TABLE DES MATIÈRES

Page

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE 5
1.1 Les enrobés bitumineux et ses constituants 5
1.1.1 Définition 5
1.1.2 Types d'enrobés bitumineux 5
1.1.3 Propriétés essentielles de l'enrobé bitumineux 6
1.1.4 Principales caractéristiques des enrobés bitumineux 6
1.1.5 Le bitume 7
1.1.5.1 Généralités 7
1.1.5.2 Principales caractéristiques d'un bitume 7
1.1.5.3 Caractérisation et classification des bitumes 8
1.1.6 Les granulats 11
1.1.6.1 Généralités 11
1.1.6.2 Caractéristiques 11
1.1.6.3 Caractérisation 11
1.1.7 Les vides dans l'enrobé bitumineux 15
1.1.7.1 Généralités 15
1.1.7.2 Caractéristiques 15
1.1.8 Caractérisation des enrobés bitumineux selon les essais mécaniques 16
1.2 Sollicitations externes et dégradations des enrobés bitumineux 17
1.2.1 Introduction 17
1.2.2 Sollicitations mécaniques 18
1.2.3 Sollicitations climatiques 19
1.2.3.1 Introduction 19
1.2.3.2 Conditions climatiques qui prévalent au Québec 20
1.2.4 Sollicitations hydriques 23
1.2.4.1 Introduction 23
1.2.4.2 Dégradations observées 24
1.2.4.3 Mécanismes de dégradation observés 25
1.2.4.4 Causes de dégradation liées aux sollicitations hydriques et autres 28
1.2.4.5 Causes de dégradation liées à l'enrobé, conception et travaux 29
1.2.4.6 Perte de cohésion des constituants de l'enrobé 31
1.2.4.7 Perte d'adhésivité entre les constituants de l'enrobé 35
1.2.4.8 Perte d'intégrité et de rigidité de l'enrobé bitumineux 40
1.2.5 Sollicitations chimiques 43
1.2.5.1 Produits de déglaçage 43
1.2.5.2 Chlorure de calcium, $CaCl_2$ 44
1.2.5.3 Chlorure de sodium, NaCl 44

1.3 Comportements mécaniques et thermomécaniques des enrobés bitumineux 46
1.4 Comportement viscoélastique linéaire des enrobés bitumineux 48
1.4.1 Mesures des propriétés viscoélastiques linéaires 48
1.4.1.1 Types d'essais 48
1.4.1.2 Types de chargements 48
1.4.2 Mesure sous chargement cyclique sinusoïdal, le module complexe 49
1.4.2.1 Définition 49
1.4.2.2 Types d'essais 52
1.4.2.3 Représentation graphique des résultats 52
1.4.3 Principe d'équivalence temps-température 55
1.4.4 Modélisation du comportement viscoélastique linéaire 57
1.4.5 Effet des paramètres de sollicitation sur la valeur du module complexe .. 60
1.4.5.1 Température et fréquence 60
1.4.5.2 Niveau et nombre de sollicitations 60
1.4.6 Effet de la composition sur la valeur du module complexe 61
1.4.6.1 Introduction 61
1.4.6.2 Granulats et fines minérales 61
1.4.6.3 Liant et additifs 62
1.4.6.4 Teneur en vides 63
1.5 Comportement en fatigue des enrobés soumis à des sollicitations mécaniques 63
1.5.1 Phénomène de fatigue 63
1.5.2 Essais de laboratoire 64
1.5.2.1 Types d'essais 64
1.5.2.2 Types et modes de sollicitation 64
1.5.2.3 Conditions d'essai 65
1.5.2.4 Mécanismes d'endommagement en cours de chargement 65
1.5.2.5 Mesure de la norme du module complexe en cours de chargement 65
1.5.2.6 Détermination du module initial 67
1.5.3 Durée de vie du matériau 68
1.5.3.1 Détermination selon le critère de rupture retenu 68
1.5.3.2 Critères de rupture éventuels 68
1.5.3.3 Loi de fatigue 71
1.5.3.4 Dispersion 73
1.5.3.5 Incidences du mode de sollicitation 73
1.5.3.6 Incidences de la température et de la fréquence 74
1.5.3.7 Influence de la composition du matériau bitumineux 74
1.5.3.8 Influence du conditionnement 75
1.6 Couplages thermomécaniques 77
1.6.1 Introduction 77
1.6.2 Coefficient de dilatation-contraction thermique des enrobés 77

CHAPITRE 2 PROGRAMME EXPÉRIMENTAL 83
2.1 Présentation générale 83
2.2 Méthodologie de l'expérimentation 83

2.2.1 Volet #1 83
2.2.1.1 Volet #1A, les essais thermiques (ET) 84
2.2.1.2 Volet #1B, les essais de module complexe (EE*) 86
2.2.2 Volet #2, les essais de fatigue (EF) 87
2.2.3 Nomenclature utilisée 88
2.3 Enrobé bitumineux testé 90
2.4 Préparation des éprouvettes 91
2.4.1 Introduction 91
2.4.2 Fabrication et échantillonnage de l'enrobé bitumineux 91
2.4.3 Élaboration et compactage des plaques d'enrobé 91
2.4.4 Détermination de la teneur en vides des plaques compactées 92
2.4.5 Sciage et carottage des plaques 92
2.4.6 Entreposage des carottes 94
2.4.7 Délai entre le carottage et la réalisation d'un essai 94
2.4.8 Mesurage et pesage des carottes avant la réalisation de l'essai 95
2.4.9 Détermination de la teneur en vides des carottes 95
2.4.9.1 Méthode hydrostatique, détermination de la densité brute 96
2.4.9.2 Méthode volumétrique, détermination de la masse volumique 96
2.4.9.3 Teneur en vides des carottes 97
2.4.9.4 Exigences pour la teneur en vides des carottes 97
2.4.10 Collage des casques 97
2.4.11 Instrumentation des éprouvettes 99
2.4.11.1 Équipements de mesure 99
2.4.11.2 Caractéristiques des équipements de mesure 99
2.4.11.3 Éprouvettes de type T 100
2.4.11.4 Éprouvettes de type E* 101
2.4.12 Saturation partielle des éprouvettes 102
2.4.12.1 Détermination du degré de saturation des éprouvettes 104
2.5 Essai thermique (ET) 106
2.5.1 Étalonnage des équipements 106
2.5.2 Enceinte thermique 107
2.5.3 Déroulement d'un essai thermique (ET) 107
2.5.4 Acquisition de données 109
2.6 Équipements pour essais mécaniques 110
2.6.1 Presses hydrauliques 110
2.6.2 Enceintes thermiques des presses 111
2.6.3 Capteurs de mesure de déplacement 112
2.6.4 Jauges de déformation 113
2.6.5 Capteurs de mesure de température 113
2.7 Essais mécaniques de module complexe (EE*) et de fatigue (EF) 114
2.7.1 Types d'essai et de chargement préconisés 114
2.7.2 Dispositif expérimental 115
2.7.2.1 Introduction 115
2.7.2.2 Dispositif pour les éprouvettes de type E* 115
2.7.2.3 Dispositif pour les éprouvettes de type F_{SJ} 116

2.7.3 Niveaux de déformation préconisés 116
2.7.4 Déroulement d'un essai mécanique 116
2.7.4.1 Conditionnement 116
2.7.4.2 Essai de module complexe (EE*) 117
2.7.4.3 Essai de fatigue (EF) 119
2.7.5 Équipements, acquisition de données et paramètres mesurés 119
2.7.6 Traitement des données 123
2.7.7 Critères relatifs à la qualité de l'essai mécanique 124
2.7.8 Caractéristiques mesurées 125
2.7.9 Déformations axiales mesurées par les extensomètres et jauges 128
2.7.9.1 Cas des extensomètres sur éprouvette 128
2.7.9.2 Cas des extensomètres sur les casques 129
2.7.10 Corrections de |E*| pour les mesures avec extensomètres placés sur les casques 131
2.7.11 Évaluation de l'endommagement généré par les cycles de GD 132
2.8 Éprouvettes attitrées par type d'essai 134

CHAPITRE 3 RÉSULTATS ET ANALYSES DU VOLET #1A, LES ESSAIS THERMIQUES (ET) 135
3.1 Introduction 135
3.2 Saturation partielle des éprouvettes 135
3.3 Essais thermiques réalisés 135
3.4 Résultats des essais 137
3.4.1 Introduction 137
3.4.2 Degré de saturation 137
3.4.3 Évolution de la température 139
3.4.3.1 Évolution thermique au sein des éprouvettes 139
3.4.3.2 Températures de solidification 142
3.4.3.3 Variations de température lors de la formation de glace 150
3.4.3.4 Températures de fusion de la glace 151
3.4.4 Déformation axiale durant les cycles de gel et dégel 153
3.4.4.1 Introduction 153
3.4.4.2 Déformation axiale avec le temps 154
3.4.4.3 Dilatation durant la formation de glace (ε_S) 154
3.4.4.4 Contraction générée par la fonte de la glace (ε_F) 158
3.4.4.5 Déformation axiale en fonction de la température 159
3.4.4.6 Coefficient de dilatation linéique 161
3.4.5 Essais additionnels 170
3.4.5.1 Introduction 170
3.4.5.2 Cycles de gel et dégel complémentaires de -46 à +23°C 171
3.4.5.3 Résultats types 171
3.4.5.4 Résultats relatifs aux éprouvettes contenant de la saumure 174
3.5 Variation de la teneur en vides des éprouvettes, effet sur le DS 178
3.6 Conclusions 180

CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET ANALYSES DU VOLET #1B, LES ESSAIS DE MODULE COMPLEXE (EE*) 183
4.1 Introduction 183
4.2 Saturation partielle des éprouvettes 184
4.2.1 Introduction 184
4.2.2 Effets sur la rhéologie et l'endommagement de l'enrobé 184
4.2.3 Évolution des degrés de saturation 185
4.3 Essais réalisés 187
4.3.1 Introduction 187
4.3.2 Présentation 187
4.3.3 Durée minimale pour l'ensemble des étapes et des essais 188
4.3.4 Temps écoulé depuis le premier essai de module complexe 189
4.4 Vérification de la qualité des essais de module complexe 189
4.5 Résultats types d'un essai de module complexe pour l'enrobé testé à l'état sec 191
4.5.1 Introduction 191
4.5.2 Présentation des résultats 192
4.5.2.1 Courbes dans le plan de Cole-Cole et l'espace de Black 192
4.5.2.2 Courbes isochrones et isothermes du module complexe 194
4.5.2.3 Courbes maîtresses 195
4.6 Résultats types et modélisation du comportement VEL de l'enrobé à l'état sec 196
4.6.1 Introduction 196
4.6.2 Calibration du modèle 2S2P1D 197
4.6.3 Simulation du comportement VEL de l'enrobé à l'état sec 199
4.7 Résultats types et quantification des dommages 201
4.7.1 Quantification des dommages à l'aide des valeurs de |E*| modélisées 201
4.7.2 Quantification des dommages à l'aide des valeurs de |E*| calculées expérimentalement 203
4.8 Comparaison globale des résultats d'essais 206
4.8.1 Représentations classiques des résultats 206
4.8.2 Détermination des paramètres 2S2P1D 210
4.9 Comparaison normalisée des résultats 212
4.9.1 Utilité de cette méthode 212
4.9.2 Modélisations des modules complexes en considérant des paramètres fixés pour le modèle rhéologique 2S2P1D 215
4.10 Influence du liquide et de la glace sur la rhéologie de l'enrobé bitumineux 225
4.10.1 Introduction 225
4.10.2 Détermination de la température de solidification 225
4.10.3 Effet des liquides sur la rhéologie de l'enrobé 232
4.10.3.1 Introduction 232
4.10.3.2 Effet des liquides sur la rhéologie de l'enrobé avant de réaliser les cycles de gel et dégel 233
4.10.3.3 Effet des liquides sur la rhéologie de l'enrobé au fil des cycles de gel et dégel 234
4.10.3.4 Effet couplé du liquide et des cycles de gel et dégel sur la rhéologie de l'enrobé 237

4.10.4 Effet de la glace sur la rhéologie de l'enrobé 239
4.10.4.1 Introduction 239
4.10.4.2 Effet de la glace avant les cycles de gel et dégel 239
4.10.4.3 Effet de la glace au fil des cycles de gel et dégel 240
4.10.4.4 Effet de la glace et des cycles de gel et dégel 242
4.11 Quantification des dommages apparents à l'aide de la modélisation 244
4.11.1 Évolution du dommage au cours des cycles de gel et dégel (D_{XGD}) 244
4.11.2 Évolution du dommage apparent au cours des cycles de GD en considérant le déphasage de C* (ϕ_C) 247
4.12 Quantification des dommages apparents à l'aide des valeurs expérimentales de |E*| 249
4.12.1 Évolution du dommage entre les +15°C ($D_{\text{entre les } +15°C}$) 249
4.12.2 Évolution du dommage apparent généré par la séquence de cyclage de sollicitation (D_{SCS}) 252
4.12.3 Évolution du dommage généré par les séquences de cyclage (ΣD_{SCS}) 254
4.12.4 Évolution du dommage généré par le cycle de GD du EE* (D_{GDEE*}) 257
4.13 Retour sur le dommage au fil des cycles de GD (D_{XGD}) 260
4.14 Conclusions 264

CHAPITRE 5 RÉSULTATS ET ANALYSES DU VOLET #2, LES ESSAIS DE FATIGUE (EF) 267
5.1 Introduction 267
5.2 Essais réalisés 268
5.3 Saturation partielle des éprouvettes 269
5.4 Résultats types d'un essai de fatigue 269
5.4.1 Introduction 269
5.4.2 Évolution de la température à la surface de l'éprouvette 270
5.4.3 Évolution de l'échauffement à la surface de l'éprouvette 271
5.4.4 Indice de qualité des signaux 272
5.4.5 Éléments relatifs à la déformation 273
5.4.5.1 Évolution de l'amplitude de déformation 273
5.4.5.2 Évolution des écarts de déformation 274
5.4.5.3 Évolution de la valeur centrée de la déformation 275
5.4.6 Éléments relatifs à la contrainte 276
5.4.6.1 Évolution de l'amplitude de la contrainte 276
5.4.6.2 Évolution de la valeur centrée de la contrainte 276
5.4.7 Évolution de l'angle de phase 277
5.4.8 Évolution de la norme du module complexe 278
5.4.9 Évolution de l'énergie dissipée par cycle 279
5.5 Comparaison des résultats des essais de fatigue pour les deux états 280
5.5.1 Introduction 280
5.5.2 Éléments relatifs à la température 280
5.5.2.1 Évolution de la température à la surface des éprouvettes 280
5.5.2.2 Évolution de l'échauffement à la surface des éprouvettes 280
5.5.3 Indice de qualité des signaux 282

5.5.4 Éléments relatifs à la déformation 282
5.5.4.1 Évolution des écarts de déformation 282
5.5.4.2 Évolution de la valeur centrée de la déformation 283
5.5.5 Éléments relatifs à la contrainte 283
5.5.5.1 Évolution de l'amplitude de contrainte 283
5.5.5.2 Évolution de la valeur centrée de la contrainte 285
5.5.5.3 Évolution du rapport entre la valeur centrée et l'amplitude de contrainte 286
5.5.6 Évolution de la norme du module en cours de sollicitation 288
5.5.7 Évolution de l'angle de phase 289
5.5.8 Évolution de l'énergie dissipée par cycle en cours de sollicitation 291
5.5.9 Rupture en fatigue des éprouvettes 292
5.6 Analyse des résultats des essais de fatigue 294
5.6.1 Introduction 294
5.6.2 Méthodologie pour l'analyse de l'endommagement par fatigue 294
5.6.3 Détermination des modules initiaux $|E^*_0|$ pour les deux états 296
5.6.4 Évolution du dommage pour les éprouvettes à l'état S 298
5.6.4.1 Niveau de dommage menant à la rupture (D_{III}) 299
5.6.4.2 Évolution du dommage corrigé menant à la rupture (D_{IIIc}) 300
5.6.5 Évolution du dommage pour les éprouvettes à l'état PSE 303
5.6.5.1 Évolution du dommage menant à la rupture (D_{III}) 303
5.6.5.2 Évolution du dommage corrigé menant à la rupture (D_{IIIc}) 304
5.6.6 Durée de vie selon les divers critères de rupture pour les éprouvettes testées à l'état sec (S) 307
5.6.7 Durée de vie selon les divers critères de rupture pour les éprouvettes testées à l'état partiellement saturé en eau (PSE) 309
5.6.8 Comparaison des durées de vie des deux états (S et PSE) 310
5.7 Conclusions 312

CONCLUSION 315

RECOMMANDATIONS 319

ANNEXE I DURÉE ET DÉROULEMENT DES ÉTAPES NÉCESSAIRES AVANT LA RÉALISATION D'ESSAI 321

ANNEXE II INFORMATIONS RELATIVES AUX PLAQUES D'ENROBÉ BITUMINEUX 323

ANNEXE III INFORMATIONS RELATIVES AUX ÉPROUVETTES D'ENROBÉ BITUMINEUX 325

ANNEXE IV CORRECTION DE LA DÉFORMATION APPARENTE DES JAUGES ÉTABLIE EXPÉRIMENTALEMENT 339

ANNEXE V MÉTHODE DES MOINDRES CARRÉS 341

Rapport-Gratuit.com

ANNEXE VI CALCULS THÉORIQUES DE L'ÉCART DE L'ANGLE DE PHASE ENTRE LES EXTENSOMÈTRES PLACÉS SUR LES CASQUES ET LES JAUGES PLACÉES SUR L'ÉPROUVETTE.....343

ANNEXE VII EFFET DES LIQUIDES, ANALYSE À L'AIDE DES VALEURS DE |E*| À +15°C ET 10HZ 347

ANNEXE VIII RÉSULTATS DES ESSAIS DE FATIGUE (EF) 351

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....391

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 1.1 Caractérisation des bitumes selon les essais rhéologiques 8

Tableau 1.2 Caractérisation des bitumes selon les essais essentiels, complémentaires et supplémentaires 10

Tableau 1.3 Essais de caractérisation pour les granulats des enrobés bitumineux 12

Tableau 1.4 Caractérisation des enrobés bitumineux 17

Tableau 1.5 Nombre d'événements sous la barre des -20, -25 et -30°C au cours d'une année entre 1971 et 2000 à Montréal.....21

Tableau 1.6 Nombre moyen et annuel de cycles de gel et dégel au Québec 22

Tableau 1.7 Mécanismes de dégradation d'un enrobé générés par les sollicitations hydriques sans sollicitations mécaniques.....26

Tableau 1.8 Mécanismes de dégradation d'un enrobé générés par la combinaison des sollicitations hydriques, mécaniques et/ou climatiques.....27

Tableau 1.9 Causes de dégradation liées aux sollicitations hydriques et autres.....28

Tableau 1.10 Causes de dégradations relatives à la conception et aux divers travaux....29

Tableau 1.11 Causes de dégradation de l'enrobé bitumineux en présence d'eau en liens avec ses constituants.....30

Tableau 1.12 Mécanismes à l'origine de la perte de cohésion des constituants de l'enrobé 32

Tableau 1.13 Causes engendrant une faible adhésivité initiale du bitume au granulat ...36

Tableau 1.14 Mécanismes à l'origine de la perte d'adhésivité.....37

Tableau 1.15 Modèles de Maxwell et Kelvin-Voigt.....57

Tableau 1.16 Modèles de Huet et de Huet-Sayegh.....58

Tableau 1.17 Modèle 2S2P1D 59

Tableau 1.18 Méthodes utilisées pour la détermination de la valeur du module initial $|E^*_0|$ 67

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Tableau 1.19 Incidences du mode de sollicitation sur l'essai et les résultats de durée de vie 74

Tableau 1.20 Comparaison de la résistance à la fatigue d'enrobés bitumineux à l'état sec (S) et partiellement saturé en eau (PSE) 76

Tableau 2.1 Répartition des éprouvettes pour les essais thermiques (ET) 85

Tableau 2.2 Répartition des éprouvettes pour les essais de module complexe (EE*) ... 87

Tableau 2.3 Répartition des éprouvettes pour les essais de fatigue (EF) 88

Tableau 2.4 Nomenclature utilisée pour la codification des éprouvettes soumises aux essais de module complexe (EE*) 89

Tableau 2.5 Nomenclature utilisée pour la codification des éprouvettes soumises aux essais de fatigue (EF) 90

Tableau 2.6 Caractéristiques physiques des éprouvettes de type T, avant instrumentation et saturation, nécessaires au calcul de la porosité 105

Tableau 2.7 Caractéristiques des éprouvettes de type T mesurées après une première saturation partielle (SP1) et nécessaires au calcul du degré de saturation (DS) 105

Tableau 2.8 Essai de traction-compression 114

Tableau 2.9 Cycles enregistrés lors de l'essai de module complexe par palier de température 120

Tableau 2.10 Cycles enregistrés lors de l'essai de fatigue 120

Tableau 3.1 Essais thermiques (ET) réalisés sur les éprouvettes de type T 136

Tableau 3.2 Températures de solidification théoriques et mesurées dans un milieu confiné 144

Tableau 3.3 Température de fusion théorique et mesurée dans un milieu confiné 152

Tableau 3.4 Coefficient de dilatation linéique des éprouvettes entre -18 & +10°C et +10 & +23°C 162

Tableau 3.5 Synthèse des équations trouvées expérimentalement et théoriquement pour le coefficient de dilatation linéique lors du refroidissement et lors du réchauffement entre +10 et +23°C pour les éprouvettes partiellement saturées 167

Tableau 3.6 Comparaison entre les résultats obtenus pour les 60^{iers} et les deux cycles complémentaires de GD au cours de la phase de refroidissement ….....175

Tableau 3.7 Comparaison entre les résultats obtenus pour les 60^{iers} et les deux cycles additionnels de gel-dégel au niveau de la fusion de la glace des saumures 177

Tableau 3.8 Évolution de la teneur en vides des éprouvettes au fil des cycles GD.....179

Tableau 4.1 Degré de saturation des éprouvettes de type E* après la saturation 185

Tableau 4.2 Degré de saturation des éprouvettes de type E* avant et après les EE* …….....186

Tableau 4.3 Degré de saturation des éprouvettes de type E* avant et après les ET 186

Tableau 4.4 Essais de module complexe (EE*) réalisés sur chacune des éprouvettes d'enrobé bitumineux avant et après chaque essai thermique (ET).....188

Tableau 4.5 Durée minimale pour la réalisation de tous les essais.....188

Tableau 4.6 Indices de qualité (IQ) et écarts ($\Delta\varepsilon_{exti}$) obtenus au cours des essais de module complexe (EE*).....190

Tableau 4.7 Températures et fréquences utilisées lors d'un EE* 192

Tableau 4.8 Résultats obtenus lors du 3ème EE* sur l'enrobé testé à l'état sec et quantification des dommages D_{SCS} et $D_{entre\ les\ +15°C}$.....205

Tableau 4.9 Détermination des paramètres du modèle 2S2P1D et l'équation WLF suivant les différents ET, pour les cinq états étudiés (T_R = -5,5°C) 210

Tableau 4.10 Paramètres 2S2P1D fixés pour tous les essais.....217

Tableau 4.11 Synthèse relative à la détermination de la température de solidification du fluide en considérant deux températures de référence …….....231

Tableau 4.12 Évolution du dommage calculé à partir de la comparaison des valeurs de |E*| mesurées aux 1ers ou aux 2èmes 10Hz des deux +15°C (AVANT et APRÈS).....251

Tableau 4.13 Dommage cumulatif, généré par les séquences de cyclage, entre les +15°C en considérant les 1ers ou les 2èmes 10Hz aux températures de +15°C (AVANT et APRÈS) 257

Tableau 4.14 Valeurs de |E*| mesurées à +15°C AVANT et 10Hz en fonction du nombre de cycles de gel et dégel (GD) 261

Tableau 4.15 Dommage déterminé à l'aide des valeurs de |E*| mesurées à +15°C AVANT et 10Hz en fonction du nombre de cycles de gel et dégel (GD) 261

Tableau 4.16 Valeurs de |E*| mesurées à +15°C APRÈS et 10Hz en fonction du nombre de cycles de gel et dégel (GD) 262

Tableau 4.17 Dommage déterminé à l'aide des valeurs de |E*| mesurées à +15°C APRÈS et 10Hz en fonction du nombre de cycles de gel et dégel (GD) 262

Tableau 5.1 Synthèse des essais de fatigue réalisés sur l'enrobé EB-14 268

Tableau 5.2 Critère de rupture atteint lors de l'essai 293

Tableau 5.3 Valeur du module initial $|E_0^*|$ des éprouvettes testées à 10°C-10Hz, à l'état sec (S) ou partiellement saturé en eau (PSE) en fonction de l'amplitude de déformation (ε_{Aax}) 297

Tableau 5.4 Paramètres utilisés pour le calcul du dommage menant à la rupture, corrigé des effets biaisant (D_{IIIc}), pour les essais en fatigue réalisés sur les éprouvettes S (+10°C-10Hz) 301

Tableau 5.5 Calcul du dommage menant à la rupture (D_{IIIc}) corrigé des effets biaisant pour les éprouvettes testées à l'état partiellement saturé en eau (PSE), à +10°C et 10Hz 304

Tableau 5.6 Durée de vie déterminée selon les critères de rupture pour les éprouvettes testées à l'état sec (S), à +10°C et 10Hz 307

Tableau 5.7 Durée de vie déterminée selon les critères de rupture pour les éprouvettes testées à l'état partiellement saturé en eau (PSE), à +10°C et 10Hz 309

Tableau 5.8 Caractéristiques en fatigue de l'enrobé testé sous les deux états à +10°C et 10Hz 311

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 1.1 Teneur en bitume et propriétés de l'enrobé 7

Figure 1.2 Schématisation des sollicitations induites par le trafic 18

Figure 1.3 Températures mesurées aux deux stations de 1971 à 2000 20

Figure 1.4 Comportements mécaniques des enrobés à température fixée, N (nombre de sollicitations) et |ε| (amplitude de déformation) 47

Figure 1.5 Variation sinusoïdale de la contrainte et de la déformation pour un matériau viscoélastique linéaire 49

Figure 1.6 Représentation des composantes E_1 et E_2, et la norme du module complexe |E*| 51

Figure 1.7 Isothermes du module complexe 53

Figure 1.8 Isochrones du module complexe 53

Figure 1.9 Module complexe dans le plan Cole et Cole 54

Figure 1.10 Module complexe dans l'espace de Black 55

Figure 1.11 Élaboration d'une courbe maîtresse (T_R = +10°C) 56

Figure 1.12 Évolution de la rigidité de l'éprouvette suivant trois phases lors d'un essai de fatigue 66

Figure 1.13 Norme du module complexe et détermination de $N_{F50\%}$ 69

Figure 1.14 Espace de Black et détermination de $N_{fmax\phi}$ 70

Figure 1.15 Écart de déformation et détermination de $N_{f\Delta\varepsilon ax}$ 71

Figure 1.16 Écart d'angle de phase et détermination de $N_{f\Delta\phi}$ 71

Figure 1.17 Droite de Wöhler 72

Figure 1.18 Températures mesurées à la paroi et au cœur d'un éprouvette d'enrobé soumis à un taux de 60°C/h 79

Figure 2.1 Déroulement et durée pour la réalisation des six essais thermiques (ET) et sept essais de module complexe (EE*) sur les deux groupes d'éprouvettes....86

Figure 2.2 Granulométrie et fuseau granulométrique de spécification du combiné granulaire de l'enrobé EB14....91

Figure 2.3 a) Patron de sciage d'une plaque élaborée en prismes, b) Plan de carottage des prismes sciés....93

Figure 2.4 Banc de collage : a) Vue dans le plan X-Z, b) Vue dans le plan Y-Z....99

Figure 2.5 Instrumentation des éprouvettes de type T : a) Vue de profil, b) Vue en coupe....100

Figure 2.6 Instrumentation des éprouvettes de type E* : a) Vue de profil, b) Vue en coupe....102

Figure 2.7 Montage pour la saturation partielle des éprouvettes....103

Figure 2.8 Procédé de saturation : a) Abaissement de la pression et désaération de l'éprouvette et du liquide dans le pycnomètre, b) Transfert du liquide et immersion de l'éprouvette, c) Éprouvette recouverte d'une membrane en latex....104

Figure 2.9 Température de l'air projeté au sein de l'enceinte thermique durant les essais thermiques (ET)....108

Figure 2.10 Presse hydraulique, modèle MTS 810....111

Figure 2.11 Dispositif pour les éprouvettes de type E* placées dans la MTS 810 : a) Éprouvette équipée des extensomètres et jauges (vue en profil), b) Positionnement des extensomètres (vue en plan)....115

Figure 2.12 Déroulement d'un essai de module complexe : variations et conditionnement de température (θ), retour à une contrainte nulle (σ = 0) et séquence de cyclage de sollicitations (SCS) incluant des sollicitations à 50μdef, retours à σ = 0 et temps de repos....118

Figure 2.13 Équipements de mesure et déformations de l'éprouvette....119

Figure 2.14 Contrainte et déformations mesurées par les extensomètres (E*-PSS7-DS62%-0GD-1EE* à 15°C-0,3Hz)....123

Figure 2.15 Points expérimentaux, signal approché et IQ pour un extensomètre (E*-PSS7-DS62%-0GD-1EE* à 15°C-0,1Hz)....125

Figure 2.16 Énergie visqueuse dissipée par cycle (W_N) représentée par l'aire de l'ellipse 127

Figure 2.17 Contrainte et déformation moyenne axiale et radiale des jauges (E*-PSS7-DS62%-0GD-1EE* à 15°C-0,1Hz) 128

Figure 2.18 Écart relatif entre la norme du module complexe |E*| établis à partir des extensomètres et des jauges en fonction de l'amplitude de contrainte 130

Figure 2.19 Écart entre les extensomètres et les jauges pour l'angle de phase (ϕ_E) en fonction de la contrainte 131

Figure 2.20 Écart relatif des |E*| entre extensomètres et jauges en fonction de la contrainte après correction 131

Figure 2.21 Écart entre extensomètres et jauges pour l'angle de phase (ϕ_E) en fonction de la contrainte après correction 132

Figure 3.1 Réalisation des six essais thermiques (ET) qui incluent les six séquences de cycles de gel et dégel (GD) 136

Figure 3.2 Variation du degré de saturation avec le temps pour les éprouvettes partiellement saturées. Mesures réalisées : 1) après la saturation partielle (SP1, SP2, SP3 et SP4), 2) avant et après l'essai thermique (1^{er} au 5^{e} ET), 3) après une longue période d'entreposage (LE) et, 4) de part et d'autre d'un arrêt des équipements (AE) 138

Figure 3.3 Évolution des températures à la surface et au cœur de l'éprouvette à l'état sec (S) durant le $7^{ème}$ CGD ($3^{ème}$ ET) 140

Figure 3.4 Différence de température entre la surface et le cœur de l'éprouvette S lors du $7^{ème}$ cycle GD ($3^{ème}$ ET) 140

Figure 3.5 Températures à la surface et au cœur de l'éprouvette PSE lors du $4^{ème}$ ET (j = 4) et le $12^{ème}$ cycle de GD (i = 12), et détermination des variations de température (ΔT_S et ΔT_C) lors du changement de phase du liquide ou du solide 141

Figure 3.6 Évolution de la température de solidification en fonction du nombre de cycles de GD déduites en considérant les mesures de la température de surface (T_{SS}) et celle au cœur (T_{SC}) pour chacune des éprouvettes 143

Figure 3.7 Températures de solidification (T_S) des liquides mesurées à la surface (T_{SS}) et au cœur (T_{SC}) des éprouvettes en fonction de leur degré de saturation 148

Figure 3.8 Variations de température (ΔT) lors de la solidification du liquide à la surface (ΔT_S) et au cœur des éprouvettes (ΔT_C) (définies à la Figure 3.5).....151

Figure 3.9 Température de fusion : théorique (ligne pointillée) et mesurée pour l'eau à la surface (T_{FS}) et au cœur (T_{FC}) de l'éprouvette PSE (définie à la Figure 3.5).....152

Figure 3.10 Déformation axiale (ε_{axiale}) et températures dans l'enceinte, à la surface et au cœur de l'éprouvette PSE lors du 12ème CGD, et détermination de la dilatation générée lors de la formation de la glace (ε_S) et de la contraction liée à sa fusion (ε_F).....154

Figure 3.11 Dilatation générée par la solidification du liquide (ε_S définie à la Figure 3.10).....155

Figure 3.12 Contraction générée par la fusion de la glace (ε_F définie à la Figure 3.10) ….....159

Figure 3.13 a) ε_{axiale} vs $T_{surface}$, b) ε_{axiale} vs $T_{cœur}$ pour l'éprouvette PSS7 ($58 \leq DS \leq 61\%$; B_j à J_j définis à la Figure 2.9 ; $j = 3$; $4 \leq i \leq 10$).....160

Figure 3.14 Coefficients de dilatation linéique (α) des éprouvettes lors du refroidissement ($\downarrow T$) et lors du réchauffement ($\uparrow T$) entre +10 et +23°C en fonction du degré de saturation (le numéro du cycle de GD près de cette plage de température est mis en étiquette).....163

Figure 3.15 Coefficients de dilatation linéique (α) lors du refroidissement ($\downarrow T$) pour toutes les éprouvettes partiellement saturées entre +10 et +23°C en fonction du degré de saturation (valeur à l'ordonnée de 26,8 pour les courbes de tendance linéaire).....164

Figure 3.16 Coefficients de dilatation linéique (α) lors du réchauffement ($\uparrow T$) pour toutes les éprouvettes partiellement saturées entre +10 et +23°C en fonction du degré de saturation (valeur à l'ordonnée de 26,9 pour les courbes de tendance linéaire).....164

Figure 3.17 Évolution du rapport entre le coefficient de dilatation linéique lors du réchauffement ($\uparrow T$, $\alpha_{réchauf}$) et celui lors du refroidissement ($\downarrow T$, $\alpha_{refroid}$) lors d'un même cycle de GD pour la plage de température de -18 à +10°C.....168

Figure 3.18 Coefficients de dilatation linéique (α) pour toutes les éprouvettes entre -18 et +10°C en fonction du degré de saturation (numéro du cycle de GD en étiquette).....169

Figure 3.19 Évolution de la température imposée dans l'enceinte pour la réalisation des deux cycles complémentaires de GD 171

Figure 3.20 Déformation axiale (ε_{axiale}) et températures dans l'enceinte, à la surface et au cœur de l'éprouvette PSS7 lors du 101ème CGD, et détermination de la dilatation générée lors de la formation de la glace (ε_S) et de la contraction liée à sa fusion (ε_F) 172

Figure 3.21 Températures à la surface et au cœur de l'éprouvette PSS7 lors du 102ème cycle de GD, et détermination des variations de température (ΔT_S et ΔT_C) lors de la formation de la glace à la surface (T_{SS}) et au cœur (T_{SC}) ou à sa fusion à la surface (T_{FS}) et au cœur (T_{FC}) 173

Figure 4.1 Temps écoulé entre la fin du X^{ème} EE* et le début du 1er EE* 189

Figure 4.2 Module complexe dans le plan de Cole et Cole 193

Figure 4.3 Module complexe dans l'espace de Black 193

Figure 4.4 Isochrones du module complexe 194

Figure 4.5 Isothermes du module complexe 194

Figure 4.6 Courbe maîtresse de la norme du module complexe (T_R = -5,5°C) 195

Figure 4.7 Courbe maîtresse de l'angle de phase (ϕ_E) (T_R = -5,5°C) 195

Figure 4.8 Évolution du coefficient de translation (a_T) avec la température 196

Figure 4.9 Influence des paramètres du modèle 2S2P1D sur la courbe du module complexe dans le plan Cole-Cole 198

Figure 4.10 Détermination de la constante β à partir de la courbe maîtresse du module complexe 198

Figure 4.11 Module complexe de l'enrobé à l'état sec après 3 cycles de GD dans le plan Cole-Cole et simulation avec le modèle 2S2P1D 199

Figure 4.12 Module complexe de l'enrobé à l'état sec après 3 cycles de GD dans l'espace de Black et simulation avec le modèle 2S2P1D 199

Figure 4.13 Courbe maîtresse de |E*| de l'enrobé à l'état sec après 3 cycles de GD et simulation avec le modèle 2S2P1D (T_R = -5,5°C) 200

Figure 4.14 Courbe maîtresse de ϕ_E de l'enrobé à l'état sec après trois cycles de gel-dégel et simulation avec le modèle 2S2P1D (T_R = -5,5°C) 200

Rapport-Gratuit.com

Figure 4.15 Évolution du tau (τ_E) avec la température 201

Figure 4.16 Variation du dommage en fonction de la fréquence équivalente (aT · Fr) calculée suivant le 2ème ET, soit au 3ème EE* (D_{XGD}) (T_R = -5,5°C) 202

Figure 4.17 Variation du phi en fonction de la fréquence équivalente (aT · Fr) calculée suivant le 2ème ET, soit au 3ème EE* (ϕ_C) (T_R = -5,5°C) 203

Figure 4.18 Évolution du dommage généré par la séquence de cyclage de sollicitations (D_{SCS}) en fonction du palier de température 205

Figure 4.19 Niveau de dommage généré entre les deux paliers de +15°C ($D_{entre\ les\ +15°C}$) selon la fréquence considérée 206

Figure 4.20 Modules complexes suivant les EE* et les ET dans le plan de Cole-Cole, pour les cinq états étudiés 208

Figure 4.21 Normes des modules complexes suivants les EE* et les ET dans l'espace de Black, pour les cinq états étudiés 209

Figure 4.22 Évolution du module statique suivant le nombre de cycles de GD ($E_{00,\ XGD}$) et normalisé en référence au module statique avant les ET ($E_{00,\ 0GD}$) (paramètres déterminés du modèle rhéologique 2S2P1D) 211

Figure 4.23 Évolution du module vitreux suivant le nombre de cycles de GD ($E_{0,\ XGD}$) et normalisé en référence au module vitreux avant les ET ($E_{0,\ 0GD}$) (paramètres déterminés du modèle rhéologique 2S2P1D) 211

Figure 4.24 Plan de Cole-Cole normalisé suivant les ET et les EE* pour les cinq états étudiés 213

Figure 4.25 Espace de Black normalisé suivant les ET et les EE* pour les cinq états étudiés 214

Figure 4.26 Plans de Cole-Cole normalisés pour tous les essais des cinq états 215

Figure 4.27 Module complexe dans le plan de Cole et Cole pour tous les essais des cinq états avec des paramètres fixés pour le modèle 2S2P1D 218

Figure 4.28 Norme du module complexe dans l'espace de Black pour tous les essais avec des paramètres fixés pour le modèle 2S2P1D 219

Figure 4.29 Évolution du tau avec la température pour les cinq états étudiés en considérant des paramètres fixés pour le modèle 2S2P1D (référence : E*-S-DS00%-0GD-1EE*) 220

Figure 4.30 Évolution d'a_T avec la température pour les cinq états étudiés avec des paramètres fixés pour 2S2P1D et WLF (références : θ de -5,5°C et E*-S-DS00%-0GD-1EE*) 221

Figure 4.31 Courbe maîtresse de la norme du module complexe pour tous les essais des états étudiés avec paramètres fixés pour 2S2P1D (température de référence de -5,5°C, T_R) 222

Figure 4.32 Courbe maîtresse de l'angle de phase du module complexe pour tous les essais avec paramètres fixés pour le modèle 2S2P1D (température de référence de -5,5°C, T_R) 223

Figure 4.33 Normalisation d'E_0 par état avec le nombre de cycles GD (paramètres fixés pour le modèle rhéologique 2S2P1D) 224

Figure 4.34 Normalisation d'E_{00} par état avec le nombre de cycles GD (paramètres fixés pour le modèle rhéologique 2S2P1D) 225

Figure 4.35 Delta tau sur tau_{WLF} en fonction de la température pour les cinq états étudiés et EE* réalisés (paramètres 2S2P1D fixés et constantes WLF déterminés à T_R = -5,5°C) 227

Figure 4.36 Delta a_T tau sur a_{TWLF} en fonction de la température pour les cinq états étudiés et EE* réalisés (paramètres 2S2P1D fixés et constantes WLF déterminés à T_R = -5,5°C) 228

Figure 4.37 Delta tau sur tau_{WLF} en fonction de la température pour les cinq états étudiés et EE* réalisés (paramètres 2S2P1D fixés et constantes WLF déterminés à T_R = +4,7°C) 229

Figure 4.38 Delta a_T sur a_{TWLF} en fonction de la température pour les cinq états étudiés et EE* réalisés (paramètres 2S2P1D fixés et constantes WLF déterminés à T_R = +4,7) 230

Figure 4.39 Valeurs de tau à T_R (-5,5°C) des enrobés aux états étudiés, avant de réaliser des cycles de GD (0 GD), en fonction du DS et normalisées en référence à celle de l'enrobé à l'état sec (valeurs du rapport, teneur en vides et degré de saturation indiquées) 234

Figure 4.40 Valeurs de tau des enrobés à une température de +4,7°C, aux états étudiés et à 0 GD, en fonction du DS et normalisées en référence à celle de l'enrobé à l'état S (valeurs du rapport, teneur en vides et degré de saturation indiquées) 234

Figure 4.41 Normalisation de la valeur de tau de l'enrobé à la température de référence (T_R) de -5,5°C, à l'état i et à X GD par rapport à celle obtenue pour ce même enrobé à 0 GD (paramètres fixés) 235

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Figure 4.42 Normalisation de la valeur de tau de l'enrobé à une température de +4,7°C, à l'état i et à X GD par rapport à celle obtenue pour ce même enrobé à 0 GD (paramètres fixés) 236

Figure 4.43 Normalisation de la valeur de tau de l'enrobé à une température de +4,7°C, à l'état i et à X GD par rapport à celle obtenue pour l'enrobé à cette même température à l'état sec (S) et à X GD (paramètres fixés, #CGD en étiquette) 237

Figure 4.44 Normalisation de la valeur de tau de l'enrobé à une température de +4,7°C, à l'état i et à X GD par rapport à celle obtenue pour l'enrobé à cette même température, à l'état sec (S) et à 0 GD (paramètres fixés).....238

Figure 4.45 Normalisation d'E_0 de l'enrobé bitumineux à l'état i et à 0 GD par rapport à celle obtenue pour l'enrobé à l'état sec et en fonction du DS (paramètres fixés) (valeurs du ratio ; teneur en vides ; degré de saturation) 240

Figure 4.46 Normalisation d'E_0 de l'enrobé bitumineux à l'état i et à X GD par rapport à celle obtenue pour ce même enrobé à 0 GD (paramètres fixés pour le modèle 2S2P1D) 241

Figure 4.47 Normalisation de la valeur d'E_0 de l'enrobé bitumineux à l'état i et à X GD par rapport à celle obtenue pour l'enrobé à l'état sec (S) et à X GD (paramètres fixés pour le modèle 2S2P1D et numéro du CGD en étiquette) 242

Figure 4.48 Normalisation de la valeur d'E_0 de l'enrobé à l'état i et à X GD par rapport à celle obtenue pour l'enrobé à l'état sec (S) et à 0 GD (paramètres fixés pour le modèle 2S2P1D) 243

Figure 4.49 Évolution du dommage en fonction des cycles de GD (D_{XGD}) pour tous les essais des cinq états (T_R = -5,5°C).....246

Figure 4.50 Évolution de phi en fonction des cycles de GD (ϕ_C) pour tous les essais des cinq états (T_R = -5,5°C).....248

Figure 4.51 Évolution du dommage établi à partir de la comparaison des valeurs de |E*| à +15°C AVANT et +15°C APRÈS en fonction de la fréquence.....250

Figure 4.52 Évolution du dommage potentiellement généré par la séquence de cyclage de sollicitation (D_{SCS}) par palier de température 253

Figure 4.53 Dommage cumulatif généré par les séquences de cyclage de sollicitation (ΣD_{SCS}) lors d'un essai de module complexe (EE*) 255

Figure 4.54 Évolution du dommage généré par le cycle de gel et dégel lors de la réalisation de l'essai de module complexe (D_{GDEE*}) pour tout les états ……. 258

Figure 5.1 Évolution de la température à la surface de l'éprouvette 5D1 271

Figure 5.2 Évolution de l'échauffement à la surface de l'éprouvette 5D1 (ε_{Aax} = 129µdef ; $T_{consigne}$ = 10°C) 272

Figure 5.3 Évolution de l'indice de qualité des signaux de σ et ε 273

Figure 5.4 Évolution de l'amplitude de déformation axiale moyenne 273

Figure 5.5 Évolution des écarts de déformations mesurées par les 3 extensomètres lors de l'essai de fatigue réalisé sur l'éprouvette 5D1 en mode de contrôle de déformation.....274

Figure 5.6 Évolution des centres de déformation (éprouvette # 5D1) 275

Figure 5.7 Évolution de l'amplitude de la contrainte.....276

Figure 5.8 Évolution de la valeur centrée de la contrainte.....277

Figure 5.9 Évolution de l'angle de phase (ε_{Aax} = 129µdef ; $T_{consigne}$ = 10°C).....278

Figure 5.10 Évolution de la norme du module complexe de l'éprouvette 5D1, testée à l'état sec à 10°C-10Hz, en fonction du nombre de cycles 279

Figure 5.11 Évolution de l'énergie dissipée par cycle (W_N).....279

Figure 5.12 Évolution de l'échauffement à la surface des éprouvettes testées à l'état sec (S), à +10°C-10Hz, en fonction du nombre de cycles de sollicitation.....281

Figure 5.13 Évolution de l'échauffement à la surface des éprouvettes à l'état partiellement saturé en eau (PSE), testées à +10°C-10Hz, selon le du nombre de cycles de sollicitation.....281

Figure 5.14 Évolution de l'amplitude de contrainte en fonction des cycles de sollicitation pour les éprouvettes testées à l'état sec (S), à +10°C et 10Hz.....284

Figure 5.15 Évolution de l'amplitude de contrainte en fonction des cycles pour les éprouvettes testées à l'état partiellement saturé en eau (PSE), à +10°C et 10Hz 284

Figure 5.16 Évolution de la valeur centrée de contrainte (σ_0) pour les éprouvettes à l'état sec (S), sans jauges (F_{SJ}) et ayant une teneur en vides intermédiaire (3,5 à 4,5%) 285

Figure 5.17 Évolution de la valeur centrée de contrainte pour les éprouvettes à l'état partiellement saturé en eau, sans jauges et ayant une teneur en vides intermédiaire.....286

Figure 5.18 Rapport entre la valeur centrée et l'amplitude de contrainte pour les éprouvettes à l'état S, sans jauges et ayant une teneur en vides de 3,5 à 4,5% 287

Figure 5.19 Rapport entre la valeur centrée et l'amplitude de contrainte pour les éprouvettes à l'état PSE, sans jauges et ayant une teneur en vides de 3,5 à 4,5% 287

Figure 5.20 Évolution de la norme du module complexe des éprouvettes testées à l'état sec, +10°C-10Hz en fonction du nombre de cycles.....288

Figure 5.21 Évolution de la norme du module complexe des éprouvettes testées à l'état partiellement saturé en eau, à +10°C-10Hz, en fonction du nombre de cycles.....289

Figure 5.22 Évolution de l'angle de phase en fonction des cycles à +10°C et 10Hz pour les éprouvettes à l'état sec.....290

Figure 5.23 Évolution de l'angle de phase en fonction des cycles à +10°C et 10Hz pour les éprouvettes PSE à teneur en vides intermédiaire 290

Figure 5.24 Évolution de l'énergie dissipée par cycle pour les éprouvettes S (+10°C-10Hz) 291

Figure 5.25 Évolution de l'énergie dissipée par cycle pour les éprouvettes PSE (10°C-10Hz).....292

Figure 5.26 Valeurs de la norme du module complexe initial en fonction de l'amplitude de déformation pour les éprouvettes testées à l'état S ou PSE, à +10°C-10Hz (Teneur en vides, degré de saturation, et temps écoulé entre le carottage et la réalisation de l'essai).....297

Figure 5.27 Évolution du dommage (D) en fonction du nombre de cycles pour les éprouvettes testées à +10°C, 10Hz et à l'état sec 299

Figure 5.28 Niveau de dommage menant à la rupture (D_{III}) pour les éprouvettes à l'état sec, testées à +10°C et 10Hz, en fonction de l'amplitude de déformation 300

Figure 5.29 Niveau de dommage menant à la rupture pour les éprouvettes à l'état sec, testées à 10°C et 10Hz, en fonction de l'amplitude de déformation et teneur en vides 300

Figure 5.30 Évolution du dommage menant à la rupture, corrigé des effets biaisant, en fonction de l'amplitude de déformation pour les éprouvettes S testées à +10°C et 10Hz 301

Figure 5.31 Évolution du dommage menant à la rupture, corrigé des effets biaisant, en fonction de l'amplitude de déformation et par groupe de teneur en vides pour les éprouvettes S, testées à +10°C et 10Hz 302

Figure 5.32 Évolution du dommage menant à la rupture, corrigé des effets biaisant, en fonction de la teneur en vides des éprouvettes S testées à +10°C et 10Hz 302

Figure 5.33 Évolution du dommage en fonction du nombre de cycles pour les éprouvettes partiellement saturées en eau (PSE) 303

Figure 5.34 Évolution du dommage menant à la rupture en fonction de l'amplitude de déformation pour les éprouvettes à l'état partiellement saturé en eau (PSE) 304

Figure 5.35 Évolution du dommage, corrigé des effets biaisant, en fonction de l'amplitude de déformation pour les éprouvettes PSE (teneur en vides, DS et dommage indiqués) 305

Figure 5.36 Évolution du dommage corrigé en fonction de la teneur en vides des éprouvettes PSE (valeurs et évolution du DS en cours d'essai indiqués) 306

Figure 5.37 Évolution du dommage corrigé en fonction de la teneur en vides des éprouvettes S et PSE (évolution du DS en cours d'essai indiquée) 307

Figure 5.38 Droites de fatigue et résultats pour l'enrobé ayant une teneur en vides entre 3,5 et 4,5%, testé à l'état sec (S), à +10°C et 10Hz 308

Figure 5.39 Résultats de fatigue valident pour l'enrobé testé à l'état sec (S), à +10°C et 10Hz, et droite de fatigue pour l'enrobé ayant une teneur en vides de 3,5 à 4,5% 308

Figure 5.40 Droites de fatigue et résultats pour l'enrobé ayant une teneur en vides de 3,5 à 4,5%, testé à l'état PSE, à +10°C et 10Hz (teneur en vides et DS indiqués) 310

Figure 5.41 Droites de fatigue de l'enrobé bitumineux, ayant une teneur en vides de 3,5 à 4,5%, testés sous les deux états (S et PSE), à +10°C et 10Hz ....…….311

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AASHTO	*American Association of State Highway and Transportation Officials*
AE	Arrêt des équipements
AIPCR	Association internationale permanente des congrès de la route
APRÈS	Après que la température ait passé sous 0°C lors de l'essai de module
ASTM	*American Society for Testing and Materials*
AVANT	Avant que la température ait passé sous 0°C lors de l'essai de module
BBR	*Bending Beam Rheometer* (rhéomètre à flexion de poutre)
CEI	Commission électrotechnique internationale
CMVM	Courbe de masse volumique maximale d'un combiné granulaire
CNRC	Conseil national de recherches du Canada
CSA	*Canadian Standard Association* (Association canadienne de normalisation)
CCDG	Cahier des charges et devis généraux
CGD	Cycle de gel et dégel
coll.	Collaborateur(s)
cos	Cosinus
cum.	Cumulé
DCT	Dilatation-contraction thermique
DGCB	Département de Génie Civil et Bâtiment de l'ENTPE
DS	Degré de saturation
DS_{CR}	Degré critique de saturation
DS_{min}	Degré de saturation minimal
DS_{max}	Degré de saturation maximal

DSR	*Dynamic Shear Rheometer* (rhéomètre à cisaillement dynamique)
EB	Enrobé bitumineux
EC	Essai conforme
E/C	Rapport massique eau-ciment pour les bétons hydrauliques
EE*	Essai de module complexe
EF	Essai de fatigue
EME	Enrobé à module élevé
ENC	Essai non conforme
ENTPE	École Nationale des Travaux Publics de l'État
ET	Essai thermique
ÉR	Éprouvette remplacée par une autre
FM	Filler minéral
GD	Gel et dégel
GF	Granulat fin
GG	Gros granulat
GNM	Grosseur nominale maximale d'un granulat
IQ	Indice de qualité des signaux de contrainte ou de déformations
LC	Laboratoire des Chaussées
LE	Long entreposage des éprouvettes
L/D	Ratio longueur/diamètre d'une éprouvette ou carotte d'enrobé bitumineux
LCMB	Laboratoire sur les chaussées et matériaux bitumineux
LCPC	Laboratoire central des Ponts et Chaussées
LPC	Laboratoires des Ponts et Chaussées

LVDT	*Linear Variable Differential Transformer* (capteur de déplacements)
max.	Valeur maximale
MC	Milieu continu
min.	Valeur minimale
MLCP	Matériel du LPC
moy.	Valeur moyenne
MSCR	*Multiple Stress Creep Recovery* (déformation et recouvrance répétées)
MTQ	Ministère des Transports du Québec
MTS	*Material Testing System*
MV	Masse volumique du matériau
n. a.	Non applicable
n. m.	Non mesuré
no, #	Numéro
n. o.	Non observable
n. s.	Non spécifié
NF	Norme française
NL	Non linéaire
NQ	Norme québécoise
PAV	*Pressure Aging Vessel* (bombe de vieillissement sous pression)
PCG	Presse à cisaillement giratoire
PET	Station météorologique de Pierre Elliott Trudeau
PETT	Principe d'équivalence temps-température
PG	*Performance Grade* (grade ou classe de performance)

Rapport-Gratuit.com

PSE	Partiellement saturé en eau
PSS	Partiellement saturé en saumure
PSS7	Partiellement saturé en saumure avec une concentration en sel de 7,4%
PSS14	Partiellement saturé en saumure avec une concentration en sel de 13,8%
PSS19	Partiellement saturé en saumure avec une concentration en sel de et 19,4%
pts	Points ou appuis pour un essai de flexion
RAS	Rien à signaler
USIRF	Revue générale des routes et de l'aménagement
RNA	Rupture non atteinte
RP	Rupture prématurée (< 60000 cycles de sollicitation)
RTFOT	*Rolling Thin Film Oven Test* (étuvage accéléré en couche mince)
SCS	Séquence de cyclage de sollicitations
sem	Semaine
SETRA	Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements
SHRP	*Strategic Highway Research Program*
sin	Sinus
SP	Saturation partielle
SSS	Saturée à surface sèche
SUPERPAVE	*Superior Performing Asphalt Pavements*
TPN	À température et pression normales
TSR	*Tensile Strength Ratio* (rapport des résistances en traction)
TSRST	*Thermal Stress Restrained Specimen Test* (essai de retrait thermique empêché)
UV	Ultraviolet (rayonnement)

VDOT	Virginia Department of Transportation
VEL	Viscoélastique linéaire
VH	Viabilité hivernale
WLF	Willams, Landel et Ferry (formule analytique ou équation de)

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

SYMBOLES

a_T	Coefficient de translation servant à l'élaboration des courbes maîtresses
ax, axiale	Axiale
A	Amplitude du signal
A_X à J_X	Identification des étapes réalisées lors d'un essai thermique (ET)
b	Pente de la droite de fatigue
C	Carotte d'une plaque d'enrobé bitumineux
C_i	Coefficient correcteur pour prendre en compte de la non linéarité de l'endommagement par fatigue durant la phase II (valeur entre 0 et 1)
c_1	Coefficient correspondant à la durée de vie du matériau pour une amplitude de déformation imposée de 1m/m à une température et une fréquence données
C_1	Constante de la formule WLF
c_2	Coefficient lié à la pente de la droite de Wöhler
C_2	Constante de la formule WLF
$CaCl_2$	Chlorure de calcium
C*	Coefficient de rigidité complexe (C*) établi à une fréquence équivalente ($Fr_é$)
|C*|	Rapport entre la norme du module complexe de l'enrobé bitumineux à un nombre donné de cycles de gel-dégel (X GD) et celle de ce même enrobé à l'état sain (0 GD).
d	Jour (durée)
d ou D	Déplacement ou diamètre d'une éprouvette
d_{mb}	Densité brute du mélange d'enrobé bitumineux
d_{mm}	Densité maximale du mélange d'enrobé bitumineux

