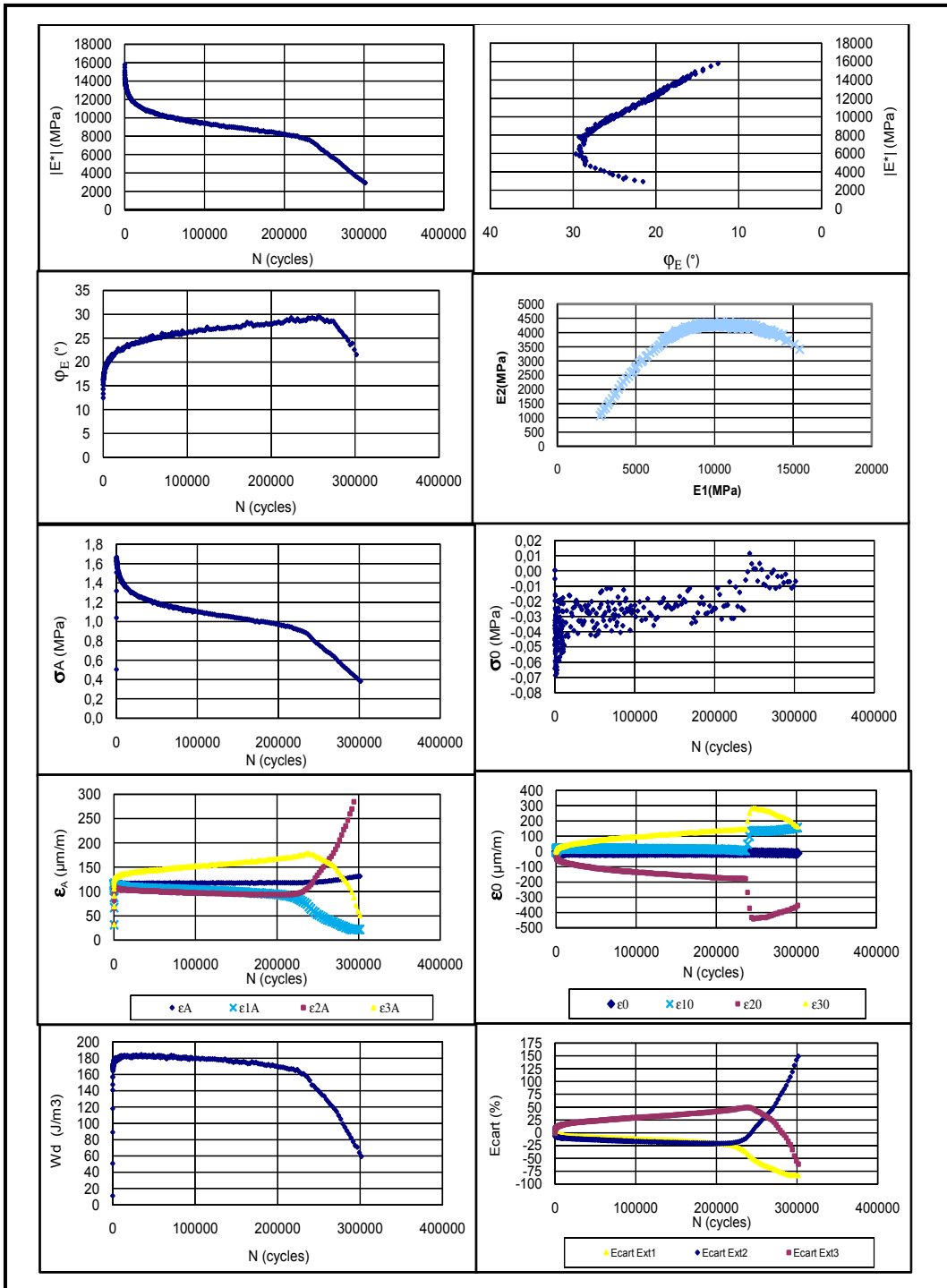
Presse de sollicitation:

Presse de sollicitation: Presse Bionix Date / heure: 11/02/2011 - 13h16 Opérateur: RT	DONNÉES RÉELLES Fréquence (Hz): T° essai (°C): 10,29 ε réel (µdef): 116,66
DONNÉES CIBLES Type d'enrobé: GB20 (PG 58-28) Éprouvette N°: P3-B3 Diamètre (mm): 73,947 Hauteur (mm): 118,913 Vi(%): 4,31 Fréquence (Hz): 10 T° cible (°C): 10 ε cible (µdef): 120	Observations:

RESULTATS FATIGUE

IE ₀ I (MPa): 15691	Nf 50% (cycles): 218993
IE _{0,2} I (MPa): 7846	Nf II/III (cycles): 161540





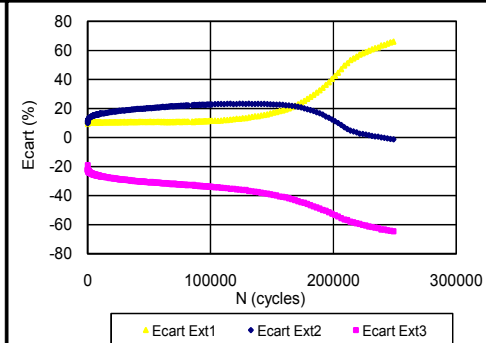
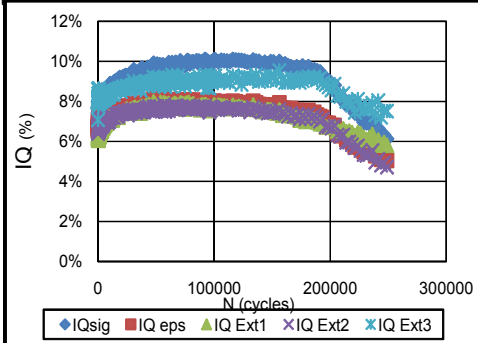
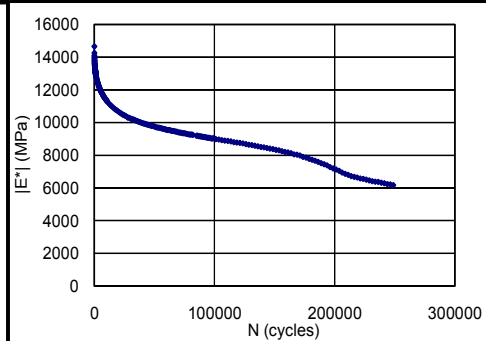
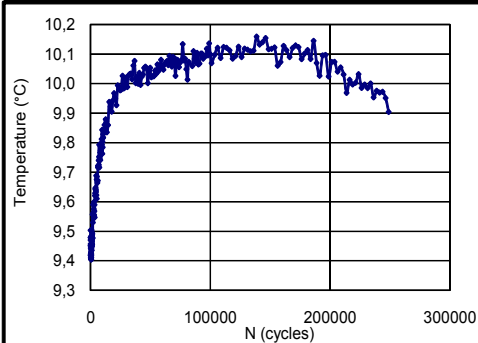
INFORMATION GENERALE ESSAI DE FATIGUE

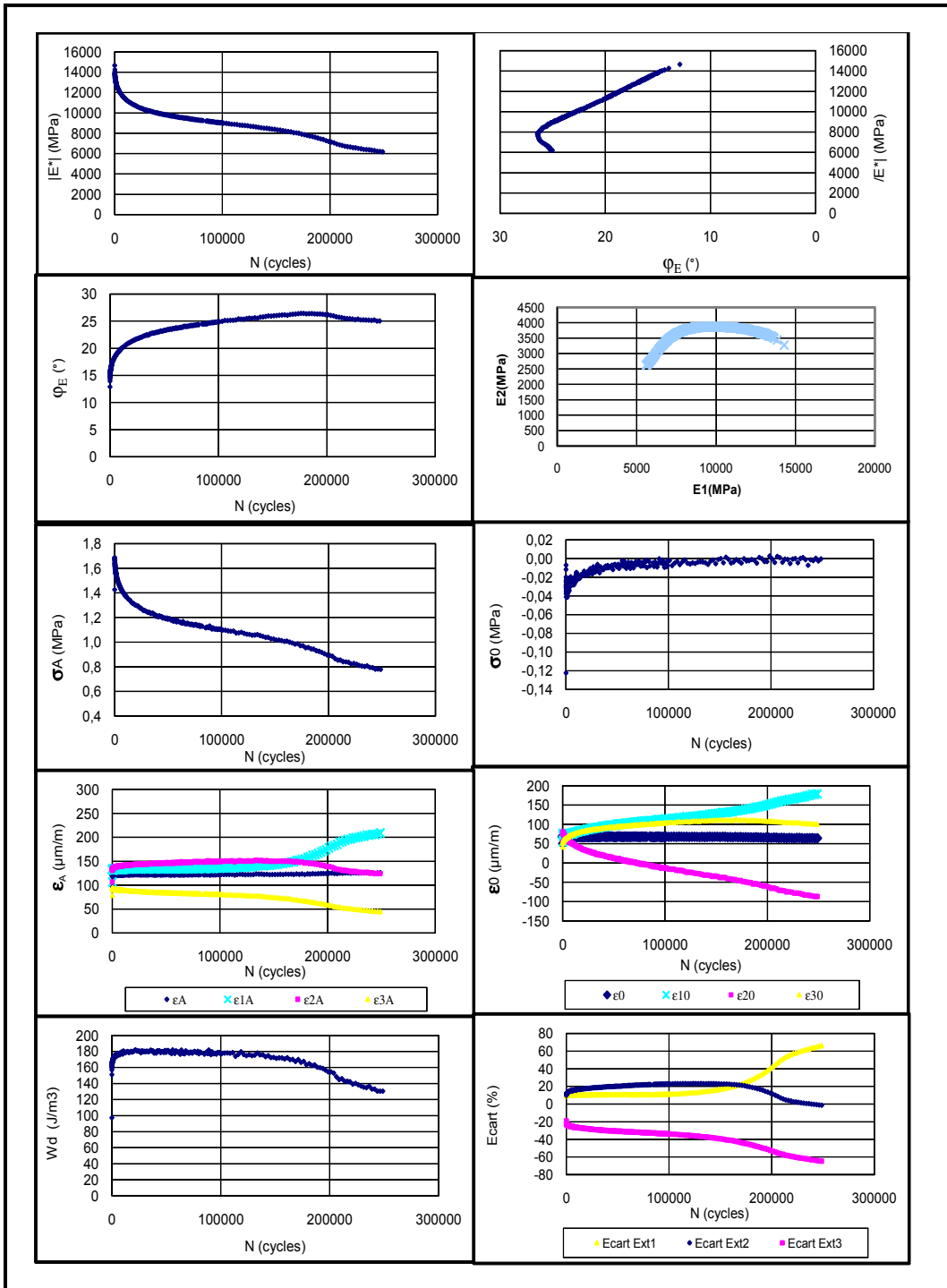
Presse de sollicitation:

Presse de sollicitation:	MTS	DONNÉES RÉELLES	
Date / heure:	06/05/2011 - 19h31	Fréquence (Hz):	
Opérateur:	RT	T° essai (°C):	9,82
DONNÉES CIBLES		ϵ réel (μdef):	121,55
Type d'enrobé:	GB20 (PG 58-28)	Observations:	
Éprouvette N°:	P3-D2		
Diamètre (mm):	73,977		
Hauteur (mm):	122,62		
Vi(%):	5,02		
Fréquence (Hz):	10		
T° cible (°C):	10		
ϵ cible (μdef):	120		

RESULTATS FATIGUE

IE₀₁ (MPa)	14650	N _{f50%} (cycles)	193707
IE₀₂ (MPa)	7325	N _{f II/III} (cycles)	178678





GB20 PG64-28 (10°C 10 Hz)

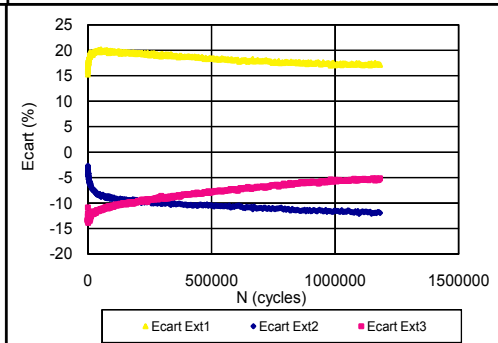
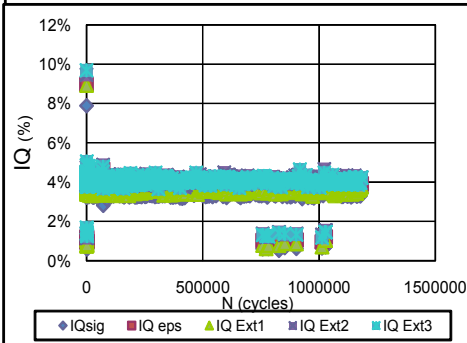
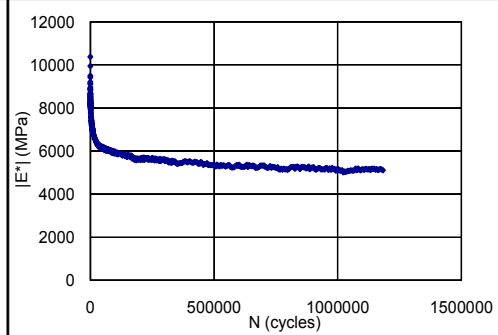
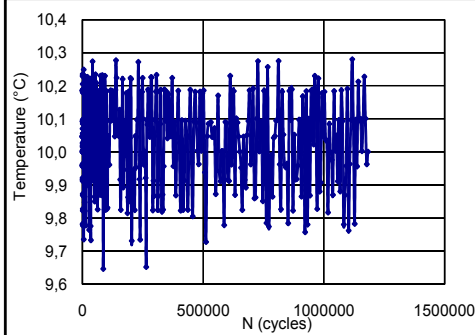
INFORMATION GENERALE ESSAI DE FATIGUE