$D_{\text{entre les +15°C}}$	Dommage généré par les séquences de cyglage de sollicitations entre les températures de +15°C AVANT et +15°C APRÈS
D_{GDEE*}	Dommage induit par le cycle de gel et dégel de l'essai de module complexe
D_{SCS}	Dommage générée par la séquence de cyclage de sollicitations
D_{XGD}	Dommage apparent généré par X gel et dégel
D_{III}	Dommage menant à la rupture (début de la phase III) de l'éprouvette
D_{IIIc}	Dommage corrigé des effets biaisant menant à la rupture (phase III)
E_f	Rigidité initial de l'éprouvette au 1er cycle d'un essai sans effet biaisant et où la température de l'éprouvette resterait rigoureusement constante pendant toute la durée de l'essai
E_0	Module vitreux (*glassy modulus*), lorsque la pulsation tend vers l'infini
E_{00}	Module statique (*static modulus*), lorsque la pulsation tend vers zéro
E_{00i}	Rigidité de l'éprouvette au cycle 1, obtenue par extrapolation linéaire sur l'intervalle i (-1, 0, 1ou 2)
E_1	Partie réelle (ou composante réversible élastique) du module complexe appelée module d'élasticité dynamique ou module de conservation
E_2	Partie imaginaire (ou composante irréversible) du module complexe appelée module de perte
E*	Module complexe ou éprouvette de type E* soumise aux essais de module complexe
|E*|	Norme du module complexe (module dynamique ou module de rigidité)
$\|E^*_0\|$	Module initial de l'enrobé bitumineux
$\|E^*\|_{EF}$	Évolution de la rigidité de l'éprouvette lors de l'essai de fatigue
$\|E^*_N\|$	Module de l'enrobé bitumineux au cycle N
$E^*_{\text{+15°C AVANT}}$	Rigidité mesurée à +15°C avant que la température ait passé sous 0°C
$E^*_{\text{+15°C APRÈS}}$	Rigidité mesurée à +15°C après que la température ait passé sous 0°C

F	Force
Fr	Fréquence de sollicitation
$Fr_{é}$	Fréquence équivalente
Fr_i	A une fréquence donnée
F_{SJ}	Éprouvette sans jauge de déformation et soumise à l'essai de fatigue
F(t)	Fonction de fluage
h	Paramètre des éléments paraboliques (où $0 < k < h < 1$)
h_0	Distance entre les pointes des extensomètres
i	Nombre imaginaire (= $\sqrt{-1}$), nombre actuel de cycles de gel-dégel (0 à 102), numéro de l'intervalle (-1 à 2) dans la phase II d'un essai de fatigue, de la jauge de déformation (1 à 3) ou de l'extensomètre (1 à 3)
j	Nombre actuel de la séquence
k	Paramètre d'éléments paraboliques (où $0 < k < h < 1$) ou numéro du point d'acquisition variant de 0 à 200 pour un cycle de sollicitation
K_X	Écart relatif entre les points expérimentaux et la fonction sinusoïdale approximée par la méthode des moindres carrés (= IQ, %)
L	Longueur d'une éprouvette ou carotte d'enrobé bitumineux
m	Masse de l'appareillage mobile
M	Masse de l'éprouvette en mouvement
$MgSO_4$	Sulfate de magnésium (sel d'Epsom, sel anglais, sel de Sedlitz ou sel amer)
n	Nombre de valeurs ou résultats obtenus
N	Nombre de cycles de sollicitation ou numéro du cycle traité
NaCl	Chlorure de sodium
Na_2SO_4	Sulfate de sodium
N_f	Nombre de cycles lors de l'atteinte du critère de rupture

$N_{fmax\phi}$	Nombre de cycles de sollicitation au moment où l'angle de phase atteint une valeur maximale
$N_{f\Delta\phi}$	Nombre de cycles de sollicitation au moment où l'écart de l'angle de phase pour un des extensomètres par rapport à la moyenne des trois est supérieur à 5°
$N_{f\Delta\varepsilon ax}$	Nombre de cycles de sollicitation au moment où l'écart est de plus de 25% entre la déformation d'un des extensomètres par rapport à la valeur moyenne
$N_{f50\%}$	Nombre de cycles correspondant à une perte de 50% de la norme du module complexe initial ($\lvert E^*_0 \rvert$)
$N_{fII\text{-}III}$	Nombre de cycles marquant la transition entre les phases II et III
p	Porosité initiale de l'enrobé bitumineux (en mm^3)
P	Période ou plaque d'enrobé bitumineux
p.	Page
P_{atm}	Pression atmosphérique
R^2	Coefficient de détermination
s	Écart-type pour un échantillon
S	État sec ou section d'une plaque d'enrobé bitumineux
(t)	En relation avec le temps
T	Températures testées (en Kelvin), période pour réaliser une oscillation ou éprouvette de type T soumise aux essais thermiques (ET)
↓T	Baisse de température ou phase de refroidissement
↑T	Hausse de température ou phase de réchauffement
T_{coeur}	Température au cœur de l'éprouvette
$T_{consigne}$	Température ciblée par la consigne de l'enceinte thermique
$T_{eutectique}$	Température eutectique d'une solution aqueuse
$T_{évolution}$	Évolution de la température

T_F, T_{fusion}	Température de fusion de la glace
$T_{FC\ mesurée}$	Température de fusion de la glace mesurée au cœur de l'éprouvette
$T_{FS\ mesurée}$	Température de fusion de la glace mesurée à la surface de l'éprouvette
$T_{F\ moy\ mesurée}$	Température de fusion moyenne de la glace mesurée à la surface ou au cœur de l'éprouvette
$T_{F\ théorique}$	Température de fusion théorique de la glace
T_g	Température de transition vitreuse (*glass transition temperature*) du bitume
T_R	Température de référence
$T_{surface}$	Température à la surface de l'éprouvette
T_S, $T_{solidification}$	Température de solidification du liquide
$T_{S\ mesurée}$	Température de solidification du liquide mesurée à la surface ou au cœur de l'éprouvette
$T_{S\ théorique}$	Température de solidification théorique du liquide
T_{SC}	Température de solidification du liquide mesurée au cœur de l'éprouvette
T_{SS}	Température de solidification du liquide mesurée à la surface de l'éprouvette
V_i	Volume des vides interstitiels
Vi_I	Volume initial des vides interstitiels du matériau
$Vi_{Ivolumétrique}$	Volume initial des vides interstitiels déterminé par la méthode volumétrique
Vi_{GD}	Volume des vides interstitiel du matériau suite aux cycles de gel et dégel
Vi_l	Volume des vides interstitiels remplis entièrement de liquide (DS = 100%)
V_l	Volume du liquide absorbé au sein de l'éprouvette (en mm^3)
V_t	Volume total du matériau
V_0	Volume total et initial du matériau
$V_{10°C}$	Volume massique du liquide à 10°C

$V_{23°C}$	Volume massique du liquide à 23°C
W	Énergie dissipée
W_N	Énergie dissipée par cycle au cycle N
$\bar{x}$	Valeur moyenne
X	Nombre (répétitions) de cycle de gel et dégel, nombre d'essai de module complexe ou paramètre considéré pour la fonction sinusoïdale déterminée par la méthode des moindres carrés
X_A	Amplitude pour le paramètre considéré pour la fonction sinusoïdale déterminée par la méthode des moindres carrés
XEE*	Nombre d'essais de module complexe réalisés sur une éprouvette
XGD	Nombre de cycles de gel et dégel
X_k^c	Grandeur, coordonnée selon l'axe y, calculée à l'aide de la fonction sinusoïdale déterminée par la méthode des moindres carrés
X_k^m	Grandeur, coordonnée selon l'axe y, mesurée au point d'acquisition
X_0	Valeur centrée pour le paramètre considéré pour la fonction sinusoïdale déterminée par la méthode des moindres carrés
2S2P1D	Modèle rhéologique composé de deux ressorts (2 *Springs*), deux éléments paraboliques (2 *Parabolics*) et un amortisseur linéaire (1 *Dashpot*)
α	Alpha, coefficient de dilatation-contraction thermique
$\alpha_{refroid}$	Coefficient de dilatation linéique déterminé lors du refroidissement
$\alpha_{réchauf}$	Coefficient de dilatation linéique déterminé lors du réchauffement
β	Beta (paramètre sans dimension)
ε	Epsilon, déformation (m/m)
ε_0	Valeur centrée de la déformation
ε_{01}	Valeur centrée de la déformation dans la direction 1
ε_{02}	Valeur centrée de la déformation dans la direction 2

ε_{0ax}	Valeur centrée de la déformation moyenne de l'éprouvette mesurée par les extensomètre ou jauges
ε_{0axi}	Valeur centrée de la déformation mesurée par un extensomètre ou une jauge
ε_{0rad}	Valeur centrée de la déformation moyenne radiale mesurée par les jauges
ε_{0radi}	Valeur centrée de la déformations radiale mesurée par une jauge
ε_{1}	Déformation de l'éprouvette dans la direction no 1 (axiale)
ε_{1ext}	Déformation axiale moyenne de l'éprouvette mesurée par les extensomètres
ε_{1jau}	Déformation axiale moyenne de l'éprouvette mesurée par les jauges
ε_{2}	Déformation de l'éprouvette dans la direction no 2 (diamétrale)
ε_{2jau}	Déformation mesurée dans la direction no 2 par les jauges radiales
ε_{6}	Amplitude de la déformation pour laquelle la durée de vie correspond à 1 million (10^{+6}) de cycles
ε_{axi}	Déformation axiale de l'éprouvette mesurée par un extensomètre ou une jauge
ε_{axiale}	Déformation axiale de l'éprouvette
ε_{A}	Amplitude de déformation
ε_{Aax}	Amplitude de la déformation moyenne axiale mesurée par les extensomètres ou jauges
ε_{Aaxi}	Amplitude de déformation axiale mesurée par l'extensomètre "i" ou la jauge "i"
ε_{Arad}	Amplitude de la déformation moyenne radiale mesurée par les jauges
ε_{Aradi}	Amplitude de la déformations radiale mesurée par une jauge
ε_{F}	Contraction de l'éprouvette générée par la fusion de la glace
$\varepsilon_{rad1jau}$	Déformation radiale de l'éprouvette mesurée par la première jauge radiale
$\varepsilon_{rad2jau}$	Déformation radiale de l'éprouvette mesurée par la deuxième jauge radiale
ε_{S}	Dilatation de l'éprouvette générée par la solidification du liquide

Rapport-Gratuit.com

ε^{Ther}	Déformation thermique du matériau
Δh_i	Déplacement axial mesuré par un extensomètre
Δh_{nulle}	Variation d'hauteur nulle
ΔT	Variation de température durant un changement de phase ou écart de température
ΔT_C	Variations de température durant un changement de phase mesurée au cœur de l'éprouvette
ΔT_{FS-FC}	Écart entre les températures de fusion mesurées à la surface et au cœur de l'éprouvette
$\Delta T_{F\ théo.-mes.}$	Écart entre les températures de fusion théorique et mesurée
$\Delta T_{surface-cœur}$	Écart de température entre la surface et le cœur de l'éprouvette
ΔT_S	Variations de température durant un changement de phase mesurée à la surface de l'éprouvette
$\Delta T_{S\ théo.-mes.}$	Écart entre les températures de solidification théorique et mesurée
ΔT_{SS-SC}	Écart entre les températures de solidification mesurées à la surface et au cœur de l'éprouvette
ΔV_F	Changement de volume généré par la formation de glace
ΔVi	Variation du volume de vides interstitiels générée par les cycles de gel-dégel
$\Delta V_{l\ (10-23°C)}$	Changement de volume du liquide entre 10 et 23°C
$\Delta\varepsilon_{exti}$	Écart d'amplitude de déformation d'un extensomètre par rapport à la moyenne des trois extensomètres
$\Delta_{\phi i}$	Écart de l'angle de phase pour un des extensomètres par rapport à la moyenne des trois extensomètres
$\alpha_{linéaire}$	Coefficient de dilatation thermique linéique
δ	Delta, paramètre d'éléments paraboliques
η	Eta, viscosité newtonienne

σ	Sigma, contrainte ou écart-type d'une population d'échantillons
σ_0	Valeur centrée de la contrainte
σ_1	Contrainte imposée dans la direction 1 (axiale) de l'éprouvette
σ_A	Amplitude de la contrainte
σ_{nulle}	Contrainte nulle
θ	Theta, température
θ_i	A une température donnée
φ, ϕ	Phi, angle de déphasage (ou angle de phase)
ϕ_C	Évolution de l'angle de phase de l'enrobé bitumineux suite au dommage apparent (D) induit par les essais thermiques (ET) ($=\phi_{E\ X\ GD} - \phi_{E\ 0\ GD}$)
φ_E, ϕ_E	Angle de déphasage (ou angle de phase) entre la déformation et la contrainte dans la direction 1
$\phi_{E\ X\ GD}$	Angle de phase de l'enrobé après un nombre donné de cycles de gel et dégel (X GD)
$\phi_{E\ 0\ GD}$	Angle de phase de l'enrobé à l'état sain, soit avant la réalisation de cycles de gel et dégel (0 GD)
φ_X, ϕ_X	Angle de déphasage pour le paramètre considéré pour la fonction sinusoïdale
ϕ_{Emax}	Angle de phase maximal atteint pendant l'essai de fatigue
$\phi_{\varepsilon ax}$	Angle de phase de la déformation moyenne mesurée par les extensomètres ou jauges
$\phi_{\varepsilon axi}$	Angle de phase pour la déformation axiale mesurée par un extensomètre ou une jauge
$\phi_{\varepsilon rad}$	Angle de phase de la déformation radiale moyenne mesurée par les jauges
$\phi_{\varepsilon radi}$	Angle de phase de la déformation radiale mesurée par une jauge
ϕ_σ	Angle de phase de la contrainte
ϕ_ν	Angle de phase entre la déformation de la direction 1 et celle de la direction 2

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

L

§	Section
τ	Tau, temps caractéristique (ou de relaxation), dont la valeur varie avec la température, est relatif à la viscosité du matériau (s)
τ_E	Tau, temps caractéristique (ou de relaxation), dont la valeur varie avec la température, relatif au module complexe de l'enrobé bitumineux (s)
τ_0, τ_{E0}	Tau à la température de référence (T_R) (s)
π	Pi (valeur de 3,14159265359…)
μ	Facteur de masse
$\mu\varepsilon$, μdef	Micro déformation (μm/m)
υ^*	Coefficient de Poisson complexe
$\lvert\nu^*\rvert$	Norme du coefficient de Poisson complexe
ω	Oméga, pulsation (= $2\cdot\pi\cdot$Fr)
γ	Facteur de forme qui dépend des dimensions de l'éprouvette
&	Esperluette, et
Σ	Sommation
ΣW	Énergie dissipée totale

UNITÉS DE BASE

Longueur

km	kilomètre
m	mètre
cm	centimètre
mm	millimètre
µm	micromètre

Aire

m^2	mètre carré

Volume

m^3	mètre cube
m^3	centimètre cube
mm^3	millimètre cube

UNITÉS DE MASSE

Masse

kg	kilogramme
g	gramme

Masse volumique

g/cm^3	gramme par centimètre cube

UNITÉS CALORIFIQUES

Température

°C	degré Celsius
K	Kelvin
°F	degré fahrenheit

UNITÉS MÉCANIQUES

Angle plan

°	degré

UNITÉS DE MESURE DE L'ACIDITÉ

Activité chimique

pH	potentiel hydrogène

UNITÉS DE TEMPS

Temps

h	heure
min	minute
s	seconde
d	jour
sem	semaine

Énergie, travail, quantité de chaleur

J	Joule

Puissance

kW	kilowatt

Contrainte, pression

MPa	mégapascal
kPa	kilopascal
Pa	pascal

Fréquence

Hz	hertz

Force

kN	kilonewton
N	newton

Force électromotrice

V	volt

Résistance et conductance électriques

Ω	ohm

INTRODUCTION

Les chaussées bitumineuses s'adaptent bien à la plupart des conditions de trafic. Sur les 29 000km de routes gérés par le ministère des Transports du Québec (MTQ), 94% sont constituées de chaussées bitumineuses, 4% de chaussées en béton de ciment et le reste étant des chaussées non revêtues en matériaux granulaires (Transports Québec, 2010). Au Québec, le revêtement bitumineux repose habituellement sur une structure constituée de matériaux granulaires non liés qui reposent à leur tour sur le terrain naturel. Notamment, une large proportion des chaussées québécoises est localisée dans la vallée du St-Laurent dont le terrain naturel est constitué de dépôts d'argile et de silt souvent sensibles au gel (St-Laurent, 2012). Également, au Québec, pendant l'hiver, le gel progresse jusqu'à une profondeur de 1,2 à 3,0m, ce qui est nettement supérieur à l'épaisseur moyenne de 0,9m de la structure globale de la chaussée bitumineuse. Alors, le terrain naturel est soumis au gel, qui est susceptible de produire des lentilles de glace, ce qui se traduit par un gonflement et des soulèvements différentiels du revêtement bitumineux. Ensuite, la chaussée est soumise à des dégels partiels en période hivernale et à un dégel complet au printemps. Dès lors, la glace se transforme en eau, ce qui engendre des pertes de capacité portante des matériaux et pouvant conduire à des dégradations importantes à la chaussée. En effet, des relevés dans les pistes de roues, pendant trois ans sur deux sites d'observation au Québec, indiquent qu'en moyenne 90% des dommages annuels se produisent lors de ces dégels (Transports Québec, 2003a). Cet endommagement est directement relié aux conditions sévères qui prévalent dans la chaussée pendant la période de gel et dégel. Ces conditions sont :

1) précipitations de pluie et fontes de neige générant une saturation partielle des matériaux bitumineux et de la structure de chaussée (sollicitations climatiques) ;
2) présence de sel déverglaçant liée à l'entretien hivernale (sollicitations chimiques) ;
3) passages de véhicule lourd (sollicitations mécaniques) ;
4) variations de températures engendrant la création de déformations et de contraintes au sein du revêtement en raison des dilatations-contractions thermiques de celui-ci (sollicitations climatiques) ;

5) présence de cycles de gel-dégel générant la création de pressions internes en raison de la formation de glace (sollicitations climatiques).

Bien que l'ensemble de la chaussée soit affecté par ces conditions, le présent ouvrage se concentre tout singulièrement sur l'influence de ces conditions sur l'endommagement et le comportement mécanique de l'enrobé bitumineux composant le revêtement. À cet effet, le premier chapitre effectue une revue de la littérature portant sur deux grands thèmes. Primo, cela porte sur les sollicitations externes (mécaniques, climatiques et chimiques) qui prévalent au Québec en période de gel et dégel, et qui dégradent l'enrobé bitumineux. Secundo, il est question des caractéristiques physiques de l'enrobé bitumineux qui affectent sa durabilité, ses comportements mécaniques (viscoélastique linéaire et en fatigue) et thermomécaniques (coefficient de dilatation-contraction thermique).

Par ailleurs, un minutieux travail expérimental de laboratoire a été réalisé en vue de vérifier l'influence des conditions sévères sur la dégradation et le comportement de l'enrobé bitumineux. Ce travail expérimental a été réalisé au sein du Laboratoire des Chaussées et Matériaux Bitumineux (LCMB) de l'École de technologie supérieure (ETS). Plus particulièrement, le second chapitre est consacré à la présentation de ce programme expérimental. Il présente l'enrobé bitumineux testé, la préparation des éprouvettes d'enrobé, les conditions sévères retenues, les dispositifs expérimentaux et les différents types d'essais réalisés.

Le troisième chapitre traite des essais thermiques réalisés sur les éprouvettes d'enrobé bitumineux. Lors de ces essais thermiques, l'étude porte sur l'incidence de :

1) l'état (sec et partiellement saturé) de l'enrobé bitumineux ;
2) la présence de sel de déverglaçage (saumures à diverses concentrations) ;
3) les variations de température ($\Delta\theta$) ;
4) les cycles de gel et dégel (GD) sur l'évolution des propriétés (variations thermiques et déformations linéiques) de l'enrobé bitumineux.

Ensuite, les éprouvettes d'enrobé sont soumises à des essais mécaniques, de faibles amplitudes de déformation et sous chargement cyclique sinusoïdal, afin d'évaluer l'évolution de leur rigidité et en conséquence, l'évolution de leur endommagement suite aux essais thermiques qui incluent des cycles de gel et dégel. Plus précisément, il s'agit d'essais de module complexe qui caractérise le comportement de l'enrobé dans le domaine viscoélastique linéaire. À cet effet, le quatrième chapitre est consacré à l'analyse des résultats expérimentaux de ces essais. Ensuite, les résultats expérimentaux et le modèle rhéologique 2S2P1D sont utilisé afin de simuler le comportement de l'enrobé bitumineux selon les divers états : sec et partiellement saturé en eau ou en saumure. Cela permet d'évaluer l'effet de ces liquides et leur transformation en glace sur le comportement de l'enrobé bitumineux.

Le cinquième chapitre est consacré à l'étude du comportement à la fatigue de l'enrobé bitumineux suivant deux états : sec et partiellement saturé en eau. La comparaison des modules initiaux, des droites de fatigue (valeurs des pentes et ε_6) et des dommages menant à la rupture de l'enrobé bitumineux est effectuée. L'utilisation d'un essai de fatigue dit homogène et de la méthode DGCB permettent de se soustraire assez aisément aux effets biaisant (thixotropie du bitume, non linéarité et échauffement de l'enrobé bitumineux) afin d'obtenir la perte de rigidité attribuable essentiellement à l'endommagement par fatigue. Ceci permet de définir un dommage menant à la rupture du matériau qui est indépendant de l'amplitude de déformation. Ainsi, le dommage menant à la rupture est intrinsèque au matériau. Pour plus de rigueur, ce dommage a été mis en relation avec la teneur en vides du matériau.

Ensuite, la conclusion effectue un retour succinct sur les résultats des essais réalisés dans le cadre du programme expérimental, soient des essais thermiques, de module complexe et de fatigue. De plus, les causes à l'origine des résultats expérimentaux sont exposées.

Pour terminer, des recommandations sont proposées afin d'améliorer le programme expérimental et la qualité des mesures.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Les enrobés bitumineux et ses constituants

1.1.1 Définition

Un enrobé bitumineux est un mélange de granulats enrobé de bitume. Pour sécher les granulats et fluidifier le bitume, afin d'obtenir un mélange homogène et maniable, les matériaux sont chauffés avant l'enrobage, d'où l'expression d'enrobé à chaud (MTQ, 2005).

1.1.2 Types d'enrobés bitumineux

Il existe plusieurs types d'enrobés bitumineux, dont la granulométrie (répartition et dimension des particules), la classe de bitume et les proportions granulats-bitume varient suivant l'application ciblée. Les enrobés sont utilisés pour les travaux de rapiéçage manuel ou mécanisé et comme couche de correction, unique, de base ou de surface au niveau du revêtement de la chaussée bitumineuse. Le choix de l'enrobé bitumineux, et de ses constituants, est dicté par (Transports Québec, 2012a) :

- le type de route ;
- le volume de véhicules ;
- le climat (3 zones définies au Québec) ;
- l'usage (type de couche) ;
- les performances particulières (à l'orniérage, ..., renforcement structural) ;
- l'épaisseur de la couche à mettre en œuvre.

Les enrobés québécois sont formulés actuellement à l'aide de la formulation LC (Laboratoire des Chaussées) du ministère des Transports du Québec (norme 4202 : MTQ, 2007a).

Rapport-Gratuit.com

1.1.3 Propriétés essentielles de l'enrobé bitumineux

Les enrobés bitumineux doivent être résistant au trafic (sollicitations mécaniques), aux intempéries et aux agents atmosphériques (sollicitations climatiques), à la pollution et aux produits de déverglaçage (sollicitations chimiques) et aux soulèvements générés par la formation de glace et de lentilles de glace au sein de la structure de la chaussée (sollicitations climatiques). Notamment, les enrobés doivent (MTQ, 2005) :

- supporter les charges dues au trafic ;
- être confortables ;
- sécuritaires ;
- protéger les diverses couches de la structure de la chaussée contre les diverses sollicitations.

Dans ce contexte, les propriétés essentielles à obtenir pour les enrobés bitumineux sont (MTQ, 2005) : résistances à l'orniérage, à la fissuration par fatigue et thermique, à l'eau (désenrobage), au vieillissement (oxydation) et à la perte de granulats (arrachement), tout en offrant une bonne adhérence pneu-chaussée lorsqu'ils composent la couche de surface du revêtement.

1.1.4 Principales caractéristiques des enrobés bitumineux

Lors de leur mise en place, les enrobés contiennent des vides qu'il faut bien contrôler car ils jouent un rôle important (Lelièvre, 1994). Les vides sont exprimés en termes de volume, il faut alors quantifier les principaux constituants selon leur masse et le volume qu'ils occupent. Usuellement, les vides, bitume et granulats occupent de 2 à 9%, 10 à 15% et 76 à 88% respectivement du volume total des enrobés bitumineux qui sont formulés et mis en placent au Québec. Le bitume et les granulats constituent respectivement de 3 à 6% et 94 à 97% de la masse totale de l'enrobé bitumineux.

1.1.5 Le bitume

1.1.5.1 Généralités

Le bitume, ou liant hydrocarboné, est obtenu par raffinage des pétroles bruts. Le bitume est constitué essentiellement d'hydrocarbures, soit d'éléments de carbone et d'hydrogène, et dans une moindre mesure, de soufre, d'oxygène et d'azote. Des traces de fer, vanadium, nickel, aluminium, silicium et de sodium y sont également présentes au sein du bitume (Corté et coll., 2004).

1.1.5.2 Principales caractéristiques d'un bitume

Le bitume contribue à la cohésion, à la durabilité et au comportement viscoélastique de l'enrobé. La méthode de formulation LC a comme principe de maximiser la teneur en bitume des enrobés afin qu'ils soient résistants à la fissuration, au désenrobage et à l'arrachement, et ainsi, assurer leur durabilité et garantir une excellente durée de vie utile des revêtements (Transports Québec, 1997). Des bitumes modifiés au polymère sont utilisés pour obtenir une grande durabilité des enrobés (Transports Québec, 2001). La répercussion de la teneur en bitume sur les propriétés de l'enrobé est illustrée à la Figure 1.1.

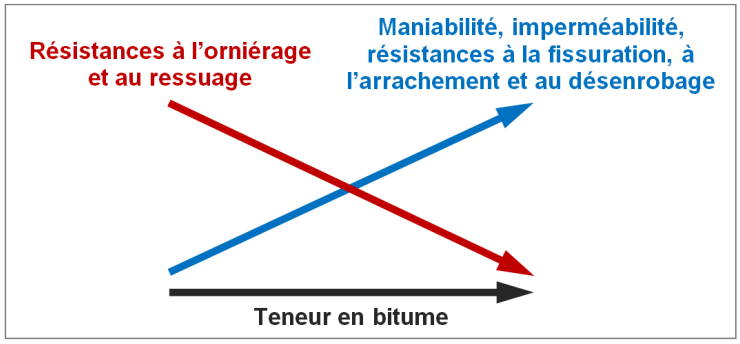


Figure 1.1 Teneur en bitume et propriétés de l'enrobé
Adaptée de Langlois (2006, diapositive #7)

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

1.1.5.3 Caractérisation et classification des bitumes

Pour classifier un bitume, on cherche à quantifier sa cohésion suivant des températures de référence (classification européenne) ou, autrement, à déterminer la plage de températures à des niveaux de cohésion de référence (classification *Superpave*[1] du programme *SHRP*[2]). Pour les deux approches, les propriétés du bitume sont établies suivant des étapes de conditionnement qui auront pour objectif de simuler l'évolution potentielle de la rhéologie du bitume au cours de la fabrication, mise en œuvre et en service des enrobés (bitume non vieilli, vieilli à court et à long terme). Au Québec, c'est la classification *Superpave* qui est utilisée (MTQ, 2012a). Cette classification repose sur des essais dits rhéologiques. En particulier, les essais rhéologiques permettent de classifier un bitume en déterminant les limites de températures, désignées classe de performance (*Performance Grade*, PG), à l'intérieur desquelles le bitume conserve un comportement adéquat (Tableau 1.1).

Tableau 1.1 Caractérisation des bitumes selon les essais rhéologiques

Essai rhéologique	Caractéristique	Vieillissement [A]			Température d'essai	Exigence
		NV	CT	LT		
Rotational viscometer (RV)	Maniabilité [B]	X			135 et 165°C (Très hautes)	Norme 4101* AASHTO, 2004
Dynamic Shear Rheometer (DSR)	Résistance à l'orniérage	X	X		52 à 76°C (Haute, *High*)	Norme 4101* AASHTO, 2009a
Bending Beam Rheometer (BBR)	Résistance à la fissuration thermique	X [C]		X	-36 à -18°C (Basse, *Low*)	Norme 4101* AASHTO, 2008
Multiple Stress Creep Recovery (MSCR)	Résistance à la fissuration par fatigue		X		52 à 64°C (Haute, *High*)	Norme 4101* AASHTO, 2010a

[A] Bitume non vieilli (NV) : nommé bitume d'origine ;
Bitume vieilli à court terme (CT) : soumis au *Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT)* (AASHTO, 2009b) ;
Bitume vieilli à long terme (LT) : soumis au *Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT)* et au *Pressure Aging Vessel (PAV)* (AASHTO, 2009b ; 2012).
[B] Ne sert pas à la classification du bitume, mais à la détermination des températures de malaxage et compactage.
[C] Pour le contrôle du bitume et non pour sa classification.
* Exigence spécifiée dans MTQ (2012a).

---

1 Abréviation de "*Superior Performing Asphalt Pavements*".

2 Sigle de "*Strategic Highway Research Program*".

Le PG d'un bitume est caractérisé par une température haute (*High*, H) et basse (*Low*, L) sous la nomenclature suivante : PG H-L. L'intervalle entre les températures haute et basse de caractérisation permet d'évaluer la susceptibilité thermique du bitume. Généralement, la susceptibilité thermique des bitumes non modifié est de l'ordre de 86°C tandis que celle des bitumes aux polymères est égale ou supérieure à 92°C (Langlois, 2001). Suivant sa classification, le choix d'un bitume est arrimé aux conditions climatiques propres à la zone d'utilisation projetée. Notamment, ces essais évaluent, à différents stades de vieillissement, le comportement rhéologique du bitume. Le bitume doit conserver en service des performances acceptables en fonction de son vieillissement potentiel généré par l'évaporation de sa fraction volatile de ses constituants et de son oxydation.

Bien que les essais rhéologiques permettent de connaître les propriétés du bitume relatives à sa performance à l'orniérage, à la fissuration thermique et à la fatigue, d'autres propriétés sont fondamentales à connaître afin de réaliser la formulation des enrobés, d'assurer la sécurité des travailleurs et de bonifier la durabilité des enrobés bitumineux. Ces propriétés sont évaluées sur le bitume non vieilli et selon des essais dits essentiels, complémentaires et supplémentaires (Tableau 1.2).

En particulier, les essais supplémentaires permettent de vérifier la recouvrance d'élasticité et l'adhésivité passive des bitumes qui sont des propriétés importantes quant à la durabilité des enrobés bitumineux. La recouvrance d'élasticité est définie comme étant la capacité d'un bitume à récupérer sa forme initiale après avoir été étiré puis coupé. Une recouvrance élastique élevée confirme que le bitume a été modifié pour lui conférer des propriétés élastomériques. Cet essai sert à prévoir à long terme le comportement du bitume face aux variations de température (Carter et coll., 2010a). Alors, la recouvrance du bitume joue un rôle direct quant à la durabilité de l'enrobé en période de gel-dégel. L'adhésivité passive du bitume est vérifiée en immergeant un mélange de granulat (5-10mm) enrobés de bitume dans de l'eau à la température de la pièce et mis en agitation pendant 24 heures. Après immersion, le taux d'enrobage résiduel est évalué visuellement. Cet essai permet d'évaluer la résistance à l'eau, soit au désenrobage, du bitume. L'adhésivité passive des bitumes est grandement

influencée par le brut utilisé et le procédé de fabrication employé (Paradis, 2006). Une adhésivité passive élevée permet de limiter l'infiltration d'eau à l'interface bitume-granulat.

Tableau 1.2 Caractérisation des bitumes selon les essais essentiels, complémentaires et supplémentaires

	Essai / caractéristique	But	Exigences
Essentiels	Pénétrabilité / Consistance	La pénétrabilité à l'aiguille permet de déterminer la consistance du bitume. Avant, cet essai servait à la classification du bitume.	ASTM, 2013
	Densité / Masse volumique	Pour la formulation LC, utilisant une méthode volumique, il est essentiel de connaître la masse volumique du bitume.	Norme 4101* ASTM, 1997
Complémentaires [A]	Point éclair / Point d'inflammation	Assurer la sécurité des travailleurs en vérifiant la température la plus basse à laquelle le bitume émet suffisamment de vapeurs pour former un mélange gazeux qui s'enflamme sous l'effet d'une source d'énergie calorifique (T > 230°C).	Norme 4101* ASTM, 2012
	Viscosité Brookfield / Maniabilité, écoulement	Obtenir une manutention et pompage adéquats (viscosité < 3Pa•s à 135°C).	Norme 4101* AASHTO, 2004
	Perte d'hydrocarbures volatils / Évaporation	Limiter le vieillissement lors de l'enrobage et la perte d'hydrocarbures volatils (< 0,6 ou 1,0%).	Norme 4101* AASHTO, 2009b
Supplémentaires [B]	Teneur en cendres / Teneur en matières insolubles	Éviter que le bitume ne soit modifié par une substance, matière insoluble, qui ne le bonifie pas.	Norme 4101* LC 25-008**
	Stabilité au stockage / Décantation	Note C.	Norme 4101* LC 25-003**
	Recouvrance d'élasticité / Propriété élastométrique	Il vérifie la présence d'élastomères (résultat ≥ 40 ou 60%) et est réalisé sur tous les bitumes dont l'intervalle (L-H) est ≥ 92°C.	Norme 4101* LC 25-005**
	Résistance au désenrobage / Résistance à l'eau, au désenrobage ou adhésivité passive	Cet essai permet d'évaluer l'aptitude d'un bitume ou émulsion bitumineuse à adhérer de façon durable au granulat en présence d'eau (enrobage ≥ 95%).	Norme 4101* LC 25-009**

[A] Nommés ainsi par Paradis (2006).
[B] Nommés ainsi par Transports Québec (2001) ou d'essais additionnels par Paradis (2006).
[C] Au Québec, le bitume est modifié par le producteur au moment de sa fabrication. Le bitume modifié peut être transporté sur des centaines de kilomètres avant d'être entreposé dans le réservoir de la centrale d'enrobage. Il est donc essentiel de s'assurer que le bitume et le modifiant sont bien intégrés l'un à l'autre et que le liant est homogène (Langlois, 2001).
* Exigence spécifiée dans MTQ (2012a).
** Exigences regroupées dans MTQ (2013).

1.1.6 Les granulats

1.1.6.1 Généralités

Un granulat représente un ensemble de particules de matière solide, provenant de roches meubles ou consolidées ou de matériaux recyclés. Au Québec, les granulats utilisés actuellement dans les enrobés bitumineux sont tous issus de l'un des trois types de roches qui forment la croûte terrestre, soit des roches ignées, métamorphiques ou sédimentaires.

1.1.6.2 Caractéristiques

Les granulats fournissent à l'enrobé sa résistance au cisaillement, soit sa stabilité dimensionnelle (Moughabghab, 1994). En effet, les granulats de diverses classes dimensionnelles sont combinés afin d'obtenir un enrobé bitumineux au squelette granulaire compact, résistant à l'orniérage, sans être trop compact pour permettre l'insertion de volumes adéquats de bitume et de vides nécessaires à la durabilité de l'enrobé bitumineux. Au Québec, les granulats, composants les enrobés, peuvent être désignés, de gros granulats (GG, particules de tailles > 5mm, classes 5-10 et 10-14mm), de granulats fins (GF, particules de taille < 5mm) et de filler minéral (FM, particules de taille < 630µm) (BNQ, 2002). Également, les granulats sont sélectionnés afin de répondre aux caractéristiques spécifiques de la couche bitumineuse à mettre en œuvre.

1.1.6.3 Caractérisation

Au Québec, la qualité des granulats est évaluée sur la base de leurs caractéristiques intrinsèques, de fabrication et complémentaires (BNQ, 2002 ; MTQ, 2007a). Le niveau de qualité exigé pour les granulats est fonction :

- du type de route (autoroute, collectrice, etc.),
- du niveau d'exposition au trafic (nombre de véhicules),
- du climat (pluie, cycles de gel-dégel, etc.).

À cet effet, les granulats de la couche de surface sont nettement plus exposés aux intempéries que ceux composant l'enrobé d'une couche de base. Le Tableau 1.3 présente la majorité des caractéristiques évaluées au Québec sur les granulats utilisés pour la confection des enrobés bitumineux.

Tableau 1.3 Essais de caractérisation pour les granulats des enrobés bitumineux
Adapté de BNQ (2002, p. 12, 13, 57 et 58)

Caractéristiques		Équipement principal	Exigence	Granulat [A]		
				GG	GF	FM [B]
Intrinsèques	Résistance à l'usure, à l'attrition	Micro-Deval	LC 21-070* LC 21-101*	X	X	
	Résist. fragmentation, abrasion, chocs	Los Angeles	LC 21-400*	X		
	Résistance à la friabilité	Micro-Deval	LC 21-080*		X	
Fabrication	Fragmentation [C]	---	LC 21-100*	X		
	Particules plates	Gabarits, vernier	LC 21-265*	X		
	Particules allongées			X		
Complémentaires	Propreté (particules < 80µm) [D]	Tamis	CSA-A23.2-5A**	X		
	Teneur en mottes d'argile [E]	Tamis	CSA-A23.2-3A**		X	
	Teneur en particules < 5µm [F]	Hydromètre	BNQ, 1987		X	
	Coefficient d'écoulement [G]	Cône	LC 21-075*		X	
	Coefficient de polissage par projection [H]	Jet d'abrasifs	LC 21-102*	X		
Essentielles ***	Granulométrie	Tamis	LC 21-040*	X	X	X
	Densités et absorption	Panier à mailles ou pycnomètre	LC 21-065*		X	
			LC 21-066*		X	
			LC 21-067*	X		

A GG : gros granulats (> 5mm) ; GF : granulats fins (< 5mm) ; FM : filler minéral (< 630 µm).
B Il ne doit pas contenir de matières organiques et avoir un indice de plasticité supérieur à 4 (ASTM, 2009).
C Pourcentage de particules ayant au moins une face fragmentée.
D S'applique à chaque classe granulaire.
E Effectué sur le retenu du tamis 80µm à l'issue d'un lavage.
F Pourcentage établi par rapport au tamisât du tamis 5mm.
G Pour les gros granulats de caractéristiques intrinsèques de catégorie 1 ou 2 (couche de surface).
H Pour les granulats utilisés dans les couches de roulement et unique.
* Exigences regroupées dans MTQ (2013).
** Exigences regroupées dans CSA (2004).
*** Essentielles pour la formulation de l'enrobé bitumineux (MTQ, 2005).

Caractéristiques intrinsèques – Les caractéristiques intrinsèques d'un granulat sont reliées à la nature même de la roche mère. Ces caractéristiques sont donc inchangeables. Elles

comprennent les résistances à l'usure, à la fragmentation et aux agents atmosphériques, notamment leurs propriétés mécaniques et pétrographiques. Les granulats riches en minéraux argileux, ferromagnésien, tendres ou d'altération sont sensibles à l'usure, à l'attrition (Chevassu, 1969 ; Robert, 2010). En général, plus le minéral constituant la roche est dur[3], comme le quartz et le feldspath, meilleure est sa résistance à l'usure, à l'attrition. Notamment, les granites, volcanites, trapps et certains grès donnent de bons résultats. Les calcaires ont une performance variant de bonne à passable selon s'ils contiennent ou pas des minéraux argileux. En outre, les roches à grains fins résistent bien aux chocs[4], à la fragmentation, ce qui n'est pas le cas pour les roches à grains grossiers. Il faut mentionner que la production, la mise en place et le compactage des enrobés génèrent un frottement et des chocs mutuels entre les particules, ce qui génèrent leur usure et leur fragmentation (Robert, 2010). Également, une bonne résistance aux chocs est recherchée afin de résister à la dégradation générée par les pneus avec ou sans crampons (clous) (Aïtcin et coll., 1992). Bien que la résistance aux cycles de gel et dégel ne soit pas évaluée, il est couramment admis que les granulats qui présentent de bonnes caractéristiques intrinsèques résistent bien aux cycles de gel-dégel (Langlois, 2001). Les granulats sont également peu sensibles aux effets climatiques comme le gel et sont généralement résistants aux éléments chimiques rencontrés sur une chaussée comme le sel de déveglaçage (Corté et coll., 2004).

Caractéristiques de fabrication – Ces caractéristiques vont plutôt dépendre de l'exploitation et du processus de production des matériaux, tel que l'angularité (bien arrondie, arrondie, subarrondie, subangulaire ou angulaire) et la forme des particules (cubique, allongée ou aplatie) (Aïtcin et coll., 1992). Ces caractéristiques sont donc modifiables, dans une certaine mesure, en jouant sur les procédés d'exploitation et d'élaboration. Le procédé de fragmentation permet d'augmenter l'angularité des particules. Plus exactement, les grains anguleux, plutôt que ceux arrondis, améliorent l'angle de

---

[3] La dureté d'un minéral est sa capacité de se laisser rayer par un autre minéral ou matière. La dureté est établie en se référant à l'échelle de Mohs.

[4] Un matériau est tenace s'il résiste bien aux chocs. S'il se brise facilement, il est fragile.

frottement interne, la résistance à l'orniérage des enrobés bitumineux et l'adhérence pneu-chaussée (Corté et coll., 2004). Les particules plates et allongées risquent de se fragmenter lors de la production, de la mise en place et du compactage des enrobés et plus tard, sous l'effet du trafic (Corté et coll., 2004).

Caractéristiques complémentaires – Ces caractéristiques sont nécessaires pour s'assurer que les granulats répondent à des besoins particuliers pour l'usage prévu : bétons, enrobés, etc. Plus spécifiquement, ces caractéristiques sont celles qui ont une incidence sur la performance de l'enrobé, mais qui ne sont pas pris en compte lors de la classification des granulats. Pour les gros granulats, l'essai de propreté[5] (Tableau 1.3) quantifie par lavage la teneur en particules inférieures à 80µm. La quantité de particules inférieures à 80µm doit être limitée car celles-ci, salissent, adhèrent aux plus grosses. Alors, ces particules fines (< 80µm) peuvent créer un écran entre le bitume et les granulats générant ainsi une faible adhérence (ou adhésivité active) entre les deux. Par ailleurs, l'essai de détermination de particules inférieures à 5µm permet de quantifier la teneur en argile (Tableau 1.3). L'argile adhère facilement aux granulats et couvre une surface importante en raison de la dimension très faible de ces particules, ce qui affecte également le lien bitume-granulat (adhésivité active). De plus, en présence d'eau, l'argile possède un caractère gonflant et une affinité avec celle-ci, ce qui est néfaste pour la stabilité et la durabilité des enrobés. L'état de surface lié à la pétrographie, la porosité et la microrugosité des particules ne peuvent être facilement déterminés par une mesure directe (Corté et coll., 2004). Cependant, l'écoulement de granulats fins au travers d'un cône, soit la détermination du coefficient d'écoulement (Tableau 1.3), permet d'apprécier l'effet combiné de la forme, l'angularité, l'état des arêtes (vives ou émoussées) et la rugosité de surface (lisse ou rugueuse) des particules minérales (Corté et coll., 2004). Plus le coefficient d'écoulement est élevé, plus le matériau est

---

[5] Pour cet essai, il n'y a pas de distinction effectuée entre les particules fines non adhérentes (libres) de celles qui ne le sont (adhérentes) avec les plus grosses. Toutefois, il serait préférable de mesurer la quantité de particules qui adhèrent aux granulats. Notamment, il semble que les gros granulats ne devraient pas contenir plus de 0,4% de fines adhérentes (Picard, 2001).

anguleux et rugueux, augmentant ainsi l'adhérence bitume-granulat, l'angle de frottement interne et la résistance à l'orniérage de l'enrobé bitumineux. De plus, le coefficient de polissage par projection (Tableau 1.3) est déterminé après avoir fait la projection d'un flux d'eau et d'abrasifs sur des particules minérales de calibre 5-10mm. Ensuite, le coefficient de frottement est mesuré à l'aide du pendule britannique. Le principe de l'essai est de fournir une mesure relative caractérisant l'état limite de polissage des gros granulats à l'action du trafic. Ceci permet de quantifier, dans une certaine mesure, l'adhérence résiduelle pneu-chaussée après polissage afin d'assurer la sécurité des usagers.

Autres caractéristiques – Ces caractéristiques sont nécessaires à la formulation des enrobés.

1.1.7 Les vides dans l'enrobé bitumineux

1.1.7.1 Généralités

Les vides (interstitiels) constituent les espaces laissés libres entre les granulats enrobés dans l'enrobé bitumineux compacté (MTQ, 2005). Dans les enrobés, les vides sont relativement grossiers, de l'ordre du millimètre, soit d'un diamètre moyen compris entre 0,3 et 1,9mm (Masad et coll., 2002, 2006 ; Torres, 2004 ; Mercado, 2007 ; Kassem, 2008 ; Mauduit et coll., 2010 ; Walubita et coll., 2012 ; Alvarez et coll., 2012).

1.1.7.2 Caractéristiques

Les vides (interstitiels) affectent grandement la performance et la durabilité de l'enrobé (Moughabghab, 1994). En effet, au niveau de l'orniérage, il est nécessaire d'avoir une teneur en vides : 1) d'au maximum de 9 à 10%, sinon l'enrobé est sous compacté et susceptible à un tassement par post-compactage liés au passage des véhicules (orniérage par consolidation) ; 2) d'au moins 2%, sinon l'enrobé est surcompacté et est susceptible au ressuage du bitume et à la déformation viscoplastique lors du passage des véhicules, soit à l'orniérage par fluage (Lamothe, 2004 ; Meunier, 2012). Au niveau de la rigidité et de la résistance à la fatigue, la hausse de la teneur en vides s'effectue au détriment de ses propriétés (Moutier et coll., 1988 ;

Rapport-Gratuit.com

Chauvin, 1990 ; Moutier, 1991 ; Harvey et coll., 1996). Au niveau de la durabilité, la teneur en vides doit être limitée à une valeur maximale variant de 6,5 à 8,5% afin de limiter les infiltrations d'air et d'eau au sein des enrobés[6] (Cooley et coll., 2001 ; Vivar et coll., 2006 ; Mallick et coll., 2001). En considérant ces aspects, le Cahier des charges et devis généraux (CCDG) spécifie que le volume en vides (V_i) de l'enrobé composant une couche bitumineuse doit se situer entre 2 et 7% (MTQ, 2012b).

1.1.8 Caractérisation des enrobés bitumineux selon les essais mécaniques

Au Québec, seule la caractérisation des enrobés bitumineux selon les niveaux 1 et 2 (Tableau 1.4) est exigée contractuellement (Paradis, 2000). À cet effet, les enrobés doivent posséder des caractéristiques qui rencontrent des exigences bien précises aux niveaux de la maniabilité, tenue à l'eau et résistance à l'orniérage.

La caractérisation des enrobés selon les niveaux 3 à 5 (Tableau 1.4) n'est pas exigée au Québec afin de réaliser la conception d'une chaussée bitumineuse. En effet, la conception des chaussées bitumineuses québécoises s'effectue à l'aide d'un calcul structural qui repose sur la méthode empirique[7] de l'American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO, 1993). Alors, la méthode de conception se fonde sur une approche statistique de régression multiple et vise à établir des relations de causes à effets sans requérir la connaissance exacte des caractéristiques et la parfaite compréhension des principes physiques impliqués (Agal, 2005).

De nouveau, la résistance aux cycles de gel et dégel n'est pas évaluée directement lors de la caractérisation des enrobés bitumineux. Toutefois, la tenue à l'eau (évaluation de la

---

[6] Enrobés bitumineux composés de gros granulats ≤ 14mm et d'une granulométrie continue.

[7] Méthode basée sur des expériences de comparaison (connaissances historiques) entre le comportement à long terme d'une structure de chaussées et différentes conditions de sollicitations.

résistance au désenrobage et à l'arrachement) peut donner des indices précurseurs quant au degré de performance des enrobés face aux cycles de gel-dégel.

Tableau 1.4 Caractérisation des enrobés bitumineux
Adapté de Delorme et coll. (2007, p. 56) et Paradis (2000, p. 22)

Niv.	Caractéristique	Essai	But	Exigences
1	Maniabilité	Presse à cisaillement giratoire (PCG)	Détermination et évolution du % vides selon le nombre de girations. L'enrobé ne doit pas présenter de ressuage à 200 girations.	MTQ, 2007a LC 26-003*
	Résistance au désenrobage et à l'arrachement	Tenue à l'eau [A]	Comparaison de la stabilité Marshall d'éprouvettes d'enrobés qui ont subi une saturation partielle sous vides et un trempage dans l'eau à +60°C pendant 24h par rapport à celles qui n'ont pas subi de trempage. Le rapport doit être ≥ 70%.	MTQ, 2007a LC 26-001*
2	Résistance à l'orniérage	Orniéreur MLCP	Mesure de la profondeur d'ornières sur plaques d'enrobé compactées à 95%, soumises à un pneu lisse chargé à une température [B] de 52, 58 ou 60°C. L'enrobé ne doit pas présenter de ressuage à 10 000 cycles (aller-retour).	MTQ, 2007a LC 26-400* LC 26-410*
3	Rigidité	Module complexe	Mesure de la rigidité de l'enrobé en variant la température et la fréquence de sollicitation.	LC 26-700*
4	Résistance à la fissuration par fatigue	Fatigue en flexion ou traction-compression	Évaluation de la durée de vie en fatigue en fonction du niveau de force, contrainte, déplacement ou déformation.	---
5	Résistance à la fissuration thermique	Essai de retrait empêché (TSRST)	Évaluation de la fissuration (contrainte et rupture) en fonction de la température.	---

[A] Cet essai ne s'applique pas aux enrobés drainants et exclut les enrobés composés de bitume ayant une recouvrance élastique ≥ 60%.
[B] Température d'essai selon la classe ou plus particulièrement, la température haute (H) du bitume.
* Exigences regroupées dans MTQ (2013).

1.2 Sollicitations externes et dégradations des enrobés bitumineux

1.2.1 Introduction

Sous l'effet des sollicitations externes (mécaniques, climatiques et chimiques), les chaussées bitumineuses sont assujetties à des phénomènes complexes. Il est possible d'y observer des phénomènes mécaniques, thermiques, physiques et chimiques qui apparaissent fréquemment de manière couplée. L'ensemble de ces sollicitations externes finissent par dégrader les

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

enrobés bitumineux. Plus particulièrement, les sollicitations qui prévalent au Québec en période de gel et dégel sont ici présentées.

1.2.2 Sollicitations mécaniques

Lors du passage d'un véhicule lourd, dont le transfert de charge est effectué par l'entremise d'essieux équipés de roue simple ou de roues jumelées, des contraintes de traction et de compression de courte durée sont engendrées selon diverses directions dans les couches de la chaussée (Figure 1.2). Seules les couches bitumineuses, ou matériaux liés, reprennent les efforts de traction. Soulignons que le collage des couches bitumineuses est usuellement réalisé. Après le passage d'un nombre important de véhicules lourds, les fissures par fatigue s'amorcent théoriquement à la base des couches liées (*Bottom-up fatigue cracking*) en raison de la plus forte extension par flexion à cet endroit. Également, les compressions répétées sous le passage des roues créées des déformations permanentes qui induisent un orniérage à la surface de la chaussée.

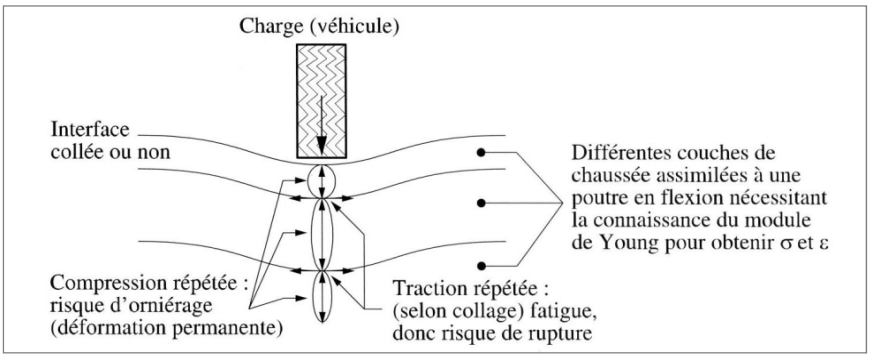


Figure 1.2 Schématisation des sollicitations induites par le trafic
Tirée de Di Benedetto et coll. (2005, p. 77)

Par ailleurs, il faut souligner que la plupart des essieux des véhicules lourds sont équipés de roues jumelées et que lors de leur passage, la chaussée bitumineuse se déforme davantage dans le sens longitudinal que transversal (Huhtala et coll., 1990 ; Peyronne et coll., 1991 ; Chabot et coll., 2010 ; Grellet, 2009 ; Ambassa et coll., 2012). Donc, il devient essentiel de

considérer la déformation longitudinale pour le dimensionnement des chaussées et de réaliser le prélèvement des échantillons dans cette direction pour la caractérisation de l'enrobé.

De plus, au Québec et en période de gel et dégel, l'usage d'abrasifs et la présence de véhicules (< 3000kg) équipés de pneus cloutés (ou à crampons) provoque un autre type de sollicitations mécaniques. Les pneus cloutés génèrent l'usure (polissage de la surface) des granulats, et même occasionnellement la fragmentation des gros granulats ou du mastic qui est fragilisé à basse température, accentuant ainsi le risque de désenrobage et l'arrachement de granulats. Par la suite, les granulats fragmentés ou désenrobés sont délogés plus facilement : phénomène d'arrachement. Finalement, le polissage, le désenrobage et l'arrachement des granulats se traduit par la formation d'ornières d'usure. Également, l'orniérage par usure peut être causé par l'action combinée de pneus réguliers et la présence d'abrasif utilisé pour l'entretien hivernal (Doré et coll., 2009). Toutefois, des essais de laboratoire ont révélé que les pneus cloutés génèrent 100 fois plus d'usure du revêtement que des pneus standards en présence de sel et de sable (Smith, 1979). Usuellement, l'orniérage par usure du revêtement se rencontre sur les routes fortement circulées, les sections de routes comportant des arrêts fréquents et particulièrement, lorsque des granulats calcaires sont utilisés en couche de roulement (AIPCR, 1995). Toutefois, la proportion de véhicules munis de pneus cloutés est actuellement faible au Québec, soit d'environ 3% (SOM, 2013). Alors, l'apparition d'ornières d'usure est donc relativement peu fréquente (AIPCR, 1995).

1.2.3 Sollicitations climatiques

1.2.3.1 Introduction

Les sollicitations climatiques comprennent l'ensemble des phénomènes météorologiques : ensoleillement, température, pression d'air, vent, humidité et précipitations. Toutefois, l'humidité, les précipitations et ces phénomènes connexes sont présentées dans une section distincte : 1.2.4 Sollicitations hydriques. Plus précisément, les sollicitations climatiques engendrent plusieurs effets : 1) changement de la rigidité des matériaux du revêtement bitumineux ; 2) vieillissement et durcissement du bitume ; 3) création de cycles de gel et

dégel ; 4) création de contraintes et déformations au sein du revêtement en raison des dilatations-contractions thermiques qui génèrent de la propagation de fissures et de la fissuration à très basses températures (Di Benedetto et coll., 2005). Plus particulièrement, le coefficient de dilatation-contraction thermique (DCT) des enrobés bitumineux est présenté à la section 1.6.

1.2.3.2 Conditions climatiques qui prévalent au Québec

L'analyse de plusieurs références et les données de deux stations météorologiques ont été examinées en détail afin d'en arriver à un bilan plus précis des conditions climatiques qui prévalent au Québec et qui peuvent influencer la performance du revêtement bitumineux. Les deux stations météorologiques sont celles de Pierre Elliott Trudeau (PET) à Montréal et de Scott près de la ville de Québec. Les données analysées de ces deux stations couvrent les années 1971 à 2000 (Gouvernement du Canada, 2008a, 2008b). La Figure 1.3 illustre les températures mesurées aux deux stations météorologiques de 1971 à 2000.

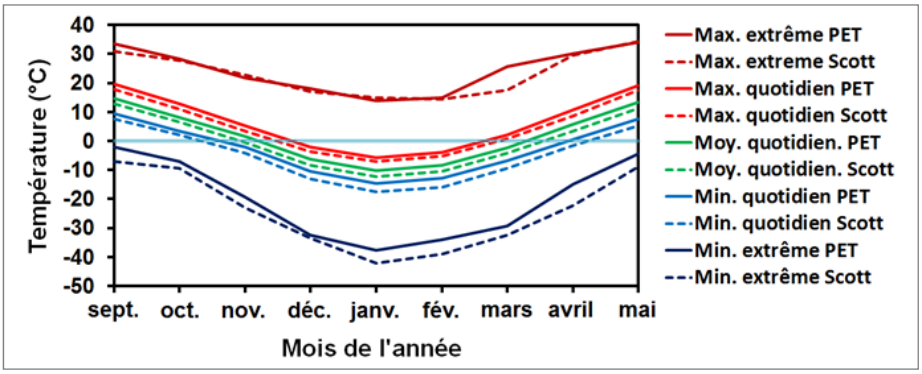


Figure 1.3 Températures mesurées aux deux stations de 1971 à 2000 (Gouvernement du Canada, 2008a, 2008b)

L'analyse des températures[8] minimales extrêmes et minimales quotidiennes des deux stations météorologiques montre que la période de gel-dégel peut s'échelonner des mois de septembre à mai, mais plus particulièrement des mois de novembre à mars respectivement. De novembre à avril, lorsqu'il y a une probabilité élevée de gel et de dégel, soit oscillations de température autour de 0°C (ligne de couleur bleu pâle, Figure 1.3), les températures moyennes minimales et maximales quotidiennes[9] de l'air ambiant sont de -17,6 à +0,6°C et de -7,1 à +10,7°C, et la variation moyenne journalière de température est de 7,4 à 10,7°C.

En hiver, des températures minimales extrêmes de -37,8 et même de -42,0°C ont été enregistrées respectivement aux stations météorologiques de PET et Scott. Le Tableau 1.5 présente le nombre d'événements sous la barre des -20, -25 et -35°C au cours d'une année entre 1971 et 2000 à la station PET (Montréal).

Tableau 1.5 Nombre d'événements sous la barre des -20, -25 et -30°C
au cours d'une année entre 1971 et 2000 à Montréal
(Gouvernement du Canada, 2008a)

Température sous	**Nombre d'événements au cours d'une année**			
	Minimum	**Moyenne**	**Maximum**	**Écart-type**
-20°C	3	12,3	27	5,4
-25°C	0	3,6	11	2,7
-30°C	0	0,4	3	0,9

Fortin (2010) mentionne que les cycles de gel-dégel surviennent généralement au début et à la fin de la saison hivernale, soit : au cours des mois de novembre, mars et avril (Figure 1.3). Usuellement, un cycle de gel-dégel (CGD) est considéré lorsque la température passe sous

---

[8] Les températures facilement accessibles sont celles de l'air à deux mètres du sol et non celles de la surface du revêtement (Tremblay, 2006).

[9] Le choix d'une température minimale et maximale de -17,6°C et de +10,7°C respectivement pour la réalisation de cycle de gel et dégel en laboratoire semble adéquat pour simuler le climat québécois sur l'ensemble de la période de gel et dégel.

0ºC ou -1ºC et revient au-dessus de 0ºC ou même +1ºC (Fortin, 2010 ; Tremblay, 2006). Tremblay (2006) mentionne que l'emploi des valeurs de +1ºC et -1ºC comme températures seuils pour identifier un CGD plutôt que la valeur théorique de 0ºC permet d'éviter le décompte de périodes qui peuvent être induites par des erreurs de mesures (imprécision de l'appareil), des oscillations de la température autour de 0ºC et parce que la température de surface a une amplitude plus élevée que celle de l'air. Le seuil de -1ºC est utilisé afin de s'assurer du regel près de la surface car l'inertie thermique des matériaux (sols, neige, etc.) peut limiter la vitesse de regel (Fortin, 2010). Le Tableau 1.6 présente les études ayant comptabilisé le nombre de CGD au cours d'une année au Québec. Entre les villes de Montréal et Québec, le nombre de CGD peut varier de 22 à 77 (moyenne de 43, Tableau 1.6).

Tableau 1.6 Nombre moyen et annuel de cycles de gel et dégel au Québec

Date	**Station**	**Localisation**	**Cycles de gel et dégel**		**Référence**
(année)	**(nombre)**	**(nom ou ville)**	**(nombre)**	**(moyenne)**	**(nom, année)**
1949 à 1953	4	Port Harrison ; Fort Chimo ; Knob Lake ; Arvida	33 à 56	45	Fraser, 1959
1996 à 2006	3	Montréal ; Québec ; Bagotville	38 à 42	40	Tremblay, 2006
1977 à 2006	4	Lauzon ; Québec ; Scott ; St-Michel	30 à 77	51	Fortin, 2010
1971 à 2000	1	PET à Montréal	22 à 58	37	Gouvernement du Canada, 2008a

Aussi, les rayons ultraviolets (UV) peuvent dégrader chimiquement le bitume et favoriser son oxydation et durcissement (Trudeau, 2013). Les facteurs influençant le plus le vieillissement du bitume sont (ordre décroissant) : oxydation, perte de composante huileuse (volatile) et durcissement stérique (Trudeau, 2013). Le degré d'oxydation du bitume au sein du revêtement dépend grandement de : 1) la durée de l'exposition à l'air, soit le temps ; 2) l'épaisseur du film de bitume ; 3) la teneur en vides de l'enrobé bitumineux qui se traduit par la présence d'air ; 4) la profondeur au sein de la chaussée qui affecte le degré d'exposition à l'air ambiant ; 5) le climat car la vitesse de l'oxydation et de la perte de composante huileuse s'accroît avec la température (Langlois, 2001 ; Tourangeau, 2005 ;

Trudeau, 2013). Ce durcissement est favorable à la résistance à l'orniérage, mais ce n'est pas le cas pour la fissuration thermique de l'enrobé.

1.2.4 Sollicitations hydriques

1.2.4.1 Introduction

La précipitation annuelle moyenne de pluie et de neige[10] au Québec, en Ontario, dans l'État de New York et en France est de 1000, 850, 750 et 800mm respectivement (Transports Québec, 2012b). En relation aux sollicitations hydriques et aux enrobés bitumineux, plusieurs éléments ont une répercussion directe sur leur dégradation :

- niveau de précipitations : quantité d'eau ruisselant sur les enrobés ;
- degré de perméabilité : quantité d'eau pénétrant et traversant les enrobés, ceci dépend des propriétés physiques des enrobés et du niveau de fissuration du revêtement ;
- qualité du drainage affectée par les pentes, devers, affaissements ou points bas localisés, systèmes d'écoulement, perméabilités des enrobés bitumineux et des accotements : durée de la présence d'eau en surface et au sein des enrobés ;
- niveau de la nappe phréatique, type d'infrastructure et matériaux constituants la structure de chaussée affectant la remontée d'eau (phénomène de capillarité) ou de vapeur d'eau (phénomène d'évaporation) ;
- sollicitations climatiques (§ 1.2.3), qui comprennent la température, l'humidité de l'air, les cycles de gel et dégel, les rayons solaires et les vents, affectant le niveau d'agressivité de la présence d'eau ou de la vapeur d'eau à la surface et au sein des enrobés ;
- sollicitations mécaniques : création de mécanismes de dégradation par la mise sous pression de l'eau au sein du revêtement.

Il y a plusieurs éléments à considérer du point de vue hydrique quant à l'amplitude de la dégradation du revêtement. En effet, l'eau pénètre au sein du revêtement selon trois modes de

---

[10] La neige est convertie en pluie suivant un ratio de 10 pour 1 (Rioux, 1999).

transport : 1) percolation de l'eau en raison des averses de pluie, fontes de neige et ruissèlements ; 2) remontée d'eau en raison du phénomène de capillarité ou du phénomène de pompage généré par le trafic **;** 3) infiltration et condensation de la vapeur d'eau (Doré et coll., 2009 ; Kucharek, 2012).

1.2.4.2 Dégradations observées

Les dégradations multiples du revêtement sont souvent accélérées par la présence d'eau. En présence d'eau, des pertes d'adhésivité et de cohésion au sein de l'enrobé bitumineux sont observables. Nous traiterons plus en détail de ces aspects aux sections 1.2.4.6 et 1.2.4.7.

La perte d'adhésivité génère la séparation physique du film de bitume de la surface du granulat. Alors, ce phénomène se produit à l'interface bitume-granulat. Une dégradation conséquente associée à ce phénomène est désignée désenrobage. Il faut souligner qu'à la base, les granulats ont une plus grande affinité pour l'eau que pour le bitume et donc, ils sont plus facilement mouillés par l'eau que par le bitume. Identiquement, la perte progressive du bitume (désenrobage), tout comme la perte de cohésion, peut conduire à la perte (arrachement) de granulat par le trafic. La dégradation du revêtement générée par la présence d'eau est majoritairement attribuable au désenrobage et dans certains cas, à une baisse de rigidité de l'enrobé bitumineux (Lee, 1982 ; Kennedy et coll., 1983). La perte de cohésion génère une baisse de rigidité du bitume, du mastic, des granulats et somme toute de l'enrobé bitumineux. La perte de cohésion (ou de rigidité) de l'enrobé peut accélérer la formation d'ornières, d'ondulations, d'arrachement de particules et la fissuration du revêtement dans les traces de roues.

En réalité, il est difficile de bien distinguer ces deux types de dégradation : perte d'adhésivité et perte de cohésion. Cet état de fait s'explique par les nombreux phénomènes et mécanismes à la base de ces dégradations (§ 1.2.4.3). Également, il faut admettre que la dégradation du revêtement en présence d'eau peut être causée par ces deux phénomènes de manière couplée. De plus, le gel de l'eau piégée dans une cavité peut générer suffisamment de pression pour

provoquer l'arrachement de particules (Transports Québec, 2003b). Notamment, des particules fines s'arrachent d'abord, laissant une apparence rugueuse du revêtement. Par la suite, des gros granulats sont arrachés sous l'action du trafic. Dès lors, l'eau pénètre plus facilement, ce qui accélère le processus de dégradation (Transports Québec, 2003b).

1.2.4.3 Mécanismes de dégradation observés

Le Tableau 1.7 donne la synthèse des mécanismes de dégradation générés par les sollicitations hydriques et ce, sans sollicitations mécaniques. Le Tableau 1.8 effectue une synthèse des mécanismes de dégradation générés par la combinaison des sollicitations hydriques et mécaniques avec ou sans sollicitations climatiques. Ces informations ont été tirées de : Lee (1982), Kiggundu et coll. (1988), Tarrer et coll. (1991), Kandhal et coll. (2001), Bagampadde et coll. (2004), Kanitpong (2005), Asphalt Institute (2007), Mauduit et coll. (2007), Mercado (2007) et, Caro et coll. (2008).

Rapport-Gratuit.com

Tableau 1.7 Mécanismes de dégradation d'un enrobé générés par les sollicitations hydriques sans sollicitations mécaniques

Mécanisme	Description du mécanisme	Causes
Séparation, détachement ou décollement *(Detachment)*	Séparation microscopique du film de bitume de la surface du granulat par un film d'eau sans dommage apparent au film de bitume. Le film de bitume peut être décollé facilement de la surface du granulat indiquant une absence complète d'adhésion.	- Granulat poussiéreux ; - Granulat qui n'a pas été suffisamment séché avant l'enrobage, l'eau dans les pores interstitiels se vaporise et condense à la surface du granulat emprisonné sous le film de bitume ; - Percolation de l'eau au travers le film mince de bitume jusqu'à l'interface bitume-granulat.
Décollement chimique *(Chemical Disbonding)*	Interaction chimique et électrostatique entre l'eau et certains granulats favorisant le décollement du bitume.	- Réaction chimique et électrostatique.
Déplacement ou remplacement *(Displacement)*	Enlèvement, perte ou déplacement du bitume de la surface du granulat par l'eau à partir : d'une brèche dans le film de bitume et/ou séparation possible à l'interface mastic-granulat.	- Enrobage incomplet lors du malaxage ; - Granulat très angulaire : usure ou film de bitume très mince aux arrêtes ; - Granulat très fragmenté après le compactage ; - Présence de poussières à la surface du granulat ; - Cycles de gel et dégel fréquents ; - Faible énergie de surface d'adhésivité ; - Composant chimique hydrophile du bitume ; - Composition minéralogique globale hydrophile ; - Incompatibilité entre le bitume et le granulat qui mène à la solubilité d'un composant par l'eau ; - pH élevée de l'eau.
Émulsion spontanée *(Spontaneous Emulsification)*	L'eau et le bitume se combinent pour former une émulsion inverse, le bitume forme la phase continue et l'eau la phase discontinue. Le mécanisme est réversible lorsque l'eau s'évapore, toutefois il peut s'amplifier avec le passage des véhicules et peut conduire au décollement total du film de bitume s'il atteint la surface du granulat.	- Immersion prolongée dans l'eau ; - Présence de certains produits anti-désenrobage ; - Composant chimique hydrophile du bitume ; - Présence de certains fillers minéraux ; - Présence de minéraux de carbonate hydrophile ; - Présence de particules argileuses ; - Faible énergie de cohésion à l'interface ; - pH élevée de l'eau.
Osmose *(Osmosis)*	Gradient de concentration de part et d'autre du film de bitume qui provoque le déplacement de l'eau vers la surface du granulat. Ce phénomène génère le désenrobage.	- Granulat composé de sels minéraux ou présence de saumure dans ses pores. - Bitumes corrosifs traités lors de la fabrication ; - Granulat qui n'a pas été suffisamment séché avant l'enrobage ; - Film de bitume perméable.
Activité microbienne *(Microbial Activity)*	Processus métabolique microbien à l'interface donnant des sous-produits qui brisent l'adhésivité à l'interface.	- Métabolisme bactérien.
Instabilité générée par le pH de l'eau *(pH Instability)*	Le pH de l'eau affecte l'angle de contact, le mouillage et la tension de l'interface bitume-eau, et, ainsi, l'adhérence du couple bitume-granulat.	- Différences au niveau de la source d'eau (robinet, distillée, etc.) expliquant les écarts entre les multiples essais ; - Une hausse du pH supérieure à 9 réduits l'adhérence ; - Importance de la sensibilité (stabilité) au pH à l'interface bitume-granulat.
Solubilité *(Solubility)*	La perte de cohésion au sein du granulat due à la solubilité de certains composés.	- pH < 6 et > 8 de l'eau est favorable à la dissolution de minéraux carbonatés et siliceux respectivement.

Tableau 1.8 Mécanismes de dégradation d'un enrobé générés par la combinaison des sollicitations hydriques, mécaniques et/ou climatiques

Mécanisme	Description du mécanisme	Causes
Pression dans les pores *(Pore pressure)*	Le déplacement de l'eau dans les vides interconnectés de la microstructure de l'enrobé et le développement d'une pression interstitielle élevée de l'eau au sein des vides isolés saturés générés par le passage d'un véhicule provoque la rupture du film de bitume ou la propagation de microfissures au sein du mastic. Ces dommages vont faciliter l'infiltration d'eau dans le mastic et à l'interface bitume-granulat et conduire au désenrobage et à la désintégration complète de l'enrobé.	- Ségrégation entre deux couches ou teneur élevée en vides permettant l'infiltration et la circulation d'eau ; - Densification de l'enrobé par le trafic emprisonnant l'eau dans des vides isolés, alors que le matériau est saturé non drainé ; - Trafic mettant sous pression l'eau au sein des vides isolés sollicitant le matériau en traction et le liant entre les granulats au point de les désenrober.
Décapage hydraulique *(Hydraulic Scouring)*	Décapage de la couche saturée de surface du revêtement bitumineux par l'action des pneumatiques menant au désenrobage et arrachement.	- Surface saturée ; - Passages de véhicules créant une mise sous pression à l'avant et succion à l'arrière du pneumatique ; - Présence de particules, abrasifs, au sein de l'eau pouvant amplifier le décapage ; - Film mince ou perméable de bitume ; - Possibilité d'un phénomène d'osmose.
Dispersion *(Dispersion)*	Perte de cohésion du bitume ou du mastic en raison d'une exposition prolongée à l'eau et une perte de matériau en raison d'un mouvement d'eau généré par le passage des véhicules.	- Présence prolongée d'eau ; - Écoulement d'eau ; - Énergie faible de cohésion à l'interface ; - Composant chimique hydrophile du bitume ; - Bitume vieilli ; - Film mince de bitume.
Désorption *(Desorption)*	Lavage du liant ou mastic par un écoulement d'eau qui peut être accentué par le trafic.	- Perméabilité élevée de l'enrobé bitumineux ou du film de bitume ; - Passages de véhicules.
Rupture du film de bitume ou micro fissures *(Film Rupture or Microcracks)*	Rupture du film de bitume, de mastic ou de granulats générant une perte d'intégrité structurelle de l'enrobé et générant ainsi de nouvelles voies d'accès pour le transport de l'humidité. Le mécanisme se produit usuellement aux arrêtes vives, où le film de bitume est mince, ou il y a présence de poussière sur le granulat.	La rupture peut être accentuée par : - Opérations de fabrication, de mise en œuvre et de compactage ; - Passages de véhicules ; - Cycles de gel et dégel.
Cloque, cloche et piqûre *(Blistering and Pitting)*	Le lever du soleil, après une averse de pluie, provoque le réchauffement du bitume qui aura tendance à couler par-dessus les gouttes d'eau (formation de cloque). Après, le réchauffement crée l'expansion des gouttes d'eau qui font céder le film de bitume laissant une cavité (piqure).	- Averse de pluie ; - Réchauffement par le soleil ; - Écoulement du bitume lors du réchauffement ; - Expansion des gouttes d'eau se trouvant sous le film et rupture du film de bitume.
Solidification de l'eau *(Freezing Water)*	La solidification de l'eau contenue dans les pores de l'enrobé peut générer des contraintes de 1 à 3 MPa et ainsi fragiliser le film de bitume, le granulat ou l'enrobé. Cette fragilisation se produit essentiellement à l'interface granulat-bitume.	- Présence d'eau au sein de l'enrobé ; - Température froide générant la formation de glace.
Vaporisation et succion *(Moisture vaporizes and Suction)*	Lors d'un réchauffement, l'évaporation de l'eau (vapeur) contenue dans les vides semi-effectifs accélère la diffusion de l'eau au sein de la microstructure du bitume et lors du refroidissement, il peut y avoir une succion d'eau au sein des vides s'il y a présence d'un film d'eau à l'embouchure en raison de l'existence d'un gradient de pression.	- Présence d'eau au sein de l'enrobé ; - Température ou ensoleillement élevé et refroidissement de l'enrobé.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

1.2.4.4 Causes de dégradation liées aux sollicitations hydriques et autres

L'étude du Tableau 1.7 et du Tableau 1.8 permet d'effectuer une énumération des causes de dégradation relatives aux sollicitations. Par ailleurs, d'autres causes ont été identifiées dans Stuart (1990), Hicks (1991) et, Zhong et coll. (2007). Notamment, le Tableau 1.9 effectue une énumération des causes relatives aux sollicitations.

Tableau 1.9 Causes de dégradation liées aux sollicitations hydriques et autres

Type de sollicitations
Sollicitations hydriques - Pluviométrie élevée ; - Averse de pluie en période chaude, durant ou juste après les travaux d'asphaltage ; - Présence prolongée d'eau ; - Écoulement d'eau ; - Surface du revêtement saturée ; - Drainage inadéquat de la chaussée ; - Humidité relative élevée ; - Vapeur d'eau ; - Présence de la nappe phréatique à faible profondeur ; - pH < 6 de l'eau génère la dissolution de minéraux carbonatés ; - pH > 8 de l'eau génère la dissolution de minéraux siliceux ; - Présence d'ions dans l'eau.
Sollicitations climatiques - Température chaude (abaisse la viscosité du bitume, possibilité de désenrobage en raison de la vapeur d'eau) ; - Cycles de gel et dégel (génère la fragilisation ou la microfissuration du granulat et de l'enrobé bitumineux).
Sollicitations mécaniques - Présence élevée de poids lourds ; - Usure du film de bitume et du granulat par les équipements de compactage ou le trafic (accrue avec la présence d'abrasif) exposant le granulat à l'eau ; - Mise sous pression de l'eau par le trafic à la surface et au sein du revêtement (effet accru avec la vitesse).
Sollicitations biologiques - Présence de bactéries dégradant le bitume.

L'étude du Tableau 1.9 permet de constater qu'au niveau des sollicitations, trois facteurs sont cruciaux quant à la dégradation des enrobés bitumineux, soit : 1) présence importante et prolongée d'eau, 2) climat chaud et, 3) cycles de gel-dégel. À cet effet, plusieurs essais de laboratoire soumettent les enrobés à cette combinaison de conditions des plus préjudiciables.

1.2.4.5 Causes de dégradation liées à l'enrobé, conception et travaux

L'étude du Tableau 1.7 et du Tableau 1.8 permet aussi d'effectuer une énumération des causes de dégradation de l'enrobé bitumineux en présence d'eau qui sont plutôt relatives à la conception et aux divers travaux (fabrication, mise en œuvre, compactage et entretien). Aussi, d'autres causes ont été trouvées dans Stuart (1990), Hicks (1991), Seddik et coll. (1997), Paradis (2002) et, Mauduit et coll. (2007). Le Tableau 1.10 présente l'ensemble des causes qui sont relatives à la conception et aux divers travaux et qui peuvent causer une dégradation de l'enrobé bitumineux en présence d'eau alors que le Tableau 1.11 présente une énumération des causes relatives aux constituants de l'enrobé bitumineux à proprement parler.

Tableau 1.10 Causes de dégradations relatives à la conception et aux divers travaux

Composante (cause)	**Propriété d'ordre**	
	physique	chimique
Conception inadéquate		
- Mélange trop maniable pour une route très sollicitée, densification après mise en œuvre ;	X	
- Couche de surface présentant une perméabilité élevée.	X	
Fabrication récente ou déficiente		
- Certains granulats récemment concassés exhibent une mauvaise résist. au désenrobage ;	X	X
- Séchage insuffisant du granulat avant enrobage ;	X	X
- Enrobage incomplet du granulat ;	X	
- Surchauffe de l'enrobé générant un vieillissement très élevé du bitume.		X
Mise en œuvre et compactage déficients		
- Ségrégation physique (équipements), thermique (climat froid) et compactage insuffisant génèrent une teneur élevée en vides entre les couches ou dans l'enrobé bitumineux se traduisant par une perméabilité élevée.	X	
Entretien du revêtement		
- L'absence d'entretien se traduit par un revêtement âgée où le bitume s'oxyde, se fragilise (ductilité réduite), s'altère, toutefois ceci peut être bénéfique en raison de la hausse de la viscosité du bitume ;	X	X
- Resurfaçage : présence d'aspérités et de poussières entre la couche de surface et de base en raison du meulage ou fraisage.	X	

Tableau 1.11 Causes de dégradation de l'enrobé bitumineux en présence d'eau en liens avec ses constituants

Composant ou étape (cause)	**Propriété d'ordre**	
	physique	chimique
Bitume		
- Vieillissement élevée (film mince de bitume, type de bitume, teneur en vides élevée de l'enrobé) ;	X	X
- Faible teneur en bitume ;	X	
- Film mince de bitume ;	X	
- Film de bitume perméable ;	X	
- Viscosité faible ;	X	
- Composant chimique hydrophile ;		X
- Corrosif qui a nécessité un traitement ;		X
- Présence de sels minéraux ou d'ions.	X	X
Granulat		
- Recouvert de particules fines en surface (recouvert de poussière et d'argile) ;	X	
- Présence de particules d'argile (affinité avec l'eau et caractère gonflant) ;	X	
- Angularité faible, texture de surface faible et absorption faible ;	X	
- Perméabilité élevée ;	X	
- Très angulaire : usure aux arrêtes (importance de la résistance à l'usure, à l'abrasion) ;	X	
- Faible résistance à la fragmentation (aux chocs) ;	X	
- Faible résistance aux cycles de gel-dégel ou attaque chimique ;	X	X
- Présence de certains fillers minéraux ;	X	X
- Affinité d'un ou plusieurs minéraux avec l'eau (hydrophile) : par ex., granulats siliceux ;		X
- Présence de minéraux calcaires (carbonates) (hydrophile) ;		X
- Nature acide (par ex., granulats siliceux) ;		X
- Granulat composé de sels minéraux ou présence de saumure dans les pores ;		X
- Solubilité des constituants.		X
Couple bitume-granulat		
- Faible énergie de cohésion à l'interface ;	X	
- Faible énergie de surface d'adhésivité ;		X
- Incompatibilité chimique.		X
Additif		
- Présence de certains produits anti-désenrobage.		X

Chacune des causes énumérées aux Tableau 1.10 et Tableau 1.11 peut générer la dégradation de l'enrobé bitumineux en présence d'eau. Il semble que les causes relatives aux propriétés d'ordres physiques soient les plus nombreuses à produire la dégradation de l'enrobé bitumineux en présence d'eau. Toutefois, il devient ardu d'effectuer un classement de ces causes (ou propriétés) selon leur importance. Dans ce contexte, il devient pertinent de mieux définir l'impact des propriétés physiques et chimiques des constituants de l'enrobé bitumineux sur sa dégradation potentielle en présence d'eau. Ceci passe inévitablement par

l'analyse détaillée de ses propriétés sur la perte de cohésion (§ 1.2.4.6) et la perte d'adhésivité (§ 1.2.4.7).

1.2.4.6 Perte de cohésion des constituants de l'enrobé

Tout d'abord, la cohésion est définie comme l'ensemble des forces qui unissent les molécules d'un même corps. La viscosité, du bitume et du mastic, constitue un indicateur de cohésion. Cependant, la viscosité du bitume ou du mastic dépend de la température. Par ailleurs, les bitumes durs ou les bitumes modifiés avec des plastomères présentent une viscosité élevée à haute température. De plus, les bitumes modifiés aux polymères possèdent une forte capacité d'allongement avant rupture et une bonne résistance à la traction. Quant à la cohésion du mastic, elle n'est pas uniquement attribuable au bitume, mais bien à l'interaction entre le bitume et le filler minéral. Pour de plus amples détails quant au pouvoir rigidifiant des fines minérales, le lecteur peut consulter Lesueur (2002). Lesueur (2005) mentionne que la cohésion garantit la pérennité du lien entre le bitume et les granulats, soit l'adhésivité.

La perte de cohésion est associée à une détérioration des propriétés mécaniques du matériau. Or, cette perte de cohésion du matériau est attribuable à son niveau d'interaction avec l'eau (Hicks, 1991). Par ailleurs, Bikerman (1960) a suggéré que la probabilité de défaillance au niveau de la cohésion est beaucoup plus élevée que celle au niveau de l'adhésivité. Ce même constat a été réalisé par Kanitpong et coll. (2003) en observant des surfaces de rupture d'éprouvettes de mélanges bitumineux après avoir été soumises à l'essai *Tensile Strength Ratio (TSR)*.

L'analyse du Tableau 1.7 et du Tableau 1.8 permet de faire ressortir les mécanismes qui sont relatifs à l'origine de la perte de cohésion. À cet effet, le Tableau 1.12 présente les mécanismes à l'origine de la perte de cohésion au niveau des constituants de l'enrobé bitumineux.

Tableau 1.12 Mécanismes à l'origine de la perte de cohésion des constituants de l'enrobé

Mécanisme	Perte de cohésion au niveau
Vaporisation et succion *(Moisture vaporizes and Suction)*	Bitume
Émulsion spontanée *(Spontaneous Emulsification)* *	Bitume
Dispersion *(Dispersion)*	Bitume et mastic
Pression dans les pores *(Pore pressure)* *	Bitume et mastic
Rupture film de bitume, microfissures *(Film Rupture, Microcracks)* *	Bitume, mastic et granulat
Solidification de l'eau *(Freezing Water)* *	Granulat et interface bit.-gran.
Solubilité *(Solubility)*	Granulat

* Même si ces mécanismes engendrent une perte de cohésion, ils sont majoritairement reconnus comme étant cruciaux au niveau de la perte d'adhésivité.

Il semble bien que la perte de cohésion s'effectue le plus souvent au niveau du bitume ou du mastic et ensuite, au niveau du granulat (Tableau 1.12). Par ailleurs, chaque constituant est analysé pour en faire ressortir les éléments d'importance.

Bitume, mastic et additifs – Généralement, il est considéré que le bitume n'est pas affecté par la présence d'eau (Kanitpong, 2005). Toutefois, les bitumes mous sont plus perméables en raison de leur faible viscosité (Shell bitumen, 1995). Il faut souligner qu'une hausse de température engendre un abaissement de viscosité du bitume. Or, la perméabilité est inversement proportionnelle à l'épaisseur du film de bitume et à la viscosité du bitume (Shell bitumen, 1995). De plus, le transport de l'eau jusqu'à l'interface bitume-granulat est facilité par la présence d'impuretés solubles (par exemple, des ions et des sels) et des composants hautement polaires présent dans le bitume (Nguyen et coll., 1996). Lors du réchauffement de l'enrobé, la "vaporisation" de l'eau contenue dans des vides isolés ou semi-effectifs de l'enrobé produit une saturation en humidité, ce qui accélère la diffusion de l'eau au sein de la microstructure du bitume (ou mastic) (Kandhal et coll., 2001). Également, lors d'un réchauffement, l'eau présente dans les vides se dilate plus que l'enrobé, ce qui provoque l'expansion du réseau de vides : pression générée dans les pores (Terrel et coll., 1994). Le passage des véhicules génère la mise sous pression de l'eau se trouvant dans les vides, ce qui peut conduire à la rupture du film de bitume effectif, la propagation de microfissures au sein du mastic et même un détachement (perte) de ces matériaux : mécanismes de pression dans

les pores et dispersion (Tableau 1.8). Tous ces phénomènes génèrent une perte de cohésion du bitume et du mastic. De plus, l'eau qui a pénétré dans le film de bitume peut former une "émulsion" avec ce dernier. La formation de cette émulsion (matériau brunâtre observable au microscope) provoque le détachement de particules de bitume générant une perte de cohésion et engendre finalement une perte d'adhésivité lorsque ce mécanisme atteint la surface du granulat (Fromm, 1974). Également, ce mécanisme d'émulsion spontanée peut se produire lorsqu'il y a présence d'eau et de matériaux expansifs, tels que les argiles, dans le bitume. En particulier, cela peut générer une rupture complète au niveau de la cohésion et ce, sans qu'il y a de perte au niveau de l'adhésivité (Stuart, 1990). Même certains produits anti-désenrobage peuvent agir comme émulsifiant (Lu et coll., 2005). Néanmoins, le mécanisme d'émulsion spontanée est réversible : l'évaporation de l'eau permet de retrouver les propriétés d'origines du bitume (Fromm, 1974). In situ, ces mécanismes sont difficilement observables en raison de la faible dimension des désordres. Par ailleurs, ces mécanismes provoquent rarement le désenrobage des granulats qui est un phénomène plus facilement observable.

Granulat – La perte de cohésion au niveau du granulat peut être causée par une rupture de liens au sein de la matière en raison de la "solubilité" de certains de ses minéraux ou de sels minéraux (Asphalt Institute, 2007). Notamment, une eau à un pH < 6 et > 8 génère la dissolution de minéraux carbonatés et siliceux respectivement (Caro et coll., 2008). À cet effet, un bon examen pétrographique de la roche mère des granulats permet de bien caractériser et quantifier les minéraux susceptibles d'engendrer des problèmes au niveau de la durabilité. Également, la perte de cohésion du granulat peut être causée par différentes ruptures, soit : fragmentation des particules, usure aux arrêtes des particules très angulaires, etc. Ces ruptures peuvent se produire lors des opérations de fabrication, de mise en œuvre et de compactage, lors du passage des véhicules ou suivant des cycles de gel et dégel. Ces pertes sont regroupées sous les mécanismes identifiés sous "Rupture film de bitume, micro fissures" et "Gel de l'eau". Ceci montre l'importante des résistances à l'usure, à l'abrasion et à la fragmentation des granulats (§ 1.1.6.3, caractéristiques intrinsèques). Toutefois, les granulats sont sélectionnés pour répondre à des caractéristiques mécaniques minimales. Notamment, un granulat avec des particules poreuses et microfissurées, donc susceptible de

contenir de l'eau et de se fragmenter lors du gel, à peu de chances de rencontrer les exigences relatives à ces essais de caractérisation et d'être utilisé dans la confection de l'enrobé. Par ailleurs, la présence d'eau dans le granulat en raison d'un séchage insuffisant avant l'enrobage peut expliquer la gélifraction[11] et la perte de cohésion du granulat. Toutefois, le gel de l'eau dans les pores du granulat va dépendre de leur dimension. Par exemple, pour des roches calcaires à pores moyens (entre 0,1 et 1µm) et micros (< 0,1µm), le seuil de congélation de l'eau est de -3°C et de -25°C respectivement (Letavernier et coll., 1987).

Dans le cas où le lien est adéquat entre le bitume et le granulat, soit l'adhésivité, la rupture de l'enrobé bitumineux sous chargements va se produire au sein du plus faible élément, soit au sein du bitume (Taylor et coll., 1983).

Bien que les mécanismes ici présentés conduisent à une perte de cohésion, c'est la perte d'adhésivité qui est le plus souvent citée comme cause de dégradation de l'enrobé en présence d'eau. En effet, les mécanismes liés une perte de cohésion ne peuvent être que déduits plutôt qu'observés sur chaussées (Terrel et coll., 1994). Alors, il s'avère difficile de faire la distinction entre les deux pertes d'intégrité sur chaussées (Terrel et coll., 1994).

En définitive, tout porte à croire que la probabilité d'obtenir une perte de cohésion se situe le plus souvent au niveau du bitume. Donc, il est préférable de renforcir ce constituant car il représente le maillon faible. Ceci peut s'effectuer en ayant recours à des bitumes (ou mastics) à viscosité élevée, soit par : l'utilisation de bitumes durs, l'ajout assez important de fines (filler calcaire ou autres) pour rigidifier le mastic ou l'ajout d'additifs au bitume, comme des plastomères. La hausse de la viscosité du bitume permet de réduire sa perméabilité, son déplacement par l'eau et donc, de protéger davantage le granulat aux agressions.

---

[11] Fragmentation des pierres due à l'alternance de gel et de dégel.

1.2.4.7 Perte d'adhésivité entre les constituants de l'enrobé

Avant tout, l'adhésivité constitue la capacité du bitume à coller aux granulats. Deux phases sont cruciales afin d'assurer la qualité et la pérennité de l'adhésivité. La première phase s'effectue lors du malaxage, le bitume ajouté aux granulats, mouille et recouvre leurs surfaces. Cette phase constitue "l'adhésivité globale", soit la capacité du liant à coller aux granulats secs ou "l'adhésivité active" dans le cas de granulats humides (Lesueur, 2005). Une forte liaison entre le bitume et le granulat est conditionnée par une bonne couverture (Castañeda Pinzon, 2007). Pour l'obtenir, le bitume doit être suffisamment liquide et le granulat doit avoir une température adéquate afin de maintenir la fluidité du bitume et assurer le mouillage de la surface et la pénétration partielle du bitume dans les pores ouverts du granulat. Par ailleurs, la qualité du mouillage est caractérisée par l'angle de contact liquide-solide. Le mouillage est : a) total lorsque le liquide s'étale totalement sur le solide (angle de 0°), b) partiel lorsque le liquide forme un monticule sur le solide (angle < 90°), c) considéré comme absent lorsque le liquide forme une goutte sur le solide (90 ≤ angle ≤ 180°) (Young et coll., 1998). Plus l'angle de contact est faible, plus l'énergie nécessaire pour séparer le bitume du granulat est grande. Notamment, l'ajout d'un composé tensioactif au bitume permet d'augmenter ces propriétés de mouillage.

La deuxième phase, appelée "adhésivité passive", est très importante au niveau de la durée de vie de l'enrobé bitumineux et correspond à la résistance au décollement du film (ou pellicule) de bitume de la surface du granulat en présence d'eau. Donc, l'adhésivité passive correspond à la capacité du bitume à résister au désenrobage par l'eau (Lesueur, 2005). Aussi, c'est la force de liaison à l'interface bitume-granulat en présence d'eau. Pour plus de détails sur l'adhésivité passive, il est possible de consulter l'ouvrage de Ramond (1977). Il existe plusieurs essais pour évaluer l'adhésivité passive, toutefois ils demeurent dans certains cas complexes à réaliser, à analyser ou sont totalement empiriques.

Une défaillance au niveau de l'adhésivité (interface bitume-granulat) en présence d'eau peut être expliquée par une faible adhésivité initiale ou par une perte progressive de cette

Rapport-Gratuit.com

adhésivité. La faible adhésivité initiale entre le bitume et le granulat peut être expliquée par les causes exposées au Tableau 1.13.

Tableau 1.13 Causes engendrant une faible adhésivité initiale du bitume au granulat

Composant ou étape (cause)	**Propriété d'ordre**	
	physique	chimique
Granulat		
- Recouvert de particules fines en surface (recouvert de poussière et d'argile) ;	X	
- Très angulaire : usure aux arrêtes (importance de la résistance à l'usure, à l'abrasion) ;	X	
- Faible résistance à la fragmentation (aux chocs) ;	X	
Couple bitume-granulat		
- Faible énergie de surface d'adhésivité ;		X
- Incompatibilité chimique.		X
Fabrication récente ou déficiente		
- Certains granulats récemment concassés exhibent une mauvaise résist. au désenrobage ;	X	X
- Séchage insuffisant du granulat avant enrobage ;	X	X
- Enrobage incomplet du granulat.	X	

Évidemment, les causes exposées au Tableau 1.13 peuvent également générées une perte d'adhésivité par la suite. La perte d'adhésivité est usuellement attribuée à l'infiltration de l'eau à l'interface bitume-granulat. Le désenrobage des granulats peut s'effectuer en trois étapes : 1) infiltration d'eau à l'interface bitume-granulat, 2) rupture de la liaison adhésive entre le bitume et le granulat, et 3) décollement du film de bitume. Il faut souligner que l'infiltration de l'eau à l'interface bitume-granulat est attribuable à l'affinité plus élevé du granulat avec l'eau qu'avec le bitume. De nouveau, plusieurs causes et mécanismes sont à l'origine de la perte d'adhésivité à l'interface bitume-granulat (Tableau 1.11 et Tableau 1.14). Alors, il devient difficile de déterminer quelles sont les propriétés des constituants qui influence le plus l'adhésivité (ou la perte d'adhésivité). Plus particulièrement, l'adhésivité entre le bitume et le granulat peut être expliquée par quatre théories qui précisent les forces d'interactions en jeu. Ces forces d'interactions sont dites (en ordre décroissant d'importance) : thermodynamique (énergie de surface), chimique (liaison ou réaction), électrostatique (orientation moléculaire) et mécanique (physique).

Tableau 1.14 Mécanismes à l'origine de la perte d'adhésivité

Mécanisme	Cause d'ordre *
Séparation, détachement ou décollement *(Detachment)*	Chimique et thermodynamique
Décollement chimique *(Chemical Disbonding)*	Chimique et électrostatique
Déplacement ou remplacement *(Displacement)*	Chimique et thermodynamique ou mécanique
Osmose *(Osmosis)*	Diffusion
Activité microbienne *(Microbial Activity)*	Bactérienne
pH instabilité *(pH Instability)*	Non spécifiée
Décapage hydraulique *(Hydraulic Scouring)*	Non spécifiée
Désorption *(Desorption)*	Mécanique après autres forces
Cloque, cloche et piqûre *(Blistering and Pitting)*	Non spécifiée
Gel de l'eau *(Freezing Water)*	Non spécifiée
Pression dans les pores *(Pore pressure)*	Mécanique
Rupture film de bitume, microfissures *(Film Rupture, Microcracks)*	Mécanique et thermodynamique
Émulsion spontanée *(Spontaneous Emulsification)*	Chimique ou électrostatique
* Bagampadde et coll. (2004) ; Caro et coll. (2008).	

Thermodynamique – L'énergie de surface constitue le facteur prédominant au niveau de l'adhésivité. L'adhésivité résulte des forces intermoléculaires qui sont reliées à l'énergie libre de surface en présence des matériaux suivants : bitume, granulat, eau et air. À ce niveau, l'adhésivité peut être caractérisée par la notion de mouillage (étalement, épandage ou angle de contact). Le bitume mouille le granulat si l'énergie d'adhésion est supérieure à celle de sa cohésion (viscosité) (Corté et coll., 2004). Notamment, le chauffage du bitume permet d'abaisser sa viscosité (ou cohésion) et alors, d'augmenter sa capacité de mouillage. Généralement, la tension d'adhésion eau-granulat est supérieure (ou angle de contact inférieur) à celle du bitume-granulat expliquant que l'eau a tendance à déplacer le film de bitume du granulat (Ishai et coll., 1977 ; Kanitpong et coll., 2003). La vitesse de désenrobage est proportionnelle à la différentielle entre la tension d'adhésion du liant au granulat et celle de l'eau au granulat (Ramond, 1977).

Chimique – Une réaction chimique se produit entre les fractions du bitume adsorbé par le granulat et les constituants du granulat. Le bitume possédant des composants plutôt à

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

caractère acide (par ex., présence d'acides naphténiques), il se lie chimiquement plus facilement avec des granulats de nature basique, donc à haute teneur en carbonate de calcium, tels que marbre et le calcaire, plutôt qu'avec des granulats à caractère acide comme le quartz, le granite, les grès et les porphyres qui sont composés de silicates (Castañeda Pinzon, 2007).

Orientation moléculaire – Les molécules du bitume, notamment les groupes polaires, s'orientent de manière à satisfaire les besoins énergétiques de la surface du granulat. L'orientation des molécules est possible lorsque le bitume est chaud. Alors, l'interaction électrostatique entre les deux surfaces est générée par l'attraction des charges électriques opposées : forces de type polaires, liaisons d'hydrogène ou interactions de Van der Waals (Castañeda Pinzon, 2007). Cette interaction est nettement inférieure à celle créée par une réaction chimique. La majorité des groupes fonctionnels du bitume sont composés de charges négatives. En conséquent, l'orientation des molécules entre les composants est favorisée lorsque des granulats chargés positivement sont utilisés (par exemple, le marbre, le calcaire et le basalte). L'ajout de chaux au granulat, qui constitue un composant basique, permet d'améliorer l'orientation des molécules du bitume améliorant ainsi l'adhésivité.

Mécanique – L'adhésion d'un bitume à un granulat est également liée à une interaction de nature mécanique : prise mécanique du bitume au granulat. La prise mécanique est fonction de la porosité (pores ouverts) et à la texture (micro-texture) du granulat. Les caractéristiques de surface du granulat qui vont influencer l'adhésivité sont :

- propreté : le recouvrement du granulat par des particules fines réduit considérablement l'adhésivité entre le granulat et le bitume.
- texture : il est plus facile de recouvrir un granulat avec une texture de surface lisse qu'une rugueuse assurant ainsi un enrobage complet. Toutefois, le granulat possédant une texture de surface légèrement rugueuse favorise un meilleur ancrage mécanique, adhésivité, du bitume au granulat (Taylor et coll., 1983). La surface lisse et vitreuse, tel que celle du quartz, génère un ancrage moins important et donc plus favorable au désenrobage que la surface micro-rugueuse du basalte (Maupin, 2009).

- angularité : Les essais de laboratoire indiquent bien que le désenrobage est plus sévère pour les granulats avec des particules angulaires que celles arrondies en raison du film mince de bitume aux arrêtes (Taylor et coll., 1983).
- Surface spécifique : La superficie d'une particule minérale est accrue avec la hausse de son angularité et de sa microrugosité, ce qui permet d'augmenter l'ancrage entre le bitume et le granulat. D'ailleurs, la hausse de la surface spécifique d'une particule nécessite une plus grande quantité de bitume, qui s'avère bénéfique au niveau de la résistance au désenrobage (Stuart, 1990).
- porosité et absorption du granulat : L'absorption du granulat peut être reliée à sa porosité ouverte. Les granulats possédant des gros pores perméables, tel que le calcaire, semble montrer une meilleure adhésivité comparativement aux granulats ayant une multitude de pores perméables de faible dimension, tel que le quartz (Taylor et coll., 1983). Toutefois, plus le granulat est poreux, plus il absorbe d'eau et il est alors plus difficile d'y faire évaporer toute l'eau lors du chauffage du granulat (Stuart, 1990). L'eau résiduelle nuit à l'adhésivité.
- minéralogie : La grosseur des grains du minéral affecte précisément la texture de surface et la porosité du granulat.

Évidemment, le mouillage du granulat et l'absorption du bitume par le granulat, qui affecte la qualité de la prise mécanique, dépend de la viscosité du bitume lors du malaxage et de la vitesse de refroidissement par la suite.

Au niveau de l'adhésivité, ce sont les caractéristiques physiques et chimiques du granulat, comparativement à celles du bitume, qui affecte le plus celle-ci et donc, la résistance au désenrobage (Ramond, 1977 ; Kiggundu et coll., 1988 ; Hicks, 1991 ; Curtis, 1993). Par ailleurs, les bitumes à viscosité élevée sont plus difficilement déplacés par l'eau, comparativement à ceux à faible viscosité, augmentant ainsi la résistance au désenrobage des enrobés bitumineux (Fromm, 1974 ; Ramond, 1977 ; USIRF, 2001).

1.2.4.8 Perte d'intégrité et de rigidité de l'enrobé bitumineux

La perte de cohésion des constituants de l'enrobé et la perte d'adhésivité entre ceux-ci va nécessairement générer une perte de cohésion de l'enrobé bitumineux. Toutefois, il est possible que la perte de cohésion de l'enrobé bitumineux soit temporaire, c'est-à-dire réversible. Ceci est observable après une période de séchage. Malgré cela, au fil du temps, les agressions vont produire une dégradation permanente de l'enrobé bitumineux et du revêtement (§ 1.2.4.2). La dégradation d'un matériau induit une détérioration de ses propriétés mécaniques. L'évaluation de la dégradation des enrobés bitumineux s'effectue avec plusieurs essais mécaniques : module complexe (petites déformations), compression simple, traction directe ou indirecte, etc.

Auparavant, il a pu être observé que les causes suivantes sont les plus influentes quant à la perte de cohésion ou à l'accentuation des dégradations des enrobés bitumineux en présence d'eau : 1) présence importante et prolongée d'eau, 2) température élevée, et 3) cycles de gel-dégel (§ 1.2.4.4).

Présence importante et prolongée d'eau – La présence importante et prolongée d'eau dépend de plusieurs éléments, qui ont été exposés à la section 1.2.4.1. Toutefois, les enrobés bitumineux qui contiennent, et plus encore, qui retiennent une grande quantité d'eau, se dégradent nettement plus rapidement. Ceci devient particulièrement critique lors de la formation de glace. La rétention d'eau au sein de l'enrobé bitumineux peut être reliée à leur perméabilité[12]. Même si cela est discutable, la perméabilité de l'enrobé bitumineux est mise

---

[12] La perméabilité des enrobés bitumineux est liée, dans une certaine mesure, à la teneur en vides, mais plus particulièrement, au type de vides et à leur grosseur. Les vides peuvent être : 1) isolés ; 2) semi-effectifs (vides qui sont présents en surface, mais qui ne traversent pas l'ensemble du matériau) ou 3) effectifs (ils traversent entièrement le matériau), ce qui affecte grandement la perméabilité de l'enrobé bitumineux. Pour une même teneur en vides, la perméabilité de l'enrobé est plus élevée dans le cas de la présence de vides effectifs, que semi-effectifs ou qu'isolés (Chen et coll., 2004). Dans une mesure inférieure, plus le diamètre

en relation avec sa teneur en vides (Terrel et coll., 1993). Notamment, une perméabilité faible engendre une faible infiltration d'eau, ceci s'applique usuellement pour les enrobés ayant une teneur en vides inférieure à 5,5-7,5%. Quant à une perméabilité élevée, elle permet une infiltration élevée d'eau, mais également son évacuation, ceci est propre aux enrobés possédant une teneur en vides supérieure à 13-15%. Une perméabilité intermédiaire va donc permettre une infiltration moyenne de l'eau, mais l'évacuation en sera modérée, ce qui favorise la rétention d'eau au sein de l'enrobé bitumineux. Alors, une teneur en vides variant de 5,5-7,5 à 13-15% favorise la dégradation des enrobés bitumineux. Ceci a été observé par Terrel et coll. (1994) au niveau de la teneur en vides et corréler par Masad et coll. (2006) au niveau du degré de perméabilité des enrobés bitumineux. À cet effet, la majorité des dégradations par désenrobage se produit essentiellement pour les enrobés à texture ouverte (*open-graded*), les couches de base et les traitements de surface, qui sont tous relativement perméable à l'eau en comparaison avec des enrobés à granulométrie étalée et à texture plus fermée (*dense-graded*). Afin de montrer la perte de cohésion possible en présence d'eau, Castañeda Pinzon (2007) a effectué des essais de module résilient à 10°C (conditionnement de 6h) sur cinq enrobés constitués d'un bitume de pénétrabilité 80-100, ayant une teneur en bitume de 5,0 à 5,8% (teneur par rapport à la masse de granulat) et une teneur en vides variant de 3,2 à 7,4%. Plus particulièrement, suite à une, deux ou trois immersions de 24h dans l'eau à une température de 60°C, il a observé que la perte de rigidité est de l'ordre de 0 à 64%, 0 à 75% et de 9 à 86% respectivement. Ces pertes de rigidité sont considérables. Des résultats similaires ont également été observés par Schmidt et coll. (1972). Cependant, après une longue période de séchage, les pertes de module sont restituées (Castañeda Pinzon, 2007).

Température élevée – Une hausse de la température génère une baisse de la viscosité et de la perméabilité du bitume, ce qui se traduit définitivement par une augmentation de la perte de rigidité de l'enrobé en présence d'eau. Plus particulièrement, pour un enrobé constitué

---

des vides est élevée, plus la perméabilité est élevée (Abdullah et coll., 1998 ; Kanitpong et coll., 2001 ; Chen et coll., 2004).

d'un bitume de pénétrabilité 80-100 et ayant une teneur en vides de 7 ± 0,5%, il a été montré que la perte de rigidité suite à une immersion dans l'eau à 60°C, comparativement à 40°C et 20°C, est respectivement de 1,8 et 6,2 plus sévère (Castañeda Pinzon, 2007). Lottman (1982), et Brown et coll. (2009) mentionnent que la saturation partielle d'éprouvettes et leur immersion d'une durée de 24h dans une eau à une température de 60°C reflète la dégradation des enrobés bitumineux observable sur chaussées dans les quatre premières années de leur vie utile (compactage Marshall, teneur en vides de 4 à 8%, essai de rupture par traction indirecte).

Cycles de gel-dégel – La réalisation de cycles de gel et dégel sur des enrobés bitumineux partiellement saturés se traduit par des pertes de rigidité qui sont irréversibles. Ceci s'explique par la solidification de l'eau qui génère des contraintes élevées (1 à 3MPa) conduisant à la gélifraction du granulat et à la fragilisation de l'enrobé bitumineux (Mauduit et coll., 2007). Notamment, Lottman (1982) et Brown et coll. (2009) stipulent que l'action combinée de la saturation partielle des éprouvettes, d'un cycle de gel d'une durée de 15h à -18°C et d'une immersion de 24h dans une eau à une température de 60°C reflète la dégradation des enrobés bitumineux observable sur chaussées après 4 à 20 ans de vie utile, ce qui est nettement supérieure à l'action combinée d'une saturation partielle et d'une immersion à 60°C. Suite à un seul cycle de gel-dégel, la perte de rigidité à la rupture peut atteindre les 35% (Gilmore et coll., 1985 ; Huang et coll., 2005 ; Feng et coll., 2010). Aussi, suite à la réalisation de cycles de gel et dégel, des enrobés partiellement saturés en eau ont présenté des augmentations de volume. Ces augmentations de volume constituent en soit une augmentation de la teneur en vides des enrobés qui peut atteindre les 2% (Yi et coll., 2009 ; Feng et coll., 2010).

Il faut mentionner que le trafic joue aussi un rôle important dans la dégradation par l'eau des enrobés bitumineux. Dans certains cas, le passage des véhicules ne fait qu'accentuer la perte de rigidité initiée par les nombreux mécanismes, mais celle-ci peut être réversible après un séchage prolongée. Malgré cela, le passage des véhicules peut provoquer le décapage hydraulique, le lavage du liant (désorption), la rupture du film de bitume et la propagation de

microfissures au sein du mastic dont la majorité constitue des dégradations irréversibles (Taylor et coll., 1983).

1.2.5 Sollicitations chimiques

1.2.5.1 Produits de déglaçage

L'entretien hivernal et le dégagement complet des chaussées nécessitent l'utilisation de produits de déglaçage. Leur choix est dicté par la température ambiante et l'effet recherché. L'efficacité des produits de déglaçage dépend de leur concentration (en ordre décroissant) : sous forme solide (grains), combinaison solide-liquide (bouillie) et forme liquide (saumure). Toutefois, le chlorure de sodium (NaCl) et le chlorure de calcium ($CaCl_2$) doivent être en présence d'eau ou capter l'humidité dans le milieu environnant afin d'amorcer le processus de fonte. Donc, la rapidité de leur action est liée à la quantité d'eau disponible (Gelin, 1989). Suivant leur concentration, le NaCl et le $CaCl_2$ sont efficaces de -3 à -12°C et de -12 à -20°C respectivement, sinon il faut avoir recours aux abrasifs[13] (Gelin, 1989 ; VH, 2005a, 2005b ; Transports Québec, 2011a). L'ajout de produit de déglaçage (ou d'une substance cryoscopique) permet d'abaisser le point de congélation de l'eau. La température minimale permettant le dégel de la glace correspond au point eutectique.

Il est nécessaire de déblayer la chaussée de la neige avant l'application des produits afin d'éviter les gaspillages. Les dosages usuels en sel, sous forme solide, saumure ou bouillie, sont de 4 à 15g/m^2 en traitement préventif et de 20 à 60g/m^2 en curatif (Bouey et coll., 1991 ; Livet, 1998). Une augmentation des dosages n'est pas un gage de meilleure efficacité car c'est souvent l'eau qui manque le plus afin d'amorcer le processus de fonte.

---

[13] Les abrasifs sont parfois utilisés seuls pour améliorer la traction. La taille minimale et maximale des particules est respectivement de 2,5mm et d'environ 12mm. L'efficacité des abrasifs peut être améliorée en ajoutant du NaCl ou $CaCl_2$ car ces produits ont tendance à s'imprégner dans la surface en fondant, ce qui empêche les particules d'être emportées par le vent ou la circulation (CNRC, 1978).

Le changement d'état de l'eau[14] implique un transfert de chaleur dans le milieu. Or, l'évaporation de l'eau et la fusion de la glace, lors du salage par exemple, absorbent de la chaleur. Tandis que la condensation et la formation de glace libèrent de la chaleur dans le milieu (Bouey et coll., 1991). Le phénomène d'hydratation d'un fondant solide s'accompagne toujours d'un transfert d'énergie[15].

1.2.5.2 Chlorure de calcium, $CaCl_2$

Le $CaCl_2$ est issu d'un processus industriel. Il est plus efficace que le NaCl en raison de sa forte teneur en eau (22 à 25%), sa forte hygroscopicité, et de sa libération de chaleur lors de son hydratation et la fonte de la glace (VH, 2005a). Ainsi, il fixe l'eau pour une humidité relative supérieure à 45-50%[16] (VH, 2005b). Le point eutectique du $CaCl_2$ est de -51,6°C à une concentration[17] d'environ 30% (% massique de soluté par rapport à celle de la solution). Il est difficile à stocker ailleurs qu'en silo étanche, son coût est supérieur et une quantité plus élevée est requise pour faire fondre la glace en comparaison au NaCl (VH, 2005a, 2005b).

1.2.5.3 Chlorure de sodium, NaCl

Le NaCl continue à être l'agent de déglaçage privilégié dans le monde en raison de sa disponibilité et son coût relativement faible. Le point eutectique du NaCl est de -21,1°C pour une concentration de 23,3% (VH, 2005b ; Rock, 2010). Si la concentration est supérieure à la concentration eutectique, les cristaux de NaCl sont précipités sans abaisser davantage le point de congélation. Sa solubilité dans l'eau est de 26,3% à 0°C. De même, le NaCl est hygroscopique. L'eau est fixée si l'humidité relative est supérieure à 75%[13]. À basse température (-7 ou -8°C), l'humidité de l'air est très faible et l'eau est insuffisante pour que

---

[14] La fusion ou la congélation de l'eau nécessite une énergie d'environ 334 J/g.

[15] Endothermique pour le NaCl (-32,6 J/g) et exothermique pour le $CaCl_2$ (+242 J/g) (Vautrin et coll., 1996).

[16] La température de l'air n'est pas spécifiée.

[17] Convenablement, ce rapport est appelé titre massique et non concentration massique (VH, 2005a).

le chlorure de sodium puisse agir. Alors, il est possible de l'utiliser en saumure ou en bouillie de sel (Gelin, 1989).