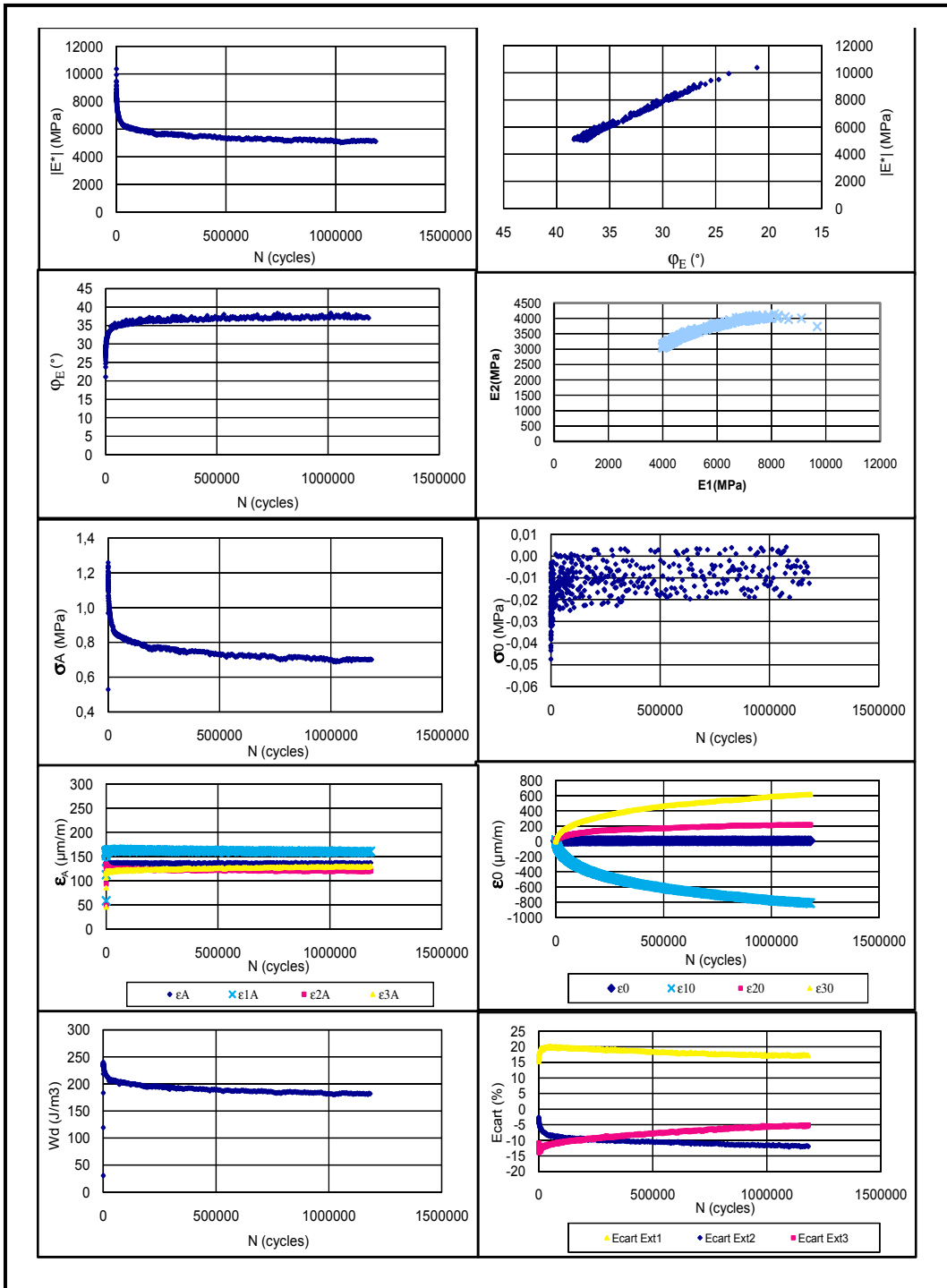
Presse de sollicitation:

Presse de sollicitation:	Presse Bionix	DONNÉES RÉELLES	
Date / heure:	16/11/2010 - 15h12	T° essai (°C) :	10,03
Opérateur:	FO	ε réel (µdef):	136,07
DONNÉES CIBLES		Observations:	
Type d'enrobé:	GB20 (PG 64-28)		
Éprouvette N°:	P1-C1		
Diamètre (mm):	78,503		
Hauteur (mm):	120,44		
Vi(%):	1,77		
Fréquence (Hz):	10		
T° cible (°C):	10		
ε cible (µdef):	140		

RESULTATS FATIGUE

IE ₀₁ (MPa):	10239	N _{f50%} (cycles)	767166
IE ₀₂ (MPa):	5120	Nf II/III (cycles)	1187631





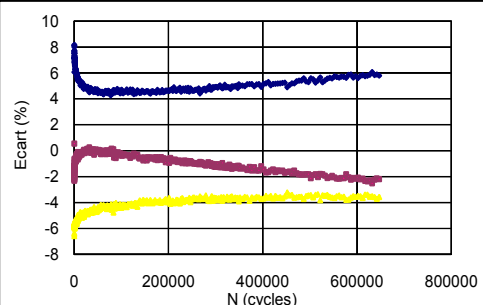
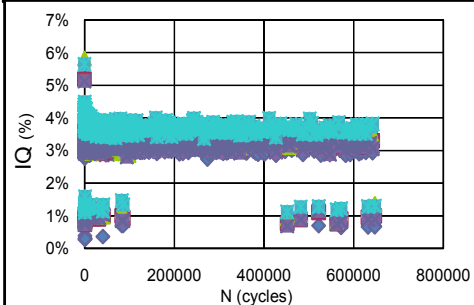
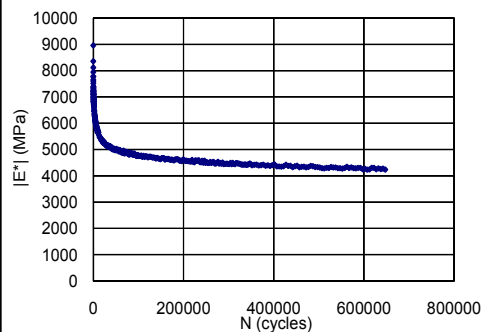
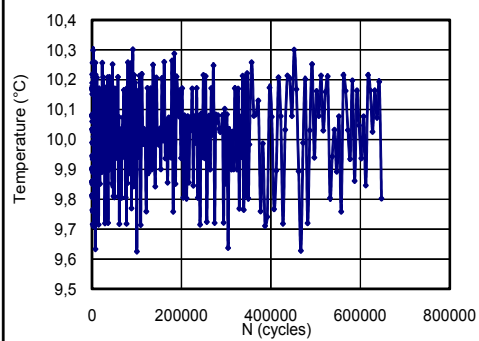
INFORMATION GENERALE ESSAI DE FATIGUE

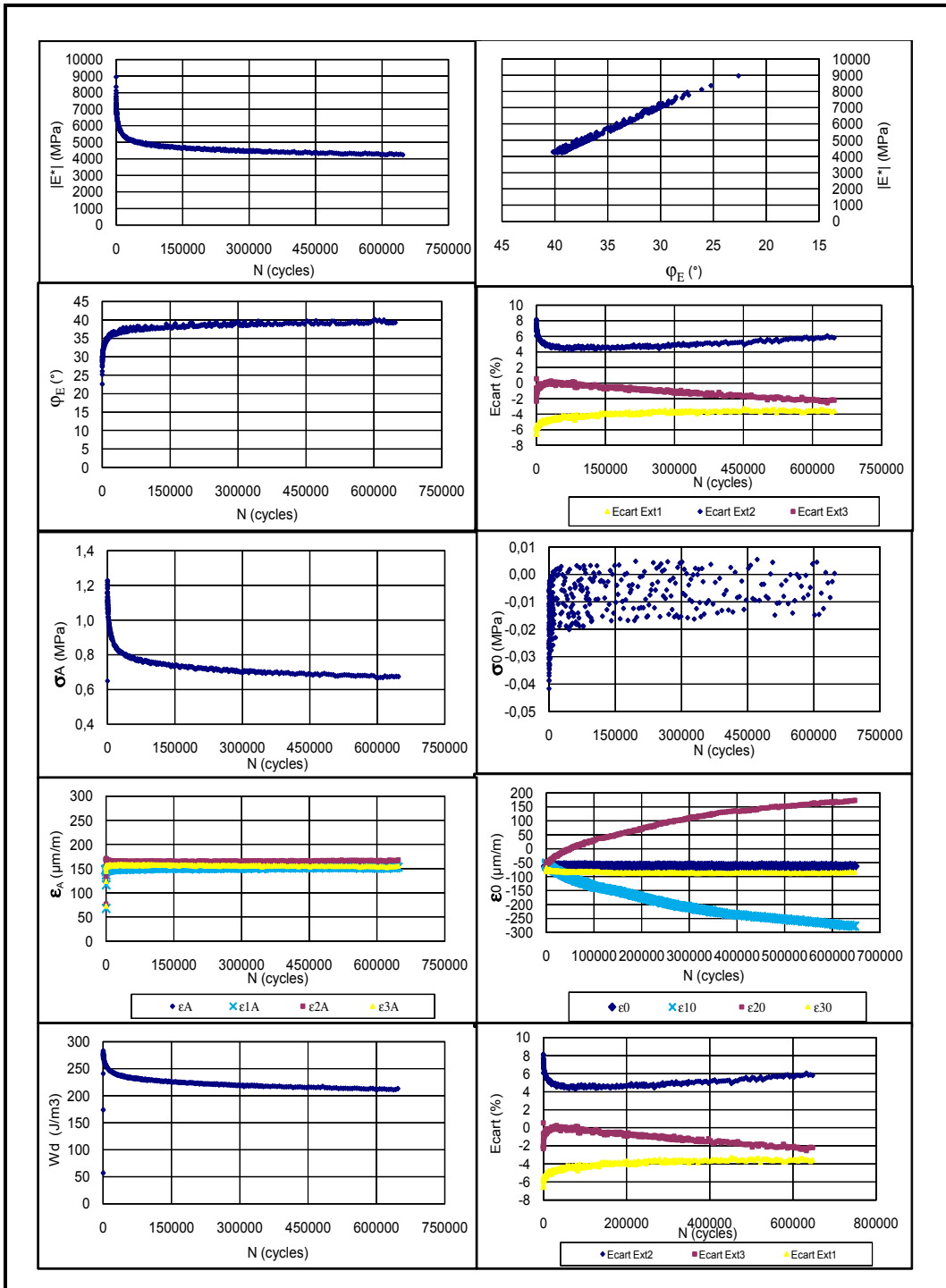
Presse de sollicitation:

Presse de sollicitation: Presse Bionix Date / heure: 28/10/2010 - 11h54 Opérateur: FO	DONNÉES RÉELLES T° essai (°C) : 10,02 ε réel (µdef): 157,14 Observations:
DONNÉES CIBLES Type d'enrobé: GB20 (PG 64-28) Éprouvette N°: P1-A1 Diamètre (mm): 78,63 Hauteur (mm): 123,43 Vi(%): 3,02 Fréquence (Hz): 10 T° cible (°C): 10 ε cible (µdef): 160	

RESULTATS FATIGUE

IE_{O1} (MPa): 9046	Nf 50% (cycles): 266610
IE_{O2} (MPa): 4523	Nf II/III (cycles): 647128





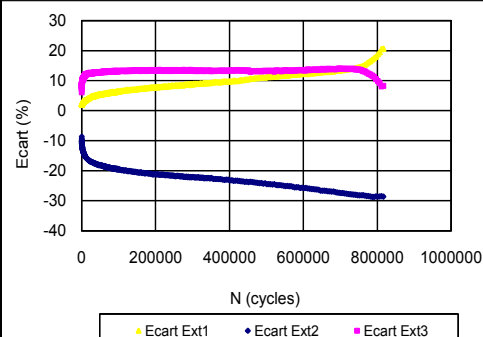
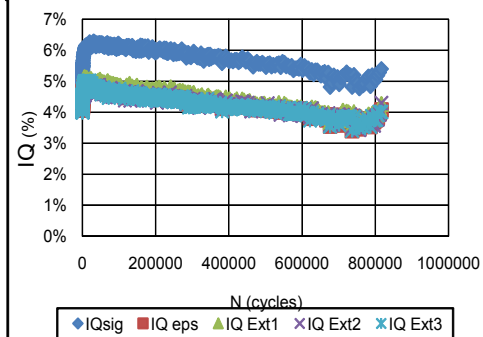
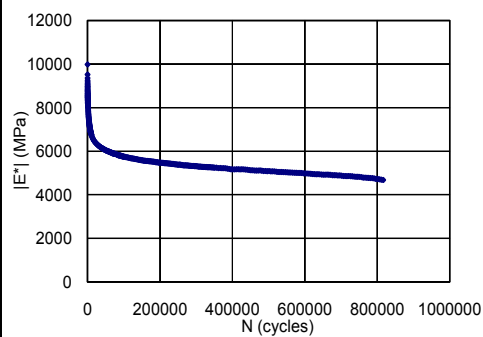
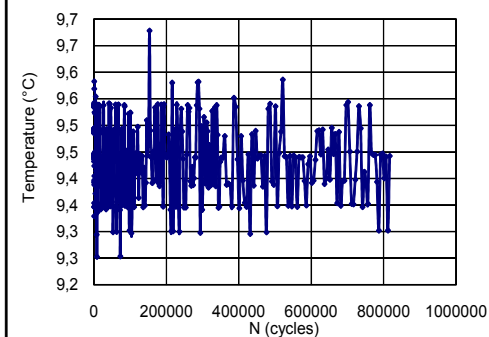
INFORMATION GENERALE ESSAI DE FATIGUE

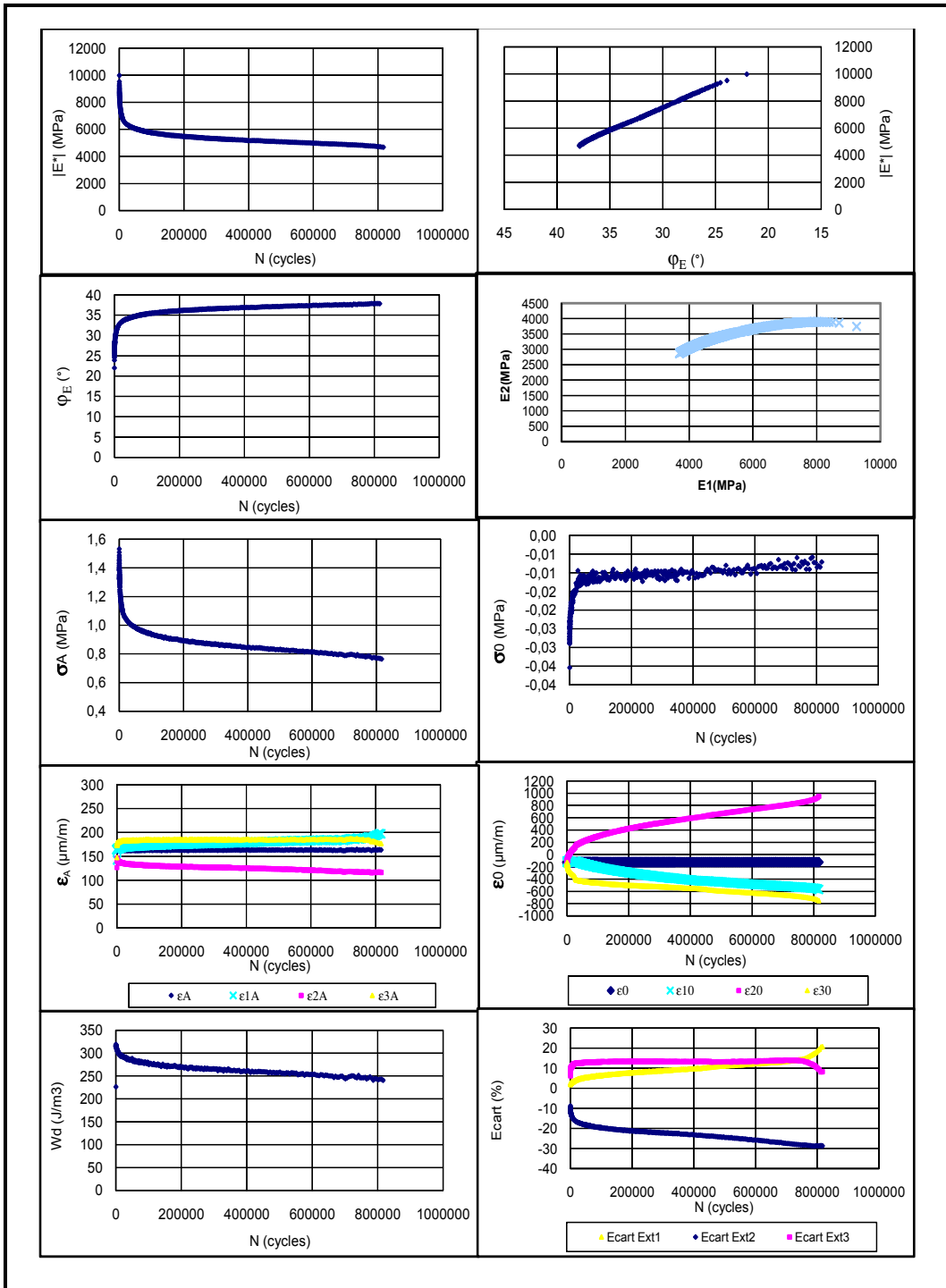
Presse de sollicitation:

Presse de sollicitation: <u>Presse Bionix</u> Date / heure: <u>01/12/2010 - 14h54</u> Opérateur: <u>RT</u>	DONNÉES RÉELLES Fréquence (Hz): _____ T° essai (°C): <u>9,44</u> ε réel (µdef): <u>162,45</u>
DONNÉES CIBLES Type d'enrobé: <u>GB20(PG64-28)</u> Éprouvette N°: <u>P1C2</u> Diamètre (mm): <u>78,59</u> Hauteur (mm): <u>118,2</u> Vi(%): <u>1,8</u> Fréquence (Hz): <u>10</u> T° cible (°C): <u>10</u> ε cible (µdef): <u>160</u>	Observations:

RESULTATS FATIGUE

IE₀₁ (MPa) <u>9988</u>	N_{f50%} (cycles) <u>591455</u>
IE₀₂ (MPa) <u>4994</u>	N_{f II/III} (cycles) <u>541413</u>





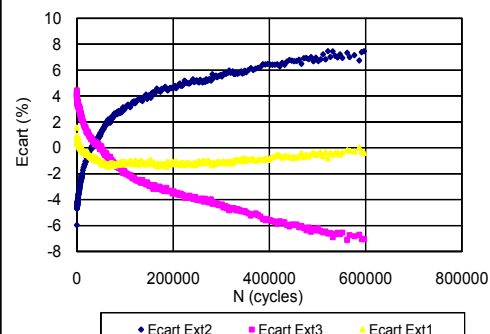
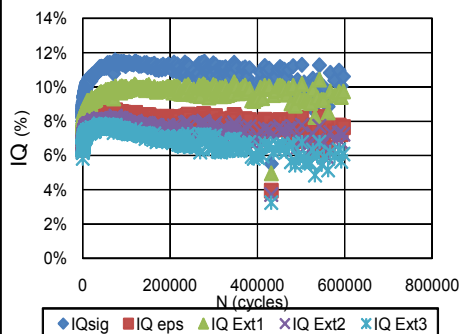
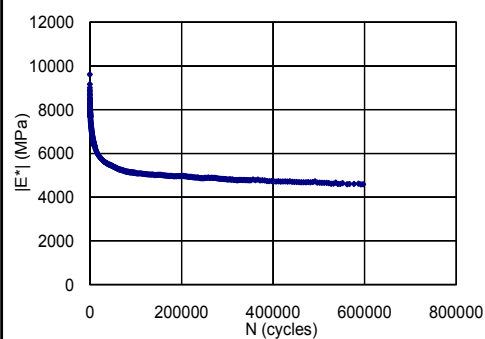
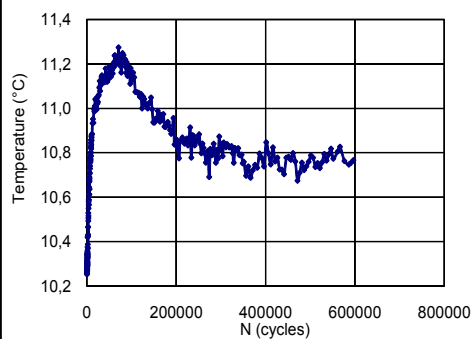
INFORMATION GENERALE ESSAI DE FATIGUE

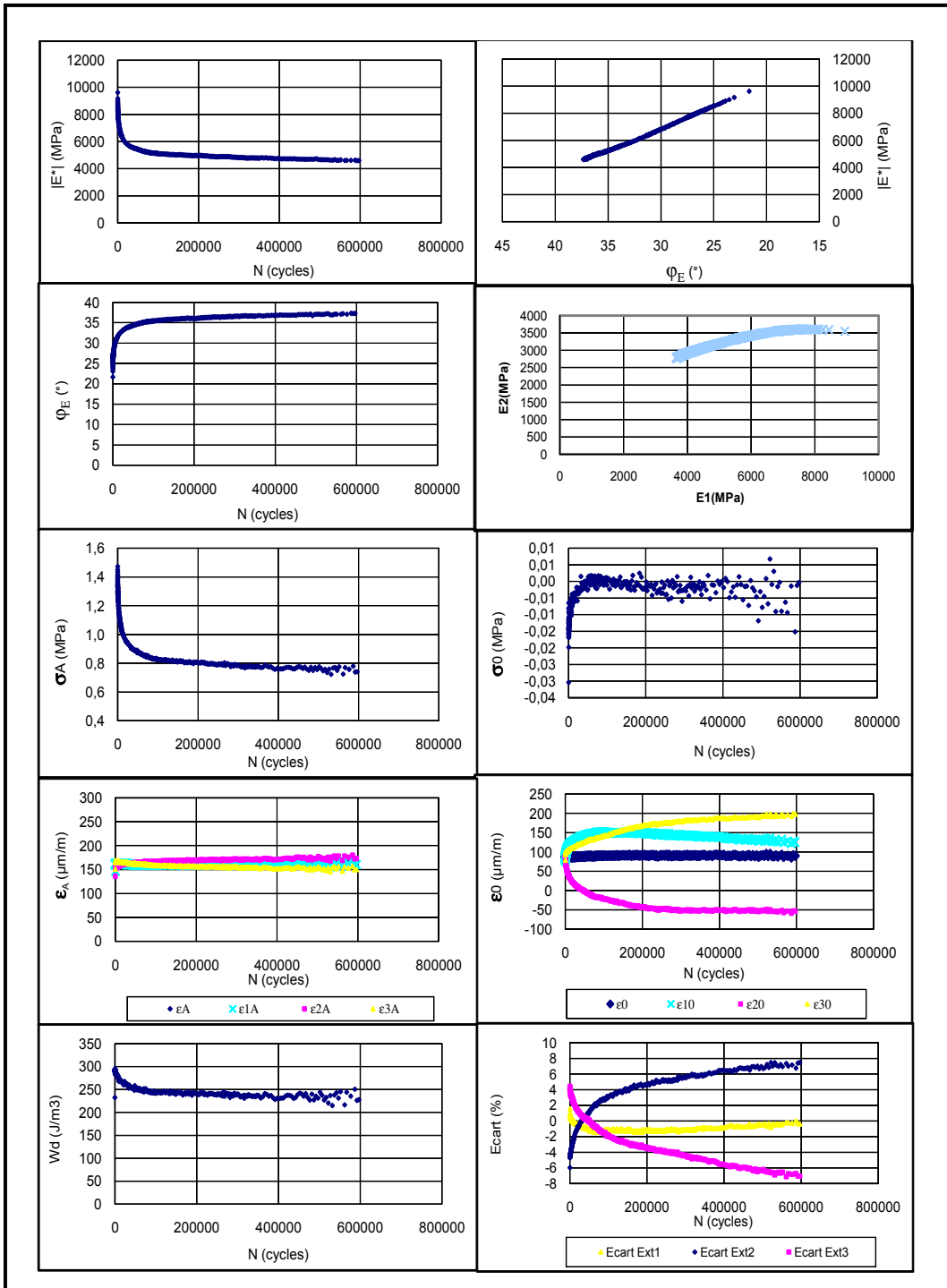
Presse de sollicitation:

Presse de sollicitation:	MTS	DONNÉES RÉELLES			
Date / heure:	19/04/2011 - 17h17			Fréquence (Hz):	10,97
Opérateur:	FB/SL			T° essai (°C) :	161,91
DONNÉES CIBLES		Observations:			
Type d'enrobé:	GB20 (PG 64-28)				
Éprouvette N°:	P2-A2				
Diamètre (mm):	78,57				
Hauteur (mm):	121,91				
Vi(%):	2,43				
Fréquence (Hz):	10				
T° cible (°C):	10				
ε cible (µdef):	160				

RESULTATS FATIGUE

IE ₀₁ (MPa):	9614	Nf 50% (cycles)	306417
IE ₀₂ l (MPa):	4807	Nf II/III (cycles)	526659





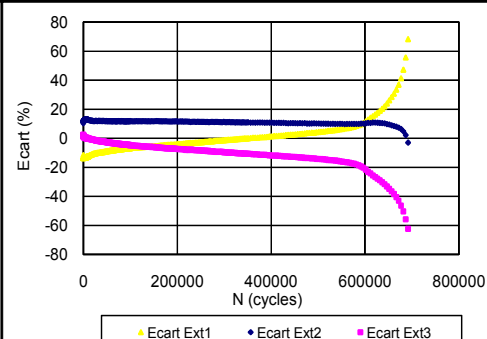
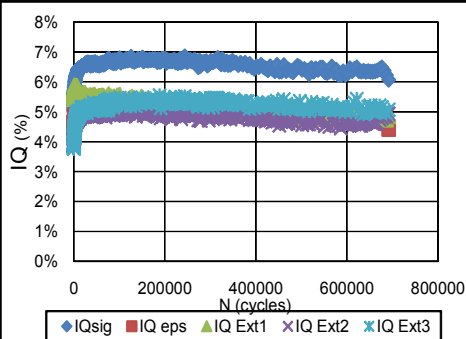
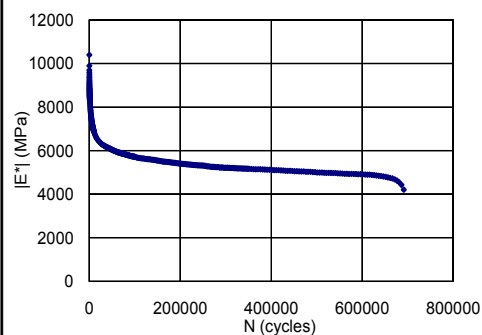
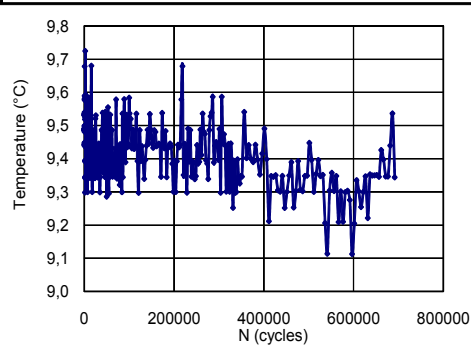
INFORMATION GENERALE ESSAI DE FATIGUE

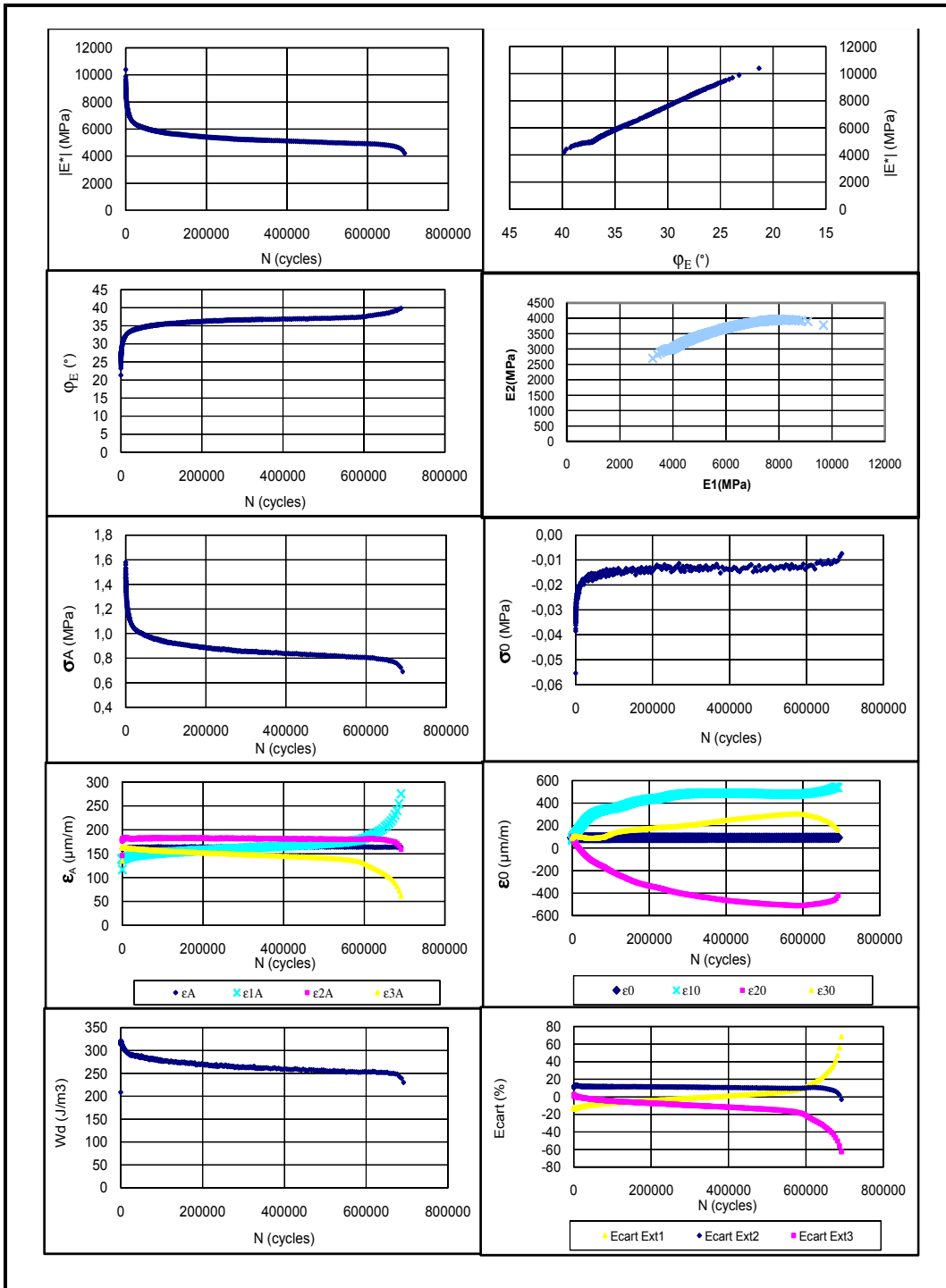
Presse de sollicitation:

Presse de sollicitation:	Presse MTS	DONNÉES RÉELLES	
Date / heure:	18/12/2010 - 10h36	Fréquence (Hz):	
Opérateur:	RT	T° essai (°C):	9,43
DONNÉES CIBLES		ε réel (µdef):	162,59
Type d'enrobé:	GB20(PG64-28)	Observations:	
Éprouvette N°:	P2A4		
Diamètre (mm):	78,57		
Hauteur (mm):	124,26		
Vi(%):	2,3		
Fréquence (Hz):	10		
T° cible (°C):	10		
ε cible (µdef):	160		