Bien que l'action chimique du NaCl sur les granulats, les liants et les enrobés bitumineux semble inexistante (VH, 2005c), certaines sollicitations et endommagements peuvent être associés à son utilisation :

- choc thermique, qui est proportionnel à la vitesse d'hydratation du NaCl, dû à sa réaction endothermique qui créer un abaissement de la température de l'ordre de 4 à 7°C de la surface du revêtement en quelques minutes (Bouey et coll., 1991, Vautrin et coll., 1996). Par exemple, un salage de 40g/m^2 sur une épaisseur de 2mm de verglas peut entraîner une chute de 2,9°C de la température de surface du revêtement (Mauduit et coll., 2007). Cet abaissement de température peut générer un micro faïençage de la surface du revêtement. Ce phénomène est plus sévère pour les revêtements anciens possédant un bitume durci et de ce fait, plus fragile (Geli, 1989 ; VH, 2005c) ;
- abaissement de la température du revêtement afin d'alimenter la réaction endothermique qui peut, dans certains cas, entraîner une formation de glace du milieu aqueux présent au sein ou en surface du revêtement (Gelin, 1989 ; Vautrin et coll., 1996). L'abaissement maximal de la température de surface est d'autant plus important que la couche de roulement est isolante : couche d'enrobé ayant une teneur élevée en vides, notamment les enrobés drainant (Vautrin et coll., 1996). Ensuite, la température du revêtement revient quasiment à la température initiale. Subséquemment, ceci crée une augmentation du nombre de cycles de gel-dégel de l'eau (ou solution aqueuse) à la surface et au sein du revêtement (Vautrin et coll., 1996 ; VH, 2005a) ;
- présence résiduelle d'humidité en surface en raison de la rétention d'eau par le NaCl et prolongement de la phase liquide (eau) puisque la phase solide (neige ou glace) est retardée ou supprimée par la présence de sel. Ceci accroit le temps d'exposition à l'eau de l'enrobé et favorise le désenrobage des granulats (Gelin, 1989 ; VH, 2005c ; 2005d). Notamment, Carter et coll. (2010b) ont montré que la résistance à la fissuration thermique d'un enrobé bitumineux partiellement saturé en saumure (concentration en sel de 8%) et

Rapport-Gratuit.com

soumis à des variations de température de -5 à 20°C est davantage réduite, comparativement à celui partiellement saturé en eau ;

- enrichissement en glace (eau) au sein des matériaux granulaires qui créé un soulèvement accru du revêtement aux fissures. Le processus d'enrichissement en glace au sein des matériaux granulaires est généré par l'infiltration de la saumure et plus spécialement, par l'existence d'un gradient en NaCl (Doré et coll., 1997) ;
- dégel des matériaux granulaires en raison de l'infiltration de saumure par les fissures ou à travers un revêtement perméable. L'effet du trafic est alors plus important à ce moment, couche dégelée reposant sur une couche gelée, que normalement en été où la rigidité des couches décroît avec la profondeur (VH, 2005c) ;
- pression de cristallisation générée par la formation de cristaux de sel de la solution saline dans les pores des particules granulaires en raison des cycles de mouillage et de séchage[18]. Ce phénomène est négligeable pour les particules granulaires des enrobés car elles sont protégées par le bitume. Toutefois, ce phénomène est notable dans les régions chaudes et côtières. Il affecte le revêtement en pierres des bâtiments et occasionnellement les revêtements minces bitumineux (Obika et coll., 1990 ; Woodbridge et coll., 1994 ; Netterberg et coll., 2004) ;
- déstabilisation d'un sol argileux par la présence de saumure (Gelin, 1989).

1.3 Comportements mécaniques et thermomécaniques des enrobés bitumineux

L'enrobé bitumineux hérite des caractéristiques viscoélastiques du liant qui le compose. En particulier, les caractéristiques mécaniques de l'enrobé bitumineux sont thermomécaniques

---

[18] En laboratoire, ce phénomène est utilisé pour simuler les cycles de gel-dégel sur les granulats utilisés dans les bétons (norme CSA A23.2-9A spécifié dans CSA, 2004). Le granulat est submergé dans une solution de sulfate de magnésium ($MgSO_4$) ou de sulfate de sodium (Na_2SO_4). Ensuite, il est séché, cela produit une augmentation de volume (9% pour le $MgSO_4$) due à la cristallisation de la solution, mettant sous pression la roche générant sa désagrégation (Aïtcin et coll., 1992 ; Di Benedetto et coll., 2005). Toutefois, l'essai de laboratoire ($MgSO_4$) ne permet pas de discriminer la performance des granulats in-situ, alors il n'est plus utilisé au MTQ depuis 1994 (Aïtcin et coll., 1992).

car elles dépendent de la température. Également, la durée de sollicitation (vitesse ou fréquence) a un impact sur ces propriétés mécaniques. Malgré leur comportement fort complexe, il est possible d'identifier quatre types de comportements mécaniques en considérant le nombre de cycles de sollicitation appliquée (N) et l'amplitude de déformation (|ε|) (Di Benedetto, 1990) :

1) pour un faible nombre de sollicitations et des déformations de quelques pourcents, le comportement observé est fortement non linéaire (NL) ;
2) pour quelques centaines de cycles de sollicitation et des déformations faibles ($<10^{-4}$ m/m), le comportement est considéré, en première approximation, viscoélastique linéaire (VEL) ;
3) pour plusieurs milliers de cycles de sollicitation et des déformations de faible amplitude, un endommagement se développe, c'est le phénomène de fatigue ;
4) lorsque des sollicitations déviatrices en contraintes sont appliquées à partir d'une contrainte nulle, des déformations irréversibles non négligeables se produisent pour des amplitudes de déformation proches de la rupture. Leur accumulation génère de l'orniérage.

La Figure 1.4 illustre les comportements mécaniques des enrobés bitumineux en fonction du nombre de sollicitations (N) et l'amplitude de déformation (|ε|).

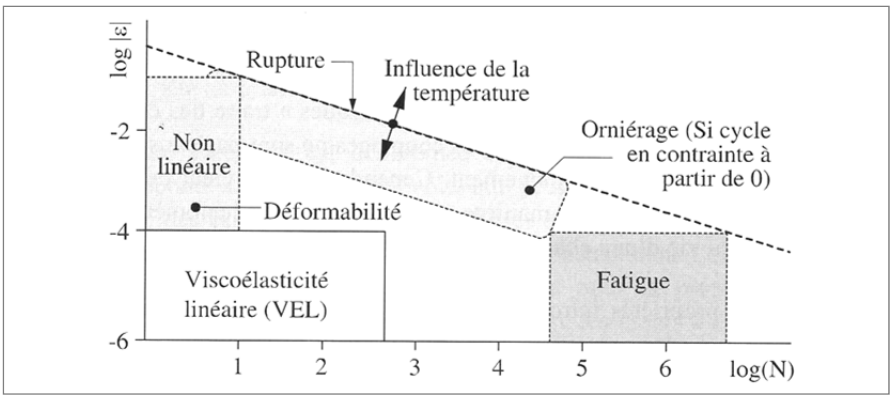


Figure 1.4 Comportements mécaniques des enrobés à température fixée, N (nombre de sollicitations) et |ε| (amplitude de déformation)
Tirée de Di Benedetto et coll. (2005, p. 79)

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

1.4 Comportement viscoélastique linéaire des enrobés bitumineux

1.4.1 Mesures des propriétés viscoélastiques linéaires

Il est nécessaire de considérer l'évolution du chargement en fonction du temps lorsqu'on mesure des propriétés d'un matériau présentant un comportement visqueux.

1.4.1.1 Types d'essais

Tous les essais, qu'ils soient homogènes[19] ou non, permettent de décrire le comportement viscoélastique linéaire (VEL) des enrobés bitumineux. Les essais homogènes ont comme avantage d'identifier de façon simple les paramètres de la loi de comportement et les limites de domaine linéaire du matériau bitumineux.

Les essais homogènes sont constitués : 1) essai triaxial, 2) essai de compression et/ou de traction simple sur cylindres ou barreaux et, 3) certains essais en cisaillement. Les essais non homogènes sont composés : 1) essais de flexion de poutre supportée ou pas (flexion en deux, trois ou quatre points) et, 2) essai de compression diamétrale (essai de traction indirecte ou essai brésilien).

1.4.1.2 Types de chargements

Lors d'essais mécaniques, les trois (3) principaux types de chargement appliqués aux enrobés bitumineux sont :

1) chargement quasi statique analysé en introduisant le temps (mode temporel). Permet de déterminer, par exemple, le module sécant ;
2) chargement cyclique non sinusoïdal, généralement en "impulsion" qui requiert une analyse particulière ;

---

[19] L'état de contrainte et de déformation est le même en chaque point de l'éprouvette testée.

3) chargement sinusoïdal analysé en introduisant la fréquence (Fr) ou la pulsation (ω) (mode fréquentiel). Le module complexe (E*) est directement déterminé avec ce type de chargement.

1.4.2 Mesure sous chargement cyclique sinusoïdal, le module complexe

1.4.2.1 Définition

Le module complexe est mesuré avec un essai soumettant l'enrobé bitumineux à des sollicitations sinusoïdales de fréquences variées. L'application d'une contrainte sinusoïdale à un matériau peut être représentée par un vecteur en coordonnées cylindriques (Figure 1.5). Alors, à tout moment, la contrainte peut être représentée par $\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t)$, où ω représente la vitesse angulaire ou communément appelée pulsation. La pulsation ω est égale à $2\pi Fr$ ou $2\pi/T$, où Fr représente la fréquence en Hertz et T la période pour réaliser une oscillation.

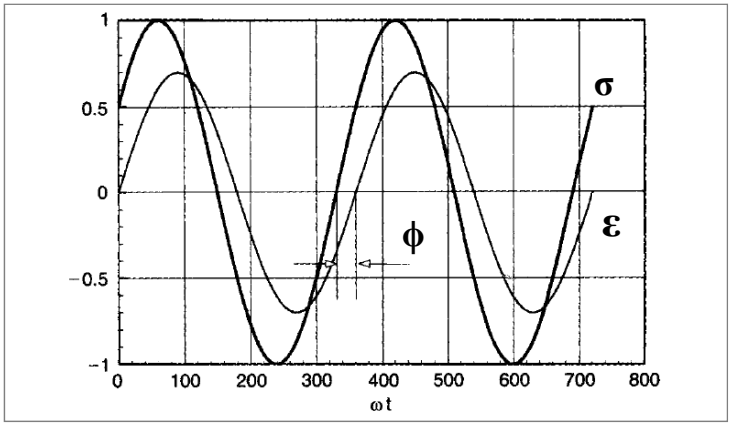


Figure 1.5 Variation sinusoïdale de la contrainte et de la déformation pour un matériau viscoélastique linéaire
Tirée de Crawford (1998, p. 111)

L'application d'une contrainte sinusoïdale [$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t)$] à un matériau parfaitement élastique se traduit inévitablement par une déformation sinusoïdale qui est en phase (ou instantanée) avec la contrainte, soit : [$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t)$]. Toutefois, lorsque le matériau est viscoélastique, la déformation (la réponse) se trouve en retard sur la contrainte (la

sollicitation). Alors, la déformation peut être représentée par la relation $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \phi)$, où ϕ constitue l'angle de déphasage (ou angle de phase) entre les deux signaux et varie de 0 à 90° (0 à $\pi/2$). Un angle de 0° correspond à un matériau parfaitement élastique tandis qu'un angle de phase de 90° correspond à un matériau purement visqueux (Transports Québec, 2011b).

Il est possible d'écrire les équations précédentes en spécifiant que c'est la contrainte qui précède la déformation, soit :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t) \tag{1.1}$$

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \phi) \tag{1.2}$$

La dernière équation peut être étendue sous la forme suivante :

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t) \cos(\phi) + \sigma_0 \cos(\omega t) \sin(\phi) \tag{1.3}$$

Ainsi, la contrainte peut être examinée sous deux composantes :

1) $\sigma_0 \cos \phi$, laquelle est en phase avec la déformation ;
2) $\sigma_0 \sin \phi$, laquelle est totalement déphasé par rapport à la déformation ($\phi = 90°$).

Cela conduit à la définition de deux modules dynamiques, soit (Crawford, 1998) :

1) $E_1 = (\sigma_0 \cos \phi)/\varepsilon_0$, lequel est en phase avec la déformation. On dit que E_1 représente la composante réversible élastique du module complexe ;
2) $E_2 = (\sigma_0 \sin \phi)/\varepsilon_0$, lequel est totalement déphasé par rapport à la déformation. E_2 représente la composante irréversible et quantifie l'énergie dissipée en cours de sollicitation.

Il est possible de représenter ces deux modules sur un diagramme de phase (Figure 1.6). De plus, le module complexe peut être représenté sous forme de vecteur, soit : la norme du module complexe |E*|, tel que représenté à la Figure 1.6.

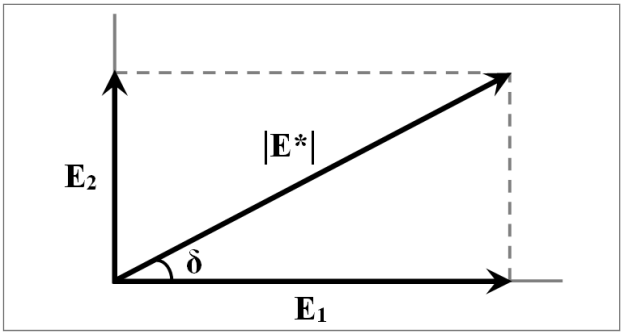


Figure 1.6 Représentation des composantes E_1 et E_2, et la norme du module complexe |E*|

Subséquemment, la norme du module complexe |E*| se définie ainsi :

$$|E^*| = \sqrt{{E_1}^2 + {E_2}^2} \tag{1.4}$$

et on utilise également les notations suivantes :

$$E^* = E_1 + i\,E_2 \tag{1.5}$$

où :

|E*| Norme du module complexe (module dynamique ou module de rigidité) ;

E_1 Partie réelle du module complexe, appelée module d'élasticité dynamique ou module de conservation ;

E_2 Partie imaginaire du module complexe, appelée module de perte ;

i Nombre imaginaire ($= \sqrt{-1}$).

Les valeurs des composantes réelle (E_1) et imaginaire (E_2) se calculent aisément :

$$E_1 = |E^*| \cos\phi \tag{1.6}$$

$$E_2 = |E^*| \sin\phi \tag{1.7}$$

La composante E_1 permet de quantifier l'énergie élastique emmagasinée dans le matériau lors d'un chargement et libérée lorsque la charge est retirée. La composante E_2 quantifie l'énergie dissipée dans le matériau sous l'effet d'une sollicitation. Cette énergie dissipée se transforme en chaleur, entre-autres, et va accroître la température au sein du matériau soumis à un chargement cyclique (Carter et coll., 2002). C'est le caractère visqueux du matériau qui est à l'origine de cette propriété spécifique.

1.4.2.2 Types d'essais

Pour tous les essais menés à diverses fréquences et températures, il est possible de déterminer le module complexe et les composantes de l'enrobé bitumineux en considérant les valeurs de la force F et du déplacement D appliquées à l'éprouvette et celle de l'angle de phase ϕ entre les signaux, du facteur de forme γ (dépendant des dimensions de l'éprouvette) et d'un facteur de masse μ prenant en compte (si nécessaire) les effets d'inertie liés à la masse M de l'éprouvette en mouvement et à la masse m de l'appareillage mobile.

Les fréquences et températures usuellement utilisées pour déterminer le module complexe dépendent de la capacité des équipements d'essai et du type d'enrobé testé : elles varient de 0,01 à 40Hz pour la fréquence et de -20 à +60°C pour la température.

1.4.2.3 Représentation graphique des résultats

Les composantes du module complexe varient avec la température et la fréquence de sollicitation qui sont fixées pour chaque essai. Les résultats expérimentaux ($|E^*|$, ϕ, E_1 et E_2) sont habituellement exprimés à l'aide de quatre représentations classiques, soit : courbes isothermes et isochrones, plan Cole-Cole et espace de Black.

Courbes isothermes – Les résultats de modules complexes sont représentés en traçant la norme du module complexe $|E^*|$ en fonction de la fréquence pour chacune des températures d'essais, généralement en coordonnées logarithmiques (Figure 1.7). La pente des isothermes

permet d'estimer la susceptibilité cinétique du matériau, c'est-à-dire la variation du module avec la fréquence de sollicitation.

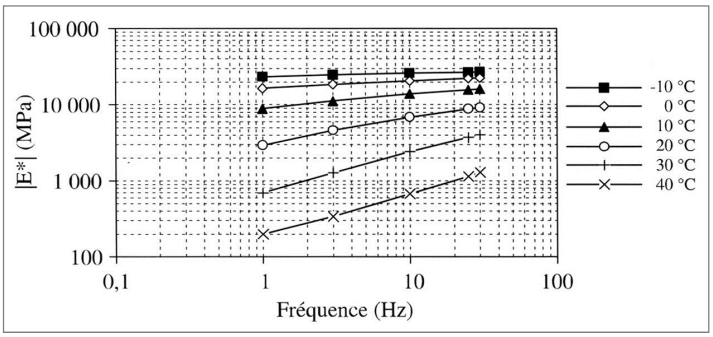


Figure 1.7 Isothermes du module complexe
Tirée de Di Benedetto et coll. (2005, p. 92)

Courbes isochrones – On représente également les résultats de modules complexes en traçant la norme du module |E*| en fonction de la température pour chaque fréquence d'essais en coordonnées semi-logarithmiques (Figure 1.8). A l'instar des courbes isothermes, cette représentation permet d'estimer la susceptibilité thermique du matériau : variation du module en fonction de la température.

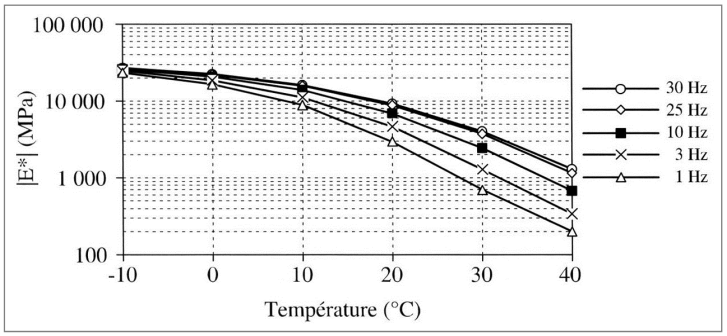


Figure 1.8 Isochrones du module complexe
Tirée de Di Benedetto et coll. (2005, p. 92)

Représentation dans le plan Cole et Cole – Une façon simple et utile de représenter les résultats de modules complexes consiste à porter la partie réelle du module complexe (E_1) en abscisse et la partie imaginaire (E_2) en ordonnée (Figure 1.9). Lorsque le matériau obéit au

principe d'équivalence temps-température (PETT, § 1.4.3), les points expérimentaux aux différentes fréquences et températures permettent de définir une courbe unique dans le plan de Cole-Cole. Cette courbe est caractéristique du matériau étudié. Elle peut être utilisée pour caler un modèle de comportement rhéologique (§ 1.4.4).

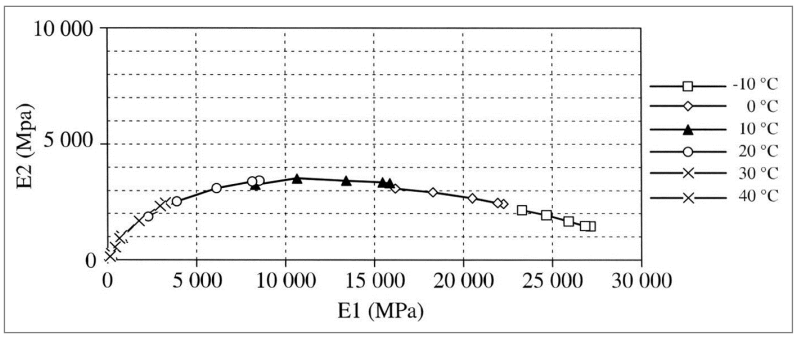


Figure 1.9 Module complexe dans le plan Cole et Cole
Tirée de Di Benedetto et coll. (2005, p. 93)

Représentation dans l'espace de Black – Il est également possible d'illustrer les résultats de modules complexes en traçant le logarithme de la norme du module complexe |E*| en fonction de l'angle de phase ϕ correspondant (Figure 1.10). Lorsque le matériau obéit au principe d'équivalence temps-température (§ 1.4.3), les points expérimentaux aux différentes fréquences et températures permettent de définir une courbe unique, caractéristique du matériau testé. Cette représentation est souvent utilisée pour visualiser la zone des modules faibles et en particulier, la diminution d'angle de phase pour les hautes températures au moment où le bitume devient suffisamment fluide pour ne plus intervenir dans la rigidité du matériau, soit le comportement d'un matériau granulaire non lié.

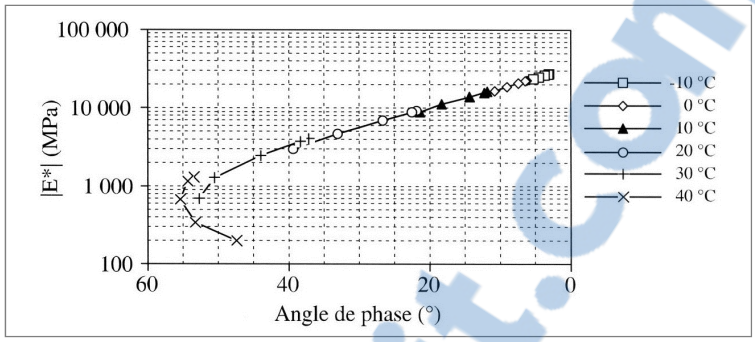


Figure 1.10 Module complexe dans l'espace de Black
Tirée de Di Benedetto et coll. (2005, p. 93)

1.4.3 Principe d'équivalence temps-température

L'espace de Black et le plan Cole et Cole permettent de constater si l'enrobé testé obéit au principe d'équivalence temps-température (PETT), soit à l'observation d'une courbe unique. Les matériaux possédant cette propriété sont appelés : matériaux thermorhéologiquement simples. Pour certains enrobés contenant des bitumes particuliers (bitumes purs à forte teneur en paraffines ou certains bitumes modifiés aux polymères), ces courbes ne sont plus uniques dans les deux domaines. Le principe d'équivalence temps-température signifie que l'augmentation de la fréquence de sollicitation a un effet équivalent à une diminution de la température et vice-versa. À cet effet, une même valeur de module peut être obtenue pour différents couples fréquence-température. L'utilisation de la propriété d'équivalence temps-température permet de construire une courbe unique (log |E*| - log Fr) en fonction d'une température de référence (T_R) choisie arbitrairement. Elle est généralement tracée pour une température de référence de +10°C pour les enrobés et +25°C pour les bitumes. La courbe obtenue est appelée courbe maîtresse. Cette courbe est obtenue par translation parallèle à l'axe des fréquences (échelle logarithmique) de chaque isotherme par rapport à l'isotherme correspondant à la température de référence (T_R) jusqu'à superposition des points de même ordonnée (Figure 1.11).

Rapport-Gratuit.com

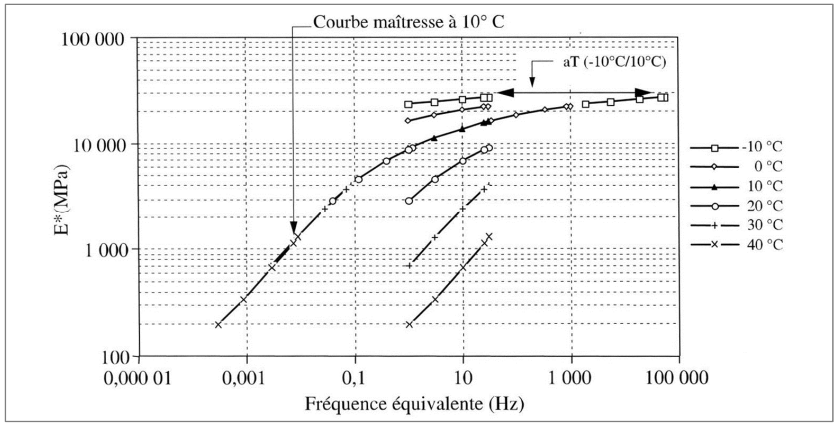


Figure 1.11 Élaboration d'une courbe maîtresse (T_R = +10°C)
Tirée de Di Benedetto et coll. (2005, p. 94)

Il faut déterminer la fonction de translation (log a_T) avec la température afin de réaliser la translation de chaque isotherme et former la courbe maîtresse. La formule analytique la plus utilisée (Somé, 2012) pour représenter la fonction de translation est la formule de Willams, Landel et Ferry (WLF) :

$$Log\ a_T = \ Log\ \frac{\tau_E}{\tau_{E\ T_R}} \ = \frac{-\ C_1\ (T\ -\ T_R)}{(T\ -\ T_R)\ +\ C_2} \tag{1.8}$$

où :

C_1, C_2 Constantes déterminées à partir des résultats d'essai et dépendant de la valeur de la température de référence (T_R) ;

T_R Température de référence à laquelle les autres températures sont ramenées ;

T Températures testées dans le programme expérimental en Kelvin (K).

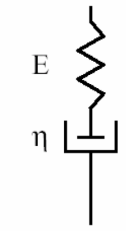
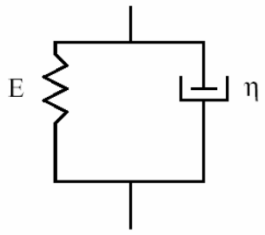
L'intérêt des courbes maîtresses est non seulement de résumer en une seule courbe toutes les données acquises, mais elles permettent de prévoir les caractéristiques rhéologiques du matériau étudié dans des zones technologiquement intéressantes mais expérimentalement inaccessibles (Carter, 2002). Grâce à ce principe, la translation à une température de référence (T_R), des résultats obtenus à une température donnée (T) est possible en

déterminant des fréquences équivalentes. La translation d'une courbe de T vers T_R consiste essentiellement à multiplier chaque fréquence par un facteur de translation a_T et associer la valeur du module mesuré à T à cette nouvelle fréquence dans le domaine T_R.

1.4.4 Modélisation du comportement viscoélastique linéaire

La modélisation des matériaux bitumineux dans le domaine des petites déformations, soit dans le domaine viscoélastique linéaire, est possible en combinant des ressorts (éléments élastiques) et des amortisseurs linéaires (éléments visqueux Newtonien). Ces éléments rhéologiques simples peuvent être placés en série ou en parallèle. Les modèles les plus simples sont ceux de Maxwell et de Kelvin-Voigt (Tableau 1.15). Toutefois, les modèles analogiques de Maxwell (liquide viscoélastique) et de Kelvin-Voigt (solide viscoélastique) ne peuvent pas décrire correctement le comportement complexe des matériaux bitumineux, mais ils peuvent constituer des éléments de base pour des associations plus complexes (Olard, 2003).

Tableau 1.15 Modèles de Maxwell et Kelvin-Voigt
Adapté de Olard (2003, p. 192)

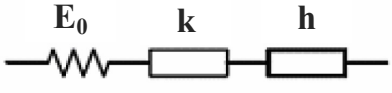
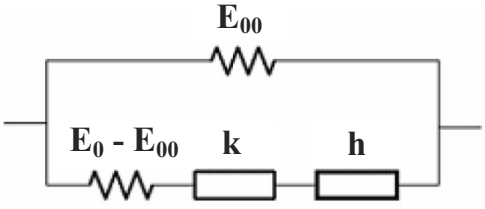
Modèle de Maxwell	**Modèle de Kelvin-Voigt**
 Liquide viscoélastique	 Solide viscoélastique
$E^*(\omega) = E\,\frac{i\omega\tau}{1+i\omega\tau} = \frac{E\,\omega^2\,\eta^2 + i\,E^2\,\omega\,\eta}{E^2 + \omega^2\,\eta^2}$	$E^*(\omega) = E + i\omega\eta$

Il existe des modèles de Maxwell et de Kelvin-Voigt généralisés qui permettent de décrire, de façon satisfaisante, le comportement viscoélastique linéaire des enrobés bitumineux

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

pourvu qu'un nombre suffisant d'éléments soit utilisé (Olard, 2003). Le modèle de Maxwell généralisé est constitué de n éléments de Maxwell montés en parallèle avec éventuellement un ressort et un amortisseur linéaire en parallèle. En outre, le modèle de Kelvin-Voigt généralisé est constitué d'un groupe de n éléments de Kelvin-Voigt en série avec éventuellement un ressort et un amortisseur linéaire en série. De plus, ces modèles permettent de décrire tout type de comportement viscoélastique linéaire lorsque le nombre d'éléments tend vers l'infini (Olard, 2003 ; Di Benedetto et coll., 2005). Toutefois, la modélisation devient fastidieuse. Or, Huet (1963) a proposé un modèle à spectre continu. Le modèle d'Huet est un modèle analogique à 3 éléments qui associe en série un ressort de raideur E_0 et deux amortisseurs à loi de fluage parabolique de paramètres h et k de la forme $F(t) = at^h$ et $F(t) = bt^k$ (Tableau 1.16). Bien que ce modèle permette une bonne modélisation des résultats de modules complexes dans le plan Cole-Cole, sa précision laisse à désirer pour les faibles modules (hautes températures et/ou basses fréquences). Pour palier à cela, Sayegh (1965) a adapté le modèle de Huet en y ajoutant un élément ressort de très faible rigidité (E_{00}) en parallèle à la série d'éléments proposés par Huet (modèle de Huet-Sayegh, Tableau 1.16).

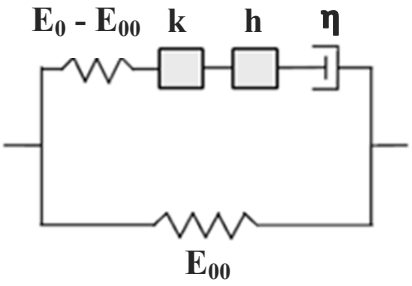
Tableau 1.16 Modèles de Huet et de Huet-Sayegh
Adapté de Olard (2003, p. 71 et 72)

Modèle d'Huet	**Modèle de Huet-Sayegh**
	
$E^*(\omega) = \frac{E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}}$	$E^*(\omega) = E_{00} + \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}}$

Plus récemment, Olard et ses collaborateurs ont proposé une amélioration au modèle d'Huet-Sayegh en y introduisant un amortisseur linéaire. Ce nouveau modèle dénommé 2S2P1D (2 *Springs*, 2 *Parabolic* and 1 *Dashpot*) donne des simulations bien meilleures aux faibles

fréquences et/ou hautes températures (Olard et coll., 2003 ; Di Benedetto et coll., 2004). Le modèle 2S2P1D est valable pour tous les types de matériaux bitumineux : liants, mastics et enrobés. De plus, ce modèle constitue un spectre continu. Seulement sept constantes (E_0, E_{00}, δ, τ_0, k, h et β) sont nécessaires pour déterminer entièrement le comportement viscoélastique du matériau considéré à une température donnée. Pour les liants purs, le module statique est de zéro ou très proche de zéro s'ils sont modifiés. Si le matériau est thermorhéologiquement simple et respecte le principe d'équivalence temps-température (PETT), alors seul τ dépend de la température. Alors, il est possible de recourir à la formule WLF : équation (1.8) à la page 56. Cette équation intègre deux constantes, soit : C_1 et C_2. Ces deux constantes sont alors ajoutées aux sept précédentes. Donc, seulement neuf constantes sont nécessaires pour la détermination du comportement viscoélastique linéaires des enrobés.

Tableau 1.17 Modèle 2S2P1D
Adapté de Olard (2003, p. 108 et 109)

Modèle 2S2P1D

$$E^*(i\omega\tau) = E_{00} + \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}}$$

i	nombre complexe défini par $i^2 = -1$;
ω	pulsation (= $2 \cdot \pi \cdot Fr$) ;
Fr	Fréquence ;
δ, k, h	paramètres des éléments paraboliques, tels que $0 < k < h < 1$;
E_{00}	module statique quand $\omega \rightarrow 0$ (*static modulus*) ;
E_0	module vitreux quand $\omega \rightarrow \infty$ (*glassy modulus*) ;
η	viscosité newtonienne [$\eta = (E_0 - E_{00}) \cdot \beta \cdot \tau$] avec β sans dimension ;
τ	temps caractéristique dont la valeur varie avec la température et $\tau(T) = a_T(T)\tau_0$ avec $\log(a_T) = \frac{-C_1(T-T_R)}{(T-T)+C_2}$

1.4.5 Effet des paramètres de sollicitation sur la valeur du module complexe

1.4.5.1 Température et fréquence

La température et la fréquence constituent les paramètres de sollicitation les plus influents sur la valeur du module complexe. L'influence de la température sur la variation relative de |E*| est plus importante à basse qu'à haute fréquence et celle de la fréquence est plus importante à haute qu'à basse température. Par exemple, pour un enrobé bitumineux 0/14mm (EB-14, PG 64-34), la valeur de |E*| peut varier dans un rapport de 10 à 100 entre -35 et +35°C pour une fréquence donnée et dans un rapport de 1 à 7 entre 0,03 et 10Hz à +35°C.

1.4.5.2 Niveau et nombre de sollicitations

Le niveau et le nombre de sollicitations appliquées pour la réalisation des mesures de module complexe peuvent influer sur le résultat obtenu. Ceci s'explique par la non-linéarité du comportement de l'enrobé avec le niveau de sollicitation et à l'échauffement qui peut être généré au sein du matériau en raison de la dissipation d'énergie liée à la viscosité du bitume.

Dans le cas d'un essai de traction-compression directe sur éprouvettes cylindriques, il est recommandé de solliciter le matériau avec une amplitude de déformation inférieure ou égale à 25×10^{-6} m/m pour rester dans le domaine linéaire (NF EN 12697-26 : AFNOR, 2004a). L'énergie dissipée à chaque cycle est proportionnelle à la fréquence et au carré de l'amplitude de déformation. Cette dissipation génère un échauffement au sein du matériau, qui combiné à sa faible conductivité, mène à une hausse de température et une chute, qui peut être non négligeable, du module. Notamment, l'application de quelques centaines de cycles à 10Hz, +10°C et à 100×10^{-6} m/m peut générer une diminution de 2% de la valeur du module en raison de l'échauffement de l'enrobé bitumineux (Di Benedetto et coll., 2005).

Il est alors recommandé d'appliquer le niveau d'amplitude et le nombre de sollicitations les plus faibles possibles et ce, sans compromettre la qualité des mesures de module qui est fonction de la précision des équipements.

1.4.6 Effet de la composition sur la valeur du module complexe

1.4.6.1 Introduction

Il faut souligner que l'influence de chacun des constituants sur la rhéologie de l'enrobé bitumineux dépend principalement de la température (θ). En effet, la rhéologie de l'enrobé bitumineux est tributaire de celle(s) : du bitume lorsque $\theta < +10°C$, du bitume et du granulat pour θ comprise entre +10 et +50°C, et du granulat pour $\theta > +50°C$ (Goodrich, 1991). Effectivement, à haute température, le bitume présente une faible viscosité et le rôle des granulats devient de plus en plus important. Par ailleurs, les teneurs en vides et en liant sont les paramètres de composition les plus influents quant à la rigidité des matériaux bitumineux (Soliman et coll., 1977 ; Moutier, 1991).

1.4.6.2 Granulats et fines minérales

La forme, la texture de surface et la nature minéralogique des granulats semblent avoir peu d'influence sur la valeur du module complexe à basse température ou tout au moins lorsque le liant est suffisamment rigide (Di Benedetto et coll., 2005). Le rapprochement de la granulométrie de la courbe de masse volumique maximale (CMVM)[20] augmente la rigidité des enrobés bitumineux, toutefois elle doit être suffisamment éloignée pour permettre l'ajout de bitume et la présence de vides (Langlois, 2001). Pour une teneur en bitume donnée, une granulométrie voisine de la courbe granulométrique de la CMVM se traduit par une baisse de teneur en vides et donc, par une hausse de rigidité. De plus, l'ajout de filler minéral permet de combler une partie des vides entre les particules grossières, d'améliorer la qualité du mastic en le rigidifiant (Lesueur, 2002) et de réduire l'épaisseur du film de bitume en raison de la surface spécifique élevée de ses particules. En définitive, l'ajout de fines améliore

---

[20] La représentation graphique de la granulométrie d'enrobés dont les tamis sont portés à la puissance de 0,45 a pour avantage de simplifier l'illustration de la courbe de masse volumique maximale des enrobés. Cette dernière est représentée par une droite reliant l'origine 0,0 à la valeur de 100% passant au tamis de dimension de grosseur maximale (MTQ, 2005).

souvent les caractéristiques mécaniques de l'enrobé bitumineux. Par contre, un surdosage en fines, qui est plus influent qu'un sous-dosage, va créer un desserrement de la fraction grossière de la structure granulaire nuisant à l'agencement (compacité) des particules (Doan, 1977 ; Lamothe, 2004). En conséquent, la rigidité de l'enrobé bitumineux en est modifiée.

1.4.6.3 Liant et additifs

La compacité de l'enrobé est fortement liée à la teneur en liant, ce qui influe sur la rigidité de l'enrobé bitumineux. En effet, l'augmentation de la teneur en liant conduit à une augmentation de la compacité de l'enrobé bitumineux et de son module et ce, jusqu'à une valeur optimale. Au-delà de cette teneur optimale en liant, le module diminue (Moutier, 1991). Certes, la hausse de la teneur en bitume se traduit par deux effets : augmentation de la lubrification entre les particules lors du compactage et remplissage d'une partie des vides laissés par les granulats. Or, ces deux effets permettent un meilleur compactage de l'enrobé. Par contre, un surdosage en liant réduit l'efficacité du compactage car le bitume en surplus absorbe l'énergie de compactage, ce qui réduit l'agencement granulaire. De plus, le bitume en surplus occupe un volume important, ce qui réduit le frottement entre les granulats. Alors, le surdosage en bitume se traduit inévitablement par une réduction du module de l'enrobé bitumineux (Lamothe, 2004). Notamment, l'optimum est d'autant plus marqué avec la hausse de l'énergie de compactage (Chauvin, 1990). De même, une teneur en liant supérieure à la valeur optimale se traduit par une hausse de la susceptibilité thermique du mélange (Soliman et coll., 1977).

Finalement, il est bon de rappeler que la grosseur nominale maximale (GNM) du combiné granulaire influence directement la teneur en liant. L'augmentation de la GNM se traduit par une baisse de la teneur en liant. Généralement, lorsqu'on augmente la GNM, l'enrobé est plus rigide : graves-bitume comparativement aux enrobés bitumineux de la couche de roulement (SETRA-LCPC, 1994). Ces enrobés présentent des films minces de bitume conduisant à des enrobés plus rigides et surtout moins susceptibles à la température (Doubbaneh, 1995). L'utilisation de bitumes durs (ou de bitumes avec température haute

élevée) dans des enrobés à GNM élevé permet d'obtenir une rigidité nettement supérieure : principe à l'origine de la confection des enrobés à module élevé (EME).

1.4.6.4 Teneur en vides

La diminution de la teneur en vides des enrobés bitumineux se traduit par une augmentation de leur rigidité et une réduction de leur susceptibilité thermique (Soliman et coll., 1977 ; Moutier et coll., 1988 ; Moutier, 1991). Selon Chauvin (1990), la valeur du module d'un enrobé bitumineux est nettement plus sensible à la variation de sa teneur en vides, plus qu'à celle de sa teneur en liant. C'est pourquoi la compaction est une étape cruciale de la mise en œuvre des enrobés.

1.5 Comportement en fatigue des enrobés soumis à des sollicitations mécaniques

1.5.1 Phénomène de fatigue

Le phénomène de fatigue est considéré comme le mode de dégradation prépondérant à température moyenne (0 à 45°C) pour les chaussées bitumineuses (Bahia et coll., 1995). Notamment, le phénomène de fatigue d'un matériau se caractérise par sa rupture après l'application d'un grand nombre de sollicitations (N > 10 000 cycles) et dont l'amplitude est bien inférieure à celle conduisant à la rupture au premier chargement. Les fissures par fatigue s'amorcent théoriquement à la base des couches bitumineuses en raison de la plus forte extension par flexion à cet endroit. Ensuite, il y a remontée de fissure de la base des couches bitumineuses jusqu'à la surface de la couche de roulement. Ultimement, des fissures vont apparaître dans ou de part et d'autre des traces de roues. L'apparition de ces fissures témoigne ainsi de la fatigue du revêtement de la chaussée bitumineuse. Également, la durée nécessaire à l'apparition des fissures en surface va dépendre, dans une certaine mesure, de l'épaisseur des couches liées. A cette section, une synthèse relative aux essais de fatigue et à la durée de vie est présentée et discutée.

1.5.2 Essais de laboratoire

1.5.2.1 Types d'essais

Il existe une panoplie d'essais en laboratoire pour la détermination de la résistance à la fatigue des enrobés bitumineux. Une synthèse détaillée de ces essais de laboratoire est présenté par : Baaj (2002), Di Benedetto et coll. (2003) et, Di Benedetto et coll. (2005). Trois grands types d'essais en laboratoire ont été développés pour évaluer la résistance en fatigue des matériaux bitumineux, qui tentent de simuler le comportement observable sur chaussée, soient : essais de flexion (2, 3 et 4 points), essai de traction-compression et essais de cisaillement. Les essais de flexion visent à représenter les efforts répétés de traction par flexion engendrés dans le revêtement de la chaussée par le passage des véhicules. Les essais de traction ont pour objectif de représenter les efforts de traction générés à la base de la chaussée fléchie. Pour terminer, les essais de cisaillement ont été élaborés pour tenir compte des efforts en cisaillement générés dans les couches de surface.

1.5.2.2 Types et modes de sollicitation

En laboratoire, les sollicitations sont usuellement de type cyclique, sinusoïdal ou *haversine*. Ces sollicitations sont imposées en continu ou avec temps de repos. Dans un souci de simplification et de maîtrise d'essai, la plupart des essais de laboratoire sont réalisés avec des sollicitations sinusoïdales avec ou sans temps de repos. Cela constitue un compromis entre simplicité d'application, d'exploitation et de reproductibilité de la réalité (Di Benedetto et coll., 2005).

De plus, les sollicitations imposées peuvent être contrôlées suivants deux modes, soient : en force (ou de contrainte pour un essai homogène) ou en déplacement (ou en déformation pour un essai homogène). Également, les déformations et les contraintes imposées peuvent être ou ne pas être centrées sur la valeur nulle.

1.5.2.3 Conditions d'essai

Étant donné que le phénomène de fatigue est considéré comme le mode de dégradation prépondérant à température moyenne pour les chaussées bitumineuses, les essais de fatigue en laboratoire sont usuellement réalisés entre 0 et +20°C. En France, la température d'essai est de +10°C. De plus, les fréquences utilisées se situent entre 10 et 40Hz. Cela constitue plus un compromis entre les possibilités de l'appareillage et la durée de l'essai, qu'un paramètre représentatif des conditions de sollicitation des chaussées qui sont variables en considérant la profondeur et la température des couches (Di Benedetto et Coll., 2005).

1.5.2.4 Mécanismes d'endommagement en cours de chargement

L'endommagement par fatigue correspond à l'apparition progressive de microfissures au sein du matériau sous chargement cyclique. L'endommagement se réparti de manière aléatoire au sein du matériau. Malgré cela, il est admis que la répartition de la microfissuration est homogène au sein du matériau (Touhara, 2012). Dans ce contexte, l'endommagement se traduit par une perte progressive de la rigidité du matériau en cours de sollicitation. En référence à la notion de la mécanique des milieux continus (MMC), l'endommagement par fatigue du matériau est quantifié à partir de la mesure de la rigidité du matériau (valeur de la norme du module complexe). Le module complexe (E*) est alors une propriété globale du matériau, soit à l'échelle macroscopique, mais qui traduit bien l'évolution de l'endommagement au sein de la microstructure du matériau.

1.5.2.5 Mesure de la norme du module complexe en cours de chargement

La mesure de la contrainte et des déformations induites en cours de sollicitation cyclique permet de déterminer l'évolution de la rigidité du matériau (|E*|). La Figure 1.12 montre une évolution type de la rigidité d'un matériau bitumineux soumis à des sollicitations cycliques au cours d'un essai de fatigue.

Rapport-Gratuit.com

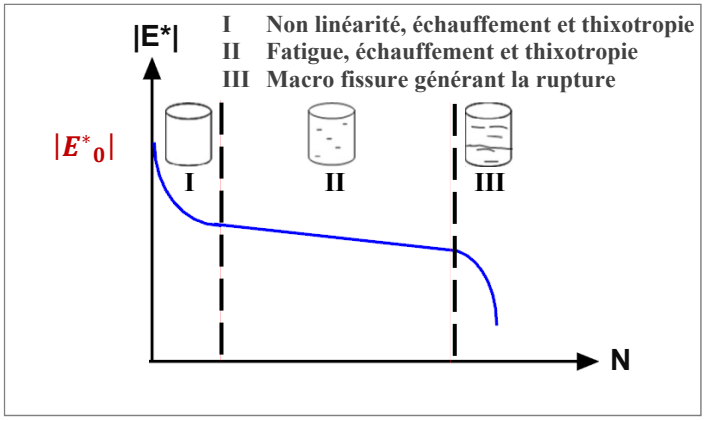


Figure 1.12 Évolution de la rigidité de l'éprouvette suivant trois phases lors d'un essai de fatigue
Adaptée de Baaj (2002, p. 61)

En cours d'essai de fatigue, il est possible de distinguer trois phases (Figure 1.12) au niveau de l'évolution de la rigidité de l'éprouvette en fonction du nombre de cycles de sollicitation (Baaj, 2002 ; Tapsoba, 2012 ; Perraton et coll., 2011) :

- la première phase (I) est marquée par une chute rapide de la rigidité du matériau à vitesse décroissante (phase d'adaptation). Cette décroissance n'est pas liée exclusivement à la fatigue du matériau : la thixotropie du bitume, la non linéarité du comportement de l'enrobé et l'échauffement du matériau jouent des rôles importants quant à la chute de module au cours de la phase I (effets biaisant ou parasites). Durant cette phase, le matériau est très peu endommagé par le phénomène de fatigue : la réversibilité du module est observée à l'arrêt des sollicitations ;
- la deuxième phase (II) est caractérisée par une diminution progressive, quasi linéaire, du module avec les cycles de sollicitation (phase quasi-stationnaire). Lors de cette phase, le phénomène de fatigue constitue le principal facteur à l'origine de la diminution du module. Bien que l'influence des effets biaisant (échauffement et thixotropie) soit faible pendant cette phase, ils doivent être considérés ;
- la troisième phase (III) est caractérisée par une chute rapide de module (phase de rupture). Cela est attribuable à l'apparition d'une ou de macro fissures localisées au sein du matériau suite à l'accumulation des microfissures qui ont apparues lors des phases I et II. Dès lors, le mécanisme d'endommagement est localisé au sein du matériau et est lié à la

propagation de fissures. Donc, le recours à la MMC n'est plus valable pour cette phase (Touhara, 2012).

Pour l'ensemble des essais de laboratoire, il existe toujours des effets biaisant (autre que l'endommagement par fatigue) difficilement quantifiables pour certains, conduisant ainsi à des écarts importants de durée de vie entre les différents essais. De l'ensemble des essais, nous retiendrons que le recours à des essais en conditions homogènes présente l'avantage de pouvoir départager plus simplement les effets biaisant de l'endommagement lié à la fatigue du matériau, permettant ainsi une description plus intrinsèque du comportement en fatigue du matériau.

1.5.2.6 Détermination du module initial

Il est nécessaire de connaître la valeur du module initial du matériau ($|E^*_0|$, Figure 1.12), soit au premier cycle, afin de calculer le dommage apparent de l'éprouvette d'enrobé au cours de l'essai de fatigue. Le Tableau 1.18 présente plusieurs méthodes utilisées pour la détermination de la valeur du module initial ($|E^*_0|$).

Tableau 1.18 Méthodes utilisées pour la détermination de la valeur du module initial $|E^*_0|$
Adapté de Touhara (2012, p. 70)

Méthode utilisée	Référence
Module mesuré au 1er cycle.	Baaj, 2002
Module mesuré au 100ème cycle.	Di Benedetto et coll., 2004
Extrapolation linéaire en considérant les valeurs de module mesuré entre le 50ème et le 300ème cycle.	Nguyen, 2009
Extrapolation linéaire en considérant les valeurs de module mesuré entre le 50ème et le 250ème cycle.	Tapsoba, 2012

En particulier, lors d'essais réalisés en contrôle de déformation, la déformation imposée se stabilise qu'après plusieurs cycles de sollicitation. À cet effet, il n'est pas judicieux de

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

prendre la valeur de module au 1er cycle de sollicitation car la rigidité de l'enrobé bitumineux varie, légèrement, avec l'amplitude de déformation. Il est alors préférable d'extrapoler à partir de valeurs de module obtenues lorsque la déformation imposée est stable.

1.5.3 Durée de vie du matériau

1.5.3.1 Détermination selon le critère de rupture retenu

La durée de vie du matériau est déterminée selon le critère de rupture retenu. Pour chaque essai de fatigue, l'éprouvette est soumise à des sollicitations répétées d'une amplitude de force (ou déplacement) donnée jusqu'à l'atteinte du critère de rupture retenu. Or, la durée de vie du matériau est établie en considérant le nombre de cycles (N_f) lors de l'atteinte du critère de rupture (*failure*) en fonction des sollicitations d'amplitudes distinctes (F, σ, d ou ε).

1.5.3.2 Critères de rupture éventuels

Au niveau international, la durée de vie en fatigue (N_f) des éprouvettes est définie comme étant le nombre de cycles correspondant à une perte de 50% de la norme du module complexe initial ($N_{f50\%}$, Figure 1.13). C'est le critère classique, il est utilisée dans les normes américaine et européenne (AASHTO, 2011a ; ASTM, 2010a ; AFNOR, 2005). Alors, ce critère est relatif à une diminution spécifique de rigidité. Pour ce critère, le module initial ($|E^*_0|$) correspond au module mesuré au 1er cycle de sollicitation.

Pour les essais réalisés en contrôle de force, les durées de vie déterminées suivant le critère classique diffèrent peu de celles associées à la rupture physique de l'éprouvette et ceci est d'autant véridique avec la basse de la température (Doan, 1977). Cependant, pour les essais en contrôle de déplacement, le critère de rupture, dit classique, semble plus arbitraire en regard à la rupture physique de l'éprouvette.

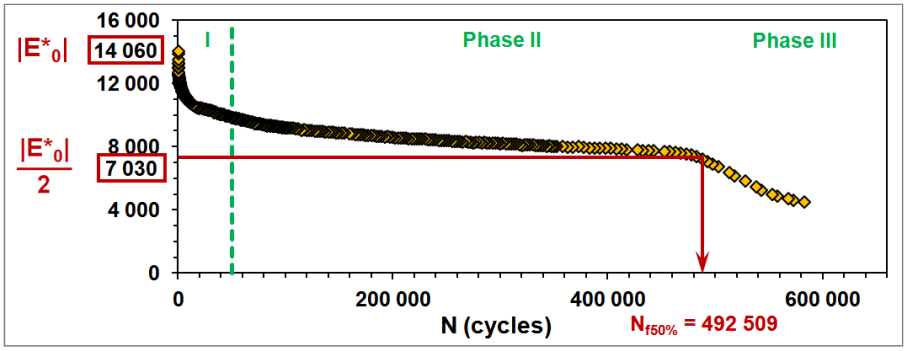


Figure 1.13 Norme du module complexe et détermination de $N_{F50\%}$

Il faut mentionner que le principal objectif recherché à la désignation d'un critère de rupture est de cibler le moment précis où le mode d'endommagement change de mécanisme : transition entre les phases II et III (Figure 1.12). À cet effet, le nombre de cycles marquant ce changement correspond à la durée de vie réelle en fatigue du matériau, lequel est désigné $N_{fII\text{-}III}$. La détermination de $N_{fII\text{-}III}$ constitue un aspect crucial dans l'évaluation de la résistance en fatigue du matériau, et ce, dans la perspective d'en cerner la propriété intrinsèque (Touhara et coll., 2013).

Alors, pour les essais en contrôle de déplacement et plus spécifiquement, pour les essais en contrôle de déformation, d'autres critères ont été proposés, comparativement à $N_{f50\%}$, afin de mieux cerner la transition entre les phases II et III.

Le suivi de l'évolution de l'angle de phase constitue un critère approprié quant à la détermination de la durée de vie de l'éprouvette et plus particulièrement, à l'atteinte de la phase de rupture du matériau. En effet, la fin de la phase II (propagation de micros fissures) et le début de la phase III (phase d'apparition de macro fissures et de rupture) de l'éprouvette est atteinte lorsque l'angle de phase est maximal (ϕ_{Emax}). L'espace de Black permet de bien visualiser l'angle de phase maximal et la démarcation des phases II et III (Figure 1.14). Alors, $N_{fmax\phi}$ correspond au nombre de cycles de sollicitation au moment où l'angle de phase atteint une valeur maximale (ϕ_{Emax}).

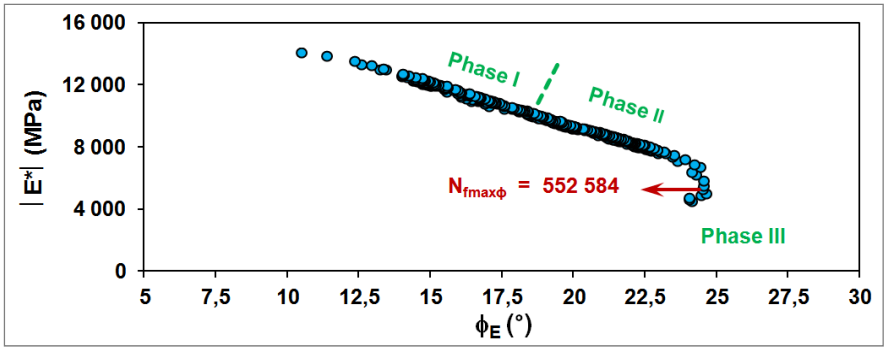


Figure 1.14 Espace de Black et détermination de $N_{fmax\phi}$

Il est également possible de se référer à des critères relatifs à la notion d'homogénéité au sein de l'éprouvette afin de déterminer adéquatement la durée de vie de l'éprouvette ou plus exactement, l'atteinte de la phase III du matériau. Lors de l'essai de fatigue, le passage de la phase II à la phase III est marqué par la propagation de micros fissures qui génèrent l'apparition d'une macro fissure. Dès lors, le champ de déformation devient non homogène. Par exemple, le positionnement de trois extensomètres au pourtour d'une éprouvette permet de détecter cette hétérogénéité. Si l'écart est de plus de 25% entre la déformation d'un des extensomètres par rapport à la valeur moyenne ($\Delta\varepsilon_{exti} = [(\varepsilon_{Aaxi} - \varepsilon_{Aax}) / \varepsilon_{Aax}] \times 100\%$, Figure 1.15) ou si l'écart de l'angle de phase pour un des extensomètres par rapport à la moyenne des trois est supérieure à 5° ($\Delta_{\phi i} = \phi_{\varepsilon axi} - \phi_{\varepsilon ax}$, Figure 1.16), ceci témoigne que le champ de déformation est non homogène au sein de l'éprouvette (Soltani, 1998 ; Baaj, 2002). Le nombre de cycles de sollicitation obtenu pour ces deux critères correspond à $N_{f\Delta\varepsilon ax}$ (Figure 1.15) et à $N_{f\Delta\phi}$ (Figure 1.16).

Pour terminer, le nombre de cycles marquant la transition entre les phases II et III, lequel est désigné par $N_{fII\text{-}III}$, peut être égal à la durée de vie défini par un critère de rupture ou au regroupement de plusieurs, soit à la moyenne de $N_{fmax\phi}$, $N_{f\Delta\varepsilon ax}$ et $N_{f\Delta\phi i}$.

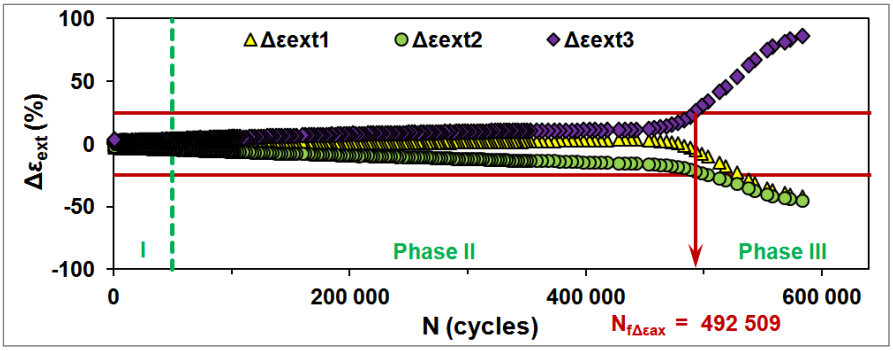


Figure 1.15 Écart de déformation et détermination de $N_{f\Delta\varepsilon ax}$

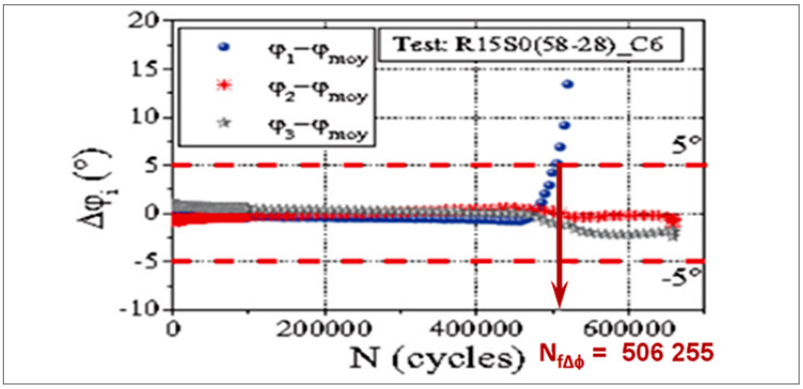


Figure 1.16 Écart d'angle de phase et détermination de $N_{f\Delta\phi}$
Adaptée de Tapsoba (2012, p. 116)

1.5.3.3 Loi de fatigue

La représentation classique entre la durée de vie en fatigue et le niveau de sollicitation imposé est donnée par la courbe de Wöhler (loi de fatigue). Il est possible de représenter cette courbe par une droite si les résultats sont présentés en logarithmes (Figure 1.17). Pour les matériaux bitumineux, aucune limite de fatigue ou limite d'endurance ne semble avoir été observée jusqu'à ce jour (Di Bendetto et coll., 2005). Pour ces matériaux, le phénomène de fatigue est toujours présent quelle que soit l'amplitude des sollicitations appliquées (F, σ, d ou ε).

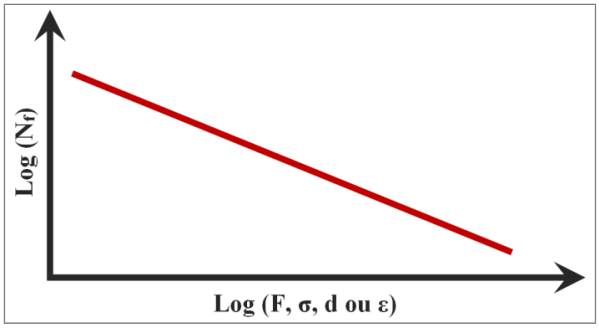


Figure 1.17 Droite de Wöhler

La détermination des caractéristiques de la droite de Wöhler permet de réaliser une comparaison plus aisée entre les performances des différents enrobés bitumineux. En occurrence, la droite de Wöhler illustrée à la Figure 1.17 peut être décrite par l'équation suivante :

$$N_f = c_1 (\varepsilon_0)^{-c_2} \quad (1.9)$$

où :

N_f Durée de vie en fatigue, laquelle correspond au nombre de cycles associé à la rupture suivant un critère spécifique ;

ε_0 Amplitude de 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 1m/m à une température et une fréquence données ;

c_2 Coefficient lié à la pente de la droite de Wöhler, qui doit être représentée dans le plan log N_f – log ε_0, pour un matériau donné (sans unité).

La pente de la droite de fatigue est directement lié au coefficient b qui est décrit dans la méthode française de dimensionnement ($b = -1/c_2$). En considérant la rupture à 1 million (10^{+6}) de cycles, l'équation précédente devient :

$$\frac{N_f}{10^{+6}} = \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_6}\right)^{-c_2} \quad (1.10)$$

où ε_6 représente l'amplitude de la déformation pour laquelle la durée de vie correspond à 1 million (10^{+6}) de cycles. Pour les matériaux bitumineux routiers, les valeurs de ε_6 et de $-1/c_2$ peuvent varier de 60 à 150µm/m et de 3,0 à 8,7 respectivement (Porter et coll., 1975 ; Moutier, 1991 ; SETRA-LCPC, 1994 ; Rivière et coll., 1997 ; Ghuzlan et coll., 2003, 2006). Ces valeurs sont déterminées en considérant : essais de laboratoire, sollicitations en continu, poutre en flexion de 2 ou 4 points, sollicitations en contrôle de force ou de déplacement, $N_{f50\%}$ comme critère de rupture, température de +10°C et fréquence de 10 ou 25Hz.

1.5.3.4 Dispersion

Les essais de fatigue présentent des résultats dispersés. Cela est dû au phénomène de fatigue en lui-même et à l'hétérogénéité du matériau (Verstraeten, 1976 ; Doan, 1977). Pour une même amplitude de sollicitation, la durée de vie peut varier dans un rapport de 1 à 10 pour les matériaux bitumineux (Di Benedetto et coll., 1997a). Il est donc nécessaire d'effectuer plusieurs répétitions afin de bien caractériser la résistance à la fatigue du matériau. Aussi, la dispersion des durées de vie est importante pour les matériaux à teneur élevée en vides et pour les essais réalisés à des faibles niveaux de déformation (Soliman et coll., 1977).

1.5.3.5 Incidences du mode de sollicitation

Le Tableau 1.19 présente les incidences du mode de sollicitation sur l'essai et les résultats de durée de vie des matériaux bitumineux. Pour chaque mode de sollicitation, la durée de vie des matériaux bitumineux est essentiellement influencée par la rigidité du matériau : valeur du module, et incidence de la température et de la fréquence sur celle-ci (éléments G à I, Tableau 1.19). Ainsi, pour un même enrobé bitumineux, les conclusions tirées sont souvent opposées pour ces deux modes de sollicitation. À cet effet, Verstraeten (1974) mentionne qu'il serait éventuellement favorable de réaliser les essais de fatigue à énergie imposée.

Tableau 1.19 Incidences du mode de sollicitation sur l'essai et les résultats de durée de vie
Adapté de Di Benedetto et coll. (2005, p. 139)

Éléments	Contrôle de force	Contrôle de déplacement
A. Évolution pendant l'essai	Augmentation du déplacement	Diminution de la force
B. Critère usuel de rupture	Rupture de l'éprouvette	Chute de moitié de la force initiale
C. Durée de propagation de fissures	Brève	Longue
D. Durée de vie	Plus faible	Plus grande
E. Dispersion des résultats	Plus faible	Plus grande
F. Nombre requis d'éprouvettes	Faible	Élevé
G. Augmentation de la température (> 0°C)	Diminution de la durée de vie	Augmentation de la durée de vie
H. Augmentation du module de rigidité	Augmentation de la durée de vie	Diminution de la durée de vie
I. Augmentation de la fréquence	Augmentation de la durée de vie	Diminution de la durée de vie
J. Variation de la composition du matériau	Plus sensible	Moins sensible

1.5.3.6 Incidences de la température et de la fréquence

La température et la fréquence ont une influence sur la rigidité de l'enrobé bitumineux. Cette influence sera favorable ou nuisible selon le mode de sollicitation utilisé (éléments G à I, Tableau 1.19). Aussi, à haute température (≥ 15°C), la fatigue du matériau est expliquée par la modification de la structure moléculaire du bitume et à basse température, il y a plutôt formation et développement de fissures au sein du bitume et des granulats (Verstraeten, 1976).

1.5.3.7 Influence de la composition du matériau bitumineux

L'influence de la composition du matériau sur sa résistance à la fatigue doit être analysée avec précaution. Notamment, cela va dépendre du mode de sollicitation. Premièrement, l'influence d'une variable de composition sera pressentie comme plus importante si un essai en contrôle de force est utilisé, plutôt qu'en contrôle de déplacement (éléments J, Tableau 1.19). Deuxièmement, la variation de sa composition peut avoir une répercussion sur son module de rigidité et donc, une influence positive ou négative sur sa résistance à la fatigue selon le mode de sollicitation utilisé (éléments H, Tableau 1.19). Toutefois, il semble bien

que les constituants les plus influents quant à la résistance à la fatigue, soit (par ordre décroissant) : le liant (teneur, additifs et nature), les vides (teneur et diamètre) et les granulats (courbe granulométrique, teneur en fines, nature minéralogique et forme).

Liant et additifs – Dans une large mesure, la teneur en liant conditionne la teneur en vides en facilitant le compactage et l'épaisseur de film de liant permettant un meilleur enrobage des particules. Malgré le mode de sollicitation choisi, l'augmentation de la teneur en bitume conduit à une amélioration de la durée de vie (élément D, Tableau 1.19). Les bitumes modifiés avec des élastomères ou des plastomères présentent souvent une meilleure tenue à la fatigue que les bitumes purs (Baaj et coll., 2005). Notamment, les liants élastomères possèdent de fortes capacités d'allongement et de résistance à la traction, et ceux plastomères, une viscosité élevée à haute température et une susceptibilité thermique réduite.

Teneur en vides – La teneur en vides à une nette influence sur la rigidité du matériau et dans une moindre mesure sur le volume de liant, ce qui influence la résistance à la fatigue selon le mode de sollicitation préconisé. L'abaissement du nombre et de la dimension des vides permet de réduire la probabilité d'initiation de fissures et la vitesse de propagation de celles-ci (Deacon et coll., 1995). De plus, les résultats de fatigue sont généralement meilleurs et moins dispersés avec la baisse de la teneur en vides. Ce constat s'applique pour les deux modes de sollicitation (Soliman et coll., 1977). Pour une teneur en bitume donnée, qui peut varier de 3,6 à 6,0%, la réduction de la teneur en vides permet d'augmenter le module de rigidité et la résistance à la fatigue d'un enrobé bitumineux semi-grenu (Moutier, 1991). Un constat similaire est observé par Harvey et coll. (1996).

1.5.3.8 Influence du conditionnement

À la section 1.5.3.3, les caractéristiques de la droite de Wöhler sont établies pour des enrobés bitumineux testés à l'état sec, toutefois quant est-il de la résistance à la fatigue des enrobés bitumineux en présence d'eau ? Il existe peu de recherches détaillées concernant l'impact de la saturation partielle des enrobés bitumineux sur leur résistance à la fatigue. Même pour les

Rapport-Gratuit.com

études plus complètes, des détails essentiels sont manquants, soit : la teneur en vides des enrobés bitumineux, la température de l'eau lors de leur immersion, leur degré de saturation et même, la teneur en bitume, ce qui limite l'analyse en vue d'élaborer un portrait global quant à l'impact de l'eau sur le comportement en fatigue des enrobés bitumineux. Quoiqu'il en soit, le Tableau 1.20 présente la synthèse de résultats de fatigue pour des enrobés testés à l'état sec (S) et d'autres testés en condition partiellement saturé en eau (PSE). En comparant les valeurs de ε_6, il est possible de mentionner que la résistance en fatigue des enrobés à l'état partiellement saturé en eau est nettement inférieure à celle des enrobés testés à l'état sec. Par ailleurs, la perte de rigidité des enrobés bitumineux suite à leur immersion dans l'eau pendant trois semaines (3sem) peut atteindre les 20% (valeurs de |E*|, Tableau 1.20). Une partie de la perte de résistance à la fatigue peut être récupérée après une période de séchage (entreposage à l'état sec, ES, Tableau 1.20).

Tableau 1.20 Comparaison de la résistance à la fatigue d'enrobés bitumineux à l'état sec (S) et partiellement saturé en eau (PSE)

Mélange	**Granulat**	**Bitume**	**Conditionnement**	**Essais de fatigue**			**Résultats**		**|E*|** [A]	**Source**
GNM, Type	**Origine, Type**	**Type, Teneur**	**Type, durée, θ**	**Type, θ, Fréq.**	**Nbr**	**Critère**	**ε_6**	**b**	**(MPa)**	
Enrobé, 0/14, granul. continue	La Noubleau, Diorite concassée	60/70, 4,2% de la masse granulaire	ES, 3sem, θ_p	Flexion 2 pts, 10°C, 25Hz	12 x 3 déf.	$N_{f50\%}$	91	5,21	13 316	Moutier et coll., 1988
			IE, 3sem, θ_p				71	5,81	10 678	
			IE, 3sem, θ_p + ES, 3sem, θ_p				83	6,02	11 900	
			IE, 3sem, θ_p + ES, 3sem, θ_p + IE, 1sem, θ_p				74	6,90	10 448	
Enrobé, 0/10	Ben Adid, Silicieux	40/50, n.s.	ES, 1sem, 20°C	Flexion 4 pts, n.s., n.s.	5 x 3 déf.	$N_{f50\%}$	85	5,34	n.s.	Mohamed, 2010
			IE, 1sem, 20°C				65	4,61		
	Akrach, Calcaire		ES, 1sem, 20°C				100	4,68		
			IE, 1sem, 20°C				68	4,06		
	Oued Nfiss, Calcaire		ES, 1sem, 20°C				90	4,25		
			IE, 1sem, 20°C				72	3,22		

ES : Entreposage des éprouvettes à l'état sec.
IE : Immersion des éprouvettes dans l'eau.
3sem : Trois (3) semaines.
1sem : Une (1) semaine.
θ_p Température de la pièce.
n.s. : Non spécifié.
ε_6 : µm/m, µdef.
[A] : Valeur à 10°C, 25Hz.

1.6 Couplages thermomécaniques

1.6.1 Introduction

La connaissance du coefficient de dilatation-contraction des enrobés bitumineux permet de quantifier les déformations (et contraintes) créées au sein du revêtement en raison des variations de température. Également, sa mesure va permettre de quantifier l'impact des sollicitations hydriques combinées aux cycles de gel et dégel sur la variation dimensionnelle des enrobés bitumineux.

1.6.2 Coefficient de dilatation-contraction thermique des enrobés

Le coefficient de dilatation-contraction thermique (DCT) des enrobés bitumineux à l'état sec a été étudié par : Domaschuck et coll. (1964), Hooks et coll. (1964), Monismith et coll. (1965), Littlefield (1967), Jones et coll. (1968), Burgess et coll. (1971), Osterkamp et coll. (1986), Janoo et coll. (1993), Stoffels et coll. (1996), Di Benedetto et coll. (1997b), Anderson et coll. (1999), Mehta et coll. (1999), Zeng et coll. (1999), Charvet (2003), Olard (2003), Nam et coll. (2004), Mamlouk et coll. (2005), Ojo et coll. (2008), Xu et coll. (2008). Par ailleurs, selon nos connaissances, seul le travail de Mauduit et de ses collaborateurs (2010) ont étudié l'effet de l'eau sur le coefficient de DCT de l'enrobé bitumineux. Donc, l'effet des saumures sur le coefficient de DCT n'a jamais été abordé.

La détermination du coefficient de DCT (α) s'effectue en variant la température (T) tout en mesurant la déformation thermique (ε^{Ther}) de l'enrobé bitumineux. Il est possible d'y déterminer le coefficient linéique, dans une ou plusieurs directions, ou volumique de l'enrobé bitumineux. Dans le cas d'un matériau isotrope, le coefficient volumique est trois fois plus élevé que celui linéique (Hooks et al., 1964 ; Jones et coll, 1968 ; Di Benedetto et coll., 2005). La variation de température peut s'effectuer par incrément, présence de paliers de température, ou à un taux donné de refroidissement ou de réchauffement (°C/h).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Paliers de température – La présence d'un palier, de durée suffisante, permet d'obtenir l'équilibre thermique au sein de l'éprouvette, soit une même température à la paroi et au cœur, et du fait même la stabilisation dimensionnelle de l'éprouvette. La durée nécessaire pour que l'équilibre thermique soit atteint au sein du matériau dépend de : 1) la capacité thermique de l'enceinte, 2) l'amplitude de la variation de température, 3) du coefficient de propagation de chaleur du matériau, 4) du nombre et, 5) la taille des éprouvettes (Di Benedetto et coll., 1997b). Pour une variation de température de 3 à 5°C, une durée de 1h30 à 3h00 pour chaque palier est généralement suffisante pour atteindre l'équilibre thermique au sein d'une éprouvette cylindrique d'enrobé bitumineux (Di Benedetto et coll., 1997b ; Olard, 2003). Aussi, cette stabilisation peut être considérée lorsque la température au cœur devient constante (± 0,5°C) et que la déformation varie de moins de 2μdef pour trois mesures consécutives prisent à un intervalle de 30 minutes (Stoffels et coll., 1996). Toutefois, la mise en place d'un thermocouple au cœur de l'éprouvette constitue une destruction partielle de ce dernier. Afin d'éviter l'utilisation d'un thermocouple au cœur de l'éprouvette à tester, il est possible d'avoir recours à deux méthodes : 1) placer un thermocouple à la paroi de l'éprouvette pour s'assurer que l'équilibre thermique au sein du matériau est atteint, soit lorsque la température de surface est stabilisée, ou 2) placer tout près de l'éprouvette, une autre éprouvette qui possède un thermocouple à la paroi et un au cœur. Le recours à des paliers de température permet d'obtenir avec précision la déformation de l'éprouvette en fonction des températures considérées, toutefois ceci demande un temps d'essai plus élevé.

Taux donné de température – L'utilisation d'un taux donné de refroidissement (ou réchauffement) permet de réaliser l'essai dans un cours laps de temps, d'obtenir la courbe entière de ε^{Ther}-T et de trouver la température de transition vitreuse (T_g) des enrobés bitumineux. La validité de la détermination du coefficient de dilatation-contraction thermique en utilisant un taux de température donné repose sur la considération qu'un régime constant s'établi au sein de l'éprouvette. Ce régime constant signifie que le taux de température mesuré à la paroi est le même que celui mesuré au cœur. Ceci se traduit alors par une variation de déformation uniforme au cœur, du même qu'à la paroi de l'éprouvette au cours du temps. Toutefois, au commencement de l'essai, il faut un certain temps pour que ce

régime soit établi au sein de l'éprouvette lorsqu'il est soumis à un taux donné de température. À la Figure 1.18, il est possible de constater qu'après une stabilisation de température à +40°C de 600 secondes (rectangle en pointillé rouge) et un taux de refroidissement très élevé de 60°C/h que le régime s'établi qu'après seulement 385s (temps requis). Dans ce cas précis, la déformation mesurée dans les premières 385 secondes ne devrait pas être considérée car le régime n'est pas établi. L'atteinte du régime est très rapide, malgré les dimensions de l'éprouvette : 6,5 x 6,5 x 38cm^3. Au cours du régime établi, l'écart de température entre le cœur et la paroi de l'éprouvette est assez constant, de l'ordre de 3 à 4°C.

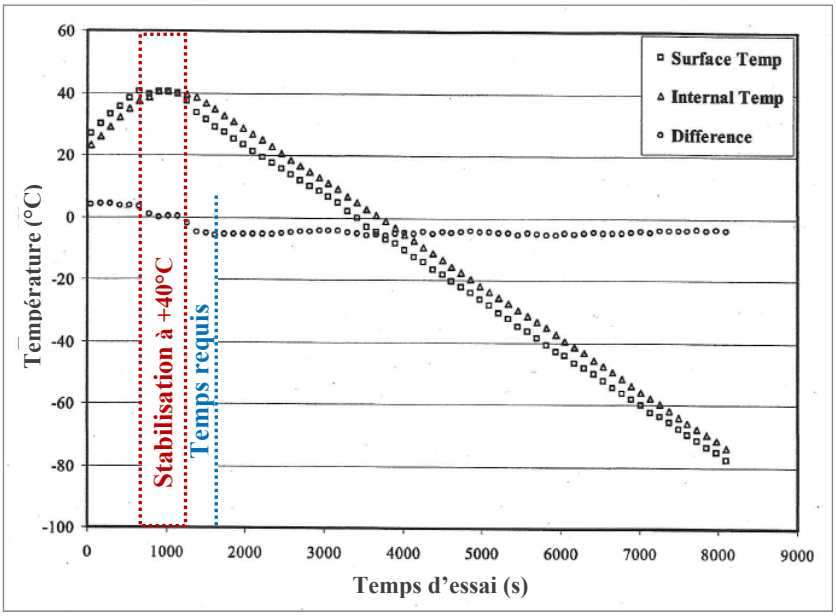


Figure 1.18 Températures mesurées à la paroi et au cœur d'un éprouvette d'enrobé soumis à un taux de 60°C/h
Adaptée de Nam et coll. (2004, p. 98)

Par ailleurs, il semble que l'utilisation de différents taux de température donnent des résultats similaires : 5, 10 ou 20°C/h (Janoo et coll., 1993) et 10 ou 60°C/h (Nam et coll., 2004). En plus, l'utilisation de paliers de température ou de taux de température ≤ à 7°C/h donnent les mêmes résultats (Littlefield, 1967 ; Stoffels et coll., 1996). Néanmoins, la littérature mentionne que la détermination de la température de transition vitreuse (T_g) peut être affectée par l'amplitude du taux de température (Nam et coll., 2004). Il est possible que ceci

soit attribuable à la mesure de la température de l'éprouvette, qui est réalisée à sa paroi, alors que la température au cœur est plus élevée (dans le cas d'un refroidissement). Donc, il semble justifiable de considérer la température moyenne de l'éprouvette pour la détermination de T_g.

De même, l'éprouvette d'enrobé peut reposer sur une surface générant de la friction (déplacement restreint) ou une friction négligeable (déplacement libre). Pour éviter tout frottement important à la base de l'éprouvette, elle peut reposer sur une feuille de téflon, de la poudre de talc, des petites billes de verre lubrifiées avec un pulvérisateur silicone et même, une plaque constituée de roulements à billes en acier (Jones et coll., 1968 ; Stoffels et coll., 1996 ; Olard, 2003 ; Nam et coll., 2004 ; Ojo et coll., 2008 ; Xu et coll., 2008). Pour la mesure de la déformation des enrobés bitumineux, plusieurs équipements peuvent être utilisés, notamment : dilatomètre pour la mesure volumique, extensomètre, jauge, LVDT ou capteur sans contact dans le cas de mesure linéaire.

Pour terminer, le coefficient de DCT est influencé par : 1) nature et proportion des constituants de l'enrobé, 2) température, 3) sens de la variation de température, 4) histoire du chargement thermique, 5) niveau de contrainte et, 6) anisotropie de l'enrobé.

Nature et proportion des constituants – Le coefficient de DCT des enrobés reflètent de façon proportionnel ceux de ses constituants. Sa valeur augmente avec la teneur en bitume (Hooks et coll., 1964 ; Jones et coll., 1968). Le coefficient de DCT du bitume est nettement supérieur à celui de l'enrobé, ce qui explique son incidence. Par ailleurs, une augmentation de la teneur en vides des enrobés diminue la valeur du coefficient (Littlefield, 1967).

Température – Pour une température variant de -50 à +70°C, la déformation des granulats générée par la variation de température est relativement constante (c.-à-d. coefficient de DCT constant qui varie de 3 à 14 x 10^{-6} m/m/°C selon le type de la roche mère), toutefois ce n'est pas le cas du bitume car il subit une modification importante de son comportement(Jones et coll., 1968 ; Young et coll., 1998). Précisément, cette modification s'effectue à la

température de transition vitreuse (*glass transition temperature*, T_g). La température de transition vitreuse (T_g) dépend de l'origine, de la modification et du grade de performance (PG) des bitumes et varie de -48 à -15°C (Schmidt et coll., 1966 ; Vinson et coll., 1989 ; Ojo et coll., 2008). Toutefois, en dessous et au-dessus de T_g, le coefficient de DCT du bitume est constant : valeurs de 140 à 400 x 10^{-6} m/m/°C et 450 à 600 x 10^{-6} m/m/°C respectivement selon le type de bitume (Young et coll., 1998 ; Nam et coll., 2004 ; Ojo et coll., 2008). À cet effet, le coefficient de DCT des enrobés bitumineux peut être considéré comme constant en dessous et au-dessus de T_g, valeurs de 3 à 34 x 10^{-6} m/m/°C et 13 à 59 x 10^{-6} m/m/°C respectivement. Ceci implique que la contraction des enrobés est moins importante à basse température. Toutefois, pour les enrobés, la transition entre ces coefficients est plus progressive de part et d'autre de T_g comparativement à ce qui est observé pour les bitumes. De plus, Littlefield (1967), Di Benedetto et coll. (1997b) et Olard (2003) observent du fluage pour des températures supérieures à +16°C, et même 0°C, ce qui affecte la mesure du coefficient de DCT des enrobés à hautes températures.

Sens de la variation de température – Il est possible d'observer que le coefficient de "dilatation" thermique des enrobés est identique ou supérieure à celui de "contraction" thermique : de 0 à 226% en dessous de T_g et de 3 à 77% au-dessus de T_g (Jones et coll., 1968 ; Di Benedetto et coll., 1997b ; Mamlouk et coll., 2005 ; Ojo et coll., 2008 ; Xu et coll., 2008). Néanmoins, les coefficients de dilatation et de contraction sont considérés comme identiques dans toutes les études (Di Benedetto et coll., 2005).

Histoire du chargement thermique – Dans le cas d'éprouvettes reposant sur une surface générant de la friction, le cycle de réchauffement-refroidissement (≈ -20 à +55°C) cause un rétrécissement de celles-ci (Littlefield, 1967 ; Jones et coll., 1968). Ce phénomène serait attribuable à l'absorption du bitume par les granulats et la densification de l'enrobé causé par un processus irréversible d'expansion et de contraction du bitume au sein des vides (Jones et coll., 1968). La présence d'une surface générant de la friction doit inévitablement retarder l'allongement (ou rétrécissement) de l'éprouvette et créer des contraintes au sein de l'enrobé et ce, plus particulièrement à la base de l'éprouvette. Notamment, le rétrécissement des

éprouvettes est nécessairement dû au fluage de celles-ci qui s'explique par le développement de contrainte au sein de l'éprouvette par la surface rugueuse. Pourtant, ce même cycle de réchauffement-refroidissement cause un allongement des éprouvettes si elles reposent sur une surface générant une friction négligeable (Jones et coll., 1968).

Niveau de contrainte – Dans la majorité des cas, le coefficient de dilatation-contraction des enrobés est obtenu pour une contrainte nulle (σ_{nulle}) : aucune charge appliquée. Di Benedetto et coll. (1997b) observent pour une température variant de -21 à -5°C que le coefficient axial augmente et le coefficient radial diminue avec l'application d'une contrainte axiale (-70 à +30kPa, signe + pour contrainte en extension).

Anisotropie – Le coefficient axial de dilatation-contraction thermique (sens de compactage) est de 20 à 50% supérieur à celui radial confirmant l'anisotropie des enrobés bitumineux (Di Benedetto et coll., 1997b).

Malgré le fait que le coefficient de dilatation-contraction des enrobés bitumineux est connu, il reste qu'il n'est pas simple de calculer la déformation et la contrainte générée par une variation de température et cela s'explique, en grande partie, par le comportement viscoélastique des enrobés bitumineux, l'inégalité de température au sein du revêtement et le frottement existant à la base du revêtement (interface non collée revêtement-matériau granulaire).

CHAPITRE 2

PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

2.1 Présentation générale

Comme nous l'avons clairement évoqué au chapitre précédant, les conditions externes peuvent accélérer significativement la dégradation de l'enrobé bitumineux en service. Le trafic, l'eau, les sels de déverglaçage, les variations de température et les cycles de gel-dégel, sont des conditions tout à fait normales, auxquels les enrobés bitumineux sont exposés au Québec en période de gel et dégel. Or, on s'interroge quant à l'importance de la dégradation de l'enrobé bitumineux suivants ces conditions. Dans la perspective d'apporter un certain éclaircissement sur ce sujet, une recherche en deux (2) volets a été élaborée. À partir d'éprouvettes instrumentées, un premier volet visant à quantifier les variations thermiques et les déformations associées, induites par des essais thermiques, qui incluent des cycles de gel-dégel, d'une part, et l'évolution de l'endommagement par la mesure du comportement en petites déformations, d'autre part, a été réalisé. Ensuite, dans la perspective de mettre en relief l'effet de la présence d'eau sur la résistance à la fatigue de l'enrobé, les durées de vie en fatigue (10°C et 10Hz) d'éprouvettes à l'état sec (S) et partiellement saturées en eau (PSE) sont déterminées ($2^{ème}$ volet). À cet effet, il convient pour chacun des volets de distinguer quatre aspects de l'expérimentation : 1) l'instrumentation de chaque éprouvette ; 2) la saturation partielle des éprouvettes ; 3) le mode de sollicitation appliquée (thermique ou mécanique) ; 4) le critère retenu pour analyser les comportements étudiés. Chacun de ces éléments est traité dans les sections subséquentes.

2.2 Méthodologie de l'expérimentation

2.2.1 Volet #1

Le volet #1 du programme de recherche se présente en deux parties. Suivant les essais thermiques (ET), incluant des cycles de gel et dégel (GD), imposées sur les éprouvettes

conditionnées suivant divers états, la première partie (volet #1A) vise à quantifier à la fois les phénomènes physiques générés (variations thermiques et déformation thermiques linéique) et une deuxième partie (volet #1B) se concentre sur l'évolution de rigidité (ou endommagement) de ces éprouvettes. Donc, nous avons recours à des essais thermiques (ET) et d'essais mécaniques. Les essais mécaniques consistent principalement à des essais de modules complexes (EE*) réalisés sur les éprouvettes testées. Notamment, cinq états de saturation sont étudiés : état sec (S), état partiellement saturé en eau (PSE), et état partiellement saturé en saumure (PSS) suivant trois concentrations en sel. Les concentrations en sel étudiées sont : 7,4% (PSS7), 13,8% (PSS14) et 19,4% (PSS19). Ces concentrations en sel ont été choisies afin de couvrir une plage importante.

2.2.1.1 Volet #1A, les essais thermiques (ET)

Les éprouvettes suivant les différents états de saturation sont soumises aux essais thermiques (ET) qui incluent des cycles de gel et dégel (GD). Pour évaluer les phénomènes physiques induits, il est nécessaire d'avoir recours à une instrumentation spécifique des éprouvettes : jauge de déformation et thermocouples (groupe #1). Plus exactement, pour évaluer les gradients thermiques au sein d'une éprouvette, un thermocouple est placé au centre de la masse. Notamment, les éprouvettes du groupe #1 sont équipées d'une jauge de déformation (direction axiale) et de deux thermocouples : un thermocouple placé à la surface de l'éprouvette et un autre inséré au cœur. Ces éprouvettes sont désignées : éprouvettes de type T (Tableau 2.1). Le détail de l'instrumentation de ces éprouvettes est donné à la section 2.4.11.3. Ce groupe d'éprouvettes permet un suivi de l'évolution des températures et de la déformation à chacun des ET et générés par ces cycles de GD pour les différents états étudiés. L'analyse du comportement de l'enrobé bitumineux est donc associée essentiellement à l'étude d'un critère dit dimensionnel par l'entremise des jauges (évolution des déformations axiales, ε_{axiale}) et d'un critère relatif à la température par l'entremise des thermocouples (évolution et fluctuation de la température). Or, l'instrumentation des éprouvettes du groupe #1 soit, la présence d'un thermocouple au cœur, s'avère préjudiciable aux mesures des modules complexes (EE*). En conséquent, un 2ème groupe d'éprouvettes a

été ajouté à l'étude du volet #1 du programme expérimental. Les éprouvettes du groupe #2 sont quant à elles équipées de deux jauges axiales, deux jauges diamétrales et d'un seul thermocouple placé à la surface. Ces éprouvettes sont désignées : éprouvettes de type E* (Tableau 2.1). Le détail de l'instrumentation de ces éprouvettes E* est donné à la section 2.4.11.4. Seules les éprouvettes de ce groupe (#2), éprouvettes de type E*, sont soumises aux essais de module complexe (EE*).

Tableau 2.1 Répartition des éprouvettes pour les essais thermiques (ET)

Groupe	**Éprouvette**		**État**	**Essais thermiques réalisés (ET, -18 à +23°C)**	
	type	**nombre**		**Nombre**	**Nombre de cycles de gel et dégel par ET (GD, -18 à +10°C)**
#1	T	1	S	6 ET (1 à 6)	1er ET : 1 GD 2e ET : 2 GD 3e ET : 7 GD 4e ET : 20 GD 5e ET : 30 GD 6e ET : 40 GD pour un total de 100CGD
		1	PSE		
		1	PSS7		
		1	PSS14		
		1	PSS19		
#2	E*	1	S		
		1	PSE		
		1	PSS7		
		1	PSS14		
		1	PSS19		

CGD Cycle de gel-dégel ;
T Éprouvette soumise uniquement aux essais thermiques (ET) ;
E* Éprouvette soumise aux essais thermiques (ET) et de module complexe (EE*) ;
S Éprouvette à l'état sec ;
PSE Éprouvette partiellement saturé en eau ;
PSS7 Éprouvette partiellement saturé en saumure avec une concentration en sel de 7,4% ;
PSS14 Éprouvette partiellement saturé en saumure avec une concentration en sel de 13,8% ;
PSS19 Éprouvette partiellement saturé en saumure avec une concentration en sel de et 19,4%.

Les conditions thermiques appliquées aux deux groupes d'éprouvettes (#1 et #2) sont exposés au Tableau 2.1. La plage de température utilisée lors de ces essais thermique (ET)[21] est de -18 à +23°C (étapes A_j-J_j, Figure 2.1). Chacun des ET varie de l'un à l'autre en raison

[21] La plage de température considérée pour les essais thermiques est inspirée de celle retenue pour la réalisation des essais de résistance à l'écaillage des bétons hydrauliques (-18 ± 3°C à +23 ± 2°C ; ASTM C 672/C 672M-03 ; ASTM, 2003b).

Rapport-Gratuit.com

du nombre de cycles de gel et dégel (GD) réalisés (Tableau 2.1 et Figure 2.1). Plus spécifiquement, le nombre de cycles de GD réalisé à chacun des ET est de : 1, 2, 7, 20, 30 et 40. Lors des cycles de GD[22], la température varie de -18 à +10°C (Figure 2.1).

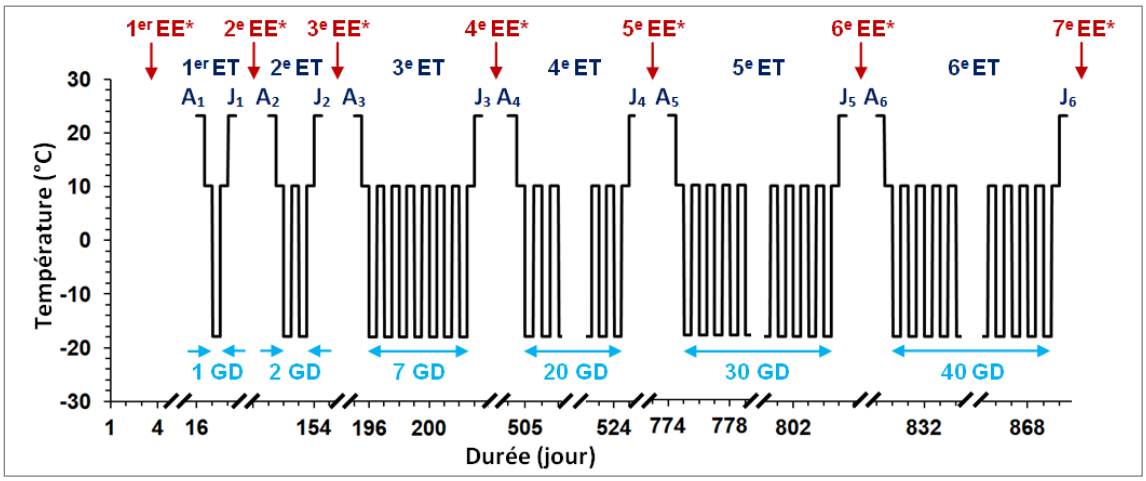


Figure 2.1 Déroulement et durée pour la réalisation des six essais thermiques (ET) et sept essais de module complexe (EE*) sur les deux groupes d'éprouvettes

2.2.1.2 Volet #1B, les essais de module complexe (EE*)

La Figure 2.1 indique clairement les moments retenus pour la mesure des modules complexes (EE*) suivant chacun des essais thermiques (ET) et ce, en vue de cerner l'évolution de l'endommagement induit. Les essais de module complexe (EE*) sont effectués afin de suivre l'évolution de la rigidité (|E*|) des éprouvettes d'enrobé bitumineux suivant les ET pour les différents états étudiés.

---

[22] La plage de température retenue pour la réailsation des cycles de gel et dégel a été établie à partir des températures moyennes minimales et maximales (arrondies à l'entier) observées lors de la période de gel et dégel au Québec (§ 1.2.3.2). Quant au nombre de cycles de gel et dégel (GD), il a été établi afin d'assurer un suivi serré au commencement des essais thermiques et des ajustements dès que possible si cela était nécessaire. Par ailleurs, la réalisation d'un cycle de GD dure au moins 24h. En considérant cette durée importante, le nombre maximal de cycles de GD a été fixé à 100. Tout de même, cela représente environ deux hivers et demi de sollicitations climatiques (moyenne de 43 cycles de GD par hiver, § 1.2.3.2).

En particulier, le dommage des éprouvettes généré par les cycles de GD est analysé (D_{XGD}). Le détail de ce calcul est donné à la section 2.7.11. Pour obtenir la rigidité de l'enrobé bitumineux à l'état initial (0 GD), il est alors nécessaire de réaliser un EE* avant les ET (Figure 2.1). Notamment, les essais de module complexe (EE*) sont réalisés en alternance avec les essais thermiques (ET), soit avant et après les six (6) ET imposés (Figure 2.1). À cet effet, sept EE* sont réalisés sur chacune des éprouvettes E* (Tableau 2.2).

Le temps requis pour la mesure des E* est non négligeable, 3 jours d'essai par éprouvette, qui sont au nombre de cinq (Tableau 2.2). En raison du temps requis, il a été choisi de tester qu'une éprouvette par état. La mesure du E* explique les interruptions, le cheminement particulier et le prolongement de la durée pour la réalisation des six ET (ou des six séquences de CGD) réalisée pour les deux groupes d'éprouvettes (Figure 2.1).

Tableau 2.2 Répartition des éprouvettes pour les essais de module complexe (EE*)

Groupe	**Éprouvette**		**État**	**Essais mécaniques, de module complexe (EE*), réalisés sur chacune des éprouvettes (nombre)**
	type	**nombre**		
#2	E*	1	S	7 EE* (1 à 7)
		1	PSE	
		1	PSS7	
		1	PSS14	
		1	PSS19	

E*	Éprouvette soumise aux essais thermiques (ET) et de module complexe (EE*) ;
S	Éprouvette à l'état sec ;
PSE	Éprouvette partiellement saturé en eau ;
PSS7	Éprouvette partiellement saturé en saumure avec une concentration en sel de 7,4% ;
PSS14	Éprouvette partiellement saturé en saumure avec une concentration en sel de 13,8% ;
PSS19	Éprouvette partiellement saturé en saumure avec une concentration en sel de et 19,4%.

2.2.2 Volet #2, les essais de fatigue (EF)

Suite à l'analyse des essais thermiques (ET) et de module complexe (EE*) du volet #1, il a été convenu de réaliser des essais de fatigue (EF) sur des éprouvettes : 1) à l'état sec (S) et, 2) partiellement saturées en eau (PSE). Ce choix s'est fait en constatant que l'état PSE,

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

comparativement aux états S, PSS7, PSS14 et PSS19, est le plus dommageable. L'objectif principal du 2ème volet est de déterminer la durée de vie en fatigue de l'enrobé bitumineux en fonction des deux états : S et PSE.

Les éprouvettes soumises aux essais de fatigue (EF) n'ont pas été instrumentées de jauges. Elles sont représentées par le terme F_{SJ} (sans jauge) (Groupe #3, Tableau 2.3). Pour la détermination de la durée de vie en fatigue, 5 à 10 éprouvettes sont testées par état (Groupe #3, Tableau 2.3). L'analyse du comportement à la fatigue de l'enrobé bitumineux est fondée essentiellement sur la mesure de l'évolution de la norme du module complexe (|E*|) et la durée de vie (N_f) qui est établie suivant différents critères de rupture pour divers niveaux de déformations imposées.

Tableau 2.3 Répartition des éprouvettes pour les essais de fatigue (EF)

Groupe	**Éprouvette**		**État**	**Essai mécanique, de fatigue (EF), réalisé sur chaque éprouvette (nombre)** [A]
	type	**nombre**		
#3	F_{SJ}	5 à 10	S	1EF, jusqu'à la rupture de l'éprouvette
		5 à 10	PSE	
[A]	Le niveau de déformation lors d'un essai de fatigue (EF) est constant (με constante). Toutefois, pour établir la courbe de Wöhler, au moins quatre essais de fatigue sont réalisés à différentes amplitude de déformation (με variable) ;			
F_{SJ}	Éprouvette sans jauge de déformation et soumise à l'essai de fatigue ;			
S	Éprouvette à l'état sec ;			
PSE	Éprouvette partiellement saturé en eau.			

2.2.3 Nomenclature utilisée

En raison des diverses éprouvettes et types d'essai au cœur de cette recherche, il devient important de choisir une nomenclature d'identification appropriée pour la codification des éprouvettes et résultats d'essai.

Pour les éprouvettes partiellement saturées en eau ou en saumure (PSE, PSS7, PSS14 et PSS19), il est important de préciser leur degré de saturation car il affecte : A) la rigidité de

l'enrobé bitumineux à haute et basse températures en raison de la perte de cohésion du mastic et à la formation de glace respectivement et, B) la durée de vie de l'enrobé.

Pour les éprouvettes soumises aux EE*, il est nécessaire d'effectuer un décompte du nombre d'EE* réalisés sur chacune d'entre-elles. Ceci s'explique par le fait même que la réalisation d'un essai de module complexe (EE*) génère un cycle de GD. De plus, ce cycle de GD est très différent de ceux imposés au cours des ET. En effet, pour l'EE*, l'éprouvette est soumise à une plage de température variant de +23 à -35°C et de -35 à +35°C.

Pour les EE*, la nomenclature d'identification est présentée au Tableau 2.4. Par exemple, le code "E*-PSE-DS90%-10GD-4EE*" signifie que l'éprouvette de type E*, partiellement saturée en eau (PSE) à un degré de saturation (DS) de 90% a été soumise à 10 cycles de gel-dégel (GD) et à quatre (4) essais de module complexe (EE*).

De plus, la teneur en vides des éprouvettes et l'amplitude de déformation obtenue lors des essais de fatigue (EF) affecte grandement leur durée de vie. Alors, il est important de le préciser dans l'identification. Pour les EF, cette nomenclature d'identification est présentée au Tableau 2.5.

Tableau 2.4 Nomenclature utilisée pour la codification des éprouvettes soumises aux essais de module complexe (EE*)

Instrumentation		**État**				**Sollicitations d'ordre**		
Type d'éprouvette		**Saturation**				**Thermiques**		**Mécaniques**
		Fluide		**Degré**				
E*	–	S PSE PSS7 PSS14 ou PSS19	–	DS**W**%	–	**X**GD	–	**Y**EE*
W	De 0 à 100 ;							
X	0, 1, 3, 10, 30, 60 et 100 ;							
Y	De 1 à 7.							

Tableau 2.5 Nomenclature utilisée pour la codification des éprouvettes soumises aux essais de fatigue (EF)

État			Éprouvette			Sollicitations
Saturation						
Fluide	Degré		Teneur en vides		Numéro	Amplitude de déformation
S PSE PSS7 PSS14 ou PSS19	– DS**W**%	–	**Y**%	–	**PSC**	– **Z**µdef

W	De 0 à 100 ;
Y	De 2 à 6, avec deux chiffres significatifs ;
P	Numéro de la plaque d'enrobé bitumineux ;
SC	Code associé au numéro de l'éprouvette carottée "C" spécifiant son positionnement au sein d'une section "S" d'une plaque "P" confectionnée en laboratoire (détails à la Figure 2.3) ;
Z	De 80 à 150.

2.3 Enrobé bitumineux testé

Dans le cadre du programme expérimental, un seul type d'enrobé bitumineux est testé, soit l'enrobé EB-14. Cet enrobé a été caractérisé par Meunier (2012). Tout particulièrement, l'enrobé EB-14 est couramment utilisé au Québec en couche de base, unique ou de surface, ce qui explique son choix pour le programme expérimental. L'enrobé bitumineux EB-14 utilisé est constitué d'un squelette granulaire de grosseur nominale maximale (GNM) de 14mm avec des granulats de haute qualité (classes 1a et 1), qui sont entièrement concassés (fragmentation de 100%), et d'un bitume de grade PG 70-28 ayant une recouvrance de 75%. La densité maximale du mélange (d_{mm}) est de 2,586. La teneur en bitume de l'enrobé est de 4,8% (% massique par rapport à la masse totale). La formulation de l'enrobé est réalisée selon les spécifications du ministère des Transports du Québec (norme 4201 : MTQ, 2007b). La Figure 2.2 illustre la granulométrie et le fuseau granulométrique de spécification du combiné granulaire de l'enrobé EB-14 testé.

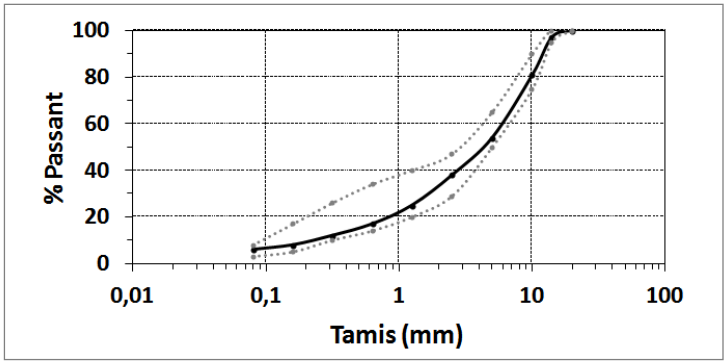


Figure 2.2 Granulométrie et fuseau granulométrique de spécification du combiné granulaire de l'enrobé EB14

2.4 Préparation des éprouvettes

2.4.1 Introduction

Cette section présente l'ensemble des étapes requises avant la réalisation d'essais thermique ou mécanique. En particulier, les étapes sont présentées de façon chronologique pour une compréhension plus aisée de la démarche à suivre. De plus, l'ANNEXE I présente la durée et le déroulement de l'ensemble de ces étapes nécessaires avant la réalisation d'essais thermique ou mécanique.

2.4.2 Fabrication et échantillonnage de l'enrobé bitumineux

L'enrobé bitumineux EB-14 a été confectionné en centrale d'enrobage plutôt qu'en laboratoire. Ensuite, l'enrobé a été échantillonné en très grande quantité et placé dans des boîtes en carton conçues à cet effet. Chaque boîte permet d'y placer environ 10kg d'enrobé.

2.4.3 Élaboration et compactage des plaques d'enrobé

Pour l'élaboration en laboratoire des plaques d'enrobé, l'enrobé échantillonné a dû être chauffé à nouveau. Ce chauffage supplémentaire conduit à une oxydation additionnelle de l'enrobé qui le rigidifie. En conséquent, à l'atteinte de la température de l'enrobé

manuellement homogénéisé, la compaction de la plaque a été de facto réalisée[23].L'enrobé est compacté en laboratoire avec le compacteur de plaques MLPC selon la méthode d'essai LC 26-400 (MTQ, 2013). Le compactage des plaques de $125 \times 400 \times 600 mm^3$ est effectué à l'aide d'une charge roulante constituée de pneumatiques jumelés.

2.4.4 Détermination de la teneur en vides des plaques compactées

Au lendemain du compactage d'une plaque, cette dernière est pesée afin de connaître sa teneur réelle en vides. La méthode hydrostatique (§ 2.4.9.1) est utilisée pour la détermination de la teneur en vides en considérant la densité maximale de l'enrobé (d_{mm}). La teneur en vides de chaque plaque, neuf en tout, est spécifiée à l'ANNEXE II.

2.4.5 Sciage et carottage des plaques

Entre le moment du compactage et celui du carottage d'une plaque, un temps de mûrissement minimum de 24h est recommandé par la méthode d'essai LC 26-700 (MTQ, 2013) et la norme NF P 98-250-3 (AFNOR, 1992). À titre de précaution, dans le cadre du programme expérimental actuel, un temps de mûrissement d'au moins 14 jours est considéré. Après ce mûrissement, des éprouvettes de 80mm de diamètre sont carottées dans l'épaisseur de la plaque et suivant le sens du déplacement de la charge roulante, tel que schématisé à la Figure 2.3. Le temps écoulé entre le compactage et le carottage de chaque plaque confectionnée dans le cadre de ce programme expérimental est donné à l'ANNEXE II. Ensuite, les carottes sont numérotées suivant la codification suivante : PSC, où P est le numéro de la plaque (de 1 à 9), S est le numéro de la section de la plaque (de A à D) et C est le numéro de la carotte (1, 2 ou 3). Après carottage, les éprouvettes sont coupées et meulées pour obtenir une longueur

---

[23] Dans le cas d'un enrobé confectionné en laboratoire, les directives de la méthode d'essai LC 26-700 (MTQ, 2013) recommande une période de vieillissement de 4h dans une étuve ventilée à la température de compactage avant le compactage d'une plaque. Ce vieillissement en laboratoire vise à simuler celui généré lors de la confection en centrale d'enrobage, le transport et la mise en œuvre de l'enrobé bitumineux sur chaussée : vieillissement à court terme, tel que définie dans la norme AASHTO R 30-02 (AASHTO, 2010b).

de 120 ± 2mm. Alors, le ratio longueur/diamètre (L/D) est de 1,5[24], tel que spécifié dans la norme AASHTO T 342-11 (AASHTO, 2011).

Par ailleurs, le diamètre des carottes (D) doit être d'au moins 4, 2,7 ou 3,75 fois la GNM du combiné granulaire constituant l'enrobé bitumineux, tel que spécifié respectivement dans les normes NF EN 12697-26 (AFNOR, 2004a), AASHTO T 342-11 (AASHTO, 2011b) et la méthode d'essai LC 26-700 (MTQ, 2013). Ce critère est facilement respecté dans le cadre de ce programme expérimental puisque le diamètre des éprouvettes et la GNM du combiné granulaire sont de 80 et de 14mm respectivement (rapport de 5,7).

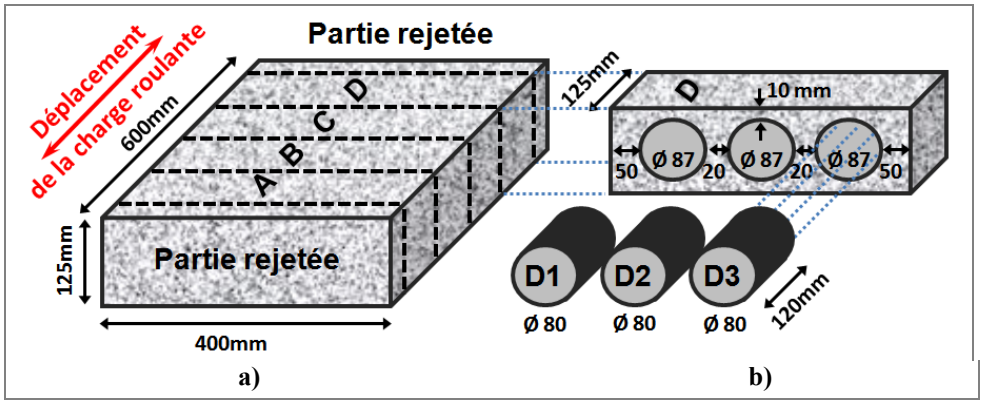


Figure 2.3 a) Patron de sciage d'une plaque élaborée en prismes, b) Plan de carottage des prismes sciés

Les critères à respecter pour le sciage, carottage, caractéristiques dimensionnelles des carottes (planéité, parallélisme, perpendicularité, hauteur, diamètre) sont détaillés dans les normes AASHTO T 342-11 (AASHTO, 2011b), NF EN 12697-29 (AFNOR, 2003), NF P 98-250-3 (AFNOR, 1992) et la méthode d'essai LC 26-700 (MTQ, 2013). Ces critères ne doivent pas être négligés. Ils permettent d'obtenir des carottes de dimensions semblables, une

[24] A titre informatif, les normes LC 26-700 (MTQ, 2013) et NF EN 12697-26 (AFNOR, 2004a) spécifient respectivement un ratio L/D de 2 et de 1,8 à 3. Également, le Département de Génie Civil et Bâtiment (DGCB) de l'École Nationale des Travaux Publics de l'État (ENTPE) vise un ratio L/D de 1,8 minimum et d'environ de 2.

mesure mécanique de qualité en raison de la planéité, perpendicularité et parallélisme des faces des carottes, ce qui se traduit indéniablement par une réduction de la variabilité entre les mesures d'un même type d'essai pour un enrobé bitumineux donné.

2.4.6 Entreposage des carottes

Après carottage, pour éviter tout gauchissement et vieillissement de l'enrobé par les rayons UV, les éprouvettes sont allongées dans un lit de sable placé dans une chambre à l'abri des rayons solaires et à une température inférieure à +25°C. Dans le programme actuel, ceci a été respecté. Les conditions d'entreposage sont spécifiées dans les normes NF EN 12697-24 (AFNOR, 2005), NF P 98-250-3 (AFNOR, 1992) et NF P 98-261-1 (AFNOR, 2001).

2.4.7 Délai entre le carottage et la réalisation d'un essai

Dans ce programme, neuf plaques ont été compactées en séquence sur une période de deux semaines. Par ailleurs, il a été préconisé de carotter toutes les plaques à un même moment afin d'obtenir un vieillissement similaire pour l'ensemble des carottes. À cet effet, le délai spécifié de 2 à 8 semaines entre le carottage et la réalisation d'un essai n'a pu être respecté dans la majorité des cas en raison de la durée importante du programme expérimental et des problèmes d'équipements rencontrés en cours du programme (LC 26-700 (MTQ, 2013) ; NF EN 12697-24 (AFNOR, 2005) ; NF EN 12697-26, (AFNOR, 2004a) ; NF P 98-260-1 (AFNOR, 2000) ; NF P 98-260-2 (AFNOR, 1992) ; NF P 98-261-1 (AFNOR, 2001))[25]. Pour chaque éprouvette, la durée réelle entre le carottage et la réalisation d'un essai est spécifié à l'ANNEXE III.

---

[25] À titre informatif, le délai spécifié par la norme AASHTO T 342-11 (AASHTO, 2011b) est au maximum de 2 semaines. En plus, cette norme mentionne que les éprouvettes doivent être recouvertes de polyéthylène si le délai dépasse 2 jours pour éviter le vieillissement de l'enrobé bitumineux.

2.4.8 Mesurage et pesage des carottes avant la réalisation de l'essai

Les caractéristiques physiques (longueur, diamètre, masses) des éprouvettes (ou carottes) sont mesurées avant la réalisation d'un essai. Ces caractéristiques permettent notamment de déterminer la teneur en vides et l'évolution de la teneur en eau, soit le degré de saturation, des éprouvettes. En raison du nombre important de carottes, leurs caractéristiques physiques sont présentées à l'ANNEXE III. Le volume en vides (V_i) est un paramètre de premier plan dans la composition d'un enrobé bitumineux. Elle affecte sa durabilité et sa rigidité.

2.4.9 Détermination de la teneur en vides des carottes

Il est possible de déterminer la teneur ou le volume en vides interstitiels (V_i) à partir d'une approche volumétrique. Il faut en sorte établir le volume total (V_t) de la carotte. Le volume total (V_t) correspond à la masse volumique du matériau (MV) et peut être mis en corrélation avec sa densité brute (d_{mb}). La teneur ou volume en vides (V_i) peut être déterminée à partir de deux méthodes : méthode hydrostatique ou méthode volumétrique. Dans le cadre de ce programme expérimental, les deux méthodes sont utilisées afin de confirmer la valeur de la teneur en vides obtenue.

Selon la méthode d'essai LC 26-320 (MTQ, 2013), le volume en vides (Vi) est :

$$V_i(\%) = \left[1 - \frac{d_{mb}}{d_{mm}}\right] \times 100 \tag{2.1}$$

Le terme d_{mb} désigne la densité brute de l'enrobé compacté et le terme d_{mm} représente la densité maximale de l'enrobé. Pour l'enrobé EB-14, la d_{mm} est de 2,586. La d_{mm} a été déterminée selon la méthode d'essai LC 26-045 (MTQ, 2013).

Rapport-Gratuit.com

2.4.9.1 Méthode hydrostatique, détermination de la densité brute

Cette méthode d'essai est préconisée pour les enrobés, dit denses, ayant une teneur en vides inférieure à 10% (LC 26-040 : MTQ, 2013). Il s'agit de peser l'éprouvette à l'état sec dans l'air et dans l'eau et à l'état SSS (saturée à surface sèche) dans l'air afin de connaître sa densité brute (d_{mb}), telle que définie par l'équation 2.2 :

$$d_{mb} = \frac{A}{B - C} \times \frac{dw}{0{,}997044} \tag{2.2}$$

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 (g/cm^3) à la température de l'essai (25 ± 3°C) ;

0,997044 Masse volumique de l'eau à 25°C (d_{w25}, g/cm^3).

Il est possible d'obtenir la masse volumique (MV, g/cm^3) de l'éprouvette en multipliant la valeur de la d_{mb} par la masse volumique de l'eau à 25°C (d_{w25}) :

$$MV = d_{mb} \times d_{W25} \tag{2.3}$$

2.4.9.2 Méthode volumétrique, détermination de la masse volumique

Cette méthode d'essai est préconisée pour les enrobés à porosité ouverte : teneur en vides supérieure à 10% (LC 26-040 : MTQ, 2013). Le volume brut de l'éprouvette est déterminé à partir de ces dimensions géométriques. 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 quatre chiffres significatifs. À partir de

sa masse à l'état sec (A) et de son volume brut (V_b, cm^3), la masse volumique (MV, g/cm^3) de l'éprouvette est :

$$MV = A \times V_b \quad (2.4)$$

Ensuite, la masse volumique (MV) est transformée en densité brute (d_{mb}) en prenant en compte la densité de l'eau à 25°C (d_{w25}).