RESULTATS FATIGUE

IE_o! (MPa)	10381	N _{f 50%} (cycles)	323667
IE_{o/2}! (MPa)	5190	N _{f II/III} (cycles)	661470





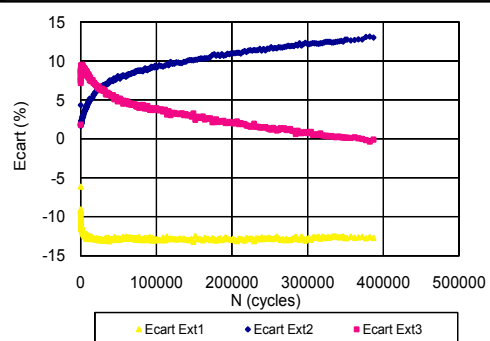
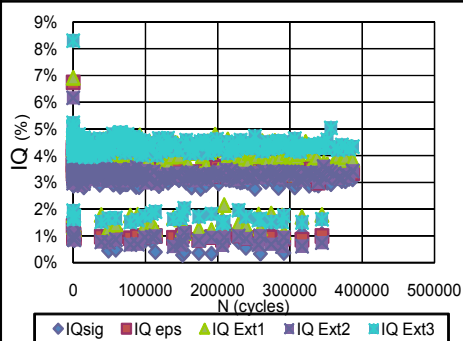
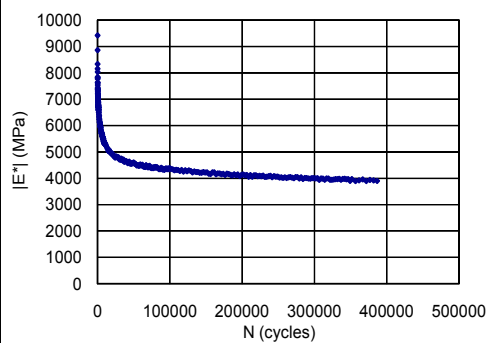
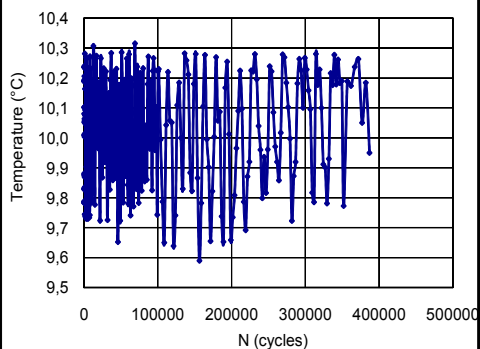
INFORMATION GENERALE ESSAI DE FATIGUE

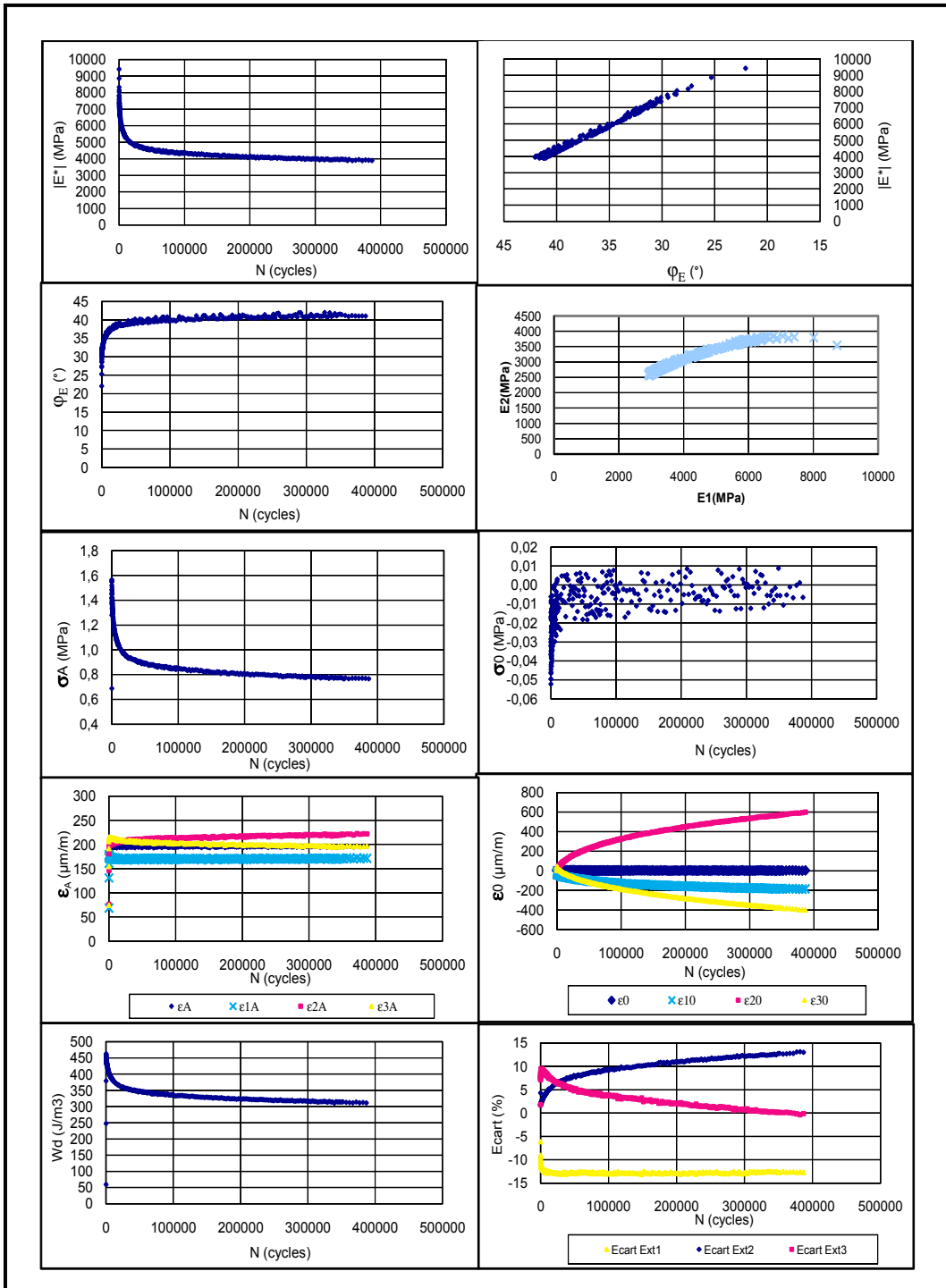
Presse de sollicitation:

Presse de sollicitation: Presse Bionix Date / heure: 27/11/2010 - 14h22 Opérateur: FO	DONNÉES RÉELLES T° essai (°C) : 10,03 ε réel (µdef) : 194,88 Observations:
DONNÉES CIBLES Type d'enrobé: GB20 (PG64-58) Éprouvette N°: P1-C3 Diamètre (mm): 78,573 Hauteur (mm): 121,077 Vt(%): 1,49 Fréquence (Hz): 10 T° cible (°C): 10 ε cible (µdef): 200	

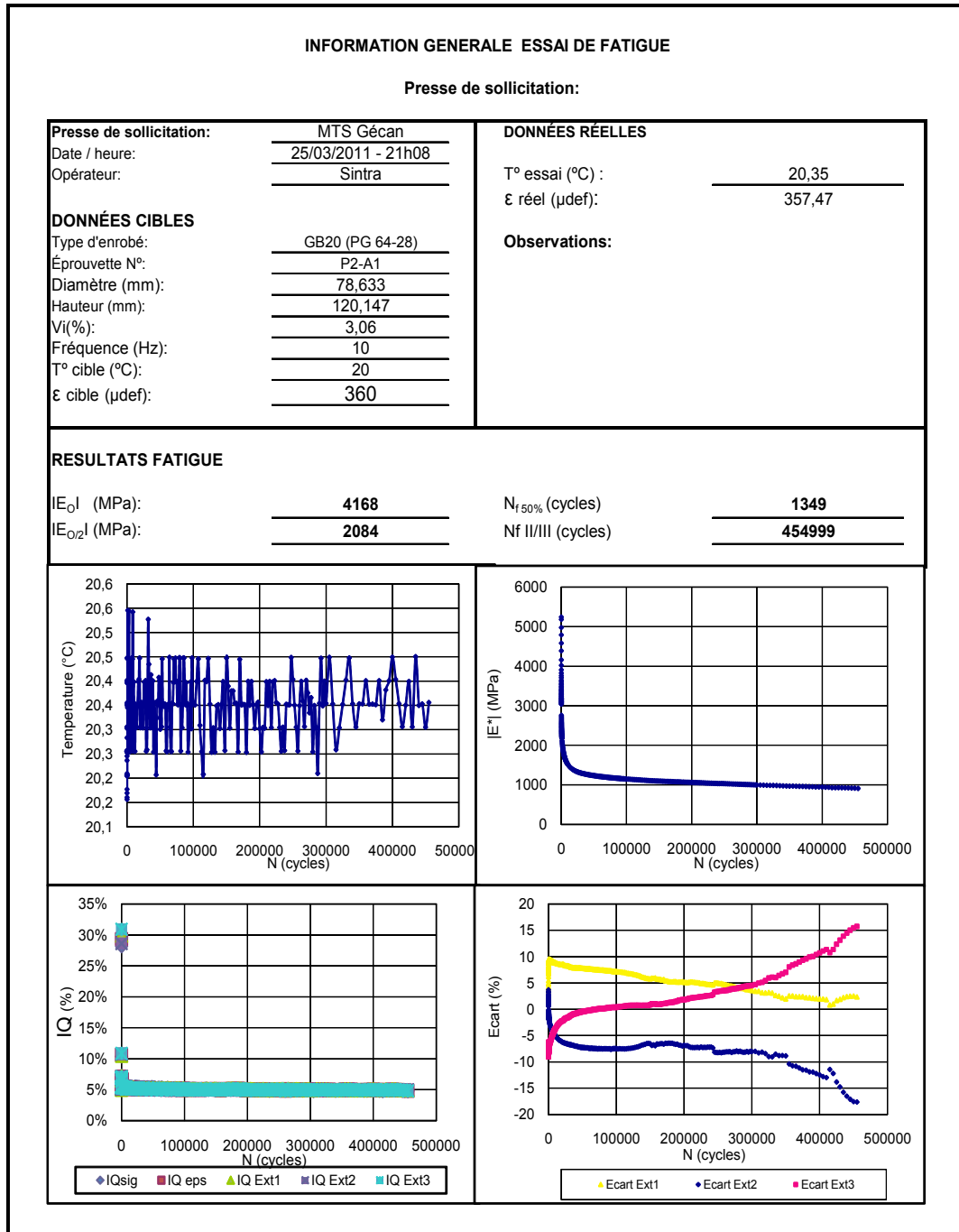
RESULTATS FATIGUE

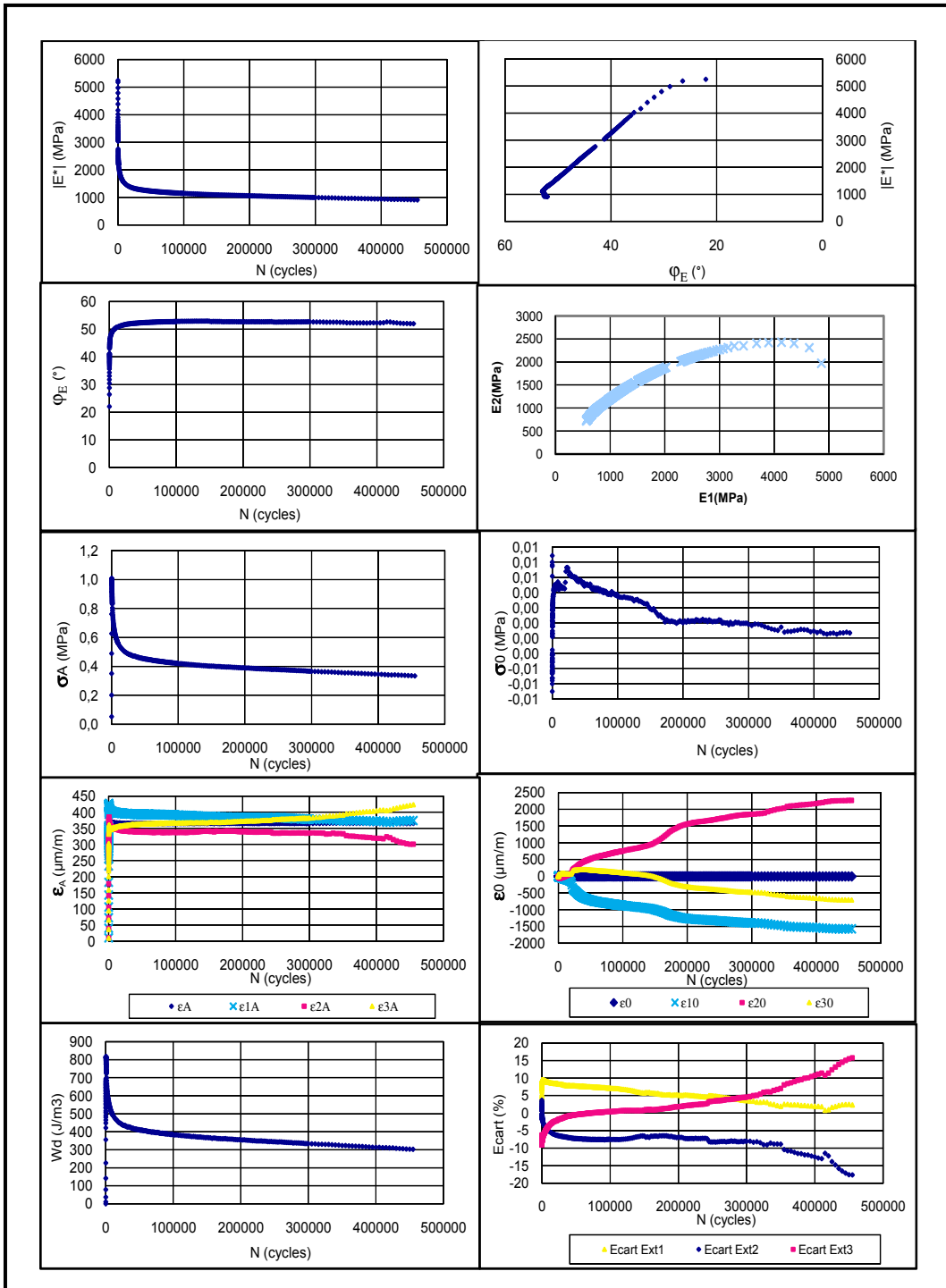
IE₀₁ (MPa): 9514	N_{f50%} (cycles): 28801
IE₀₂ (MPa): 4757	N_f II/III (cycles): 386835





GB20 PG 64-28 (20°C, 10 Hz)