2.4.9.3 Teneur en vides des carottes

La teneur en vides de l'ensemble des carottes testées dans le cadre de ce programme expérimental varie de 1,9 à 5,7% (ANNEXE III). Au Québec, la teneur en vides exigée in situ pour les couches d'enrobé bitumineux du revêtement est de 2 à 7%, tel que spécifié dans le CCDG (MTQ, 2012b).

2.4.9.4 Exigences pour la teneur en vides des carottes

Pour constituer une série d'éprouvettes pour réaliser des essais de module complexe (EE*) ou de fatigue (EF), la teneur en vides ne doit pas varier de plus de 1% ou que l'écart-type soit ≤ 0,5 ou 0,7% (AASHTO T 342-11 (AASHTO, 2011b) ; NF EN 12697-24 (AFNOR, 2005) ; NF P 98-261-1 (AFNOR, 2001) ; NF P 98-260-2 (AFNOR, 1992b)). Une plage de teneur en vides de 1% est ici considérée pour constituer les lots d'éprouvettes à tester : classement effectué selon la teneur en vides déterminée selon la méthode hydrostatique.

2.4.10 Collage des casques

Des casques en aluminium (Ø 90 ou 100mm) sont collés à l'aide d'époxy aux extrémités planes des éprouvettes cylindriques. Les sollicitations mécaniques appliquées au matériau sont induites par l'entremise de ces casques, lesquels sont mécaniquement fixés au système d'attache de la presse hydraulique. Un époxy en gel et résistante à basse température est utilisée pour le collage (Sika Canada, Sikadur 31 Hi-Mod Gel). Le centrage des casques

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

d'aluminium sur les éprouvettes est assuré par un banc de collage (Figure 2.4). Le banc de collage est équipé d'une 1ère partie mobile dans le plan X-Z permettant de s'ajuster à la longueur des éprouvettes (Figure 2.4a). Également, l'éprouvette repose sur deux plateaux mobiles à paroi inclinée dans le plan Y-Z (Figure 2.4b). La présence d'un large rail et d'une visse sans fin permet d'approcher ou d'éloigner les plateaux mobiles, à paroi inclinée, l'un de l'autre et alors de centrer l'éprouvette par rapport au centre du casque suivant son diamètre (plan Y-Z).

Toutefois, après la réalisation de plusieurs essais de fatigue, il a été constaté que seulement deux essais sur trois étaient satisfaisants c'est-à-dire que le champ de déformation de l'éprouvette était homogène au début de la sollicitation mécanique. Pour atteindre un meilleur rendement quant à la réalisation des essais mécaniques, la procédure de collage des casques a été modifiée au cours du programme expérimental. Pour la fin de la réalisation des essais de fatigue du volet #2, le collage a été effectué en deux étapes : utilisation du banc pour coller un casque à une extrémité et collage du 2ème casque directement sur la presse en appliquant une faible force (40N) pendant 4h. Notons que pour faciliter les opérations, le casque collé à la presse est celui de la partie supérieure de l'éprouvette. Cette façon de faire permet : 1) d'ancrer solidement chacun des casques au système d'attache de la presse hydraulique, ce qui permet d'éliminer les jeux mécaniques ; 2) d'éviter l'induction de contrainte de torsion à l'éprouvette lors du serrage ; et 3) d'assurer le parallélisme des casques et ainsi obtenir un alignement quasi parfait de l'éprouvette avec la presse. Cette façon de faire a permis un meilleur pilotage pour les essais mécaniques et contribuer à accroître la qualité des résultats d'essais.

L'utilisation seule du banc de collage ou du banc combinée à la presse hydraulique pour le collage des casques est spécifiée au début du CHAPITRE 5 (essais de fatigue), ceci permet d'effectuer une meilleure analyse des résultats obtenus.

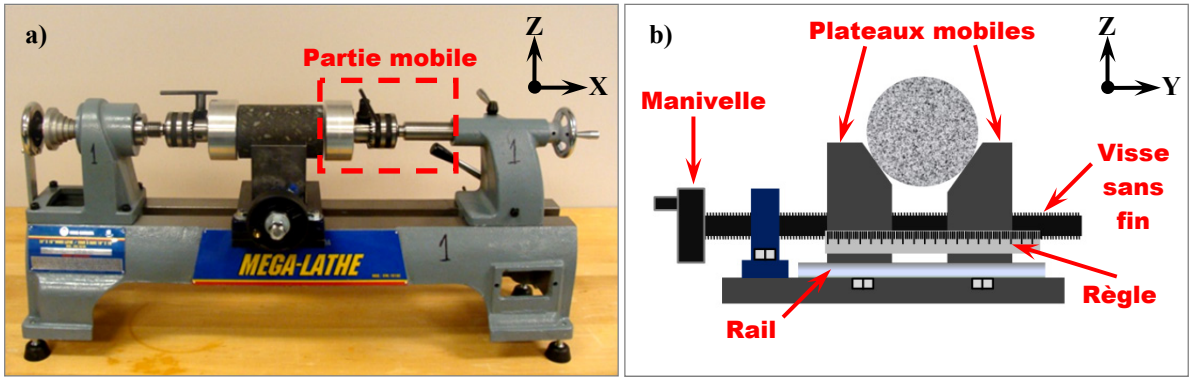


Figure 2.4 Banc de collage : a) Vue dans le plan X-Z, b) Vue dans le plan Y-Z

2.4.11 Instrumentation des éprouvettes

2.4.11.1 Équipements de mesure

Pour l'instrumentation des éprouvettes, des jauges de déformation et des thermocouples sont utilisés. Le passage d'un courant électrique aux travers les jauges et les thermocouples permet d'obtenir la mesure désirée.

2.4.11.2 Caractéristiques des équipements de mesure

Pour bien représenter la déformation de l'enrobé bitumineux, il est nécessaire que la jauge utilisée ait minimalement une longueur de 4 à 5 fois la GNM des granulats (Doerler, 2008). Le type de jauge de déformation utilisé est flexible et non câblé pour assurer un meilleur collage à l'éprouvette. La jauge sélectionnée a une longueur de 50,8mm et une résistance de 120Ω (modèle N2A-06-20CBW-120 : Vishay, 2010). Actuellement, une résistance de 120Ω représente un choix optimal : fiabilité et fabrication dans des limites très étroites : note technique no TN 56C (Vishay, 2008a). La plage d'utilisation de ces jauges est de -75 à +95°C et leur plage de mesure est de ±30 000µdef, soit ±3% (Vishay, 2010). L'alliage constituant les jauges retenues possède un coefficient de dilatation thermique de 11 à 12,1µm/m·°C.

Les thermocouples utilisés sont de type "T" provenant de l'entreprise Omega. Ils peuvent être utilisés de -200 à +350°C et ont une précision de ±1°C en valeur absolue. Toutefois, les valeurs relatives des variations de température sont nettement réduites. Ces thermocouples sont très rigides et présente une maniabilité réduite.

2.4.11.3 Éprouvettes de type T

L'instrumentation des éprouvettes de type T est illustrée à la Figure 2.5. Pour la mesure de la déformation axiale, chaque éprouvette est équipée d'une jauge. La jauge est collée à l'éprouvette à l'aide d'époxy. Elle est recouverte d'une mince couche de vernis (Vishay, M Coat A) pour la protéger de l'humidité tout en évitant l'isolation thermique.

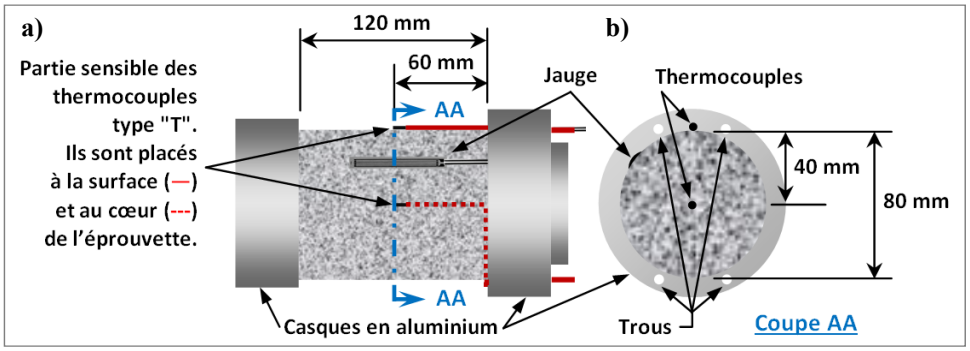


Figure 2.5 Instrumentation des éprouvettes de type T :
a) Vue de profil, b) Vue en coupe

De même, chaque éprouvette est équipée de deux thermocouples : un placé à la surface (à la paroi) et l'autre au cœur (centre de masse) de l'éprouvette. Pour placer le thermocouple au cœur, l'éprouvette est percée au centre, suivant sont axe longitudinal, et le trou est rempli de bitume chaud avant l'insertion du thermocouple. Évidemment, l'insertion du thermocouple au sein de l'éprouvette peut altérer le comportement thermique de l'enrobé bitumineux. Avant l'insertion, la tête du thermocouple est enduit de vernis (M Coat A) afin d'éviter sa corrosion et l'interruption des mesures de température. Bien que non requis, les éprouvettes T sont équipées de casques en aluminium tout comme les éprouvettes de types E* et F_{SJ} soumises aux essais mécaniques. De cette façon, les éprouvettes témoignent du comportement

thermique attendu des éprouvettes sollicitées mécaniquement. Également, le câble de la jauge et celui des thermocouples passent à travers des trous réalisés dans les casques d'aluminium spécialement conçus (Figure 2.5). Après le passage des câbles au travers ces trous, ils sont colmatés avec de la silicone.

Les mesures réalisées par la jauge et les thermocouples permettent de :

1) suivre l'évolution de la température ($T_{évolution}$) à la surface et au cœur de l'éprouvette ($T_{surface}$ et T_{coeur}) en cours d'essai thermique (ET) ;
2) suivre l'évolution de la déformation axiale de l'éprouvette en fonction de la température (ε^{Ther}) ;
3) calculer le coefficient de dilatation thermique linéique ($\alpha_{linéaire}$) de l'enrobé bitumineux ;
4) quantifier la dilatation de l'éprouvette générée par la solidification du liquide ($\varepsilon_{solidification}$, ε_S), soit la formation de la glace ;
5) quantifier la contraction créée par la fusion de la glace (ε_{fusion}, ε_F) ;
6) quantifier les fluctuations de température (ΔT) générées par la formation et la fusion de la glace ;
7) déterminer la température de formation de la glace ($T_{solidification,}$ T_S) et point de fusion de la glace ($T_{fusion,}$ T_F) en fonction de la teneur en sel (7, 14 ou 19%) et du degré de saturation (DS) des éprouvettes.

À notre connaissance, au niveau des enrobés bitumineux, comparativement aux bétons hydrauliques, le suivi, la quantification et la détermination de tout ces éléments constitue une première du genre (1ère innovation).

2.4.11.4 Éprouvettes de type E*

L'instrumentation des éprouvettes de type E* est illustrée à la Figure 2.6. Chaque éprouvette de type E* est instrumentée d'un thermocouple placé en surface, de deux jauges axiales et deux jauges radiales. Les jauges sont diamétralement opposées. Les jauges radiales superposent les jauges axiales. Également, les jauges sont recouvertes de ruban adhésif et de

polymère de polysulfure (Vishay, M-Coat J) afin de les protéger davantage contre l'humidité. A priori, la rigidité de ces matériaux de recouvrement est jugée négligeable. La plage d'utilisation du polymère est de -45 à +95°C. Lors de l'essai de module complexe (EE*), les jauges permettent de mesurer : le module complexe (E*) et le coefficient de Poisson complexe (v*).

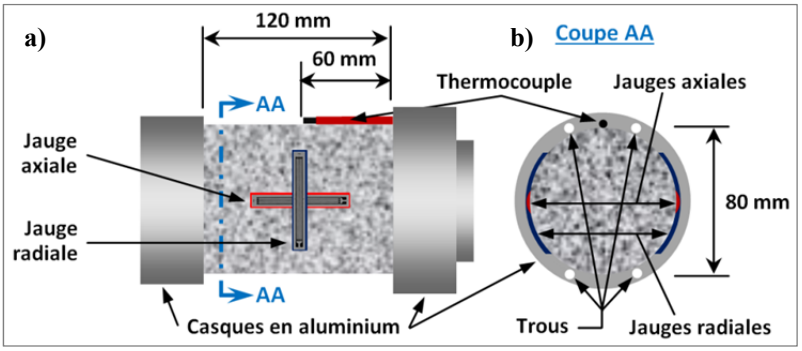


Figure 2.6 Instrumentation des éprouvettes de type E* :
a) Vue de profil, b) Vue en coupe

2.4.12 Saturation partielle des éprouvettes

À l'exception de l'éprouvette à l'état sec, les éprouvettes sont partiellement saturées en eau ou en saumure. Pour introduire le liquide dans les vides perméables d'une éprouvette, la méthode utilisée pour la détermination de la résistance à l'eau du MTQ a été considérée (LC 26-001 : MTQ, 2013). Le montage est constitué d'une pompe à vide, d'un manomètre, de deux valves (V1 et V2), d'un pycnomètre muni d'une entrée (E1) et d'une sortie (S1) et d'un dessiccateur également munie d'une entrée (E2) et d'une sortie (S2). Le montage est illustré à la Figure 2.7.

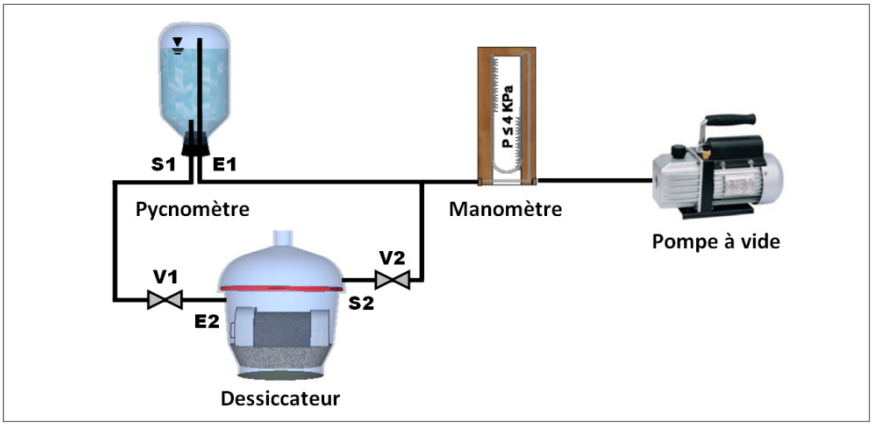


Figure 2.7 Montage pour la saturation partielle des éprouvettes

Essentiellement, pour saturer une éprouvette, plusieurs étapes sont réalisées. Dans un 1er temps, à la pression atmosphérique (P_{atm}), une éprouvette est déposée sur un lit de sable grossier et uniforme placé au fond d'un dessiccateur. Ensuite, l'extrémité des câbles des jauges et thermocouples qui n'est pas en contact avec l'éprouvette est placée dans un contenant de plastique à l'intérieur du dessiccateur afin d'éviter tout contact avec le liquide de saturation. De plus, la valve (V1) du dessiccateur est fermée alors que la valve (V2) est ouverte. Ensuite, le couvercle du dessiccateur est placé. Dans un 2ème temps, le pycnomètre est rempli du liquide de saturation et branché à l'entrée E1 et à la sortie S1. Dans un 3ème temps, en activant la pompe à vide, la pression dans le dessiccateur et le pycnomètre est abaissée et maintenue à une pression $\leq$ 4kPa (Pression P1, Figure 2.8 a). La réduction de la pression dans le pycnomètre a pour effet de désaérer le liquide. Après 30 minutes, et toujours en maintenant la pression $\leq$ 4kPa, dans un 4ème temps, la valve V1 est ouverte permettant ainsi le remplissage du dessiccateur à partir du liquide désaéré (eau ou saumure) et de couvrir complètement l'éprouvette. L'éprouvette est ainsi gardée en immersion pendant au moins 90 minutes et ce, toujours à la pression P1 (Figure 2.8 b). Dans un 5ème temps, la pompe est arrêtée et la pression dans le dessiccateur est contrôlée afin qu'elle revienne progressivement à celle de l'atmosphère (P_{atm}). Ensuite, l'éprouvette est : 1) retirée du dessiccateur ; 2) asséchée avec un linge humide pour retirer l'excédent de liquide tout en s'assurant qu'elle

reste saturée et ait une surface sèche (état SSS) ; 3) pesée dans l'air ; 4) recouverte d'une membrane[26] en latex pour empêcher la perte de liquide au cours des manipulations et des essais (Figure 2.8 c). De plus, pour assurer l'étanchéité de la membrane, des collets (2) métalliques sont placés aux extrémités, directement sur les casques (Figure 2.8 c).

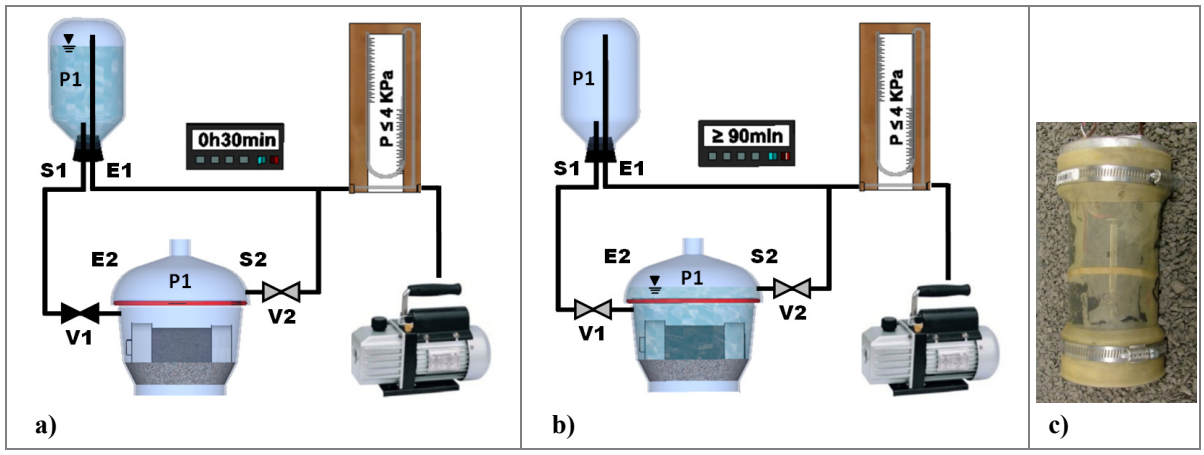


Figure 2.8 Procédé de saturation : a) Abaissement de la pression et désaération de l'éprouvette et du liquide dans le pycnomètre, b) Transfert du liquide et immersion de l'éprouvette, c) Éprouvette recouverte d'une membrane en latex

2.4.12.1 Détermination du degré de saturation des éprouvettes

Plusieurs étapes doivent être réalisées afin de déterminer avec précision le degré de saturation des éprouvettes. Tout spécialement, avant de procéder à l'instrumentation, il est nécessaire de peser l'éprouvette afin de déterminer la densité brute de l'enrobé compacté (d_{mb}) (§ 2.4.9.1). Ensuite, la teneur en vides du matériau (V_i) est calculée à l'aide des valeurs de densité brute du matériau (d_{mb}) et de la densité maximale du mélange (d_{mm}) (§ 2.4.9.1). Après, il est nécessaire de déterminer le volume du réseau poreux (porosité) de l'éprouvette. Le Tableau 2.6 présente les caractéristiques physiques des éprouvettes de type T, avant instrumentation et saturation, nécessaires au calcul de la porosité.

[26] La membrane a une épaisseur de 0,6mm, un diamètre de 76mm et une longueur de 255mm. En raison de son diamètre, la membrane ne confine pas l'éprouvette qui a un diamètre de 79mm et alors, n'influe pas sur la rigidité de l'enrobé bitumineux qui est mesurée lors des essais mécaniques.

Tableau 2.6 Caractéristiques physiques des éprouvettes de type T, avant instrumentation et saturation, nécessaires au calcul de la porosité

Éprouvette (no)	d_{mb} [A]	Teneur en vides (V_i, % vol.) [B]	MV (g/cm^3) [C]	A (g) [D]	V_b (cm^3) [E]	Porosité (p) (cm^3) [F]
8-D1	2,474	4,3	2,466	1446,4	586,4	25,4
8-B2	2,472	4,4	2,464	1412,8	573,2	25,3
8-B3	2,470	4,5	2,463	1406,8	571,1	25,5
8-C1	2,469	4,5	2,462	1392,6	565,6	25,5
8-A3	2,470	4,5	2,462	1444,7	586,7	26,4

[A] Densité brute de l'enrobé compacté obtenue selon la méthode hydrostatique (§ 2.4.9.1).
[B] Calculée avec les valeurs de d_{mb} et de d_{mm} (§ 2.4.9).
[C] Masse volumique de l'éprouvette (§ 2.4.9.1).
[D] Masse dans l'air de l'éprouvette sèche.
[E] Volume brut de l'enrobé compacté : $V_b = A / MV$.
[F] $p = V_b \times V_i$.

À la suite de l'instrumentation et du collage des casques, il est nécessaire de connaître la masse sèche de l'éprouvette. Après chaque saturation, l'éprouvette partiellement saturée et à l'état SSS est pesée. Ceci permet de connaître la masse de liquide au sein de l'éprouvette. Le Tableau 2.7 présente les caractéristiques des éprouvettes de type T mesurée après une première saturation et nécessaires au calcul du degré de saturation.

Tableau 2.7 Caractéristiques des éprouvettes de type T mesurées après une première saturation partielle (SP1) et nécessaires au calcul du degré de saturation (DS)

Éprouvette (no)	Fluides au sein du solide	Identification	m_l (g) [A]	MV_l (g) [B]	V_l (cm^3) [C]	DS (% vol.) [D]
8-D1	Air	S	0	---	---	0
8-B2	Air et eau	PSE	20,6	0,9982	20,6	82
8-B3	Air et saumure	PSS7	23,3	1,0515	22,2	87
8-C1		PSS14	25,8	1,0993	23,5	92
8-A3		PSS19	27,4	1,1430	24,0	91

[A] Masse de liquide au sein de l'éprouvette.
[B] Masse volumique du liquide à la température de la pièce (laboratoire).
[C] Volume du liquide.
[D] Degré de saturation de l'éprouvette.

Rapport-Gratuit.com

Le degré de saturation (DS) est déterminé selon l'équation suivante :

$$DS(\%) = \frac{V_l}{p} \times 100\% \tag{2.5}$$

où :

V_l Volume du liquide absorbé (mm^3) ;

p Porosité initiale de l'enrobé bitumineux (mm^3).

Lors des pesages subséquents, il est nécessaire de vérifier s'il y a eu écoulement et donc, présence d'eau en surface de l'éprouvette ou ailleurs. Si c'est le cas, cet excédant d'eau en surface doit être essuyé afin de déterminer avec précision le degré de saturation (DS) de l'éprouvette.

2.5 Essai thermique (ET)

2.5.1 Étalonnage des équipements

Pour s'assurer d'obtenir des résultats rigoureux, il est nécessaire d'effectuer un étalonnage des thermocouples et des jauges. L'étalonnage des thermocouples est réalisé à trois températures (-25, 0 et 25°C) dans un bain d'eau ou d'eau-alcool.

L'étalonnage des jauges est particulièrement important puisque la résistance électrique de celles-ci varie non seulement avec la déformation du matériau, mais également avec la température. La déformation liée à la variation de la résistance électrique due uniquement à la température est nommée "déformation apparente" pour la distinguer de celle liée à la variation générée par les efforts induits au matériau et désignée "déformation mécanique". Tel qu'énoncé dans la note technique NT 504 (Vishay, 2008b), la déformation apparente est due notamment à :

1) Variation de la résistivité de l'alliage constituant la jauge qui varie avec la température ;
2) Dilatation différentielle existant entre la jauge et le matériau à tester.

L'établissement de la correction de la déformation apparente des jauges est établi expérimentalement selon la note technique TN 513 de Vishay (2007), la norme ASTM E 251-92 (ASTM, 2003a) et les travaux de Finke et coll. (1978), et décrite en détail à l'ANNEXE IV.

2.5.2 Enceinte thermique

Une enceinte thermique de l'entreprise Tenney Environmental, modèle T10C, a été utilisée pour les ET. Le volume interne de l'enceinte est de 0,61 x 0,69 x 0,71m^3. La puissance du compresseur de l'enceinte est de 2,5kW. La plage de température de l'enceinte s'échelonne de -70°C à +170°C. La température est répartie et homogénéisée dans l'enceinte au moyen d'un ventilateur fixé sur la face arrière dans la partie supérieure de l'enceinte.

L'étalonnage de l'enceinte est réalisé avec des thermocouples étalonnés au préalable (§ 2.5.1). Les thermocouples sont répartis dans le volume de l'enceinte de la façon suivante : huit thermocouples sont disposés à 20cm de chacun des coins et un thermocouple au centre (tous sont équidistants des parois). Cet étalonnage s'inspire de la norme NF X 15-140. Cette dernière est progressivement remplacé par la norme CEI 60068-3-11 (CEI, 2007). De plus, le système d'acquisition est le même que celui utilisé lors des ET (§ 2.5.4).

2.5.3 Déroulement d'un essai thermique (ET)

Avant et après un ET, les éprouvettes sont soigneusement pesées afin de déterminer avec précision leur degré de saturation. Lors du déroulement d'un ET, les éprouvettes sont placés sur un lit de sable concassé (2,5/5mm) disposé dans des pannes métalliques. Ceci permet d'éviter toute déformation par fluage des éprouvettes lors du déplacement, de l'entreposage et la réalisation des cycles de GD dans l'enceinte au cours d'un ET. Trois pannes métalliques ont été utilisées pour y placer les dix éprouvettes des deux groupes (types T et E*). Ces pannes sont réparties sur trois niveaux dans l'enceinte. La réalisation des cycles de GD au cours d'un ET est illustrée à la Figure 2.9. Pour une meilleure compréhension de la réalisation des cycles de GD, il est possible de se référer à la Figure 2.1. À la Figure 2.9, la

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

lettre "j" est associé à l'ET correspondant (j = 1 à 6) et la lettre "i" est associé au nombre de cycles de GD des ET (i = 0 à 100). La lettre "X" est associé au nombre de répétitions de cycles de GD réalisé à chacun des ET (x = 1, 2, 7, 20, 30 ou 40).

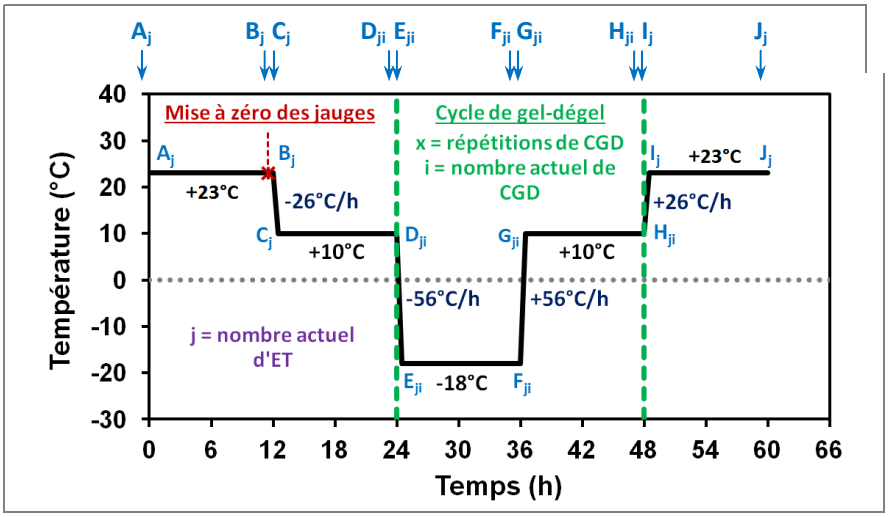


Figure 2.9 Température de l'air projeté au sein de l'enceinte thermique durant les essais thermiques (ET)

Avant de commencer l'ET "j", l'enceinte est programmée pour atteindre deux paliers de température : +23°C (A_j-B_j) et +10°C (C_j-D_{ji}). À chaque palier, la température est maintenue pendant 11h et 30min. À la fin du premier palier de température (+23°C), toutes les jauges sont mises à zéro. À la fin du deuxième palier (+10°C), la réalisation des cycles de gel-dégel débute : étapes D_{ji}-H_{ji}. Pour chaque cycle de GD, deux paliers de température sont ciblés : -18°C (E_{ji}-F_{ji}) et +10°C (G_{ji}-H_{ji}). À chacun de ces paliers, la température est maintenue pendant 11h et 30min. Finalement, après le dernier cycle de GD d'une séquence spécifique d'un ET "j", un dernier palier de température est ciblé à +23°C (I_j-J_j) et la température est encore une fois maintenue pendant 11h et 30min.

Dans tous les cas, la durée considérée pour passer d'un palier de température à un autre est de 30 minutes. Pour un ET spécifique ("j" donné), ces transitions de 30 minutes sont identifiées sur la Figure 2.9 par les étapes B_j-C_j, D_{ji}-E_{ji}, F_{ji}-G_{ji} et H_{ji}-I_j. Le taux thermique est constant entre les étapes B_j-C_j et H_{ji}-I_j et entre D_{ji}-E_{ji} et F_{ji}-G_{ji} où il est de 26 et 56°C/h respectivement.

Bien que des taux élevés soient utilisés, le taux thermique au sein des éprouvettes ne dépassent jamais 7 à 8°C/h en raison de la puissance de l'enceinte et de la quantité importante d'éprouvettes et de matériaux au sein de l'éprouvette (≈ 75kg). Les paliers de température (étapes A-B, C-D, E-F, G-H et I-J), d'une durée de 11 heures et 30 minutes, sont effectués afin de s'assurer que la température en tout points de l'éprouvette soit stabilisée. Ceci permet d'atteindre la stabilisation dimensionnelle (déformation) de l'éprouvette. Précisément, cette stabilisation de température au sein des éprouvettes est obtenue après 10 heures et 15 minutes à une température constante (Figure 3.4, p. 140). Cet état stabilisée est préconisée pour la détermination du coefficient de dilatation linéique de l'enrobé entre les températures ciblées de -18, +10 et +23°C. Des détails additionnels sur la détermination du coefficient de dilatation linéique sont donnés à la section 1.6.

2.5.4 Acquisition de données

L'acquisition de données est accomplie pour tous les cycles de GD et permet de suivre : 1) de façon périodique, juste avant l'étape A_j et juste après l'étape J_j, le degré de saturation des éprouvettes ; 2) en continu, la température à la surface et au cœur ; 3) en continu, la déformation axiale des éprouvettes.

Pour le degré de saturation, des mesures additionnelles sont prises : juste après la saturation partielle (SP) et après un long entreposage (LE) des éprouvettes pour vérifier s'il était nécessaire d'effectuer une nouvelle saturation partielle de l'éprouvette avec un seuil établi de 50%.

L'acquisition des températures est effectuée avec le système CR-10 de l'entreprise Roctest. Il est possible d'y effectuer l'acquisition simultanée de 32 thermocouples. L'acquisition des déformations est effectuée à l'aide du système 5000 et du logiciel StrainSmart de la compagnie Vishay. Il est possible d'y effectuer l'acquisition simultanée de 20 jauges par le biais de quatre cartes de contrôle.

2.6 Équipements pour essais mécaniques

2.6.1 Presses hydrauliques

L'application des sollicitations mécaniques sur l'éprouvette (force, déplacement ou déformation) nécessite l'utilisation d'une presse hydraulique. La force appliquée est contrôlée par la cellule de charge, le déplacement par un vérin hydraulique et la déformation (ou déplacement) par des capteurs externes (extensomètres, jauges, etc.).

Dans le cadre du programme expérimental, deux presses MTS sont utilisées : MTS 810 et MTS 858. Les presses sont alimentées par une pompe hydraulique et équipées de servovalve afin d'obtenir des signaux adéquats pour la fréquence et l'amplitude de sollicitation. Les paramètres d'asservissements, identifiés par les lettres P, I, D et F, représentant le gain Proportionnel, le taux de Dérive, l'Intégration et le *Feed forward* (anticipation) sont optimisés pour les enrobés bitumineux.

Les éprouvettes de types E*, équipées avec jauges, sont placées dans la presse MTS 810. Le système de pilotage de cette presse est configuré pour effectuer la lecture des jauges et l'acquisition des mesures de celles-ci. La MTS 810 est équipée d'une enceinte thermique, d'un système d'acquisition et de pilotage (contrôleur avec logiciel Testware). Cette presse est illustrée à la Figure 2.10. La charge maximale de la presse est de 100kN. La cellule de charge est configurée pour une capacité de 25kN afin d'obtenir une meilleure précision pour les essais.

Globalement, le système d'acquisition (et contrôleur) de cette presse est configuré pour enregistrer les données de temps, force, déplacement du vérin et des trois extensomètres, déformation des jauges, températures et nombre de cycles de sollicitation.

Pour les éprouvettes de type F_{SJ}, sans jauges, la presse MTS 858 est utilisée. La MTS 858 est équipée d'une enceinte thermique, un système d'acquisition et de pilotage (contrôleur avec logiciel Testware). La charge maximale de la presse est de 25kN et la cellule de force est

également de 25kN. Cette presse, de capacité moindre que la MTS 810, est plus précise et le pilotage des essais est amélioré. La configuration du système d'acquisition (et contrôleur) de la MTS 858 permet d'enregistrer les données de temps, force, déplacement des trois extensomètres, températures et nombre de cycles de sollicitation.

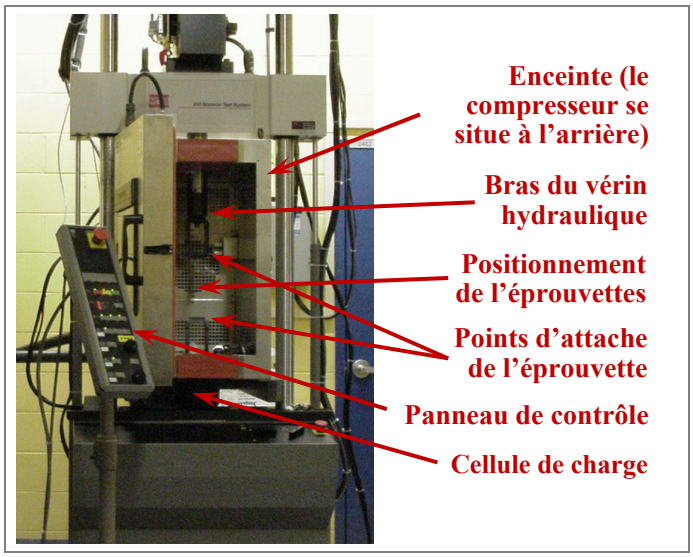


Figure 2.10 Presse hydraulique, modèle MTS 810

Finalement, soulignons que la précision des cellules de charge a été vérifiée suivant la norme ASTM E4-10 (ASTM, 2010b). Les cellules de charge des presses ont une précision[27] de ±1% de la force appliquée. Cette précision est valide pour une force aussi faible que 1/50^{ième} de la plage de mesure des cellules qui est de 25kN.

2.6.2 Enceintes thermiques des presses

L'éprouvette est placée dans une enceinte thermique en cours de sollicitation mécanique. La description de l'étalonnage des enceintes thermiques est décrite à la section 2.5.2.

---

[27] À partir de la pécision des équipements (cellule de charge, thermocouple, extensomètre et jauge de déformation), il est possible de calculer leur incertitude à mesurer, par exemple, la norme du module complexe |E*| (pour de plus amples détails se référer aux ouvrages de Carter (2002) et Lefebvre (2005)).

Pour la presse MTS 810, une enceinte thermique de l'entreprise Tenney Environmental-Lunaire limited, modèle BTS-1.5-TT, d'une capacité de 3,0kW est utilisée. La plage d'utilisation est de -34 à +100°C ou de -70 à +100°C avec de l'azote liquide. La température est répartie et homogénéisée au moyen d'un ventilateur fixé à l'arrière et dans la partie supérieure de l'enceinte. La température dans l'enceinte est contrôlée par un thermocouple placé directement sur l'éprouvette. Par la suite, ce thermocouple a été déplacé devant l'entrée d'air dans l'enceinte, comme cela devait être le cas. La précision du thermocouple est de ±1,0°C.

L'enceinte de la presse MTS 858 est alimentée par air forcée provenant d'une enceinte thermique indépendante. Ces deux enceintes sont reliées par deux conduits flexibles (entrée et sortie d'air). L'enceinte thermique est équipée de deux compresseurs en cascade qui permettent d'atteindre de très basses températures (modèle ET8-2-2-AC-ECA de l'entreprise Envirotronics). La plage d'utilisation est de -60 à +177°C. La température dans l'enceinte thermique est contrôlée par un thermocouple qui est placé à la sortie du conduit qui évacue l'air de l'enceinte de la presse. La précision du thermocouple est de ±1,0.

2.6.3 Capteurs de mesure de déplacement

Pour les éprouvettes de type E* et F_{SJ}, des extensomètres en Invar de 165mm[28] (modèle 632.11F-20 de MTS) et de 50mm (modèle 632.11F-90 de MTS) sont utilisés respectivement. La mise en place de la membrane en latex sur les éprouvettes pour éviter l'évaporation du fluide de saturation explique le choix de deux types d'extensomètres. Leur étendue de mesure est de ± 2 500µm. Les extensomètres de 165mm et de 50mm sont fixés aux casques en aluminium pour les EE* (détails § 2.7.2) et à l'éprouvette pour les EF (détails § 2.7.2.3) respectivement. Des couteaux placés en pointes des extensomètres permettent une attache plus stable. Les extensomètres sont disposés et répartis autour de l'éprouvette selon un angle de 120°.

---

[28] Distance entre les pointes.

Tous les extensomètres ont été étalonnés avec une vis micrométrique mécanique graduée au 2µm (modèle 650.03 de MTS). Lors de l'étalonnage, il est essentiel de déplacer la vis dans le même sens (extension ou compression) afin d'éliminer toute erreur de mesure générée par l'hystérésis spécifique aux capteurs (extensomètres). Leur précision est de ±1% du déplacement appliqué. Cette précision est valide pour un déplacement aussi faible que 1/50^{ième} de la plage de mesure de ± 2 500µm de l'extensomètre, soit 50µm. La norme ASTM E83-10a (ASTM, 2010c) précise la méthodologie pour la vérification des extensomètres.

2.6.4 Jauges de déformation

Les caractéristiques des jauges sont données en détail à la section 2.4.11.2. Le système d'acquisition (et contrôleur) de la presse MTS 810 est adapté afin d'enregistrer les mesures des jauges de déformation. Notamment, un pont complet d'extensométrie (pont de Wheatstone) est réalisé au sein du contrôleur. Ce pont est constitué de quatre résistances de 120Ω, dont une constitue celle de la jauge. Afin de réaliser l'étalonnage du pont (et contrôleur), un boîtier, au lieu de la jauge, est branché au système. Ce boîtier (modèle 1550A de Vishay) est équipée de boutons poussoirs qui font varier la résistance et permettent donc de simuler la déformation de la jauge. Aussi, le voltage utilisé pour alimenter les jauges est faible (1,6V) car les enrobés bitumineux sont de mauvais conducteur et dissipe mal la chaleur générée par le passage du courant au travers la résistance de la jauge. Si la chaleur n'est pas dissipée, cela génère une dérive de la mesure de la jauge.

2.6.5 Capteurs de mesure de température

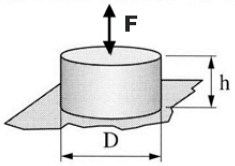
Lorsqu'il y a présence de membrane, le capteur de mesure de la température est placé sur la membrane, et non sur l'éprouvette, car il y a un risque de dysfonctionnement en raison de la présence d'eau, saumure ou d'humidité. Dans la MTS 810 et la MTS 858, une sonde thermique de type PT 100 est placée sur l'éprouvette ou sur la membrane afin de mesurer la température à la surface de l'éprouvette. La précision de ces sondes est de ±1°C.

2.7 Essais mécaniques de module complexe (EE*) et de fatigue (EF)

2.7.1 Types d'essai et de chargement préconisés

Il existe de nombreux essais permettant de déterminer le module complexe (E*). Le Laboratoire sur les chaussées et matériaux bitumineux (LCMB) de l'École de technologie supérieure (ÉTS, Montréal), le Département de génie civil et bâtiment (DGCB) de l'École nationale des travaux publics de l'État (ENTPE, France) et le ministère des Transports du Québec (MTQ, province du Québec) préconisent un essai de traction-compression sur éprouvette cylindrique sans confinement pour la détermination du module complexe (E*). C'est un essai en condition homogène. Les contraintes et déformations sont homogènes dans la partie centrale de l'éprouvette (Nguyen, 2009). Cet essai est illustré au Tableau 2.8.

Tableau 2.8 Essai de traction-compression
Adapté de Di Benedetto et coll. (2005, p. 123)

Type d'essai	Schéma de principe	Facteur de forme γ
Traction compression (avec ou sans confinement)		$\frac{4h}{\pi D^2}$

Cet essai peut être réalisé en contrôle de déformation ou contrainte. Pour ce programme expérimental, l'essai est contrôlé en déformation. De plus, les sollicitations axiales de type traction-compression sont alternées et centrées à zéro et ce, sous chargement sinusoïdal.

2.7.2 Dispositif expérimental

2.7.2.1 Introduction

Étant donné que les chances sont importantes quant au dysfonctionnement des jauges en raison des nombreuses saturations partielles et à la réalisation des cycles de GD, le pilotage d'un essai est réalisé à partir de trois extensomètres (traités à la section 2.6.3).

2.7.2.2 Dispositif pour les éprouvettes de type E*

Une membrane est mise en place sur les éprouvettes de type E* pour éviter l'évaporation et l'écoulement du liquide : eau (PSE) ou en saumure (PSS7, PSS14 et PSS19). Pour uniformiser le dispositif, une membrane est également placée sur l'éprouvette qui est à l'état sec (S). De ce fait, il n'est pas possible de placer les extensomètres directement sur l'éprouvette car il y a risques de perforation de la membrane. Par conséquent, les trois extensomètres en invar de 165mm ont été utilisés et placés directement sur les casques en aluminium. Le montage est illustré à la Figure 2.11. Notons que suivant ce montage, les extensomètres mesurent la déformation de l'éprouvette, mais également celle des casques en aluminium nécessitant une approche particulière pour le traitement des données d'essais et la détermination des propriétés de l'enrobé bitumineux.

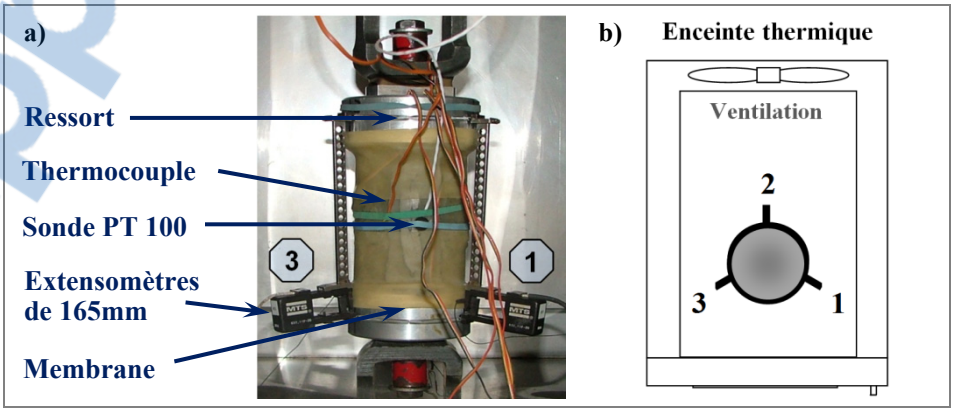


Figure 2.11 Dispositif pour les éprouvettes de type E* placées dans la MTS 810 : a) Éprouvette équipée des extensomètres et jauges (vue en profil), b) Positionnement des extensomètres (vue en plan)

Rapport-Gratuit.com

2.7.2.3 Dispositif pour les éprouvettes de type F_{SJ}

Pour les éprouvettes de type F_{SJ} servant aux EF, il est nécessaire de placer les extensomètres sur les éprouvettes, au lieu des casques en aluminium, afin d'obtenir une déformation constante de l'enrobé en cours de sollicitation. Des extensomètres de 50mm ont été utilisés et placés directement sur l'éprouvette (traités à la § 2.6.3). Également, aucune membrane n'a été placée sur les éprouvettes testées à l'état sec (S), comparativement aux éprouvettes partiellement saturées en eau (PSE). Pour ces dernières, la mise en place des extensomètres nécessite de perforer localement la membrane pour permettre un contact direct des couteaux des extensomètres avec la surface de l'enrobé. Dans ces conditions, pour éviter les pertes par évaporation, de la paraffine est coulée autour des couteaux pour colmater les perforations.

2.7.3 Niveaux de déformation préconisés

Pour les essais de module complexe (EE*) du volet #1, le niveau de déformation préconisé est de 50 x 10^{-6} m/m pour être certain d'être dans le domaine viscoélastique linéaire (VEL). Le nombre de sollicitations est également limité au minimum pour éviter l'endommagement par fatigue (Tableau 2.1). L'endommagement potentiel généré à l'enrobé bitumineux par les EE* est vérifié : équation (2.6), p. 117.

2.7.4 Déroulement d'un essai mécanique

2.7.4.1 Conditionnement

Pour assurer l'homogénéité de la température au sein de l'éprouvette, un conditionnement de 4h pour les EF ou de 5h pour les EE* est effectué à la température ciblée avant la réalisation d'une séquence de sollicitations. Le changement de température est effectué à un taux de 10°C/h.

2.7.4.2 Essai de module complexe (EE*)

Le déroulement d'un essai de module complexe (EE*) est illustré à la Figure 2.12. Les températures considérées s'échelonnent entre -35 et +35°C et ce, par incrément de 10°C. Également, des temps de repos sont imposés après la réalisation des sollicitations à 50µdef à une fréquence donnée afin de permettre au matériau de récupérer (Figure 2.12).

Dans un premier temps, il est possible de vérifier si le matériau est endommagé par la séquence de cyclage de sollicitations (SCS) à chaque palier de température. À cet effet, les valeurs du module complexe (E*) mesurées au début et à la fin de la séquence de sollicitations à une température donnée (ou palier de température) sont considérées (Figure 2.12, rectangles et lignes pointillées de couleur rouge vin). La norme NF EN 12697-26 (AFNOR, 2004a) stipule que l'éprouvette ne peut plus être utilisée pour la suite de l'EE* si l'écart de rigidité de l'éprouvette au début et à la fin de la séquence de cyclage de sollicitations dépasse les 3%[29]. En considérant les mesures prisent au 1er et au 2ème 10Hz d'une séquence, cette vérification est effectuée ainsi :

$$Dommage\ SCS\ =\ D_{SCS}\ =\ 1\ -\ \frac{E^*_{2ème\ 10Hz}}{E^*_{1er\ 10Hz}} \tag{2.6}$$

Bien que la norme spécifie cette exigence de 3%, à notre connaissance, seul ce travail présente en détail cette vérification (2ème innovation).

---

[29] Il faut être prudent quant à la notion d'endommagement. Cette baisse de rigidité doit plutôt être attribuée à une restructuration du bitume (thixotropie) et un échauffement (quoiqu'infiniment faible) au sein du matériau. La réalisation d'essais de fatigue pour un nombre de cycles inférieur à 10 000 démontre bien que le matériau récupère sa rigidité initiale après un temps de repos de plusieurs heures. De ce fait, le matériau n'est nullement endommager (Di Benedetto et coll., 2011).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

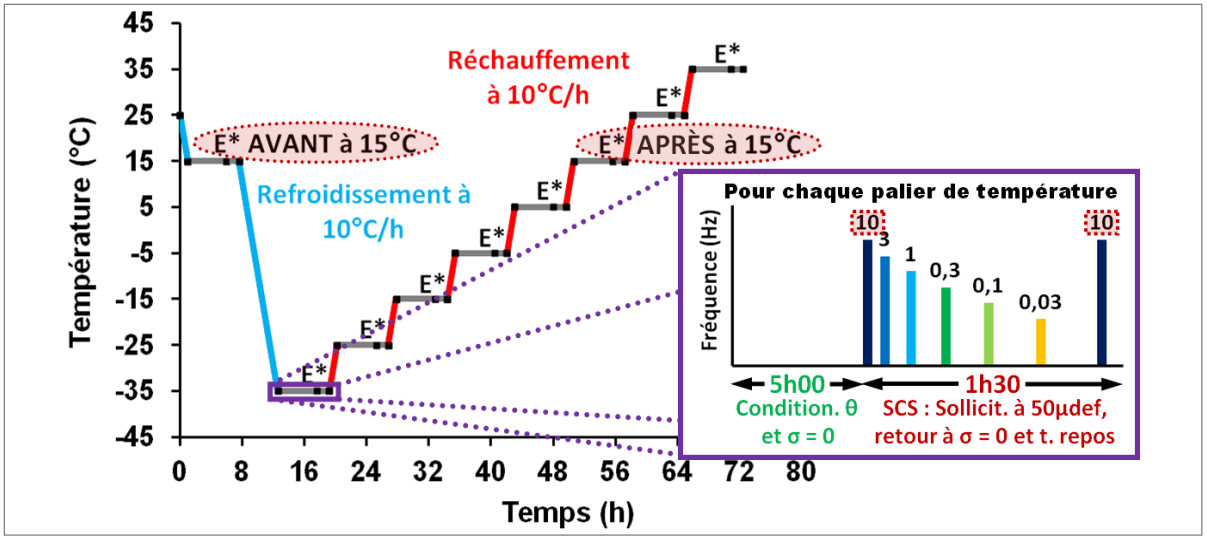


Figure 2.12 Déroulement d'un essai de module complexe : variations et conditionnement de température (θ), retour à une contrainte nulle (σ = 0) et séquence de cyclage de sollicitations (SCS) incluant des sollicitations à 50µdef, retours à σ = 0 et temps de repos

Dans un deuxième temps, il est possible de vérifier si le matériau s'endommage continuellement pendant la réalisation de l'EE*. Dans ce contexte, il a été convenu de vérifier le degré de dommage en comparant les résultats à +15°C (0,03 à 10Hz), soit AVANT et APRÈS la baisse de température sous 0°C (Figure 2.12, ovales de couleur rouge et en ligne pointillée). Étant donné que la température obtenue AVANT et APRÈS n'est jamais la même exactement, un ajustement avec le modèle 2S2P1D est effectué pour les résultats APRÈS. La quantification du dommage entre les deux +15°C ($D_{\text{entre les +15°C}}$) est réalisé comme suit :

$$D_{\text{entre les +15°C}} = \left(1 - \frac{E^*_{+15°C\ APRÈS}}{E^*_{+\,15°C\ AVANT}}\right) \tag{2.7}$$

Bien que certains puissent avoir quantifié et vérifié ce dommage, nous sommes, à notre connaissance, les premiers à le présenter en détail (3ème innovation).

2.7.4.3 Essai de fatigue (EF)

La réalisation des essais de fatigue (EF) est effectuée à une température de +10°C et une fréquence de 10Hz. Les amplitudes des essais de fatigue sont choisies afin de déterminer l'amplitude pour une durée de vie de 10^{+6} cycles (ε_6). La courbe de Wöhler est constituée à partir d'au moins quatre essais effectués à différentes amplitudes de déformation.

2.7.5 Équipements, acquisition de données et paramètres mesurés

La Figure 2.13 illustre les équipements de mesure et la déformation de l'éprouvette de type E* selon les directions. Dans le cas des éprouvettes de types F_{AV} et F_{SJ}, les extensomètres sont placés sur l'éprouvette.

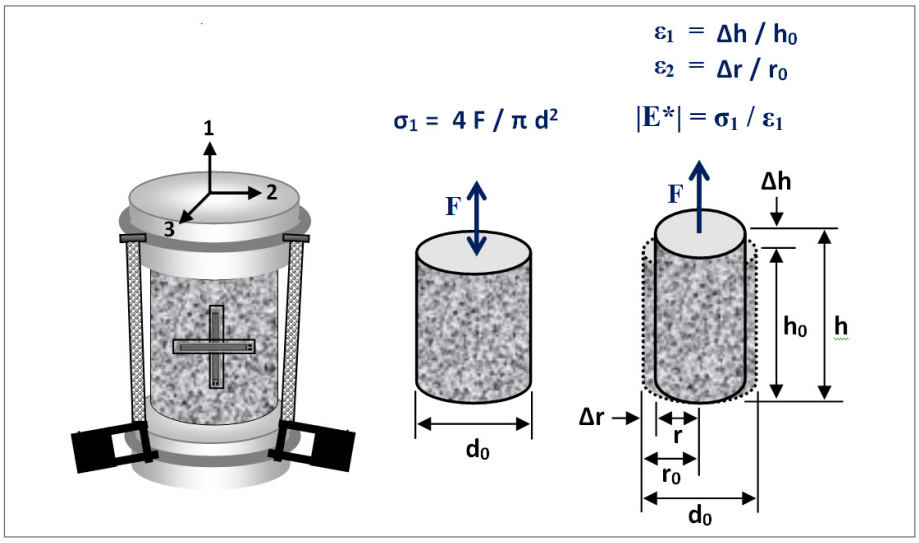


Figure 2.13 Équipements de mesure et déformations de l'éprouvette

L'acquisition de données est effectuée pour obtenir 100 points de mesure par cycle de sollicitation.

Dans le cas des EE*, tout les cycles de sollicitation sont enregistrés en raison de leur nombre raisonnablement restreint. Le Tableau 2.9 indique le nombre de cycles enregistrés pour

chaque fréquence de sollicitation et ce, par palier de température. Soulignons qu'il y a neuf paliers de température. Pour les EF, en raison du nombre considérable de cycles de sollicitation qui peut être réalisés, seulement les cycles indiqués dans le Tableau 2.10 sont enregistrés.

Tableau 2.9 Cycles enregistrés lors de l'essai de module complexe par palier de température

Fréquence de sollicitation (Hz)	**Période d'enregistrement**	**Nombre de cycles enregistrés par palier de température**
10	Tous les cycles	30
3		24
1		20
0,3		18
0,1		15
0,03		12
10		30

Tableau 2.10 Cycles enregistrés lors de l'essai de fatigue

Plage de cycles (N)	**Période d'enregistrement**	**Nombre de cycles enregistrés par plage**
1 à 100	Tous les cycles	100
100 à 1 000	2,5 cycles aux 20 cycles	112,5
1 000 à 10 000	2,5 cycles aux 150 cycles	150
10 000 à 100 000	2,5 cycles aux 1 000 cycles	225
100 000 à 300 000	2,5 cycles aux 2 500 cycles	200
Après 300 000	2,5 cycles aux 5 000 cycles	---

De plus, le système et le logiciel d'acquisition (Testware, MTS) permettent l'enregistrement des données suivantes :

- le temps (t) ;
- la force (F) permettant de calculer la contrainte (σ_1) en considérant la surface de l'éprouvette déterminée par le mesurage du diamètre de l'éprouvette (d) :

$$\sigma_1 = \frac{4\,F}{\pi \cdot d^2} \tag{2.8}$$

- le déplacement axial Δh_i des trois extensomètres (i = 1, 2 ou 3) permet de calculer les déformations axiales ε_{axi} de l'éprouvette en considérant la distance de mesure des extensomètres, distance entre les pointes, dénommé "h_0". Pour les extensomètres de 165mm, la déformation de l'époxy et des casques est considérée comme étant nulle afin de simplifier le traitement des données. Alors, dans ce cas, la distance "h_0" considérée est égale à l'hauteur de l'éprouvette. Or, "h_0" est égal à 50mm pour les extensomètres de 50mm ou égal à l'hauteur de l'éprouvette, soit d'environ 120mm, pour les extensomètres de 165mm. La déformation axiale se calcule ainsi :

$$\varepsilon_{axi} = \frac{\Delta hi}{h_0} \tag{2.9}$$

- la déformation axiale moyenne ε_{1ext} de l'éprouvette mesurée par les extensomètres est calculée avec la moyenne des trois extensomètres :

$$\varepsilon_{1ext} = \frac{\varepsilon_{ax1} + \varepsilon_{ax2} + \varepsilon_{ax3}}{3} \tag{2.10}$$

- la déformation axiale moyenne ε_{1jau} de l'éprouvette mesurée par les jauges est calculée avec la moyenne de 2 ou 3 jauges :

$$\varepsilon_{1jau} = \frac{\varepsilon_{jau1} + \varepsilon_{jau2}}{2} \ ou \ \frac{\varepsilon_{jau1} + \varepsilon_{jau2} + \varepsilon_{jau3}}{3} \tag{2.11}$$

- la déformation radiale $\varepsilon_{rad1jau}$ et $\varepsilon_{rad2jau}$ mesurée par les deux jauges radiales diamétralement opposées. La déformation radiale moyenne ε_2 suivant l'axe 2 de l'éprouvette est calculée ainsi :

$$\varepsilon_{2jau} = \frac{\varepsilon_{rad1jau} + \varepsilon_{rad2jau}}{2} \tag{2.12}$$

- la température mesurée par la sonde PT100 et/ou le thermocouple ;
- le numéro du cycle.

Pour un matériau viscoélastique linéaire, l'application d'une sollicitation en contrainte sinusoïdale dans la direction 1 se traduit par :

$$\sigma_1(t) = \sigma_{01} \sin(\omega t) \tag{2.13}$$

et la réponse en déformation dans cette direction est sinusoïdale en régime établi :

$$\varepsilon_1(t) = \varepsilon_{01} \sin(\omega t - \phi_E) \tag{2.14}$$

de plus, la réponse en déformation transversale (radiale) est établie selon la forme :

$$\varepsilon_2(t) = \varepsilon_{02} \sin(\omega t + \pi + \phi_\upsilon) = -\varepsilon_{02} \sin(\omega t + \phi_\upsilon) \tag{2.15}$$

où ϕ_E est le déphasage entre la déformation et la contrainte dans la direction 1, ϕ_ν est le déphasage entre la déformation de la direction 1 et celle de la direction 2.

Il est possible de relier la déformation ε_1 à la contrainte σ_1 par la relation suivante :

$$E^* = \frac{\sigma_1^*}{\varepsilon_1^*} \tag{2.16}$$

Le module complexe E* est le rapport entre les amplitudes de σ_1* et ε_1*. L'angle de phase ϕ_E de E* est lié au déphasage entre ces deux signaux. En notation complexe, cela s'écrit :

$$E^* = \frac{\sigma_1^* e^{i\omega t}}{\varepsilon_1^* e^{(\omega t - \phi E)}} = |E^*| e^{i\phi_E} \tag{2.17}$$

Le coefficient de Poisson complexe est défini par l'équation (2.18). Sa norme est le rapport des amplitudes de déformation radiale et axiale mesurées par les jauges, tel qu'indiqué aux équations (2.11) et (2.12). L'angle de phase ϕ_υ est la différence de phase entre ces deux déformations.

$$\upsilon^* = -\frac{\varepsilon_2^*}{\varepsilon_1^*} = |\upsilon^*| \, e^{i\phi_\upsilon} \tag{2.18}$$

La Figure 2.14 illustre un exemple de signaux expérimentaux issus d'un essai de module complexe. La contrainte et les déformations axiales mesurées par les extensomètres sont centrées sur zéro et représentées en fonction du temps.

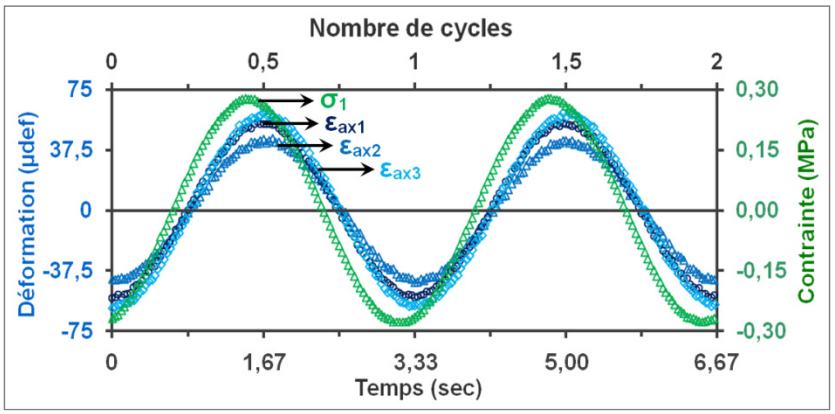


Figure 2.14 Contrainte et déformations mesurées par les extensomètres (E*-PSS7-DS62%-0GD-1EE* à 15°C-0,3Hz)

2.7.6 Traitement des données

Les données sont traitées à l'aide de macros élaborées avec le volet VBA (Visual Basic for Applications) du logiciel Microsoft Excel. Le traitement s'effectue par itération (méthode des moindres carrés) en considérant deux cycles de sollicitations, soit 200 points de mesure. Ces deux cycles sont traités afin d'établir une sinusoïde dont l'écart avec les points expérimentaux et la fonction sinusoïdale d'amplitude X_A pour une fréquence angulaire (ω) soit minimisé. L'opération est exécutée pour chaque paramètre, désigné par la lettre X, tel

que la contrainte et les déformations des extensomètres et jauges. X_0 désigne la valeur centrée de chacun des paramètres considérés. La méthode des moindres carrés est décrite à l'ANNEXE V. Après traitement, les données expérimentales de contrainte et déformations sont assimilées à des courbes sinusoïdales d'équation :

$$X = X_0 + X_A \sin(\omega t + \phi_X) \tag{2.19}$$

À partir de ces courbes sinusoïdales, les paramètres suivants sont déduits :

- pour le signal de contrainte : σ_A, σ_0, ϕ_σ (amplitude, valeur centrée et angle de phase) ;
- pour les signaux de déformation axiale : ε_{Aaxi}, ε_{0axi}, $\phi_{\varepsilon axi}$ (l'amplitude, la valeur centrée et l'angle de phase pour les deux ou trois déformations axiales : i = 1, 2 ou 3) et ε_{Aax}, ε_{0ax}, $\phi_{\varepsilon ax}$ (l'amplitude, la valeur centrée, l'angle de phase de la déformation moyenne des deux ou trois mesures précédentes) ;
- pour les signaux de déformation radiale : ε_{Aradi}, ε_{0radi}, $\phi_{\varepsilon radi}$ (l'amplitude, la valeur centrée et l'angle de phase pour les deux déformations radiales : i = 1 ou 2) et ε_{Arad}, ε_{0rad}, $\phi_{\varepsilon rad}$ (l'amplitude, la valeur centrée, l'angle de phase de la déformation moyenne des deux mesures précédentes).

2.7.7 Critères relatifs à la qualité de l'essai mécanique

Il est également nécessaire de vérifier la qualité de l'essai mécanique. Pour chaque paramètre X (contrainte ou déformations) calculé sur deux cycles, le critère K_X permet d'évaluer l'écart relatif entre les points expérimentaux et la fonction sinusoïdale approximée par la méthode des moindres carrés. Ce critère constitue l'indice de qualité (IQ) de l'essai. L'expression de K_X (en pourcent) est calculée en considérant 200 points d'acquisition (2 cycles) et est donnée par l'équation (2.20). X_k^m désigne la grandeur mesurée au point d'acquisition k (1, 2, 3, … à 200) et X_k^c désigne la grandeur calculée à l'aide de la fonction sinusoïdale :

$$K_X(\%) = IQ(\%) = \left(\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\frac{|X_k^m - X_k^c|}{X_A}\right) x\ 100\% \tag{2.20}$$

Un essai est considéré comme étant bon ou acceptable lorsque toutes les valeurs d'IQ sont inférieures à 10% ou 15% respectivement. Ceci s'applique plus particulièrement aux signaux de contrainte et déformations mesurées par les équipements pilotant l'essai (dans le cas présent, les extensomètres). La Figure 2.15 illustre un exemple de points expérimentaux pour la déformation, fonction sinusoïdale approchée par la méthode des moindres carrés pour la déformation et présentation de l'indice de qualité (IQ) correspondant.

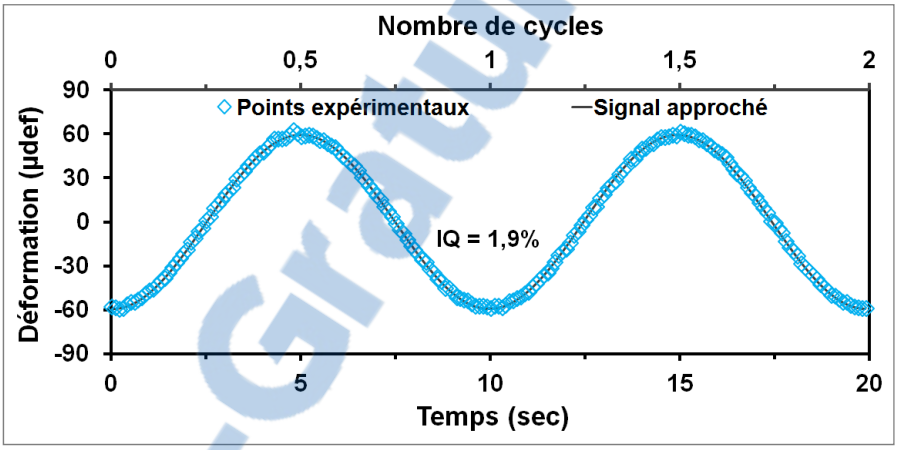


Figure 2.15 Points expérimentaux, signal approché et IQ pour un extensomètre (E*-PSS7-DS62%-0GD-1EE* à 15°C-0,1Hz)

De plus, l'écart d'amplitude de déformation d'un extensomètre (i = 1, 2 ou 3) par rapport à la moyenne des trois doit être inférieur à 25% ($\Delta\varepsilon_{exti}$). Ce dernier critère permet de vérifier que le niveau de déformation au sein de l'éprouvette est uniforme et que l'essai peut être considéré comme homogène. Alors, les résultats d'essai sont acceptés si les IQ $\leq$ 15% pour l'ensemble des signaux et que $\Delta\varepsilon_{exti} \leq 25\%$ (déformations mesurées par les extensomètres).

2.7.8 Caractéristiques mesurées

À partir de ces résultats, les caractéristiques mécaniques de l'enrobé bitumineux sont calculées. Ceci s'effectue en supposant que le matériau est linéaire, ce qui n'est vrai qu'en première approximation.

Rapport-Gratuit.com

|E*| constitue la norme du module complexe. Elle est calculée à partir de l'amplitude de la contrainte et l'amplitude de la déformation axiale moyenne des extensomètres ou des jauges de déformation :

$$|E^*| = \frac{\sigma_A}{\varepsilon_{Aax}} \tag{2.21}$$

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

$$E_1 = |E^*| \cos \phi_E \tag{2.22}$$

$$E_2 = |E^*| \sin \phi_E \tag{2.23}$$

L'angle de phase du module complexe ϕ_E est le déphasage entre le signal de contrainte approché et celui de la déformation axiale moyenne des extensomètres ou des jauges approchées :

$$\phi_E = \phi_\sigma - \phi_{\varepsilon ax} \tag{2.24}$$

|ν*| est la norme du coefficient de Poisson complexe. Elle est calculée à partir de l'amplitude de la déformation moyenne des jauges radiales approchée et l'amplitude de la déformation moyenne des jauges axiales approchée :

$$|\nu^*| = \frac{\varepsilon_{Arad}}{\varepsilon_{Aax}} \tag{2.25}$$

Les composantes ν_1 et ν_2 du coefficient de Poisson complexe sont calculées ainsi :

$$\nu_1 = |\nu^*| \cos \phi_\nu \tag{2.26}$$

$$\nu_2 = |\nu^*| \sin \phi_\nu \tag{2.27}$$

L'angle de phase du coefficient de Poisson complexe ϕ_ν est le déphasage entre le signal de la déformation moyenne des jauges axiales approché et celui de la déformation moyenne des jauges mesures radiales approchée :

$$\phi_\nu = \pi + \phi_{\varepsilon rad} - \phi_{\varepsilon ax} \tag{2.28}$$

L'énergie dissipée par cycle au cycle N (W_N) de chargement sinusoïdal est calculée en considérant l'amplitude de la déformation axiale moyenne, l'amplitude de la contrainte et l'angle de phase du module complexe :

$$W_N = \pi \, \varepsilon_{Aax} \, \sigma_A \sin \phi_E \tag{2.29}$$

La Figure 2.16 illustre la contrainte en fonction de la déformation axiale moyenne pour le cycle N de sollicitation. L'aire de l'ellipse représente l'énergie visqueuse dissipée par cycle (W_N).

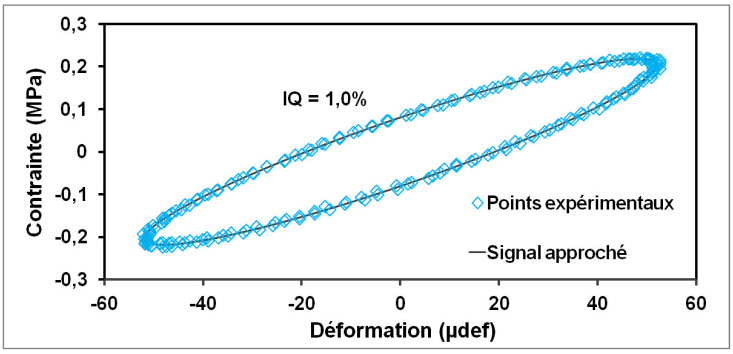


Figure 2.16 Énergie visqueuse dissipée par cycle (W_N) représentée par l'aire de l'ellipse

La Figure 2.17 présente un exemple de signaux expérimentaux issus de l'essai de module complexe. La contrainte, les déformations moyennes axiale et radiale des jauges y figurent en fonction du temps.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

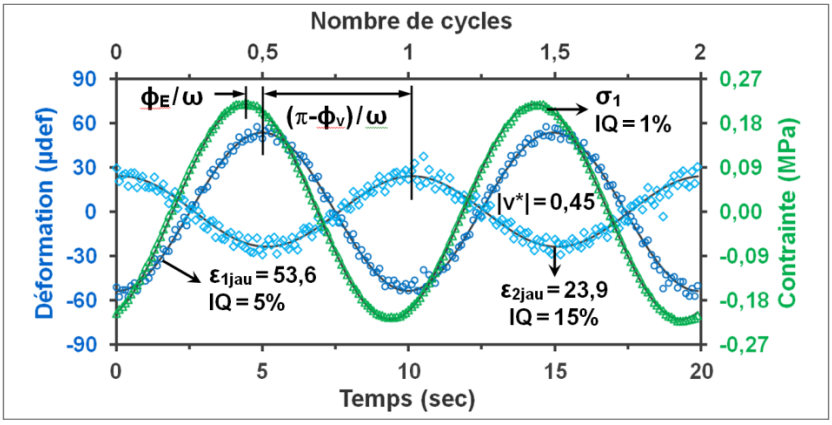


Figure 2.17 Contrainte et déformation moyenne axiale et radiale des jauges (E*-PSS7-DS62%-0GD-1EE* à 15°C-0,1Hz)

2.7.9 Déformations axiales mesurées par les extensomètres et jauges

2.7.9.1 Cas des extensomètres sur éprouvette

Les extensomètres de 50mm sont placés sur l'éprouvette dans le cas des éprouvettes de type F_{SJ}. Bien que les extensomètres soient étalonnés avec une vis micrométrique mécanique (§ 2.6.3), nous avons décidé de vérifier leur mesure en la comparant à celle des jauges de déformation.

Les extensomètres de 50mm ont été placés sur deux éprouvettes additionnelles équipées de trois jauges de déformation dans le sens axial. Notamment, les jauges de déformation sont calibrées de la même façon que celles collées sur les éprouvettes E*. Ensuite, lors de la réalisation d'un EE* à une déformation imposée de 100µdef sur les deux éprouvettes additionnelles, la comparaison des déformations axiales mesurées par les trois extensomètres placés sur l'éprouvette et les trois jauges collées à l'éprouvette montre que l'écart entre les deux instruments de mesure se situe entre 0 et 9% (moyenne de 3%) pour l'ensemble des résultats. Cet écart est faible, alors les mesures réalisées par les deux instruments peuvent être considérées comme équivalentes.

Notamment, les mesures réalisées par les jauges vont servir à corriger les mesures des extensomètres placées sur les casques.

2.7.9.2 Cas des extensomètres sur les casques

En raison de la mise en place de membrane en latex, il a été décidé de placer les extensomètres de 165mm sur les casques d'aluminium pour les éprouvettes de types E*. Pour simplifier le traitement des résultats expérimentaux, la déformation de l'époxy et des casques est considérée nulle. Toutefois, la déformation des casques et de l'époxy n'est pas nulle. Alors, la déformation de l'enrobé bitumineux (ε_{Aax}) s'en trouve surévalué générant ainsi une baisse du module (|E*|) mesuré avec les extensomètres suivant le niveau contrainte (σ_A).

L'écart entre les extensomètres et les jauges pour la valeur de la norme du module complexe (|E*|) est plus important lorsque la contrainte est élevée : l'époxy et l'aluminium se déforme davantage, les extensomètres mesurent de moins en moins la déformation réelle de l'enrobé. La Figure 2.18 illustre l'écart entre les extensomètres et les jauges pour la valeur de |E*| en fonction de la contrainte pour les cinq éprouvettes testées jusqu'au 5ème EE*. Toutefois, pour les éprouvettes S, PSE et PSS14, il y a eu des problèmes d'ordre mécaniques lors des EE*. Les éprouvettes ont été endommagées et remplacées par des éprouvettes non instrumentées de jauges. Ceci explique la présentation des résultats pour seulement 1EE* et parfois, uniquement à haute contrainte (basses températures). Pour l'éprouvette PSS19, la présence de saumure a généré le dysfonctionnement d'une jauge axiale pendant le 1er EE*. Pour l'éprouvette PSS7, il est possible de constater que l'écart entre extensomètres et jauges au cours des EE* s'éloigne de plus en plus de la courbe de tendance tracée (points en croix de couleur noire à vert, Figure 2.18). Ceci s'explique par l'endommagement des jauges au cours des EE* et des cycles de GD expliquant cette dérive pour l'écart. Pour cette raison, il a été convenu de considérer uniquement les résultats du 1er EE* (points de couleur noir). La courbe de tendance illustre cette considération (courbe - 1EE*, Figure 2.18).

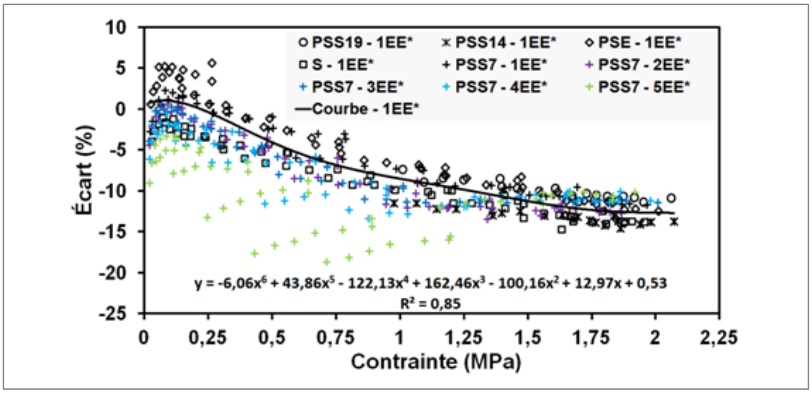


Figure 2.18 Écart relatif entre la norme du module complexe |E*| établis à partir des extensomètres et des jauges en fonction de l'amplitude de contrainte

Également, il existe un écart entre les extensomètres et les jauges pour l'angle de phase (ϕ_E). La Figure 2.19 illustre cet écart. L'écart est très faible, très près de zéro pour l'ensemble des résultats, à l'exception des points à hautes températures (basse contrainte) où il peut atteindre 2,7°. Pour la même raison, seul les points pour le 1er EE* sont considérés (points de couleur noir). La courbe de tendance prend en considération que les points correspondants (courbe, Figure 2.19).

À partir de calculs théoriques, il est possible de vérifier l'écart obtenu entre les extensomètres placés sur les casques et les jauges placées sur l'éprouvette quant à l'angle de déphasage (Tiouajni, 2009 ; ANNEXE VI). Il faut mentionner que non correction des déformations axiales mesurées par les extensomètres permet, tout simplement, de comparer les résultats : évolution de la rigidité de l'enrobé bitumineux en fonction du nombre de cycles de GD. Toutefois, une correction de ces mesures permet de quantifier avec plus de précision l'endommagement et de procéder à la modélisation des résultats, tel que réalisé dans ce travail.

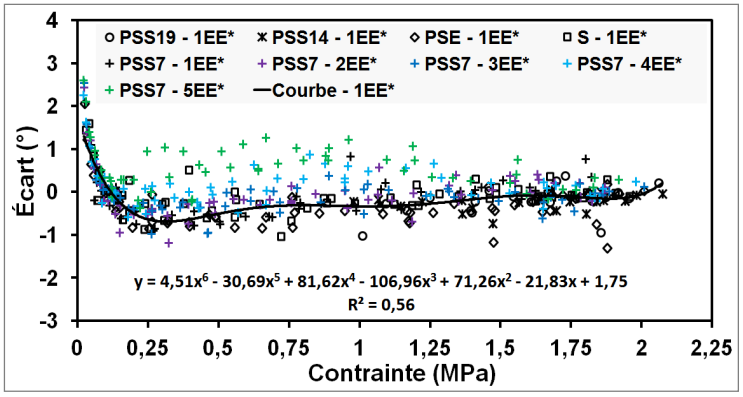


Figure 2.19 Écart entre les extensomètres et les jauges pour l'angle de phase (ϕ_E) en fonction de la contrainte

2.7.10 Corrections de |E*| pour les mesures avec extensomètres placés sur les casques

Les équations des courbes de tendance présentées à la Figure 2.18 et à la Figure 2.19 permettent d'effectuer les corrections nécessaires pour |E*| et ϕ_E respectivement. Après corrections des résultats d'essai pour le 1er EE*, les écarts sont nettement diminués. Ces écarts sont majoritairement de ± 4,8% pour |E*| (Figure 2.20) et ± 1,2° pour ϕ_E (Figure 2.21). Ils sont bien dispersés autour de zéro démontrant que la correction de chacun des paramètres est bien accomplie.

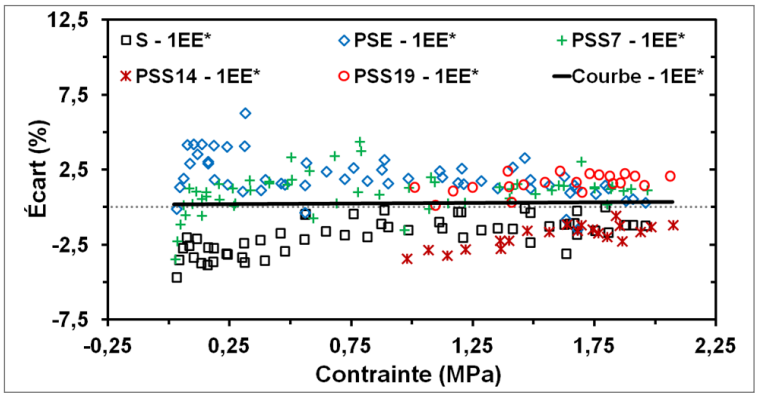


Figure 2.20 Écart relatif des |E*| entre extensomètres et jauges en fonction de la contrainte après correction

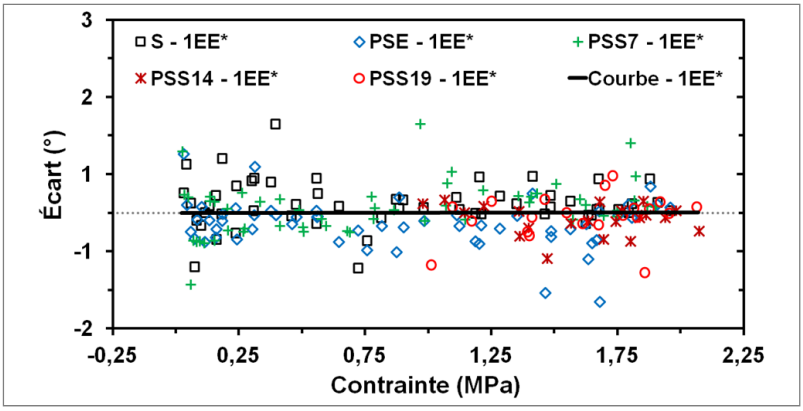


Figure 2.21 Écart entre extensomètres et jauges pour l'angle de phase (ϕ_E) en fonction de la contrainte après correction

Après ces corrections, la modélisation des résultats est réalisée pour chaque essai avec le modèle 2S2P1D. Au total, il y a 35 EE* à traiter, soit 7 EE* pour chacun des cinq états. Pour la modélisation du comportement du matériau, les résultats à +15°C AVANT ne sont pas considérés pour éviter la duplication à +15°C et se soustraire à l'endommagement potentiel du cycle de GD induit par l'EE*.

2.7.11 Évaluation de l'endommagement généré par les cycles de GD

La modélisation est effectuée pour une température de référence aux alentours de +5°C (température réalisée lors du EE*). Toutefois, pour la comparaison des résultats des différents EE*, il est nécessaire de ramener la modélisation à une même température, appelée température de référence, ici fixée à -5,5°C. Le choix de cette température repose sur le fait même que sur l'ensemble des EE* réalisés, c'est à cette température qu'il y a le moins de variations (écart-types faibles). Pour la suite, il est nécessaire de comparer les résultats à une même fréquence équivalente ($Fr_é$).

Dans le présent cas, il est possible de suivre l'évolution de la rigidité de l'enrobé bitumineux en fonction des cycles de GD imposés lors des ET. Il faut rappeler que des cycles de GD sont également induit lors de la réalisation des EE*. Or, l'évolution de la rigidité avec les cycles de GD se fait de façon globale et peut être quantifié par un coefficient de rigidité. Pour ce

faire, on définit un coefficient de rigidité, désigné C*, qui permet de quantifier la variation de la rigidité d'une éprouvette suivant les CGD sur toute la gamme de températures (θ) et de fréquences (Fr). C* est le rapport entre le module complexe de l'enrobé bitumineux endommagé après un certain nombre de CGD (X GD) et celui de l'enrobé sain (0 GD) pour tout couple (θ, Fr). Le calcul de C* exploite l'équivalence entre la fréquence et la température (Delaporte et coll., 2007). Lorsque le PETT (partiel ou total) est vérifié, le coefficient de rigidité complexe (C*) est défini à une fréquence équivalente ($Fr_é$) à l'aide de l'équation suivante :

$$C^* = \frac{E^*_{X\,GD}}{E^*_{0\,GD}} \tag{2.30}$$

C* est un nombre complexe (norme et angle de phase), sans unité. La norme du coefficient de rigidité |C*| est le rapport des normes des modules complexes de l'enrobé bitumineux à un nombre donné de CGD, $|E^*_{X\,GD}|$ à $Fr_{é\,X\,GD}$ = Fr, à celles des modules complexes de l'enrobé sain, $|E^*_{0\,GD}|$ à $Fr_{é\,0\,GD}$ = Fr. Il traduit l'effet de la perte de rigidité induit par les ET. L'évolution du phi (ϕ_C) est la différence d'angle entre ces deux modules.

En considérant l'équation (2.30), il est possible d'écrire :

$$C^* = \frac{E^*_{X\,GD}}{E^*_{0\,GD}} = \frac{|E^*_{X\,GD}|\, e^{i\,\phi_{E_{0\,GD}}}}{|E^*_{0\,GD}|\, e^{i\,\phi_{E_{X\,GD}}}} \tag{2.31}$$

La norme du coefficient de rigidité complexe |C*| peut être déterminée ainsi :

$$|C^*| = \frac{|E^*_{X\,GD}|}{|E^*_{0\,GD}|} \tag{2.32}$$

Alors, le coefficient de rigidité complexe peut être déterminé :

$$C^* = |C^*| e^{i \phi_{E_{X\,GD}} - i \phi_{E_{0\,GD}}} \quad (2.33)$$

$$C^* = |C^*| e^{i \left(\phi_{E_{X\,GD}} - \phi_{E_{0\,GD}}\right)} \quad (2.34)$$

L'évolution du phi du coefficient de rigidité complexe correspond alors :

$$\phi_C = \phi_{E_{X\,GD}} - \phi_{E_{0\,GD}} \quad (2.35)$$

Les équations (2.32) et (2.35) permettent ainsi de décrire l'évolution des écarts entre les modules complexes des éprouvettes suivant les ET.

À partir du coefficient de rigidité complexe, il est possible de connaître et tracer l'évolution du dommage apparent (D) généré par les ET :

$$D_{XGD}\,(T_R, Fr_{\acute{e}}) = 1 - |C^*|\,(T_R, Fr_{\acute{e}}) \quad (2.36)$$

On qualifie le dommage d'apparent parce que, en soit, l'évolution de la rigidité d'une éprouvette en cours d'ET peut être attribué à plusieurs phénomènes : présence de liquide, microfissuration et vieillissement générant le durcissement du matériau. Donc, dans le cadre de notre analyse, nous apportons une appréciation qui est relative face aux valeurs de D.

Soulignons que cette méthodologie est habituellement utilisée pour quantifier la rigidification générée par l'ajout de filler minéral à un bitume (Delaporte et coll., 2007).

2.8 Éprouvettes attitrées par type d'essai

L'ensemble des éprouvettes attitrées par type d'essai (thermique, de module complexe et de fatigue) est présenté à l'ANNEXE III.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS ET ANALYSES DU VOLET #1A, LES ESSAIS THERMIQUES (ET)

3.1 Introduction

Dans le cadre du volet #1 et de ce chapitre spécifiquement, l'incidence de : 1) l'état, sec et partiellement saturé, des enrobés ; 2) la présence de sel de déglaçage ; 3) les variations de températures ; 4) les cycles de gel-dégel sur les propriétés physiques (variations thermiques et déformations linéiques) d'éprouvettes d'enrobés bitumineux est étudiée[30].

3.2 Saturation partielle des éprouvettes

Avant de procéder aux premiers essais thermiques (ET), il est nécessaire de procéder à la saturation partielle des éprouvettes de type T qui contiendront de l'eau ou de la saumure (détails § 2.4.12). Les saturations partielles peuvent être effectuées à tout moment au cours du programme expérimental. L'objectif principal est d'avoir des degrés de saturation supérieurs à 50% lors de la réalisation des cycles de GD. Notamment, si cette exigence reste respectée, une longue période peut s'écouler entre deux saturations partielles (SP).

3.3 Essais thermiques réalisés

Le Tableau 3.1 présente la synthèse des essais thermiques (ET) réalisés sur le groupe de cinq éprouvettes de type T. Plus particulièrement, les éprouvettes sont soumises à six essais thermiques (ET). Chacun des ET inclus 1, 2, 7, 20, 30 et 40 cycles de GD, pour un total de 100 cycles de GD (Figure 3.1). Bien que les 100 cycles de GD soient réalisés, l'analyse porte uniquement sur les 60^{iers}, soit sur les 5^{ers} ET (A_1 à J_5, Figure 3.1), laquelle permet d'avoir une très bonne idée des phénomènes en jeu, tout en réduisant le temps alloué.

---

[30] Les propriétés thermo-physiques ne sont pas traitées ici. Certaines de ces propriétés peuvent être trouvées dans Di Benedetto et coll. (2011) et Nguyen et coll. (2012).

Rapport-Gratuit.com

Tableau 3.1 Essais thermiques (ET) réalisés sur les éprouvettes de type T

Éprouvette		État	Essais thermiques (ET)
No	**Vides (%) ***		
8-D1	4,3	S	1er ET : 1 GD 2e ET : 2 GD 3e ET : 7 GD 4e ET : 20 GD 5e ET : 30 GD 6e ET : 40 GD
8-B2	4,4	PSE	
8-B3	4,5	PSS7	
8-C1	4,5	PSS14	
8-A3	4,5	PSS19	
*	Teneur en vides des éprouvettes déterminée selon la méthode hydrostatique ;		
S	Éprouvette testée à l'état sec ;		
PSE	Éprouvette testée à l'état partiellement saturé en eau ;		
PSS7, PSS14 et PSS19	Éprouvette testée à l'état partiellement saturée en saumure avec une concentration en sel de 7,4% ; 13,8% et 19,4%.		

Au même moment, un 2ème groupe d'éprouvettes, possédant les mêmes caractéristiques physiques que les éprouvettes de type T, est également soumis aux ET. Les éprouvettes du 2ème groupe, de type E*, sont par ailleurs soumises à des essais de module complexe (EE*) avant et après les ET. Notamment, ceci explique la durée importante pour réaliser l'ensemble des ET et les intervalles entre chacune (Figure 3.1). Les résultats et l'analyse des résultats des essais de module complexe (EE*) sur ce 2ème groupe d'éprouvettes sont présentés au CHAPITRE 4. Dans ce chapitre, seuls les résultats relatifs au 1er groupe d'éprouvettes, de type T, sont présentés.

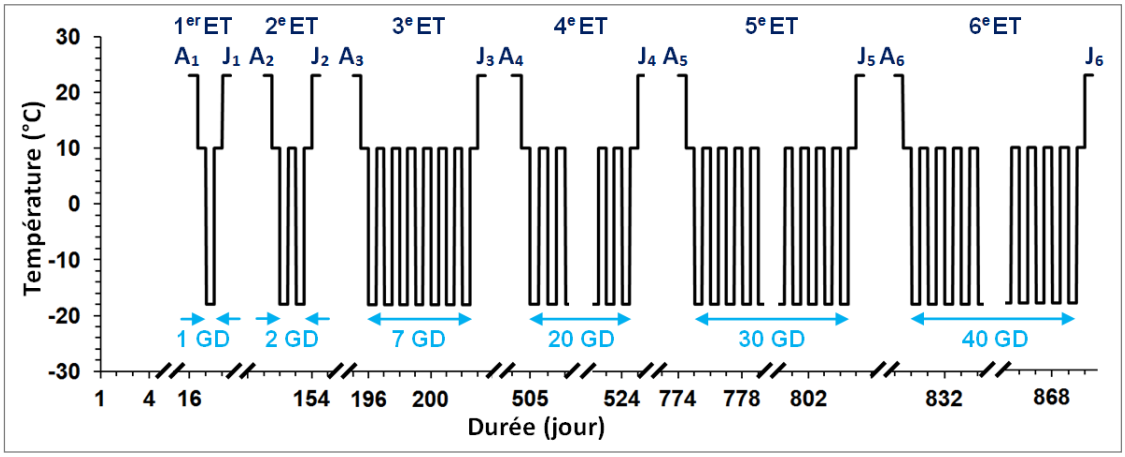


Figure 3.1 Réalisation des six essais thermiques (ET) qui incluent les six séquences de cycles de gel et dégel (GD)

3.4 Résultats des essais

3.4.1 Introduction

A partir des mesures réalisées par la jauge axiale et les deux thermocouples placés à la surface et au cœur de chacune des éprouvettes de type T, il est possible de quantifier plusieurs paramètres. En particulier, les résultats relatifs à :

1) l'évolution de la déformation avec la température, ε^{Ther}, notamment celle de la contraction et de la dilatation des éprouvettes ;
2) l'évolution de la température à la surface et au cœur des éprouvettes, $T_{évolution}$;
3) le coefficient de dilatation linéique ($\alpha_{linéique}$) des éprouvettes ;
4) la dilatation générée par la solidification des liquides ($\varepsilon_{solidification}$, ε_S) ;
5) la contraction générée lors de la fusion de la glace (ε_{fusion}, ε_F) ;
6) la variation de la température de solidification des liquides ($T_{solidification}$, T_S) et de la fusion de la glace (T_{fusion}, T_F) en fonction du degré de saturation (DS) des éprouvettes et de la teneur en sel des saumures (7, 14 ou 19%) sont subséquemment présentés.

Le degré de saturation (DS) des éprouvettes est suivi avec attention tout au long des ET, car il affecte considérablement les résultats.

3.4.2 Degré de saturation

De manière à maintenir des degrés de saturation supérieurs à 50%, plusieurs séquences de saturation partielle (SP) se sont avérées nécessaire en cours d'ET. Malgré l'utilisation d'une membrane au latex et des colliers de serrage métallique pour étanchéifier chaque éprouvette, il semble que l'eau percole au travers les trous réalisés dans le casque d'aluminium afin d'y passer le câblage des jauges et des thermocouples et ce, en dépit de l'application d'un scellant de silicone. Il faut souligner que les trous dans les casques sont de petit diamètre, alors il est difficile de bien les sceller avec de la silicone et ce, en dépit de la présence des câbles. Chacune des quatre phases de saturation partielle des éprouvettes réalisées en cours d'essai est clairement marquée à la Figure 3.2 à l'aide d'un trait verticale pointillé et annoté

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

SP1, SP2, SP3 et SP4. À la suite de chacune de ces saturations partielles, les éprouvettes sont immédiatement pesées afin de déterminer le degré de saturation (DS). Ensuite, les éprouvettes sont soumises aux cycles de gel-dégel (annoté par X GD, Figure 3.2). De plus, au début et à la fin d'un ET, les éprouvettes sont pesées afin de déterminer avec précision le degré de saturation (DS). Toutefois, des problèmes mécaniques ont nécessité l'arrêt des équipements (AE) et interrompus le 4ème et 5ème ET (Figure 3.2).

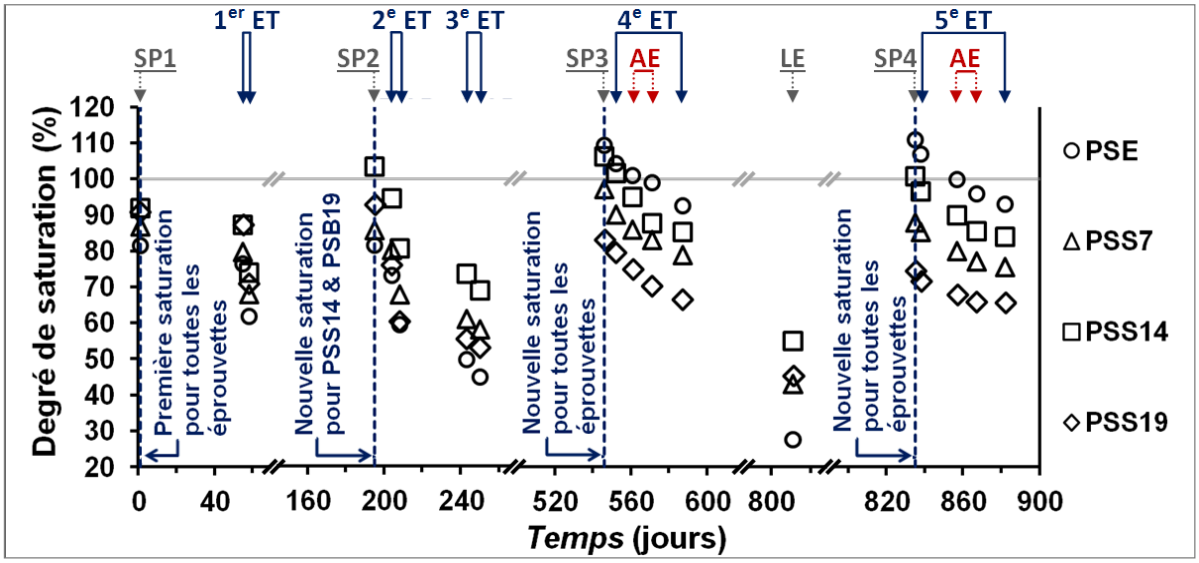


Figure 3.2 Variation du degré de saturation avec le temps pour les éprouvettes partiellement saturées. Mesures réalisées : 1) après la saturation partielle (SP1, SP2, SP3 et SP4), 2) avant et après l'essai thermique (1er au 5e ET), 3) après une longue période d'entreposage (LE) et, 4) de part et d'autre d'un arrêt des équipements (AE)

La Figure 3.2 montre, qu'au fil des saturations partielles (SP1 à SP4), le degré de saturation des éprouvettes augmente toujours. En effet, pour les éprouvettes PSE et PSS14, le degré de saturation excède même 100%. Trois phénomènes peuvent expliqués cet état de fait : 1) formation de micro fissures au sein de l'éprouvette générées par les cycles de GD ; 2) infiltration d'eau à l'interface granulat-bitume ou 3) adsorption d'eau par le mastic (Lu et coll., 2005). Les accroissements du DS les plus importants suivants les différentes phases de saturation partielle sont pour les éprouvettes (en ordre décroissant) : PSE, PSS14, PSS7 et PSS19. En particulier, durant les cycles de GD, l'éprouvette PSE, et l'éprouvette PSS14 dans une moindre mesure, est sujette aux plus importantes déformations créées par la formation et

la fonte de la glace (§ 3.4.4.3 et 3.4.4.4). Il est possible qu'un réseau de micro fissures au sein de la microstructure de ces éprouvettes explique en partie l'augmentation du degré de saturation au cours des ET et des saturations partielles. Par ailleurs, le degré de saturation de l'éprouvette PSS19 décroît avec le nombre de saturations partielles (Figure 3.2). Il est probable que des dépôts de sel à la surface, tel qu'observé, et au sein du matériau, tel que supposé, limitent la saturation partielle de l'éprouvette à un degré élevé.

3.4.3 Évolution de la température

3.4.3.1 Évolution thermique au sein des éprouvettes

La Figure 3.3 montre l'évolution des températures mesurées à la surface et au cœur de l'éprouvette à l'état sec (S) durant le 7ème cycle de GD. Les résultats montrent qu'il existe un écart entre ces deux températures et que cet écart fluctue avec le temps. Étant donné que cet écart n'est pas constant, il devient plus difficile de déterminer avec précision le coefficient de dilatation linéique du matériau lors du changement de température dans l'enceinte thermique. Bien que des taux de variations de température de l'ordre de 26 ou 56°C/h au sein de l'enceinte thermique soient imposés, un taux maximal[31] de 7 à 8°C/h est mesuré au sein des éprouvettes (Figure 3.3). Cette différence notable est attribuable à la capacité de refroidissement et de réchauffement de l'enceinte et ce, compte tenu de la quantité importante d'équipements, d'éprouvettes et de matériaux au sein de l'enceinte thermique (≈ 75kg).

---

[31] À titre comparatif, le taux maximal enregistré, lors du refroididissement, est de 8 à 16°C/h au sein d'éprouvettes de béton soumis à un essai de détermination de la résistance du béton hydraulique à un cycle rapide de gel et dégel (Pigeon et coll., 1995 ; ASTM, 1992). Aussi, il est important de mentionner que les essais en laboratoire sont souvent plus sévères que les conditions réelles. En effet, pour des dalles et des blocs de béton, ce taux maximal est plutôt de l'ordre de 2 à 4,9°C/h (Hénault, 1995 ; Pigeon et coll., 1995 ; Gagné et coll., 1998).

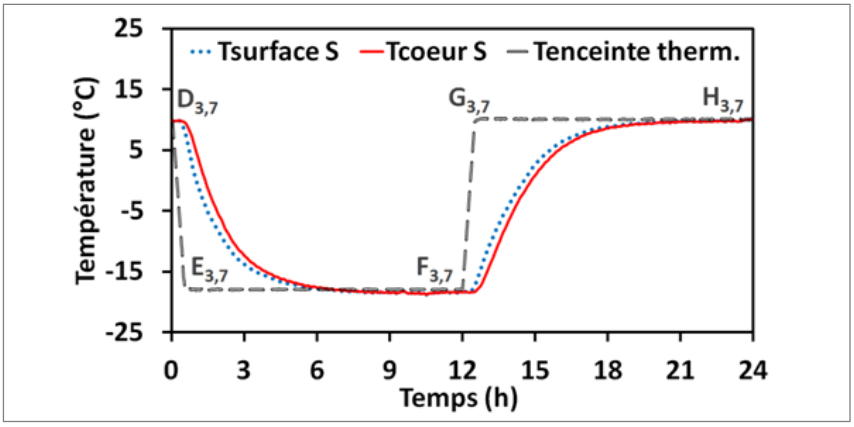


Figure 3.3 Évolution des températures à la surface et au cœur de l'éprouvette à l'état sec (S) durant le 7ème CGD (3ème ET)

La Figure 3.4 présente l'évolution de l'écart de température (ΔT) entre la surface et le cœur de l'éprouvette S au cours du 7ème cycle de GD. Les résultats présentés à la Figure 3.4 permettent d'estimer le temps requis pour atteindre une stabilité de la température au sein de l'éprouvette soumise à un cycle de GD, c'est-à-dire le temps nécessaire pour que la température à la surface et celle au cœur de l'éprouvette soient analogues ($\Delta T_{surface\text{-}cœur}$ = 0°C). La Figure 3.4 montre clairement que le temps de stabilisation n'est définitivement pas le même en cours de refroidissement que lors du réchauffement.

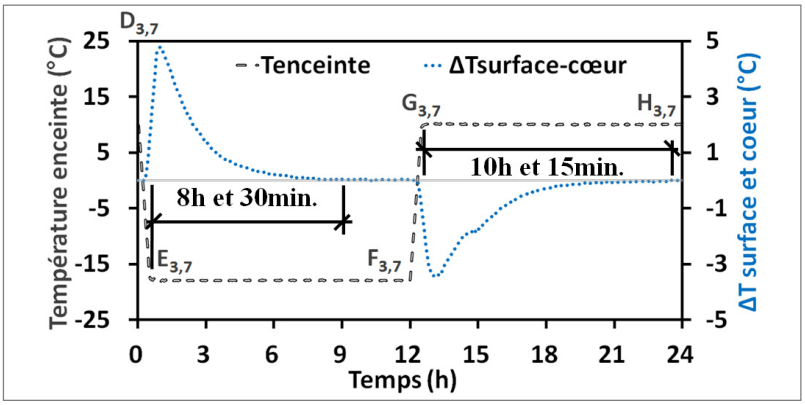


Figure 3.4 Différence de température entre la surface et le cœur de l'éprouvette S lors du 7ème cycle GD (3ème ET)

En considérant les résultats présentés à la Figure 3.4, on admet qu'il est nécessaire de maintenir la température constante (palier) pendant au moins 10h et 15min au sein de l'enceinte thermique pour obtenir une température uniforme au sein de l'éprouvette.

L'analyse de l'ensemble des résultats des mesures des températures de surface et au cœur montre que la forme des courbes de températures est assez similaire à chacun des cycles de GD et ce, pour chaque état. La Figure 3.5 montre en détail l'évolution de la température de surface et au cœur de l'éprouvette PSE au cours du 12ème cycle de GD. Les résultats présentés à la Figure 3.5 montrent la présence de deux points d'inflexion : 1) point d'inflexion associé à la température de solidification du liquide (ou de la formation de la glace) ($T_{solidification}$, T_S) et, 2) point d'inflexion associé à la fusion de la glace (T_{fusion}, T_F). Par ailleurs, les résultats de la Figure 3.5 montrent que ces points d'inflexion se présentent distinctement lorsqu'on considère l'évolution de la température en surface (T_{SS} et T_{FS}) de celle de la température au cœur (T_{SC} et T_{FC}). Dans le cas des éprouvettes partiellement saturées avec saumure, comparativement à celle partiellement saturée avec de l'eau, les points d'inflexion sont nettement plus atténués, moins perceptibles.

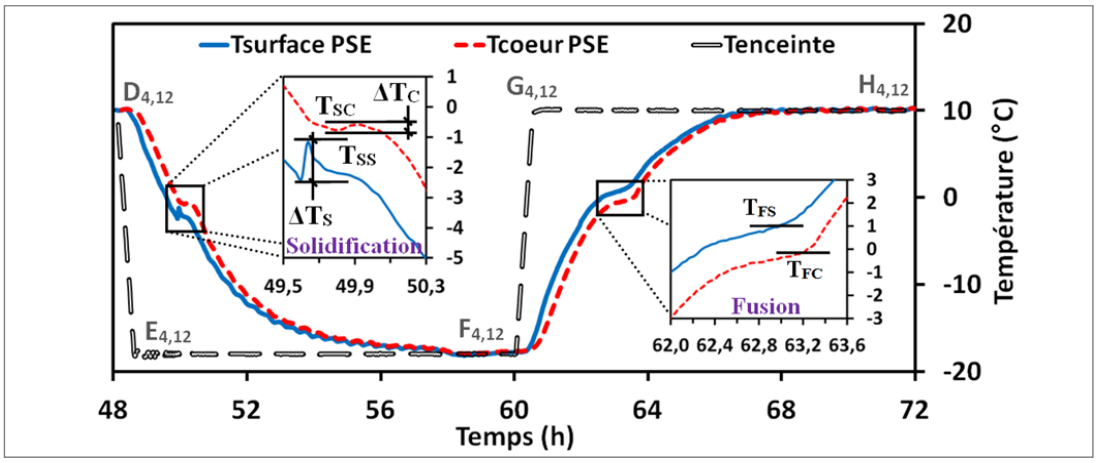


Figure 3.5 Températures à la surface et au cœur de l'éprouvette PSE lors du 4ème ET (j = 4) et le 12ème cycle de GD (i = 12), et détermination des variations de température (ΔT_S et ΔT_C) lors du changement de phase du liquide ou du solide

La solidification d'un liquide implique la formation et la croissance de cristaux de glace. Durant la formation de glace, s'effectuant à une température et pression constantes, de l'énergie est libérée sous forme de chaleur (chaleur latente de fusion). Cette chaleur cause des variations de température (ΔT) à la surface (ΔT_S) et au cœur (ΔT_C) d'une éprouvette. L'agrandissement du côté gauche de la Figure 3.5 indique les variations de température induites par l'énergie libérée en cours de la formation de glace (ΔT_S et ΔT_C). Ces différentielles peuvent être considérées pour estimer la température de solidification (T_S) de l'eau à la surface (T_{SS}) et au cœur (T_{SC}) des éprouvettes. En outre, lors de la croissance de cristaux, l'évolution de la température présente un plateau sur l'ensemble de la durée de solidification (Young et coll., 1998). Dans certains cas, notamment lorsqu'il y a peu d'eau ou qu'il y a présence de divers sel (ions dans l'eau), il est possible que ce plateau soit inexistant (Charpentier, 1992 ; Bing et coll, 2011). D'ailleurs, lors du réchauffement, le processus de fusion de la glace est nettement plus progressif, il est alors difficile de distinguer les variations de température associées à l'enthalpie de changement d'état (ΔT) à partir de l'évolution des températures mesurée pour une éprouvette (Figure 3.5, agrandissement du côté droit). Par conséquent, il est devient plus ardu de mesurer une température de fusion spécifique, en particulier pour les saumures. Or, la température de fusion (T_F) est mesurée (ou estimée[32]) seulement pour l'éprouvette testée à l'état partiellement saturé en eau (PSE) et pour laquelle les changements sont clairement plus marqués (§ 3.4.3.4).

3.4.3.2 Températures de solidification

L'évolution des températures de solidification (T_S) suivant les cycles de GD, établies pour les éprouvettes de type T, sont représentées à la Figure 3.6 et synthétisées au Tableau 3.2.

---

[32] En considérant la contraction soudaine de l'éprouvette (ε_F) générée par la fonte de la glace (détails à la § 3.4.4.4).

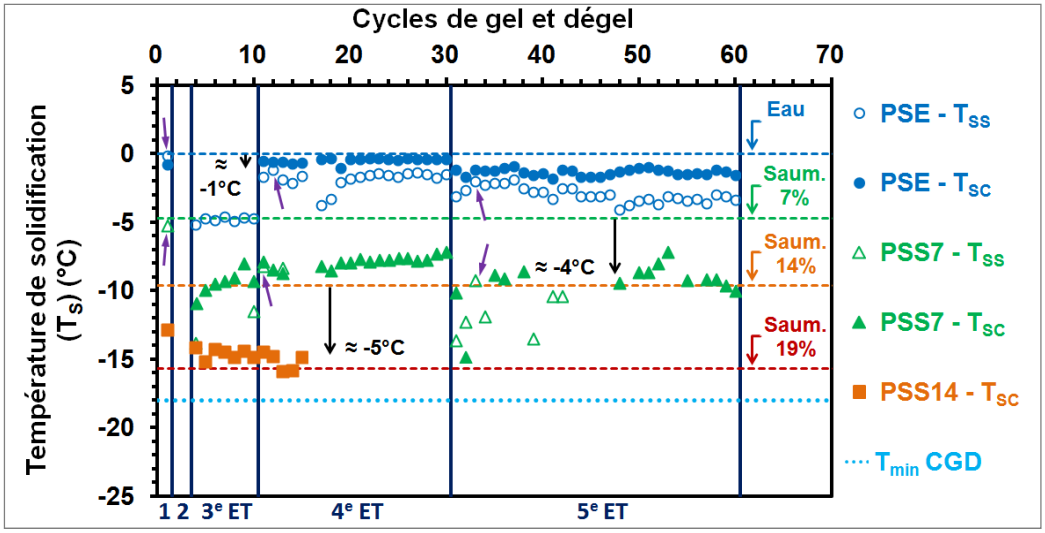


Figure 3.6 Évolution de la température de solidification en fonction du nombre de cycles de GD déduites en considérant les mesures de la température de surface (T_{SS}) et celle au cœur (T_{SC}) pour chacune des éprouvettes

Les températures théoriques de solidification de l'eau et des saumures à une concentration en sel de 7,4, 13,8 et 19,4% (désignées par PSE, PSS7, PSS14 et PSS19) sont de 0, -4,7, -9,6 et -15,7°C respectivement (Feistel et coll., 2006 ; Weast et coll., 1982). Les températures théoriques de solidification de l'eau et des saumures sont représentées par des lignes pointillées dans la Figure 3.6. Les flèches de couleur noir illustre l'écart moyen approximatif entre les températures de solidification théoriques ($T_{S\ théorique}$) et mesurées au cœur des éprouvettes (T_{SC}).

De plus, chaque ET est délimitée par des lignes verticales, continues et de couleur bleu foncé (Figure 3.6). Notamment, il est possible de constater que les températures de solidification mesurées à la surface (T_{SC}) et au cœur (T_{SC}) des éprouvettes varient significativement au fil des ET et plus spécifiquement, des cycles de GD (Figure 3.6). Ceci est essentiellement attribuable au degré de saturation (DS) des éprouvettes (plus de détails à la Figure 3.7). Dans le cas des éprouvettes PSE et PSS7, il est possible d'observer que la température de solidification des liquides, établie en considérant la température de surface (T_{SS}), est plus élevées (plus chaudes) lorsque le degré de saturation est élevée, c'est-à-dire tout juste après

la saturation partielle des éprouvettes, soit aux 1er, 11ème et 31ème cycles de GD (petites flèches de couleur mauve, Figure 3.6).

Pour l'éprouvette à l'état PSS19, il n'est pas possible d'observer la température de solidification de la saumure car elle est inférieure à la température minimale de -18°C atteinte lors d'un cycle de GD (T_{min} CGD, Figure 3.6). Dans le cas de l'éprouvette PSS14, la saumure a endommagé d'abord le thermocouple placé en surface et ensuite, la jauge de déformation expliquant le manque de données.

Tableau 3.2 Températures de solidification théoriques et mesurées dans un milieu confiné

État – Température	**$T_{S\ théorique}$**	**$T_{S\ mesurée}$**			**$\Delta T_{S\ théo.-mes.}$**	**ΔT_{SS-SC}**	**n**
		min	**X**	**max**			
PSE – T_{SS}	0	-5.2	-2.8	-0.1	-2.8	-1.8	57
PSE – T_{SC}		-1.8	-1.0	-0.3	-1.0		50
PSS7 – T_{SS}	-4.7	-13.8	-10.7	-5.2	-6.0	-1.9	12
PSS7 – T_{SC}		-14.9	-8.8	-7.2	-4.1		39
PSS14 – T_{SC}	-9.6	-15.9	-14.7	-12.8	-5.1	---	13
PSS19	-15.7	---			---	---	---

$T_{S\ théorique}$	Température de solidification théorique du liquide ;
$T_{S\ mesurée}$	Température de solidification mesurée du liquide à la surface et au cœur de l'éprouvette ;
min	Valeur minimale de la température de solidification mesurée ;
X	Valeur moyenne de la température de solidification mesurée ;
max	Valeur maximale de la température de solidification mesurée ;
$\Delta T_{S\ théo.-mes.}$	Écart entre les températures de solidification théorique et mesurée ;
ΔT_{SS-SC}	Écart entre les températures de solidification mesurées à la surface et au cœur de l'éprouvette ;
n	Nombre de résultats obtenus au cours des 60 cycles de GD.

À partir des résultats expérimentaux exposés à la Figure 3.6 et au Tableau 3.2, quatre éléments peuvent être cités :

1) les températures de solidification (T_S) mesurées sont inférieures à celles théoriques ;
2) des variations significatives sont observables au niveau de la température de solidification avec le nombre de cycles de GD ;

3) l'existence d'un écart entre les températures de solidification établies à partir de la température au cœur de l'éprouvette (T_{SC}) et celles établies en considérant la température de surface (T_{SS}) ;
4) une baisse notable de la température de solidification avec le nombre de cycles de GD est observée pour l'éprouvette PSE.