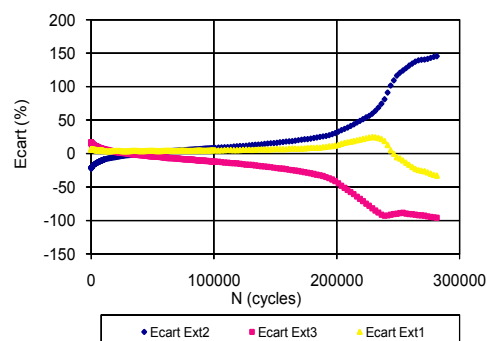
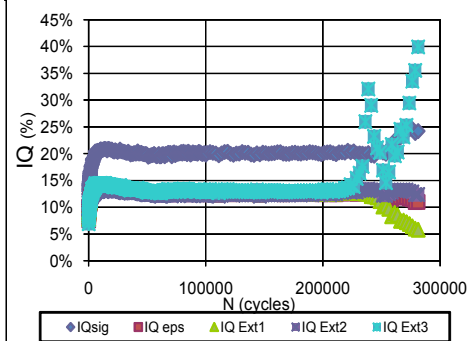
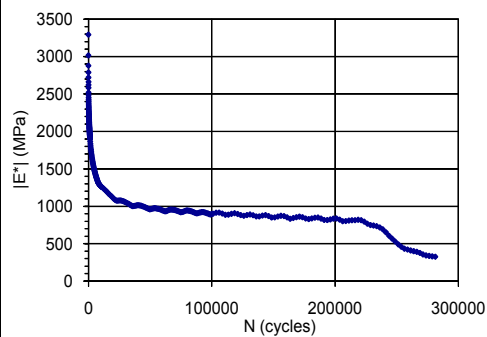
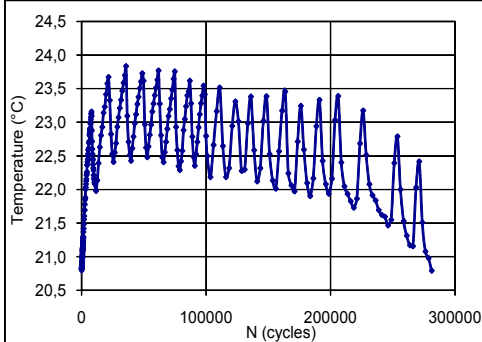
INFORMATION GENERALE ESSAI DE FATIGUE

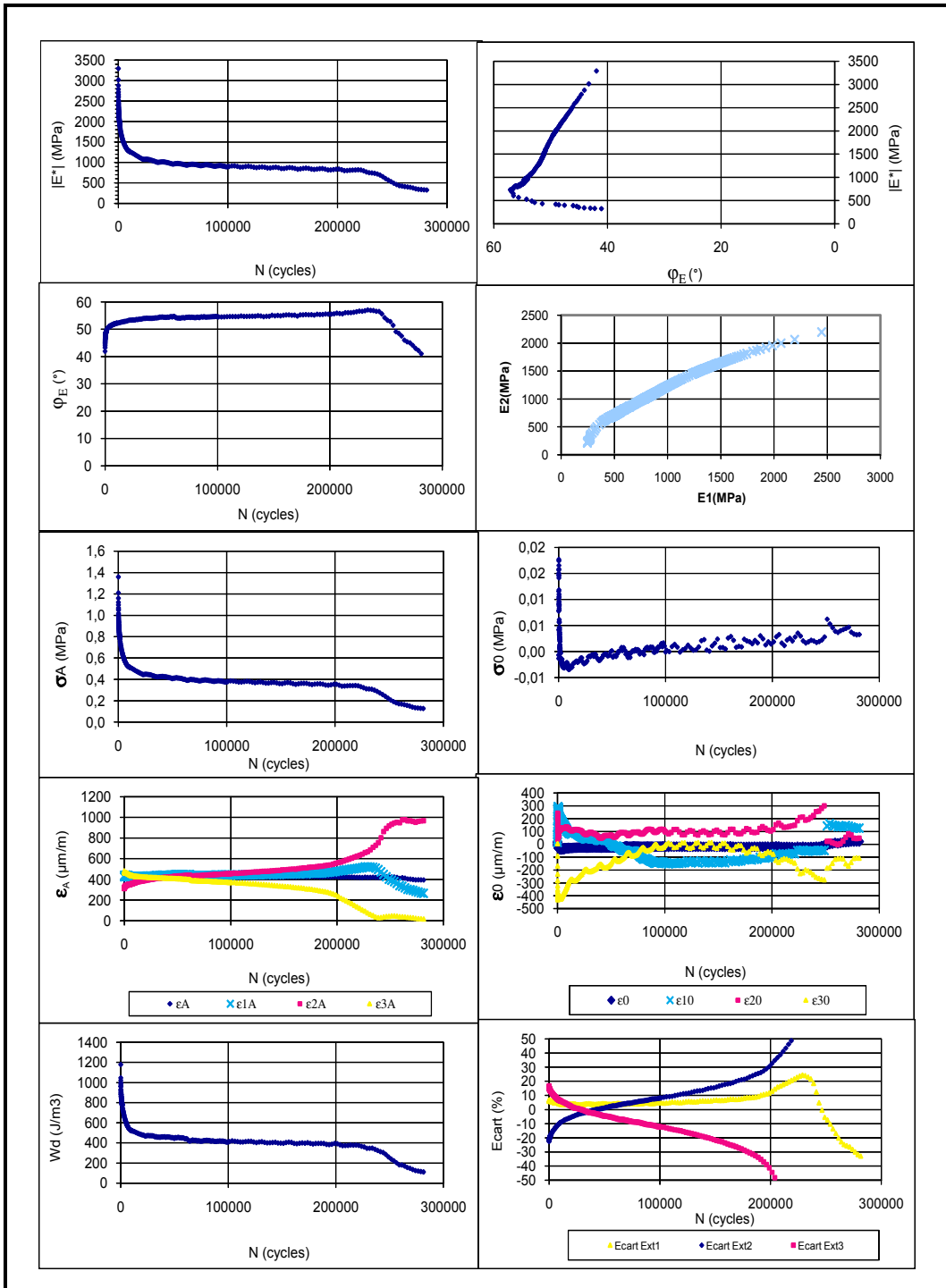
Presse de sollicitation:

Presse de sollicitation: MTS Date / heure: 12/05/2011 - 16h30 Opérateur: RT	DONNÉES RÉELLES T° essai (°C): 22,24 ε réel (µdef): 414,86 Observations:
DONNÉES CIBLES Type d'enrobé: GB20 (PG 64-28) Éprouvette N°: P2-C2 Diamètre (mm): 78,523 Hauteur (mm): 118,277 Vi(%): 1,48 Fréquence (Hz): 10 T° cible (°C): 20 ε cible (µdef): 400	

RESULTATS FATIGUE

IE₀ (MPa) 3403	Nf 50% 2422
IE_{0,2} (MPa) 1702	Nf II/III 161138





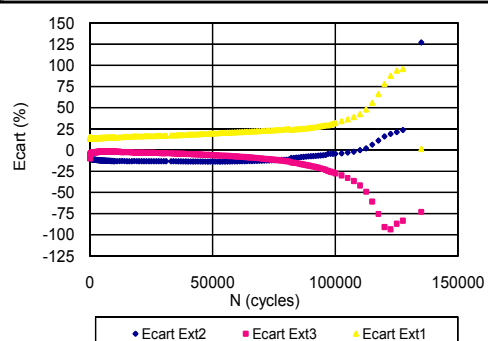
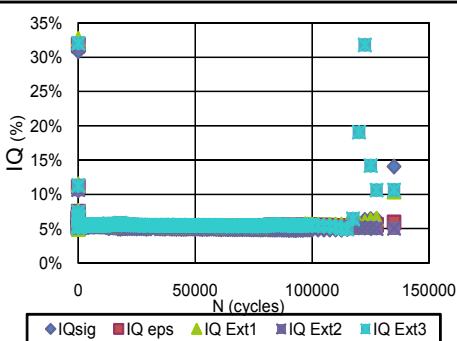
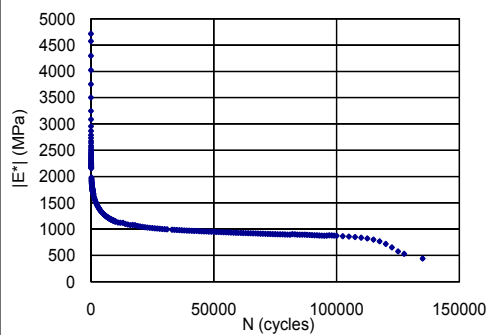
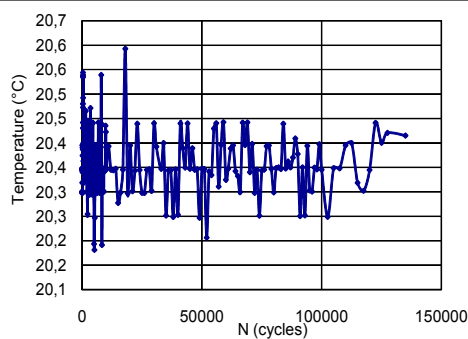
INFORMATION GENERALE ESSAI DE FATIGUE

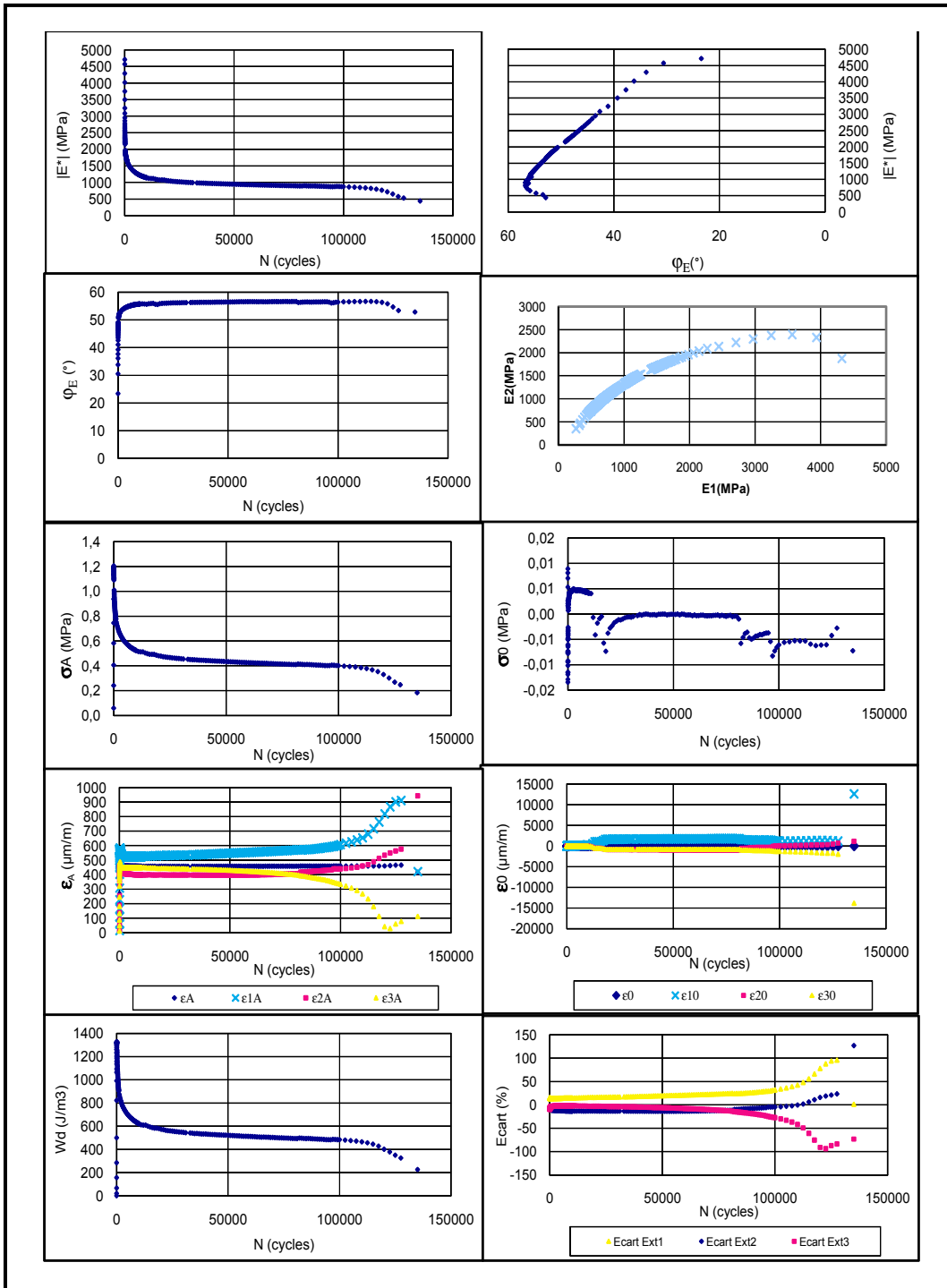
Presse de sollicitation:

Presse de sollicitation:	MTS Gécan	DONNÉES RÉELLES	
Date / heure:	15/04/2011 20:09:41	T° essai (°C) :	20,36
Opérateur:	Sintra	ε réel (µdef):	457,58
DONNÉES CIBLES		Observations:	
Type d'enrobé:	GB20 (PG 64-28)		
Eprouvette N°:	P1-D3		
Diamètre (mm):	78,49		
Hauteur (mm):	125,557		
Vi(%):	2,51		
Fréquence (Hz):	10		
T° cible (°C):	20		
ε cible (µdef):	450		

RESULTATS FATIGUE

IE ₀ I (MPa):	4467	Nf 50% (cycles)	95
IE _{0,2} I (MPa):	2234	Nf II/III (cycles)	117499





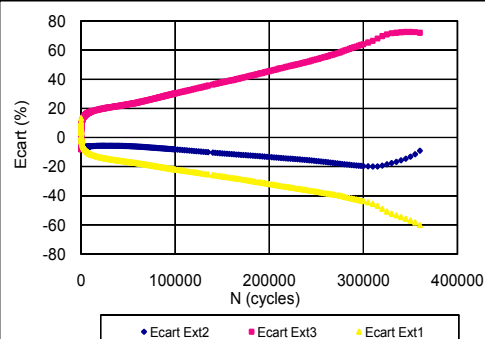
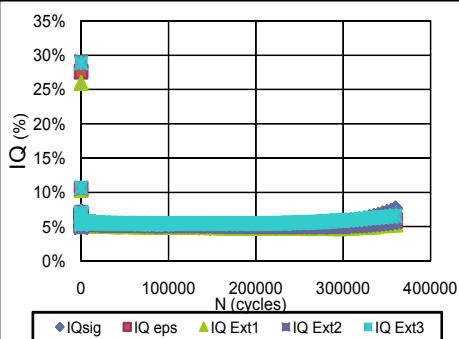
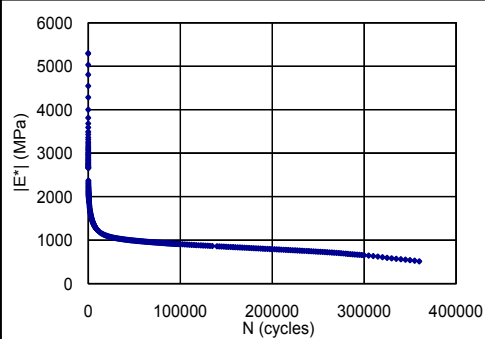
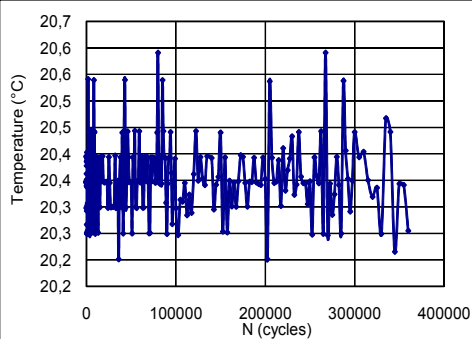
INFORMATION GENERALE ESSAI DE FATIGUE

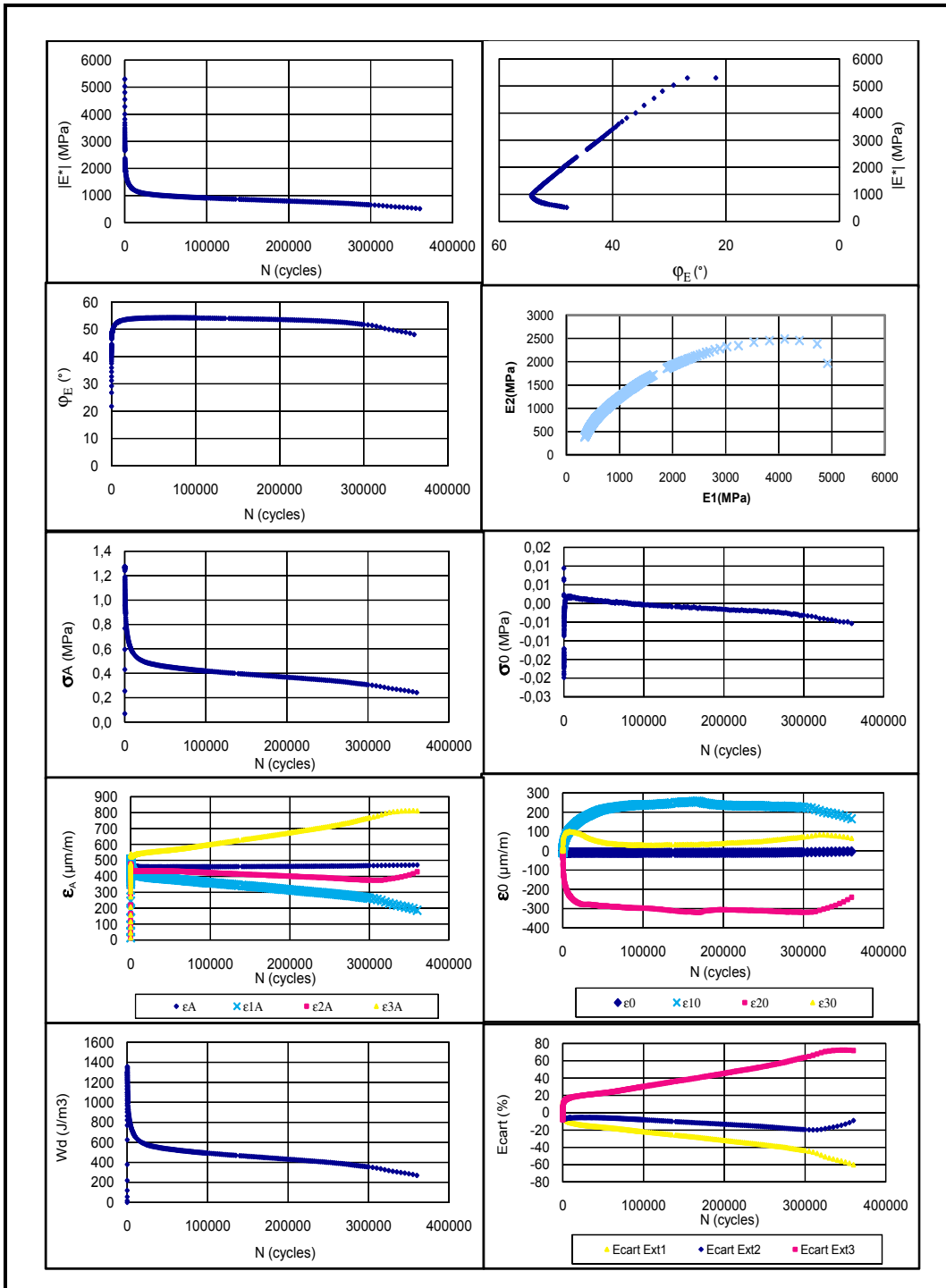
Presse de sollicitation:

Presse de sollicitation:	MTS Gécan	DONNÉES RÉELLES	
Date / heure:	21/04/2011 - 20h46	Fréquence (Hz):	
Opérateur:	Sintra	T° essai (°C):	20,35
DONNÉES CIBLES		ε réel (µdef):	457,84
Type d'enrobé:	GB20 (PG 64-28)	Observations:	
Eprouvette N°:	P2-A3		
Diamètre (mm):	78,57		
Hauteur (mm):	125,3		
Vi(%):	2,11		
Fréquence (Hz):	10		
T° cible (°C):	20		
ε cible (µdef):	450		

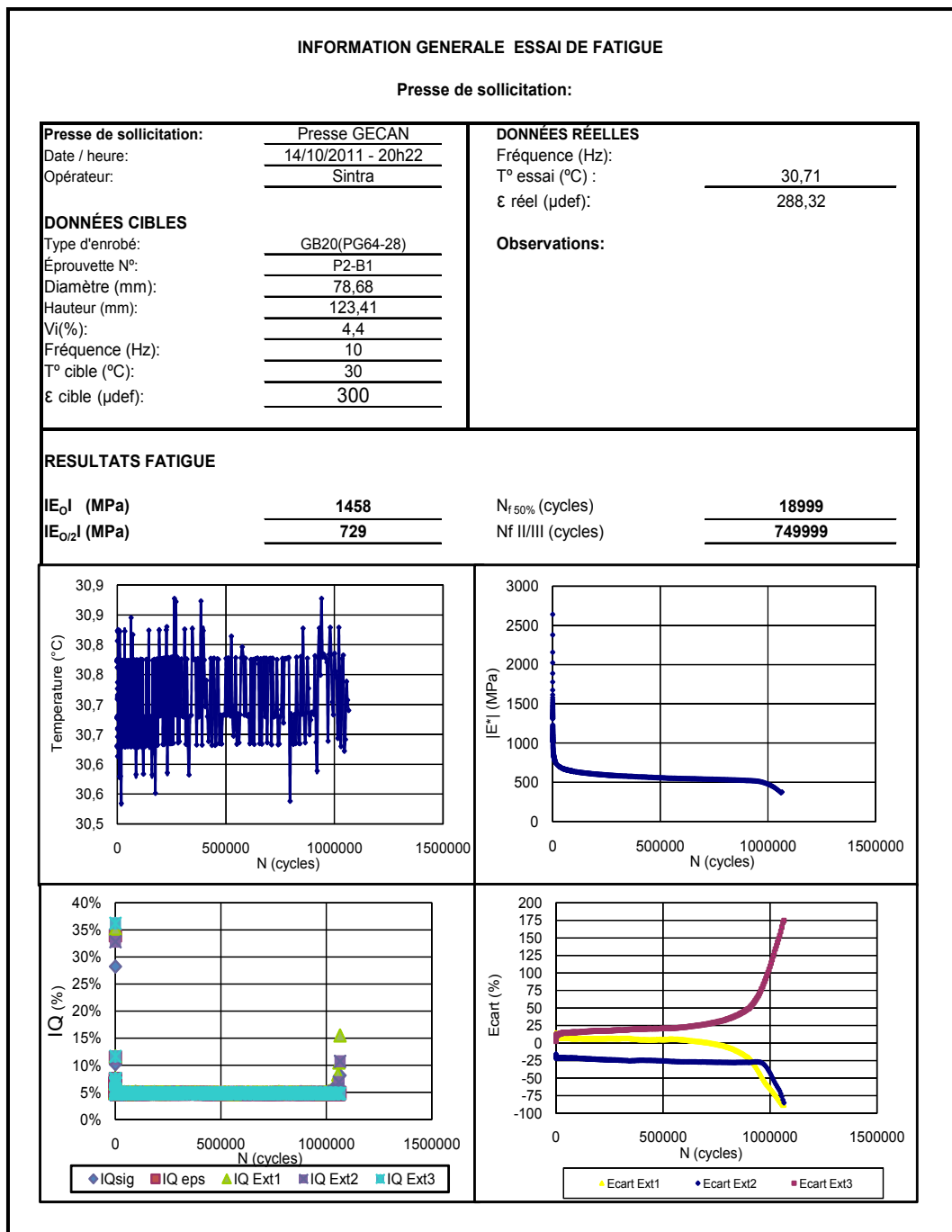
RESULTATS FATIGUE

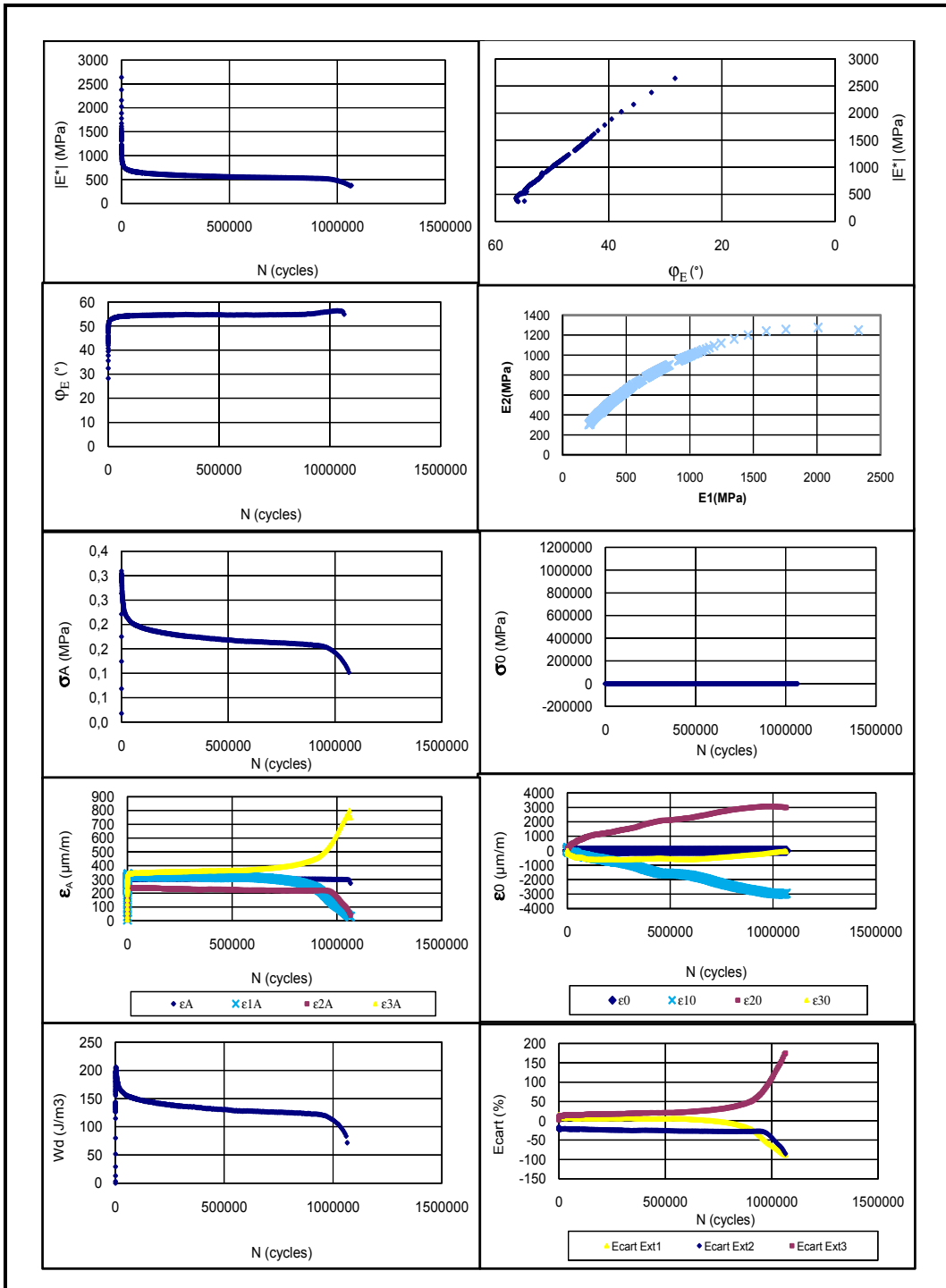
IE ₀₁ (MPa):	4608	N _{f50%} (cycles)	239
IE ₀₂ (MPa):	2304	Nf II/III (cycles)	66999





GB20 PG 64-28 (30°C, 10 Hz)





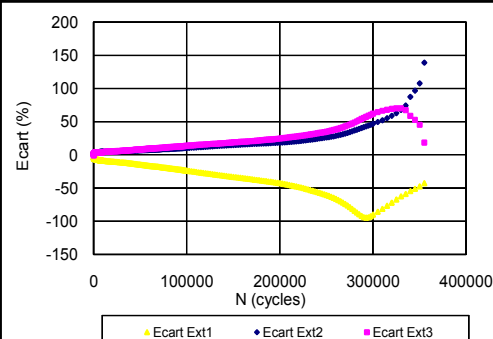
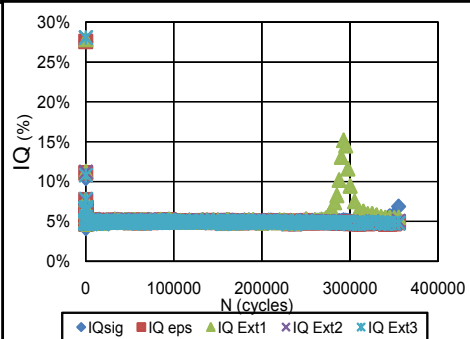
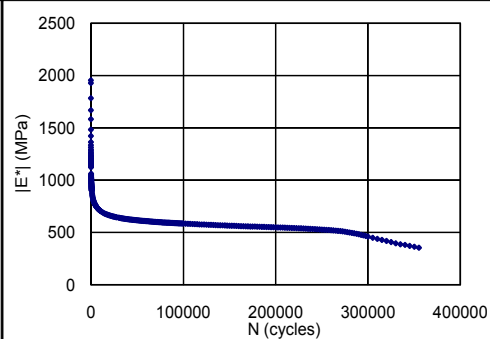
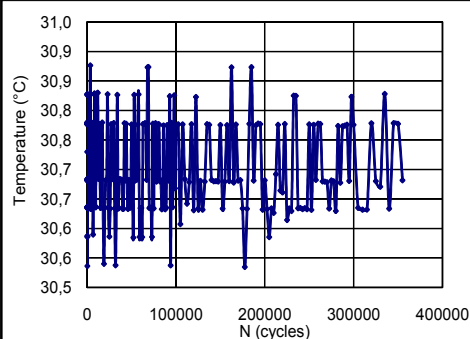
INFORMATION GENERALE ESSAI DE FATIGUE

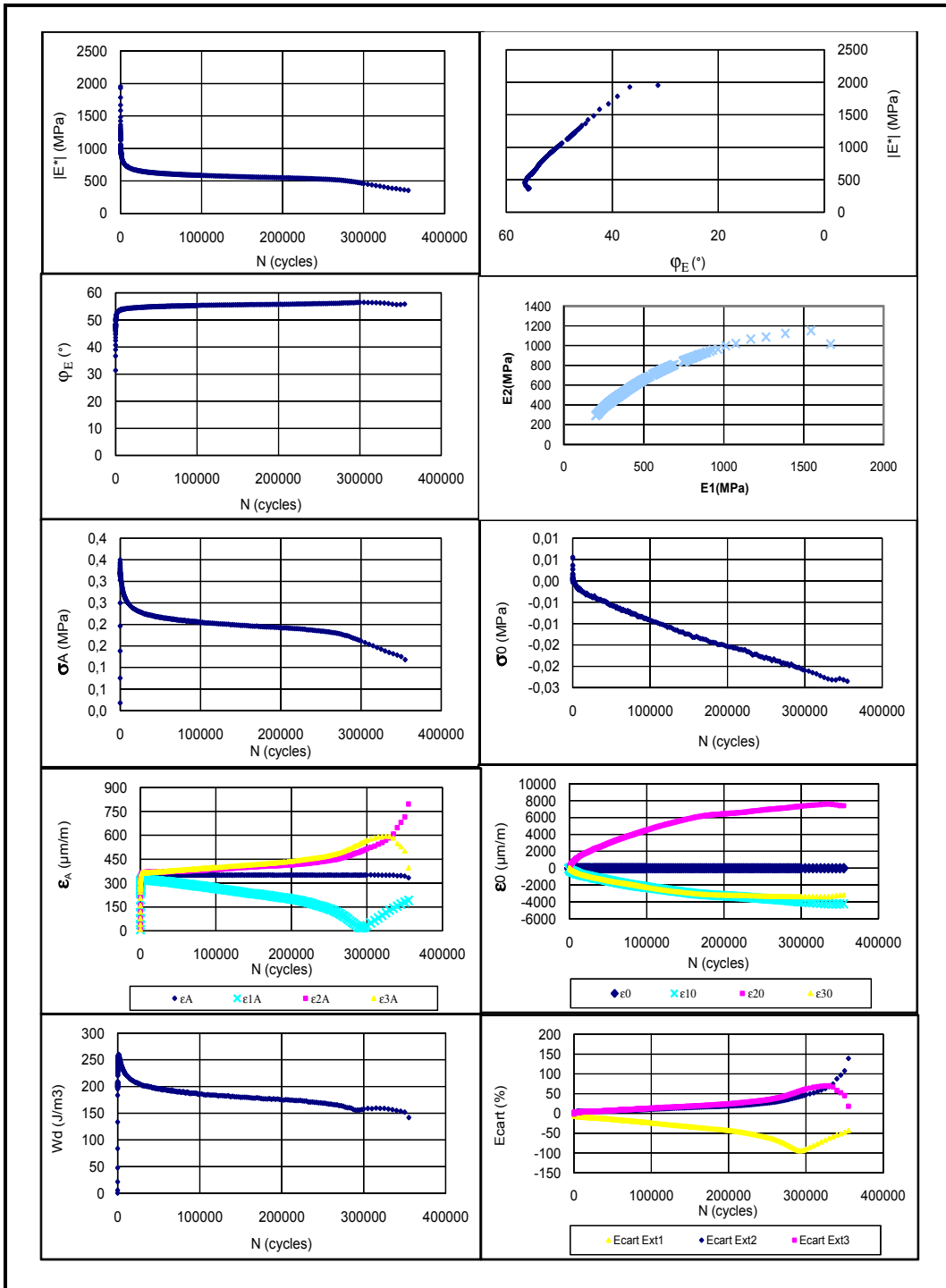
Presse de sollicitation:

Presse de sollicitation:	Presse GECAN	DONNÉES RÉELLES	
Date / heure:	20/09/2011 - 11h56	Fréquence (Hz):	
Opérateur:	Sintra	T° essai (°C) :	30,71
DONNÉES CIBLES		ε réel (µdef):	333,75
Type d'enrobé:	GB20(PG64-28)	Observations:	
Éprouvette N°:	P2-C1		
Diamètre (mm):	78,69		
Hauteur (mm):	119,26		
Vi(%):	1,68		
Fréquence (Hz):	10		
T° cible (°C):	30		
ε cible (µdef):	350		

RESULTATS FATIGUE

IE₀I (MPa)	1258	N_{f50%} (cycles)	38999
IE_{0/2}I (MPa)	629	N_f II/III (cycles)	104999





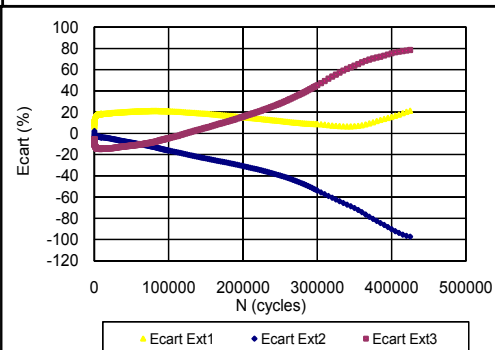
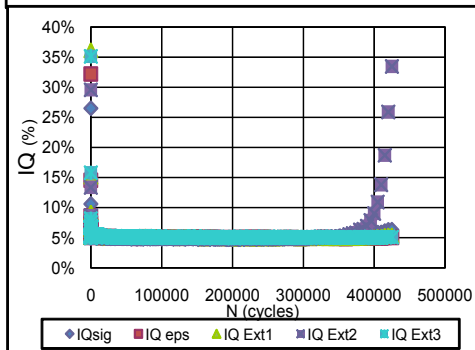
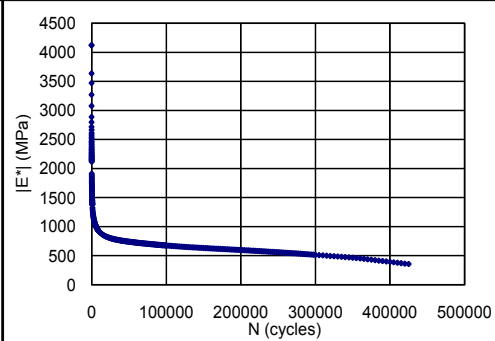
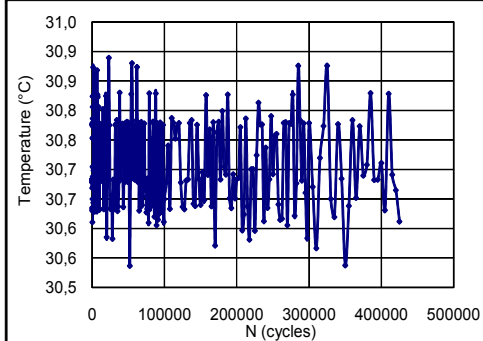
INFORMATION GENERALE ESSAI DE FATIGUE

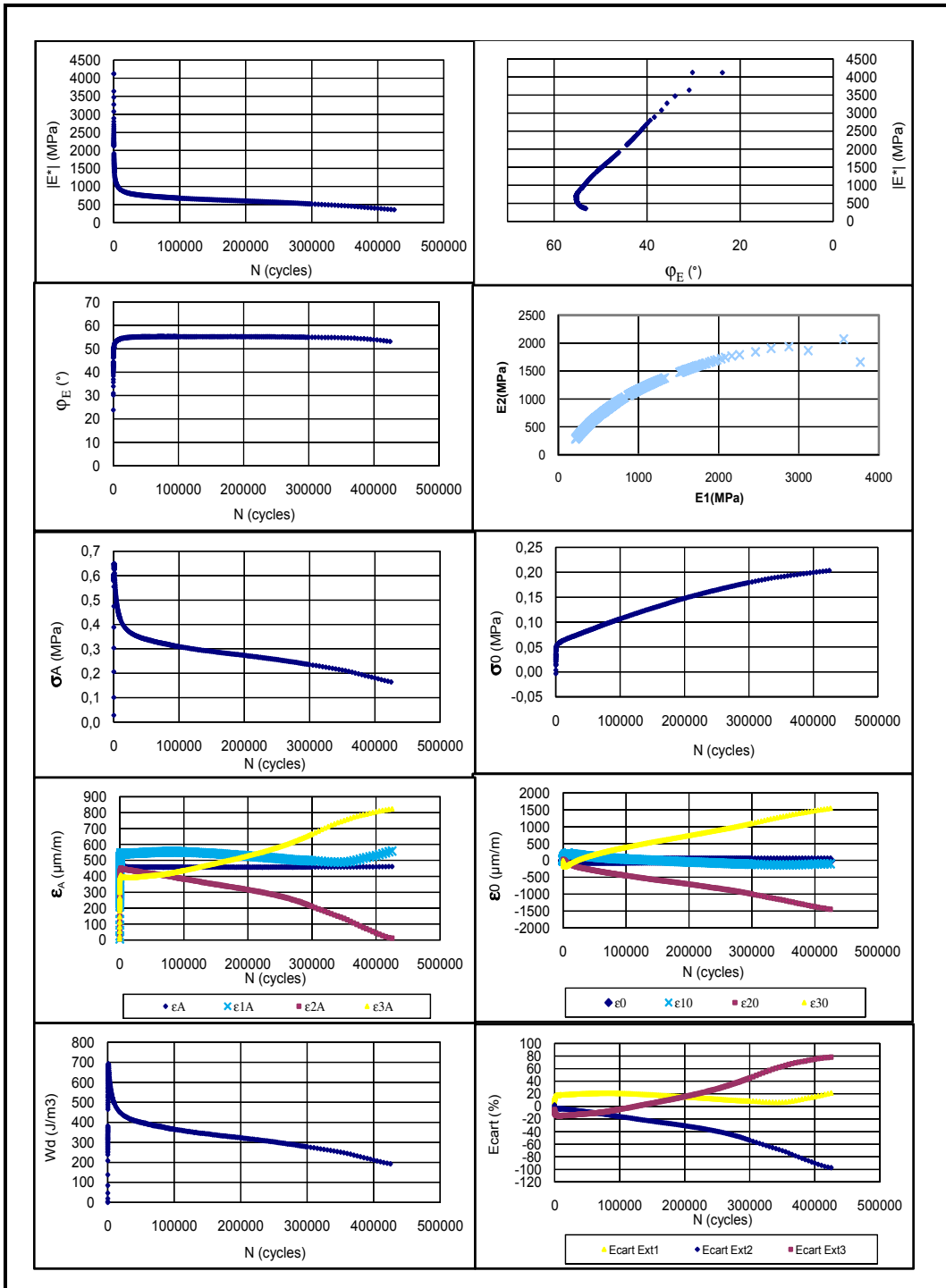
Presse de sollicitation:

Presse de sollicitation: Presse GECAN Date / heure: 15/07/2011 - 20h24 Opérateur: Sintra	DONNÉES RÉELLES Fréquence (Hz): _____ T° essai (°C): 30,71 ε réel (μdef): 424,51
DONNÉES CIBLES Type d'enrobé: GB20(PG64-28) Éprouvette N°: P2-C4 Diamètre (mm): 78,42 Hauteur (mm): 124,81 V1(%): 1,7 Fréquence (Hz): 10 T° cible (°C): 30 ε cible (μdef): 450	Observations:

RESULTATS FATIGUE

IE₀I (MPa)	2486	N_{f50%} (cycles)	1694
IE_{0/2}I (MPa)	1243	Nf II/III (cycles)	157499





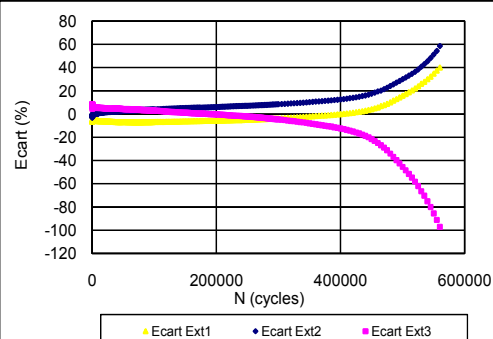
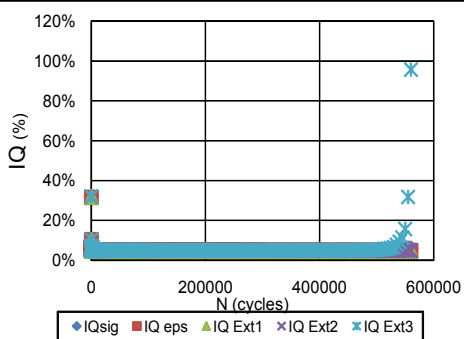
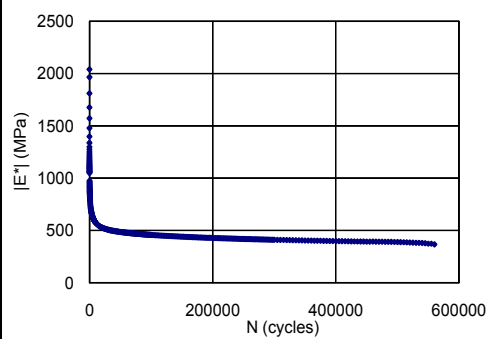
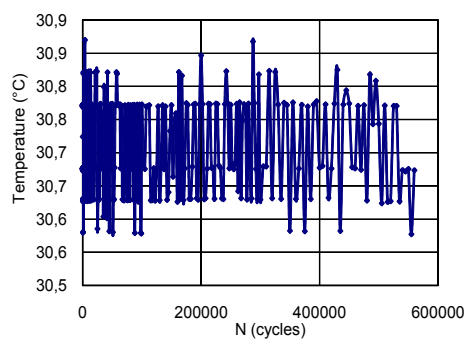
INFORMATION GENERALE ESSAI DE FATIGUE

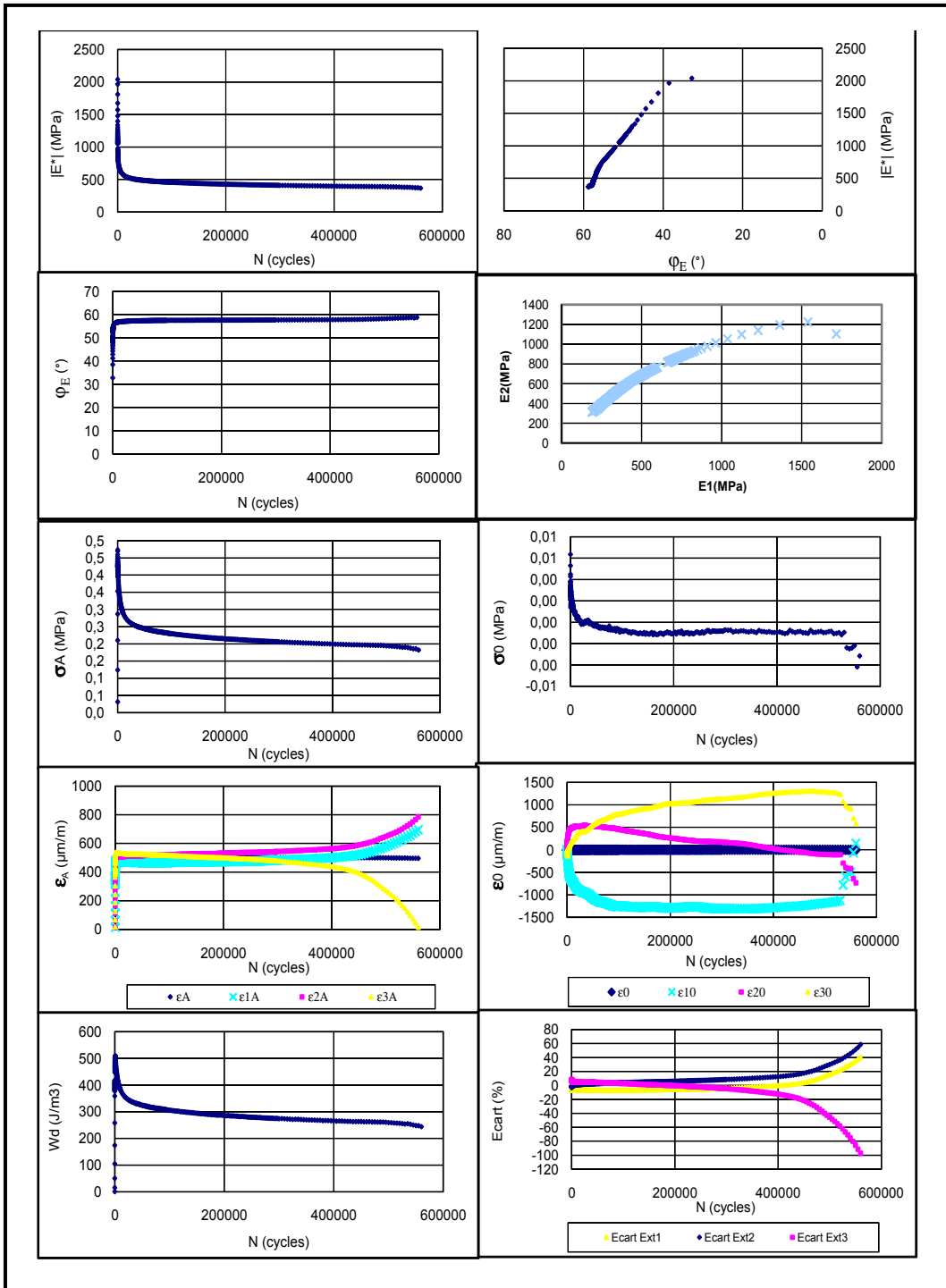
Presse de sollicitation:

Presse de sollicitation: Date / heure: 11/07/2011 - 19h35 Opérateur: Sintra	DONNÉES RÉELLES Fréquence (Hz): T° essai (°C): 30,71 ε réel (µdef): 482,09
DONNÉES CIBLES Type d'enrobé: GB20(PG64-28) Éprouvette N°: P2-C3 Diamètre (mm): 78,473 Hauteur (mm): 118,09 Vi(%): 1,89 Fréquence (Hz): 10 T° cible (°C): 30 ε cible (µdef): 500	Observations:

RESULTATS FATIGUE

IE₀ (MPa)	1645	N_{f50%} (cycles)	689
IE_{0/2} (MPa)	823	N_f II/III (cycles)	459999





ANNEXE IV

Prédiction de la durée de vie en fatigue

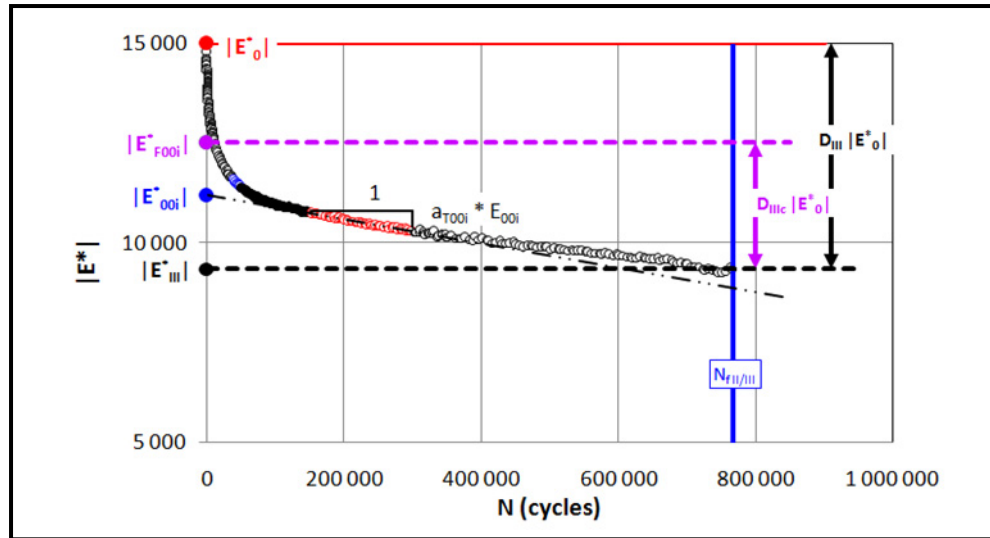


Figure A IV-1 Prédiction de la durée de vie en fatigue selon l'approche DGCB

On a :

$$D_{III} = \frac{|E^*_0| - |E^*_{III}|}{|E^*_0|}$$

Selon la figure (A.IV-1), on utilisant la règle du trois :

On a :

$$1 = a_{Ti} |E^*_{00i}|$$

Et :

$$N_{fII/III} = |E^*_{00i}| - |E^*_{III}|$$

Donc :

$$N_{fII/III} = \frac{|E^*_{00i}| - |E^*_{III}|}{a_{Ti} \cdot |E^*_{00i}|}$$

Sachant que :

$$|E^*_0| - |E^*_{F00i}| = C_i (|E^*_0| - |E^*_{00i}|)$$

Et :

$$D_{IIIc} = D_{III} \cdot \frac{C_i(|E_0^*| - |E_{00i}^*|)}{|E_0^*|}$$

On a donc :

$$D_{IIIc} = \frac{|E_{F00i}^*| - |E_{III}^*|}{|E_0^*|}$$

Et :

$$|E_{III}^*| = |E_{F00i}^*| - D_{IIIc} |E_0^*|$$

En remplaçant on trouve finalement :

$$N_{fII/III}^{DGCB} = \frac{|E_{00i}^*| - |E_{F00i}^*| + D_{IIIc} |E_0^*|}{a_{Ti} \cdot |E_{00i}^*|}$$

BIBLIOGRAPHIE

- Alimani, M. 1988. « Contribution à l'étude de l'endommagement par fatigue des enrobés bitumineux ». Rapport de recherche n° 151, Lyon, L'institut national des sciences appliquées, Laboratoire des ponts et chaussées, 130p.
- Ashayer Soltani, Mohammed Ali. 1998. « Comportement en fatigue des enrobés bitumineux ». Thèse de doctorat en génie civil, Lyon, L'institut national des sciences appliquées, 293 p.
- Baaj, Hassan. 2002. « Comportement des matériaux granulaires traités aux liants hydrocarbonés » Thèse de doctorat en génie civil, Lyon, L'institut national des sciences appliquées, 248 p.
- Bodin, Didier, Armelle Chabot, Chantal De la roche, Jean Michel Piau et Gilles Pijaudier-Cabot. 2001. « Essais de fatigue sur enrobés bitumineux et perspectives de modélisation par la mécanique de l'endommagement » congrès français de mécanique, Nancy.3-7 septembre 2001. 6 p.
- Bodin, Didier, Armelle Chabot, Chantal De la roche et Gilles Pijaudier-Cabot. 2003. « Une nouvelle loi pour l'endommagement par fatigue des enrobés bitumineux » congrès français de mécanique, Nice, 1-5 septembre 2003. 6 p.
- Bodin, Didier. 2002. « Modèles d'endommagement cyclique, application a la fatigue des enrobés bitumineux ». Thèse de doctorat en mécanique, thermique et génie civil, Nantes, L'école centrale de Nantes, 189 p.
- Bonnot, J. 1973. « La détermination des propriétés des matériaux en vue du dimensionnement des chaussée ». Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, n°63, p73-82.
- Bonnot, J. 1984. « Essais mécaniques pratiques de formulation et de contrôle des enrobés bitumineux rapport général ». Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, n°132, p 79-90.

- De la roche, Chantal .1996. « Module de rigidité et comportement en fatigue des enrobés bitumineux » Thèse de doctorat en matériaux, sols et structures, Paris, École Centrale Paris, 188 p.
- De la roche, Chantal, Jean Charrier, Paul Marsac et Jean-Marc Mollard. 2001. « Évaluation de l'endommagement par fatigue des enrobés bitumineux, apports de la thermographie infrarouge ». Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, vol. 232, Réf. 4367, p. 19-28.
- Di Benedetto, Hervé. 1990. « Nouvelle approche du comportement des enrobés bitumineux : résultats expérimentaux et formulation rhéologique ». RILEM, Mechanical tests for bituminous mixes, Budapest, p 387-401.
- Di Benedetto, Hervé et Xili Yan. 1994. « Comportement mécanique des enrobés bitumineux et modélisation de la contrainte maximale ». Materials and Structures, vol. 27, p. 539-547.
- Di Benedetto, Hervé, Mohammed Ali Ashayer Soltani et P Chaverot. 1996. « Fatigue damage for bituminous mixtures: a pertinent approach ». Baltimore, The Association of Asphalt Paving Technologists, 15 p.
- Di Benedetto, Hervé. 1998. « Modélisation : écart entre état des connaissances et applications ». Suisse. Journée LAVOC, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 28 p.
- Di Benedetto, Hervé, Hassan Baaj et Mondher Neifar. 2001. « Étude du comportement à la fatigue des mélanges bitumineux : mise au point d'un dispositif expérimental et campagne d'essais ». Lyon. École nationale des travaux publics de l'état, Janvier 2001, 21 p.
- Di Benedetto Hervé, Chantal De La Roche, Hassan Baaj, A Pronk, R Lundstrom, 2004, «Fatigue of bituminous Mixtures : Approches and Rilem group contribution », Materials and Structures Journal, 36 p.
- Di Benedetto, Hervé et Jean François Corté. 2005. *Matériaux bitumineux routiers 2, Constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges*, Éditions Lavoisier, Hermès Science, 288 p.

- Di Benedetto, Hervé, Quang Tuan Nguyen et Cédric Sauzéat, 2011. « Nonlinearity, Heating-Fatigue and Thixotropy during cyclic loading of Asphalt Mixtures », Road Materials and Pavements Design. Vol. 12, N°1, 33 p.
- Doan, T.H. 1977. « Les études de fatigue des enrobés bitumineux au LCPC ». Paris. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, n° spécial V, p 215-228.
- Domec, Vincent. 2002. « Endommagement par fatigue des enrobés bitumineux en condition de trafic simulé et de température ». Thèse de doctorat en mécanique, Bordeaux, L'université bordeaux I, 277 p.
- Domec, Vincent, Denys Breysse, Chantal De la Roche et Sylvie Yotte. 2004. « Caractérisation de la durée de vie en fatigue des enrobés bitumineux en condition de trafic simulé et de température ». XXII^{ème} rencontres universitaires de génie civil. Bordeaux. 9 p.
- Doubbaneh, Elias. 1995. « Comportement mécanique des enrobés bitumineux des petites aux grandes déformations ». Thèse de Doctorat en génie civil. Institut National des Sciences Appliquées, Lyon. 217 p.
- Doucet, Félix. 1999. « Caractérisation de la rigidité et de la résistance à la fatigue des enrobés ». Mémoire de maîtrise en génie civil. Université de Sherbrooke, Département de génie civil, Sherbrooke. 359 p.
- Doucet, Félix et Bruno Auger. 2007. « Essai de tension-compression cyclique pour la détermination du comportement mécanique des enrobés ». Montréal. 42^e congrès annuel de l'AQTR Association québécoise du transport et des routes, 2 au 4 avril 2007. 18 p.
- Doucet, Félix et Bruno Auger. 2010. « Détermination du module complexe des enrobés au ministère des transports du Québec ». Montréal. Service des matériaux d'infrastructures. Direction du laboratoire des chaussées. Ministère des transports du Québec. 152 p.
- Laveissière, Delphine. 2002. « Modélisation de la remontée de fissures en fatigue dans les structures routières par endommagement et macro-fissures, de l'expérimentation à l'outil de dimensionnement pour l'estimation de la durée de vie ». Thèse de doctorat en génie civil, Égletons, L'université de Limoges, 320 p.

- Lefeuve, Yann. 2001. « Contribution a l'étude de comportement en fatigue des enrobés bitumineux, étude de l'allongement des éprouvettes comme manifestation de l'endommagement diffus, expérimentation-modélisation ». Thèse de doctorat en structures et matériaux, Paris, École nationale des ponts et chaussées, 196 p.
- Lelièvre, André. 1994. *Les enrobés bitumineux*. Éditions Le Griffon d'argile. Sainte-Foy, Québec. 410 p.
- Maillard, Samuel. 2005. « Fissuration et autoréparation des liants bitumineux ». Thèse de doctorat en mécanique, thermique et génie civil, Nantes, L'école centrale de Nantes, 210 p.
- Meunier, Mathieu. 2012. « Élaboration d'un outil de prédiction du comportement de la chaussée à l'orniérage ». Thèse de doctorat en génie de la construction, Montréal, L'école de technologie supérieure.
- MTQ. 2005. « Enrobés : formulation selon la méthode LC ». Ministère du transport du Québec, 111 p.
- MTQ. 2011. « Recueil des méthodes d'essai LC ». Ministère du transport du Québec.
- Neifar, Mondher. 1997. « Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux : expérimentation et modélisation ». Thèse de doctorat en génie civil, Lyon, Institut national des sciences appliquées, 152 p.
- Nguyen, Dang Truc. 2006. « Prédiction des déformations permanentes des couches de surface des chaussées bitumineuses ». Thèse de doctorat en structures et matériaux, Paris, École nationale des ponts et chaussées, 193 p.
- Nguyen, Mai Lan. 2010. « Étude de la fissuration et de la fatigue des enrobés bitumineux ». Thèse de doctorat en génie civil, Lyon, L'institut national des sciences appliquées, 310 p.
- Noël, Frédérique. 2011. « Communication personnelle ».

- Olard, François. 2002. « Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux a basses températures, relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé ». Thèse de doctorat en génie civil, Lyon, L'institut national des sciences appliquées, 221 p.
- Perraton, Daniel, Hassan Baaj, Hervé Di Benedetto et Michel Paradis. 2003. « Évaluation de la résistance à la fatigue des enrobés bitumineux fondée sur l'évolution de l'endommagement du matériau en cours d'essai : aspects fondamentaux et application à l'enrobé à matrice de pierre ». *Canadien Journal. Civil. Engineering*, vol.30, p. 902-913.
- Perraton, Daniel et Alan Carter. 2010. *MGC 922 : Sujets spéciaux II en génie de la construction (enrobés bitumineux : formulation et mise en œuvre)* notes du cours MGC-992. Programme de Maîtrise en génie de la construction. Montréal : École de Technologie Supérieure, pagination multiple.
- Perraton, Daniel, Hervé Di Benedetto et Alan Carter. 2011 « Correspondances entre les coefficients des modèles de fatigue dans les méthodes mécanistiques-empiriques de dimensionnement de chaussées souples ». 49 p.
- SETRA, LCPC. 1994. « Guide technique. Conception et dimensionnement des structures de chaussées ». Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et le Service d'Études Techniques des Routes et autoroutes, Paris, déc. 1994.