Les températures de solidification mesurées se trouvent de 1 à 6°C sous celles théoriques ($\Delta T_{S\ théo.-mes.}$, Tableau 3.2). Il est bien connu que la température liée à la formation, initiale et complète, de la glace (T_S) d'une phase aqueuse confinée dans un milieu poreux est souvent inférieure à la valeur théorique établie en condition libre, c'est-à-dire à température et pression normales (TPN). En effet, la combinaison de plusieurs phénomènes peut expliquer cet écart :

1) degré de saturation : T_S diminue avec le degré de saturation (Bager et coll., 1986a ; Fagerlund, 1997 ; Kaufmann, 2004 ; Kozlowski, 2004 ; Bing et coll., 2011) ;
2) solutions aqueuses : T_S diminue avec l'augmentation de la concentration ionique de la phase aqueuse et ce, jusqu'à une valeur minimale, laquelle constitue la température eutectique de la solution. Elle est de -21,1°C pour une concentration massique de 23,3% en chlorure de sodium (NaCl) (Kaufmann, 2004 ; Kozlowski, 2004, 2009 ; Bing et coll., 2011) ;
3) dimension des vides interstitiels : T_S diminue avec la dimension des pores d'un matériau (Bazant et coll., 1988 ; Marchand et coll., 1996 ; Chatterji, 1999) ;
4) adsorption : T_S diminue avec l'augmentation de l'énergie de surface (force d'interaction entre les molécules d'eau et la surface des pores) (Marchand et coll., 1996 ; Konrad, 1999 ; Kozlowski, 2007, 2009 ; Bing et coll., 2011) ;
5) contrainte, charge, pression ou confinement : T_S diminue avec l'augmentation de la contrainte, de la charge, de la pression ou du niveau de confinement (Konrad, 1999 ; Feistel et coll., 2006).

Ces phénomènes peuvent expliquer en partie les différences entre ce que nous avons estimé (ou mesuré) et les valeurs théoriques correspondantes. Néanmoins, l'influence de la finesse

Rapport-Gratuit.com

du réseau poreux (points nos 3 et 4) sur les températures de solidification mesurées n'est pas, à priori, un élément de premier plan dans le cas des matériaux bitumineux, puisque ceux-ci présentent généralement un réseau poreux relativement grossier, de l'ordre du millimètre : diamètre moyen des pores compris entre 0,3 et 1,9mm (Masad et coll., 2002, 2006 ; Torres, 2004 ; Mercado, 2007 ; Kassem, 2008 ; Mauduit et coll., 2010 ; Walubita et coll., 2012 ; Alvarez et coll., 2012). En conséquent, la température de solidification de l'eau absorbée au sein du réseau poreux du mélange bitumineux devrait être voisine de celle qui prévaut dans un espace non confinée (0°C) (Bazant et coll., 1988 ; Chatterji, 1999). Toutefois, les résultats du Tableau 3.2 montrent que la température de solidification de l'eau mesurée en surface (T_{SS}) et au cœur (T_{SC}) de l'éprouvette PSE est d'environ -1,0 et -2,8°C respectivement. Pour vérifier si les différences entre les températures de solidification mesurées et théoriques correspondantes sont réalistes, on se réfère aux résultats obtenus dans le cas des bétons hydrauliques et de sols.

Des essais de calorimétrie effectués sur des bétons à basse température ont montré que la température de solidification de l'eau interstitielle peut être très variable. Bager et coll. (1986a) ont montré que la température de solidification peut varier de -25 à -7,4°C pour des bétons[33] ayant un rapport eau-ciment (E/C) de 0,35 à 0,60 respectivement. En outre, pour un béton ayant un rapport E/C de 0,60, ils ont constaté que les températures de solidification varient de -37,5 à -7,4°C pour des éprouvettes conditionnées et testées à une humidité relative comprise entre 58 et 100% respectivement (Bager et coll., 1986a). En outre, Bager et coll. (1986b) ont trouvé une variation de la température de solidification entre une éprouvette de béton (E/C = 0,60) conditionnée sans subir de séchage (T_S = -5°C) et une autre ayant été

[33] Dans le cas des bétons, on peut y mesurer jusqu'à trois températures de solidification de l'eau ou plutôt, trois pics de formation de glace lors du refroidissement. Ces températures (ou pics) de formation de glace correspondent à trois diamètres principaux de pores où l'eau est présente (Bager et coll., 1986a). Dans la plupart des cas, la température de l'essai est abaissée jusqu'à -55°C. Ces pics sont usuellement observables de -10 à 0°C, de -15 à -30°C et de -35 à -50°C (Bager et coll., 1986a ; 1986b ; 1987 ; Kaufmann, 2004 ; Fabbri, 2006 ; Johannesson, 2010). Alors, la formation de glace au sein d'un matériau poreux s'effectue en plusieurs étapes avec l'abaissement de température en raison des groupes distincts de diamètre de pores.

soumise à un processus de séchage-mouillage (T_S = -2,5°C). Il apparait que le processus de séchage-mouillage augmente le volume d'eau contenu dans les gros pores, affecte l'inter-connectivité de l'eau dans le réseau poreux et donne lieu à une augmentation de la température de solidification de l'eau interstitielle. Des résultats similaires sont rapportés pour d'autres bétons par Marchand (1993), Pigeon et coll. (1996), Kaufmann (2004) et Johannesson (2010).

Pour les sols[34], tels que les silts argileux et les argiles silteuses, la formation de glace s'amorce très près de 0°C lorsque la teneur en eau est supérieure à 15% et 50% respectivement (Bing, 2011 ; Kozlowski, 2004 ; 2009 ; Williams, 1964). Dans le cas de sables et de sables silteux, la formation de glace débute est également très près de 0°C et ce, pour une faible teneur en eau, de l'ordre de 5% (Bing, 2011). Malgré le fait que les argiles, par rapport aux sables et silts, possèdent des vides de petite taille, la température de solidification pour ces sols demeure voisine de 0°C en raison de leur forte teneur en eau. Par ailleurs, la majorité de l'eau au sein des sols est gelée à -5°C, à moins que l'eau soit saline (William, 1964 ; Hivon et coll., 1990 ; Kozlowski, 2003 ; 2007 ; Bing, 2011). Aussi, soulignons que l'eau présente au sein des particules minérales, par exemple, de calcaires possédant des micros pores (< 0,1µm), va geler à une température de -25°C, (Letavernier et coll., 1987).

En définitive, nous pouvons conclure que les températures de solidification de l'eau au sein de l'éprouvette PSE (Tableau 3.2, T_{SS} de -2,8°C et T_{SC} de -1,0°C) se trouvent dans la fourchette des valeurs mentionnées précédemment pour les bétons et les sols.

---

[34] Dans le cas des sols, la notion d'eau non gelée avec l'abaissement de la température est abordée. A cet effet, il est possible de constater que la quantité d'eau non gelée diminue progressivement avec la température. Cela montre que la formation de glace au sein des sols est nettement plus progressive que dans le cas des bétons avec l'abaissement de la température (William, 1964 ; Hivon et coll., 1990 ; Kozlowski, 2003 ; 2007 ; Bing, 2011).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Ensuite, la Figure 3.7 illustre la relation entre le degré de saturation (DS) et la température de solidification (T_S) des liquides absorbés au sein du réseau poreux des éprouvettes testées. Il faut mentionner que le degré de saturation est connu juste avant et juste après un ET donné, par pesage des éprouvettes.

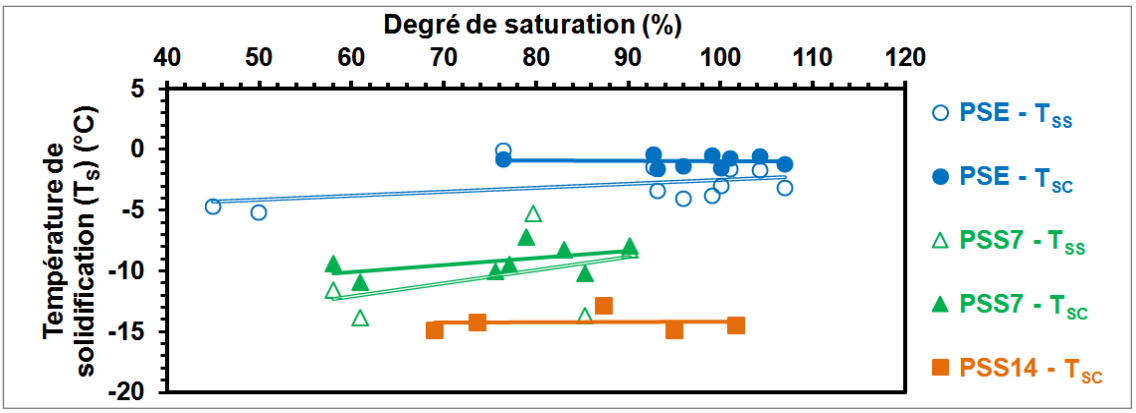


Figure 3.7 Températures de solidification (T_S) des liquides mesurées à la surface (T_{SS}) et au cœur (T_{SC}) des éprouvettes en fonction de leur degré de saturation

Même si les températures de solidification sont en quelque sorte estimées en considérant l'évolution de la température, les résultats présentés à la Figure 3.7 illustre que la température de solidification reste constante ou qu'elle n'est pas affectée par le degré de saturation s'il est supérieur à environ 70%. Sinon, la température mesurée à la surface (T_{SS}), comparativement à celle mesurée au cœur des éprouvettes (T_{SC}), est un peu plus affectée par la baisse du DS sous la barre des 70% : pentes plus abruptes des courbes de tendance (Figure 3.7).

Cependant, il est important de souligner que le degré de saturation déterminé pour chacune des éprouvettes représente essentiellement une valeur globale puisqu'il est établi en référence à la masse de l'éprouvette. Alors, les valeurs de DS présentées dans la Figure 3.7 donnent un portrait global du phénomène sans quantifier le gradient de la teneur en eau (ou DS) existant entre la surface et le cœur de l'éprouvette. Il y a tout lieu de croire qu'il y a un gradient de teneur en eau (ou degré de saturation) au sein même de l'éprouvette. En effet, il est clair que la perte d'eau (↓ DS) est plus importante en surface de l'éprouvette. Par ailleurs, lorsqu'une partie de l'eau interstitielle commence à s'évaporer, la concentration ionique (↑ teneur en

ions) de l'eau restante dans le réseau de pores augmente et modifie ainsi la température de solidification. En outre, soulignons que l'évaporation de l'eau confinée dans un réseau poreux est nécessairement plus rapide pour les pores grossiers. En conséquent, l'interaction de l'eau avec les pores de plus faibles dimensions est de plus en plus liée au phénomène d'adsorption que d'absorption, ce qui contribue davantage à réduire la température de solidification mesurée à la surface des éprouvettes avec le degré de saturation. Surtout que le degré de saturation influe grandement sur la température de solidification (Fagerlund, 1997).

Donc, la température de solidification des liquides mesurée au cœur des éprouvettes est moins sujette aux légères variations de température au sein de l'enceinte lors de la réalisation d'un ET, à la teneur en eau des éprouvettes (ou DS) et à la concentration ionique du liquide.

Également, il existe un écart entre les températures de solidification établies à partir de la température au cœur de l'éprouvette (T_{SC}) et celles établies en considérant la température de surface (T_{SS}). Notons que l'écart observé entre T_{SS} et T_{SC} pour l'éprouvette PSE, est de l'ordre de 1,8°C, ce qui est tout à fait comparable à celui observé pour l'éprouvette PSS7, de l'ordre de 1,9°C (Tableau 3.2). Les températures de solidification établies en considérant la température au cœur de l'éprouvette (T_{SC}), comparativement à celles établies en considérant la température de surface (T_{SS}), sont nettement plus près des valeurs théoriques (Figure 3.6 et Figure 3.7). Toutefois, il est nécessaire de souligner que la température mesurée à la surface de l'éprouvette n'est pas tout à fait appropriée. Ceci peut être expliqué par le fait même que le thermocouple n'est pas recouvert de pâte, qu'il est simplement appuyé sur la surface de l'éprouvette, et il est donc soumis à la variation de température de l'air au sein de l'enceinte thermique. En effet, le thermocouple[35] ne mesure pas uniquement la température à la surface de l'éprouvette, mais également celle de l'air au sein de l'enceinte thermique.

---

[35] Notamment, le DGCB de l'ENTPE utilise dans ce cas un thermocouple recouvert de caoutchouc, ce qui permet de mieux mesurer la température de surface de l'éprouvette.

Pour terminer, dans le cas de l'éprouvette PSE et ce, à partir du 10ème cycle de GD, une baisse continuelle et par palier de la température de solidification est notable avec le nombre de cycles de GD (voir Figure 3.6). Trois explications peuvent être données quant à cette constatation. Premièrement, les équipements utilisés pour réaliser les saturations partielles de l'éprouvette ont été auparavant en contact avec du solvant ou les saumures, et il est très probable que ces produits aient été dissous dans l'eau servant à la saturation partielle de l'éprouvette PSE et ce, en dépit des précautions prises lors des manipulations. Deuxièmement, de l'eau du robinet, et non déminéralisée, a été utilisée pour les essais. Troisièmement, après plusieurs phases de saturation partielle jumelées à des phases d'assèchement par évaporation lente, il y a nécessairement un enrichissement en ions de la phase absorbée au sein du réseau poreux du matériau, expliquant ainsi, en partie, une baisse notoire progressive de la température de solidification de l'eau avec le temps et ce, bien que le degré de saturation (DS) augmente toujours au fil des cycles de GD (Figure 3.2).

3.4.3.3 Variations de température lors de la formation de glace

L'évolution des valeurs des variations de température (ΔT_S et ΔT_C, déterminées à la Figure 3.5) suivant les CGD, observées lors de la formation de la glace, sont présentées à la Figure 3.8 pour les éprouvettes PSE, PSS7 et PSS14. En général, la plus grande variation de température est mesurée au cours du premier ou du second cycle de GD d'un ET, où le degré de saturation est à son maximum, soit tout juste après les phases de saturation partielle des éprouvettes effectuées avant le 1er, 11ème et 31ème cycle de GD. Les variations de température (ΔT_S et ΔT_C) sont les plus importantes dans le cas de l'éprouvette PSE et augmentent avec les cycles de GD. Cette croissance du niveau d'échauffement observé au moment de la formation de glace en cours de refroidissement suivant le nombre de cycles de GD peut être expliquée par l'augmentation progressive du DS à chaque nouvelle saturation partielle : il y a plus d'eau dans l'éprouvette, alors il y a d'autant plus de chaleur latente libérée. Pour les éprouvettes avec saumure, les variations de température pendant la solidification ne dépassent jamais 1,2°C.

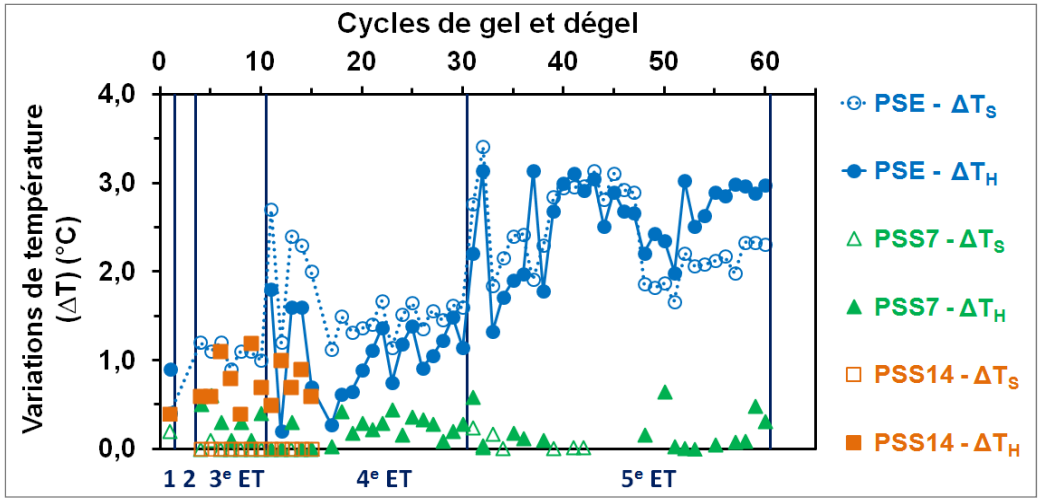


Figure 3.8 Variations de température (ΔT) lors de la solidification du liquide à la surface (ΔT_S) et au cœur des éprouvettes (ΔT_C) (définies à la Figure 3.5)

3.4.3.4 Températures de fusion de la glace

L'analyse des profils de température en vue de mettre en perspective les phénomènes en jeu lors de la phase de réchauffement d'un cycle de GD (à la droite de la Figure 3.5), notamment la détermination de la température de fusion de la glace et les variations de température lors de ce changement de phase, est nettement moins évidente. En effet, comme nous l'avons souligné précédemment (§ 3.4.3.1), l'analyse des courbes de l'évolution de température ne montre pas de plateau, de point d'inflexion bien défini ou de variations de températures pour les éprouvettes avec saumure. Même pour l'éprouvette PSE, seule la température de fusion (T_{fusion}, T_F) s'est avérée quantifiable. L'évolution des températures de fusion suivant les CGD, mesurées sur l'éprouvette PSE, sont illustrées à la Figure 3.9. La température de fusion théorique de l'eau est représentée par une ligne pointillée. Le Tableau 3.3 donne l'écart entre les températures de fusion théoriques et celles établies à partir de la mesure des températures de surface (T_{FS}) et au cœur (T_{FC}).

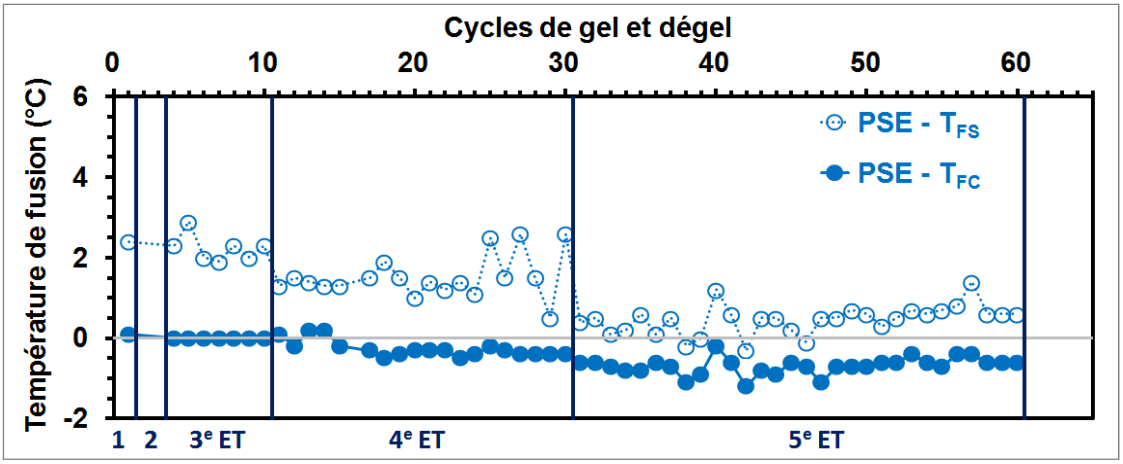


Figure 3.9 Température de fusion : théorique (ligne pointillée) et mesurée pour l'eau à la surface (T_{FS}) et au cœur (T_{FC}) de l'éprouvette PSE (définie à la Figure 3.5)

Notons qu'après le 4ème ET, nous avons légèrement modifié la procédure de mesure de la température de surface en plaçant un élastique par-dessus le thermocouple de surface, malgré la présence de la membrane en latex, de manière à favoriser un meilleur contact à la surface de l'éprouvette. Cette modification peut, en partie, expliquer la réduction de l'écart entre T_{FS} et T_{FC} à partir du 31ème cycle de GD (Figure 3.9). Toutefois, un thermocouple revêtu de caoutchouc aurait permis une meilleure mesure de la température de surface de l'éprouvette, une détermination plus précise de la température de fusion de la glace à partir de cette température (T_{FS}) et très probablement réduit les écarts ($\Delta T_{FS\text{-}FC}$ et $\Delta T_{F\ théo.\text{-}mes.}$, Tableau 3.3).

Tableau 3.3 Température de fusion théorique et mesurée dans un milieu confiné

État – Tempér.	**$T_{F\ théorique}$**	**$T_{F\ mesurée}$**	**$\Delta T_{F\ théo.\text{-}mes.}$**	**$\Delta T_{FS\text{-}FC}$**	**n**
PSE - T FS	0	+1.1	+1.1	+1.6	57
PSE - T FH		-0.5	-0.5		50

$T_{F\ théorique}$	Température de fusion théorique ;
$T_{F\ mesurée}$	Température de fusion moyenne mesurée ;
$\Delta T_{F\ théo.\text{-}mes.}$	Écart entre les températures de fusion théorique et mesurée ;
$\Delta T_{FS\text{-}FC}$	Écart entre les températures de fusion mesurées à la surface et au cœur de l'éprouvette ;
n	Nombre de résultats obtenus lors de la réalisation des 60 cycles de GD.

Les écarts entre les températures de fusion établies à partir des températures mesurées à la surface et au cœur de l'éprouvette (T_{FS} et T_{FC}) et celle théorique pour l'eau ($T_{F\ théorique}$), de l'ordre de +1,1 et -0,5°C ($\Delta T_{F\ théo.-mes.}$, Tableau 3.3), sont nettement inférieurs à ceux entre les températures de solidification (T_{SS} et T_{SC}) et celle théorique ($T_{S\ théorique}$), qui sont de l'ordre de -2,8 et -1,0°C ($\Delta T_{S\ théo.-mes.}$, Tableau 3.2). Notamment, la fusion de la glace est un processus qui est beaucoup plus progressif, notamment les variations de températures (ΔT) sont nettement inférieures lors du changement de phase, comparativement au processus lié à la formation de la glace, ce qui peut probablement permettre de déterminer avec plus de précision la température relative au changement de phase de l'eau dans un milieu confiné.

3.4.4 Déformation axiale durant les cycles de gel et dégel

3.4.4.1 Introduction

Pour chaque éprouvette, la jauge axiale et le thermocouple placés à la surface permettent de :

1) effectuer un suivi de l'évolution de la déformation avec le temps, soit la contraction et la dilatation de l'éprouvette ;
2) quantifier la dilatation de l'éprouvette générée par la solidification des liquides ($\varepsilon_{solidification}$, ε_S) ;
3) quantifier la contraction de l'éprouvette générée lors de la fusion de la glace (ε_{fusion}, ε_F) ;
4) effectuer un suivi de l'évolution de la déformation avec la température, ε^{Ther}, pour en déterminer le coefficient de dilatation linéique ($\alpha_{linéique}$) de l'enrobé bitumineux suivants les différents états.

En outre, le thermocouple placé au cœur de l'éprouvette, en comparaison avec celui placé en surface, permet de vérifier que la température au sein du matériau est bel et bien stabilisée, ce qui permet de déterminer avec précision le coefficient de dilatation linéique ($\alpha_{linéique}$) de l'enrobé.

3.4.4.2 Déformation axiale avec le temps

La Figure 3.10 montre l'évolution de la déformation de l'éprouvette PSE au cours du 12ème cycle de GD (4ème ET). Les résultats de la Figure 3.10 montrent la dilatation créée par la solidification du liquide (ε_S), la formation de glace, et la contraction liée à sa fusion (ε_F). La déformation mesurée au cours de la formation de glace (ε_S) est toujours supérieure à celle observée lors de sa fusion (ε_F). Pour l'éprouvette PSE, la déformation générée par la formation de glace (ε_S) se produit sur une courte période (P) de temps, soit de 8 à 38 minutes, tel que mis en relief à la Figure 3.10. Néanmoins, généralement, plus de 50% de cette déformation se produit brusquement, soit dans les 3res minutes.

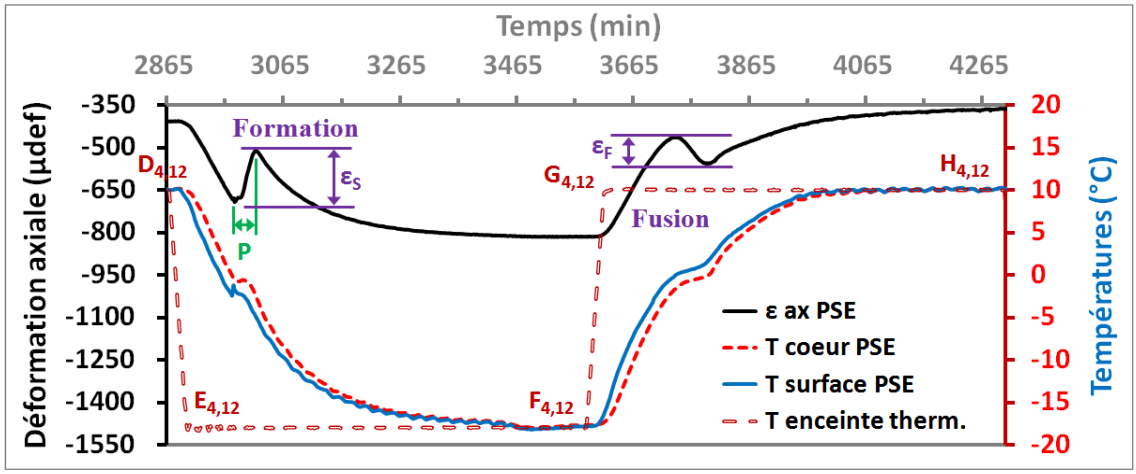


Figure 3.10 Déformation axiale (ε_{axiale}) et températures dans l'enceinte, à la surface et au cœur de l'éprouvette PSE lors du 12ème CGD, et détermination de la dilatation générée lors de la formation de la glace (ε_S) et de la contraction liée à sa fusion (ε_F)

3.4.4.3 Dilatation durant la formation de glace (ε_S)

Les valeurs de la dilatation générée lors de la formation de glace (ε_S) en fonction du degré de saturation sont illustrées à la Figure 3.11 pour les éprouvettes PSE, PSS7 et PSS14. Pour faciliter l'interprétation de ces résultats, le nombre de cycles de GD est indiqué à l'aide d'étiquette à la Figure 3.11. Également, les cycles de GD d'un même ET (détails à la Figure 3.1) sont encerclés par des lignes pointillées du même type (Figure 3.11).

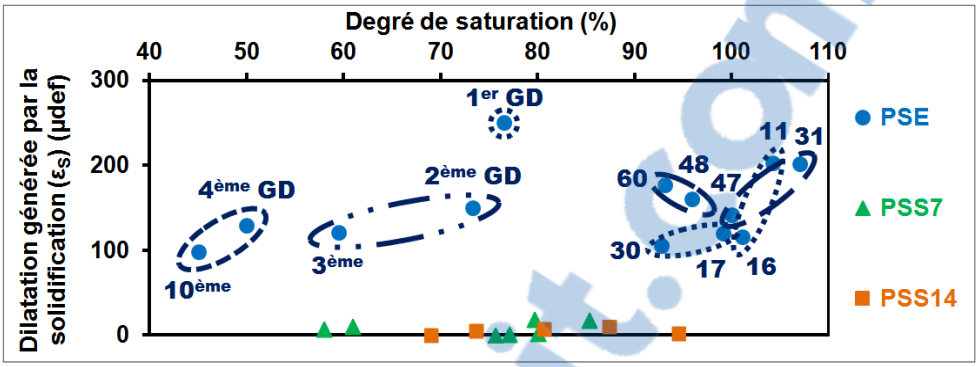


Figure 3.11 Dilatation générée par la solidification du liquide (ε_S définie à la Figure 3.10)

Rappelons que le degré de saturation (DS) ne peut être en aucun cas supérieur à 100% au sein d'un matériau. Toutefois, le DS constitue le rapport entre le volume de liquide absorbé et la porosité initiale de l'enrobé bitumineux qui est exprimée de façon volumétrique. Notamment, lors de la réalisation des ET, la porosité du matériau ne reste pas constante. Ceci s'explique par trois phénomènes : 1) formation de micro fissures au sein de l'éprouvette générées par les cycles de GD ; 2) infiltration d'eau à l'interface granulat-bitume ou 3) adsorption d'eau par le mastic. À cet effet, la porosité du matériau augmente toujours au fil des cycles de GD. Étant donné que le DS est calculé à partir de la porosité initiale et non celle actualisée, des valeurs calculées du DS supérieures à 100% sont possibles, tel qu'illustrées à la Figure 3.11, bien que cela ne soit pas possible théoriquement. Alors, plus le matériau est endommagé, moins le DS calculé représente celui du matériau.

Également, le premier cycle de GD d'un ET présente globalement la dilatation la plus élevée et ce, en raison du fort degré de saturation à ce moment (Figure 3.11). Les plus grandes valeurs d'ε_S sont obtenues pour l'éprouvette PSE et peuvent atteindre les 250µdef. Pour les éprouvettes avec saumure, les valeurs sont nettement plus faibles : < 20µdef.

En effet, la formation de glace d'une solution saline est nettement plus progressive, par rapport à celle de l'eau. Rappelons que la formation de glace à partir de molécules d'eau pure engendre un accroissement de la concentration en ions de la solution interstitielle

Rapport-Gratuit.com

avoisinante, réduisant progressivement la température de solidification de la solution (Cox, 1983 ; Akyurt et coll., 2002 ; Velenza et coll., 2006). Ce phénomène explique pourquoi la présence de sel génère une formation de glace plus progressive, réduisant ainsi l'échauffement mesurable et associé à l'enthalpie de changement d'état, et le niveau de contrainte généré par la formation de la glace (Feng et coll., 2010).

Notons que même pour des degrés de saturation aussi faibles que 50%, il est possible de mesurer une dilatation de 90 à 129µdef pour l'éprouvette PSE en période de refroidissement au cours d'un cycle de GD. Ces valeurs sont tout à fait comparables à la dilatation mesurée par Mauduit et coll. (2010), de l'ordre 146µdef, pour une éprouvette d'enrobé bitumineux, composé de granulats 0-10mm, couramment utilisé en France, ayant un degré de saturation de 51% et une teneur en vides de 9,2%.

Pourtant, à des degrés de saturations aussi faibles (≤ 50%), on ne s'entend surtout pas que la formation de glace génère une dilatation de l'éprouvette. En effet, la transformation de l'eau en glace ne génère qu'une expansion de 9% de celle-ci et les vides interstitiels ne sont remplis d'eau qu'à moitié laissant beaucoup d'espace pour ne pas gêner cette expansion. À cet effet, Fagerlund (1971) défini un degré minimal de saturation, appelé degré critique de saturation (DS_{CR}), à partir de lequel l'expansion de la glace provoque une dilatation importante de l'échantillon. Le DS_{CR} est calculé à partir de l'équation 3.1 :

$$DS_{CR} = \frac{V_i}{V_i + \Delta V_F \cdot V_i} = \frac{V_i}{V_i + 0{,}09 \cdot V_i} = 0{,}917 = 91{,}7\% \qquad (3.1)$$

où :

V_i Volume des vides interstitiels ;

ΔV_F Changement de volume généré par la formation de la glace.

Alors, la dilatation de l'éprouvette générée par la formation de la glace devrait théoriquement débuter lorsque le DS est de 91,7% et évidemment, être à son comble lorsque le DS est de

100%. Aussi, Fagerlund (1995) a montré que l'augmentation de la vitesse de refroidissement engendre une légère diminution du DS_{CR} mesuré, dû moins dans le cas des bétons hydrauliques.

Soulignons que, jusqu'à 60 cycles de GD, la dilatation maximale est de 250µdef à 76% de saturation ou de 202µdef à 104% de saturation (Figure 3.11). Tout particulièrement, les équations 3.2 à 3.4 constituent des calculs théoriques et tentent de calculer l'éventuelle dilatation maximale générée par la formation de glace. Ces équations prennent en considération que : i) les vides interstitiels sont parfaitement saturés d'eau (DS = 100%), ii) la glace est un solide incompressible, iii) l'enrobé bitumineux est un matériau isotrope et incompressible, iv) la teneur en vides (Vi) de l'éprouvette PSE est de 4,4%, et v) l'expansion de l'eau lors de sa congélation est de 9%.

$$\frac{\Delta V_F}{V_0} = 3 \cdot \varepsilon_{axiale} \tag{3.2}$$

$$\Delta V_F = V_i \cdot 9\% = 3{,}96 \times 10^{-3} \tag{3.3}$$

$$\frac{\Delta V_F}{V_0} = \frac{3{,}96 \times 10^{-3}}{100\%} = 3 \cdot \varepsilon_{axiale} \Rightarrow \varepsilon_{axiale} = 1320\mu def \tag{3.4}$$

Le terme V_0 représente le volume total et initial du matériau. Alors, théoriquement, la dilatation de l'éprouvette générée par la formation de la glace est de 0µdef pour un DS de 91,7% et atteint une valeur maximale de 1320µdef lorsque l'éprouvette est parfaitement saturée (DS = 100%). La dilatation maximale calculée est 5,3 fois plus élevée que celle mesurée (1320 vs 250µdef). Cette différence peut s'expliquer par : i) une expulsion d'une partie de l'eau lors de la formation de la glace, ii) une éprouvette partiellement saturée, ou iii) des hypothèses de calcul trop simplistes.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Toutefois, dans le cadre du programme expérimental actuel, il est possible d'observer la dilatation de l'éprouvette PSE au moment de la formation de la glace, bien que les valeurs de DS soient significativement inférieures à 91,7% et même, aussi faibles que 44%.

Il faut souligner qu'après la 1ère et la 2ème saturation partielle (SP1 et SP2, Figure 3.2), le degré de saturation de l'éprouvette PSE était de 82%. À la suite de chacune des SP, l'éprouvette a connu des pertes d'eau et le degré de saturation a diminué jusqu'à une valeur minimale de 45% (cycles de GD, nos 1 à 10). Notamment, il est clair que la perte d'eau (↓ DS) est plus importante en surface de l'éprouvette. Aussi, l'évaporation de l'eau confinée dans un réseau poreux est nécessairement plus rapide pour les pores grossiers. Alors, l'eau se trouve au centre de l'éprouvette et au sein des pores de petit diamètre. Par ailleurs, la perméabilité de l'éprouvette PSE est sûrement très faible en raison de sa teneur en vides de l'ordre de 4,4%. Alors, l'expulsion de l'eau lors de la formation de la glace est réduite. Or, il semble bien que la faible perméabilité, l'eau présente au centre de l'éprouvette et au sein des pores de faible diamètre font en sorte que malgré des valeurs faibles de DS (≤ 50%), l'éprouvette connaît une dilatation lors de la formation de glace.

3.4.4.4 Contraction générée par la fonte de la glace (ε_F)

La contraction des éprouvettes causée par la fusion de la glace (ε_F) au cours de la phase de réchauffement d'un cycle de GD, déduite de l'évolution des déformations telle qu'illustrée à la Figure 3.10, est présentée à la Figure 3.12 en fonction du degré de saturation.

Pour les éprouvettes avec saumure, le phénomène de contraction en cours de réchauffement est plus marqué que celui lié à la dilatation de l'éprouvette observée en cours de refroidissement au moment du changement de phase. Certes, la fusion de la glace se produit de façon immédiate, comparativement à sa formation qui est nettement plus progressive, expliquant que les valeurs de ε_F soient plus élevées que celles de ε_S. Pour ces éprouvettes, la contraction maximale atteinte est de 27μdef, valeur nettement supérieure à la dilatation maximale mesurée lors de la formation de glace ($\varepsilon_S \leq 18$μdef).

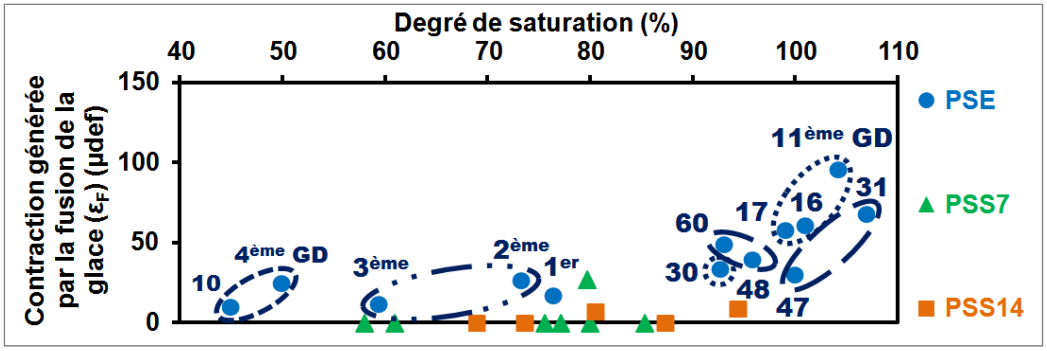


Figure 3.12 Contraction générée par la fusion de la glace
(ε_F définie à la Figure 3.10)

Pour l'éprouvette PSE, ε_F atteint une valeur maximale de 96µdef, ce qui est de 2,6 fois inférieure à la dilatation maximale mesurée lors de la formation de glace (ε_S = 250µdef).

Par ailleurs, bien qu'il y est de la chaleur latente libérée lors de la formation de la glace qui contribue certainement à augmenter la dilatation des éprouvettes (ε_S), ceci ne peut pas expliquer entièrement le grand écart qu'il existe entre ces valeurs et celles mesurées lors de la contraction des éprouvettes (ε_F) générée par la fusion de la glace.

3.4.4.5 Déformation axiale en fonction de la température

Dans le travail actuel, la déformation axiale de l'éprouvette, qui est mesurée à la surface de l'éprouvette, peut être exprimée en relation avec la température mesurée à la surface ou avec celle mesurée au cœur de l'éprouvette. En particulier, la Figure 3.13 présente la déformation axiale mesurée pour l'éprouvette PSS7 en fonction de la température mesurée en surface (Figure 3.13a) et en fonction de celle mesurée au cœur de l'éprouvette (Figure 3.13b) au cours du 3ème ET qui inclut les cycles de gel et dégel nos 4 à 10 (détails à la Figure 3.1).

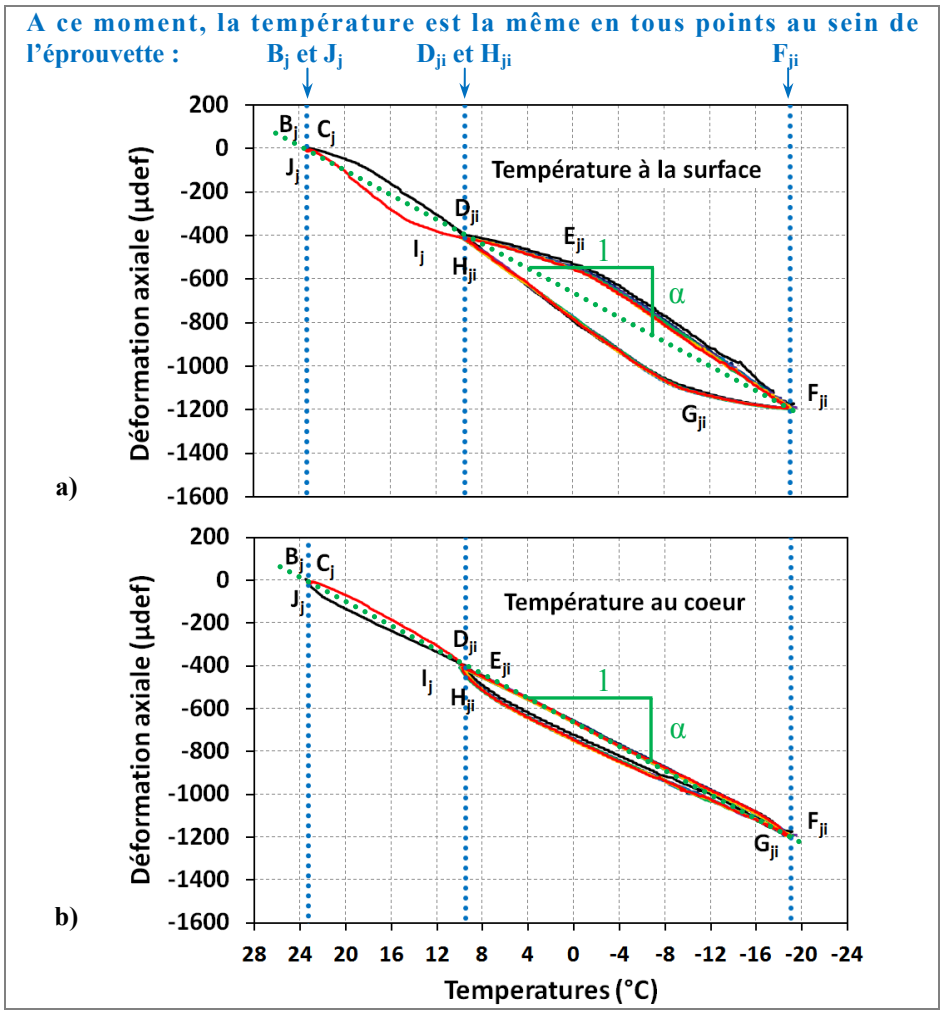


Figure 3.13 a) ε_{axiale} vs $T_{surface}$, b) ε_{axiale} vs $T_{cœur}$ pour l'éprouvette PSS7 ($58 \leq DS \leq 61\%$; B_j à J_j définis à la Figure 2.9 ; $j = 3$; $4 \leq i \leq 10$)

La relation entre la déformation axiale et la température n'est pas la même selon la température considérée, soit à la surface ou au cœur de l'éprouvette (Figure 3.13a et b). Ceci s'explique par le fait même que la température à la surface de l'éprouvette évolue plus rapidement que celle au cœur de l'éprouvette. Ceci est illustré à la Figure 3.3 et à la Figure 3.4 pour l'éprouvette à l'état sec (S). Cette observation peut également s'appliquer pour l'éprouvette PSS7. Cependant, l'évolution de la température à la surface de l'éprouvette est certainement surestimée. L'utilisation d'un thermocouple revêtu de caoutchouc aurait permis de mieux mesurer l'évolution de la température à la surface de l'éprouvette et certainement

réduit l'écart entre les relations tracées à la Figure 3.13. Également, cet écart peut être expliqué par plusieurs éléments :

1) chaque éprouvette repose sur un lit de pierre[36] disposé dans une panne métallique, alors l'échange thermique avec l'air de l'enceinte n'est pas uniforme aux pourtours de l'éprouvette ;
2) le refroidissement et le réchauffement de l'air au sein de l'enceinte thermique est intense (-26°C/h, Figure 2.9) ;
3) de courte durée (30min), ce qui ne permet pas d'atteindre un régime de température constant au sein de chacune des éprouvettes, soit entre la surface et le cœur, et d'obtenir une relation adéquate entre la température et la déformation axiale de l'éprouvette.

Cependant, il est possible d'obtenir une relation fiable entre la température et la déformation axiale de l'éprouvette par l'entremise des paliers de température. La réalisation de paliers de température d'une durée de 11,5 heures permet d'obtenir une température stabilisée et uniforme au sein (en tous points) de l'éprouvette. Notamment, les points B_j, D_{ji}, F_{ji}, H_{ji} et J_j représentent la fin de chacun des paliers de température (lignes pointillées verticales bleues, Figure 3.13). Étant donné que la température est uniforme et stabilisée au sein de l'éprouvette à la fin de chaque palier, il est certain, qu'à ce moment, la déformation axiale de l'éprouvette est également stabilisée. Alors, entre les points repères (B_j, D_{ji}, F_{ji}, H_{ji} et J_j), il est possible d'établir une relation fiable entre la déformation axiale de l'éprouvette et la température : ε^{Ther}. Notamment, les variations de déformation et de température entre ces points repères vont servir à déterminer le coefficient de dilatation linéique (α) des éprouvettes (lignes inclinées, pointillées et vertes, Figure 3.13).

3.4.4.6 Coefficient de dilatation linéique

En considérant les points repères (B_j, D_{ji}, F_{ji}, H_{ji} et J_j, Figure 3.13), le coefficient de dilatation linéique déterminé est alors donné pour les plages de températures comprises entre : i) -18 et

---

[36] Soulignons que ce lit de pierre génère de la friction.

+10°C et, ii) +10 et +23°C (Tableau 3.4). Le coefficient de dilatation linéique est déterminé dans les deux sens, soit lors du refroidissement (↓T, $\alpha_{refroid}$) et lors du réchauffement (T↑, $\alpha_{réchauf}$). Il convient de mentionner que, pour les éprouvettes saturées, le degré de saturation varie d'un cycle de GD à l'autre, ce qui peut expliquer la variabilité au niveau du coefficient de dilatation linéique.

Tableau 3.4 Coefficient de dilatation linéique des éprouvettes entre -18 & +10°C et +10 & +23°C

α	θ	Paramètre	S		PSE		PSS7		PSS14		PSS19	
			↓T	↑T	↓T	↑T	↓T	↑T	↓T	↑T	↓T	↑T
Coefficient de dilatation linéique (µdef/°C)	+10 à +23°C	$\bar{x}$	26,8	26,9	28,1	31,9	28,6	32,6	30,0	31,3	29,5	33,6
		s	1,6	1,9	2,6	6,0	1,7	3,5	4,1	3,0	0,6	3,3
		min	24,0	24,2	24,3	24,7	26,7	28,7	25,7	28,4	29,1	31,3
		max	28,6	28,2	31,2	38,4	30,1	35,7	34,0	34,8	30,0	35,9
		n	6	4	6	4	3	3	4	4	2	2
	-18 à +10°C	$\bar{x}$	26,0	25,9	20,6	21,3	25,6	25,8	25,6	25,8	25,6	25,7
		s	0,3	0,4	2,1	2,2	1,1	0,9	1,5	1,4	1,3	1,2
		min	25,4	24,8	14,6	15,6	24,6	24,9	24,4	24,5	24,2	24,4
		max	26,9	26,5	25,3	26,1	27,9	27,7	31,7	32,1	27,7	27,8
		n	58	58	58	58	37	37	39	39	30	30

$\bar{x}$	Valeur moyenne du coefficient de dilatation linéique (α) lors du refroidissement (↓T) ou lors du réchauffement (↑T) ;
s	Écart type pour un échantillon ;
min	Valeur minimale ;
max	Valeur maximale ;
n	Nombre de résultats obtenus lors des 60 cycles de GD.

Le coefficient de dilatation linéique obtenu pour l'éprouvette testée à l'état sec (valeurs comprises entre 24,0 et 28,6 x 10^{-6}/°C, Tableau 3.4) est dans la gamme des valeurs trouvées par les autres chercheurs : 9 à 41 x 10^{-6}/°C (Hooks et coll., 1964 ; Monismith et coll., 1965 ; Littlefield, 1967 ; Jones et coll., 1968 ; Burgess et coll., 1971 ; Osterkamp et coll., 1986 ; Janoo et coll., 1993 ; Stoffels et coll., 1996 ; Di Benedetto et coll., 1997b ; Zeng et coll., 1999 ; Olard, 2003 ; Xu et coll., 2008 ; Mauduit et coll., 2010).

Entre +10 et +23°C[37], les coefficients de dilatation linéique des éprouvettes contenant de l'eau et des saumures sont assez similaires (moyennes de 28,1 à 33,6 x 10^{-6}/°C). Ces valeurs sont plus élevés que pour celles à l'état sec (moyenne de 26,8 à 26,9 x 10^{-6}/°C) (Tableau 3.4). De même, l'influence de l'eau et des saumures est plus marquée lors du réchauffement (↑T, α = 31,3 à 33,6 x 10^{-6}/°C, Tableau 3.4) que lors du refroidissement (↓T, α = 28,1 à 30,0 x 10^{-6}/°C, Tableau 3.4). Tout spécialement, la Figure 3.14 met en corrélation le coefficient de dilatation linéique, lors du refroidissement et du réchauffement, de l'enrobé bitumineux suivant les divers états avec le degré de saturation des éprouvettes.

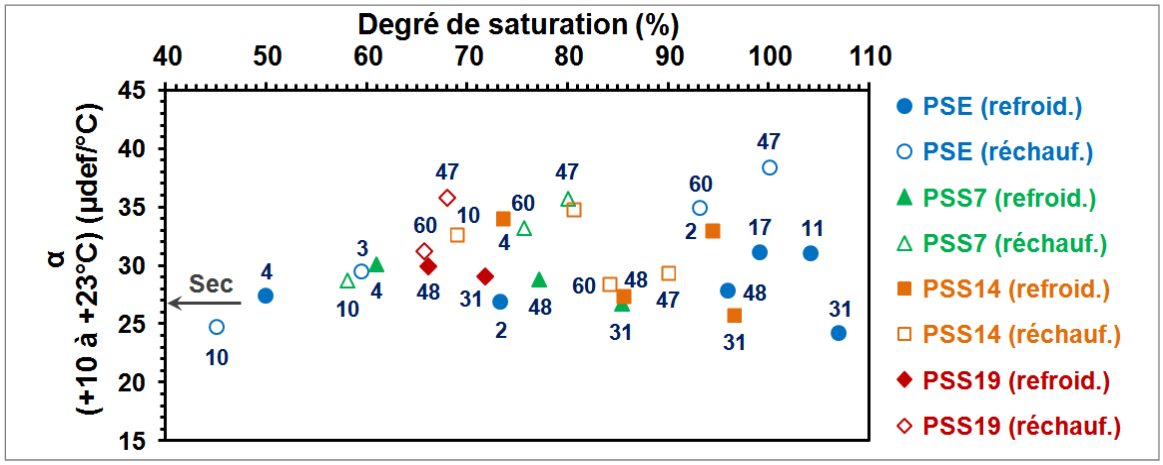


Figure 3.14 Coefficients de dilatation linéique (α) des éprouvettes lors du refroidissement (↓T) et lors du réchauffement (↑T) entre +10 et +23°C en fonction du degré de saturation (le numéro du cycle de GD près de cette plage de température est mis en étiquette)

À l'aide de courbes de tendance linéaire, la Figure 3.15 permet de mieux visualiser l'effet de chacun des liquide sur le coefficient de dilatation linéique de l'enrobé bitumineux partiellement saturé en fonction du DS et ce, lors du refroidissement. Essentiellement, les courbes de tendance sont établies en considérant que le coefficient de dilatation linéique des éprouvettes partiellement saturées est égal à celle à l'état sec lorsque le DS est de 0% (valeur à l'ordonnée de 26,8, Figure 3.15).

---

[37] Il convient de mentionner que, dans cette étendue de température, il n'y a pas de changement de phase du liquide qui affecte l'évolution usuelle de la dilatation et la contraction des éprouvettes.

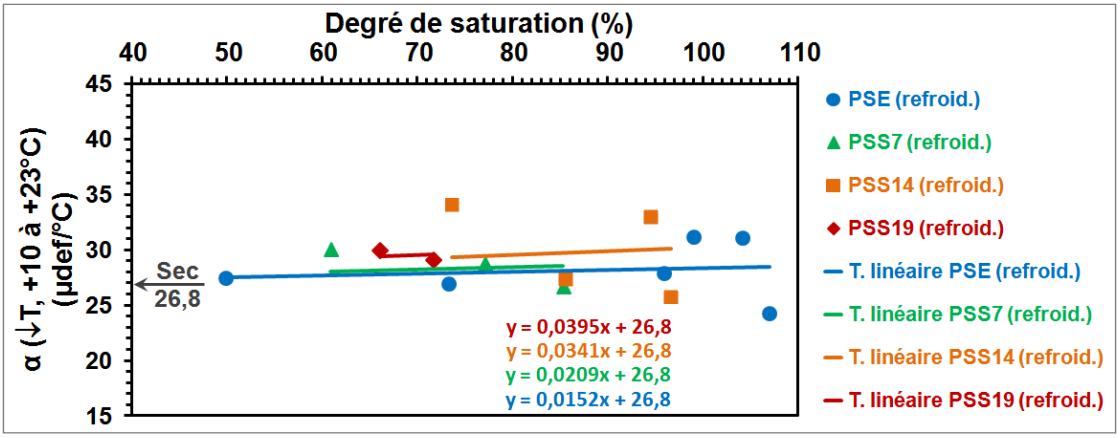


Figure 3.15 Coefficients de dilatation linéique (α) lors du refroidissement (↓T) pour toutes les éprouvettes partiellement saturées entre +10 et +23°C en fonction du degré de saturation (valeur à l'ordonnée de 26,8 pour les courbes de tendance linéaire)

La Figure 3.16 illustre l'effet de chacun des liquide sur le coefficient de dilatation linéique de l'enrobé bitumineux partiellement saturé en fonction du DS et ce, lors du réchauffement.

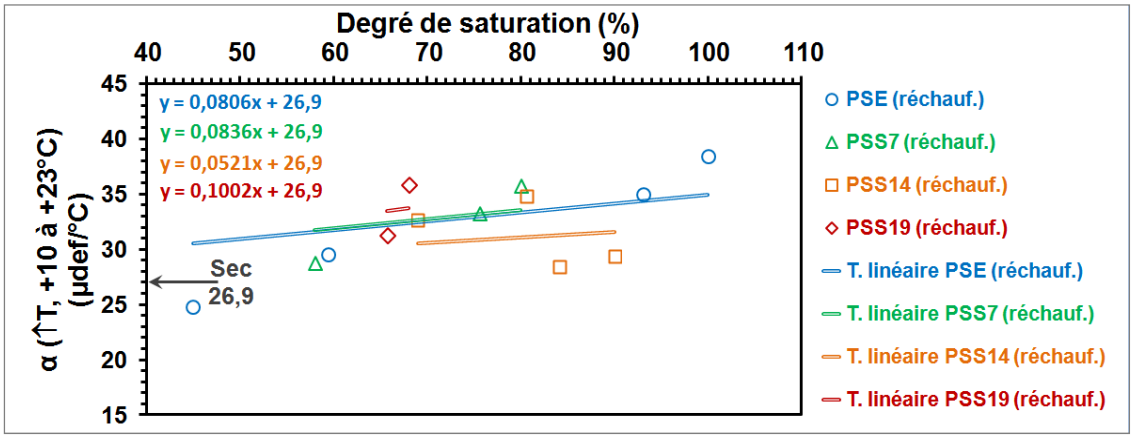


Figure 3.16 Coefficients de dilatation linéique (α) lors du réchauffement (↑T) pour toutes les éprouvettes partiellement saturées entre +10 et +23°C en fonction du degré de saturation (valeur à l'ordonnée de 26,9 pour les courbes de tendance linéaire)

En majorité, le coefficient de dilatation linéique de l'enrobé bitumineux partiellement saturé augmente avec la hausse du DS et l'accroissement de la teneur en sel au sein du liquide (Figure 3.15 et Figure 3.16). Ceci est tout à fait logique car les liquides ont un coefficient de dilatation nettement plus élevés que celui de l'enrobé bitumineux. En particulier, entre +10 et

+23°C, le coefficient de dilatation volumique de l'eau et des saumures à une concentration en sel de 7, 14 et 19% est de près de 167, 287, 338 et 370 x 10^{-6}/°C, respectivement (Lide, 2000). Celui de l'enrobé bitumineux à l'état sec est considéré[38] comme étant égal à 26,85 x 3 x 10^{-6}/°C, soit de près de 80,55 x 10^{-6}/°C.

Par ailleurs, l'augmentation du coefficient de dilatation linéique avec la hausse du DS et l'accroissement de la teneur en sel au sein du liquide est plus marquée lors du réchauffement (Figure 3.15) que lors du refroidissement (Figure 3.16). Ceci semble tout à fait logique car le liquide présent dans l'enrobé bitumineux n'est pas lié[39] à ce dernier et il présente une faible cohésion. Alors, il est très probable que la dilatation du liquide, lors du réchauffement, présent au sein des vides interstitiels génère des pressions plus élevées que celles résultantes de sa contraction, lors de son refroidissement, car il ne présente pas d'ancrage à l'enrobé bitumineux pour le forcer à se contracter avec lui (le liquide).

Aussi, la perméabilité du matériau doit être prise en considération lorsque le réseau de pores est partiellement saturé. Lorsqu'il y a des pressions générées au sein du matériau en raison des changements volumiques du liquide, et même des gaz, le niveau de perméabilité du matériau doit être pris en compte car il agit inévitablement sur le relâchement de la pression interne générée (rôle de soupape), ce qui se répercute inévitablement sur la valeur du coefficient de dilatation volumique du matériau. Notamment, la perméabilité des éprouvettes partiellement saturées doit être assez faible en raison de la faible teneur en vides (4,4 à 4,5%).

Ensuite, à l'aide de calculs théoriques, nous allons tenter de corréler les valeurs mesurées du coefficient de dilatation linéique de l'enrobé bitumineux partiellement saturé en eau ou en saumures. Dans un premier temps, les calculs sont effectués en détail pour l'éprouvette partiellement saturée en eau (PSE). Les équations 3.5 à 3.8 représentent les calculs théoriques

---

[38] Considération d'un matériau parfaitement isotrope : déformations égales dans toutes les directions.

[39] Il est clair que le liquide ne constitue pas un constituant de l'enrobé, mais il affecte son comportement.

Rapport-Gratuit.com

relatifs à l'effet de l'eau sur le coefficient de dilatation linéique de l'éprouvette PSE. Les hypothèses suivantes sont considérés : 1) les vides sont parfaitement saturés en eau (DS = 100%), 2) l'eau est un liquide incompressible, 3) l'enrobé bitumineux est un matériau isotrope et incompressible, 4) l'eau est parfaitement liée à l'enrobé, et 5) la teneur en vides (Vi) de cette éprouvette est de 4,4%.

$$\frac{\Delta V_{l\,(10-23°C)}}{V_0} = 3 \cdot \varepsilon_{axiale} \tag{3.5}$$

$$\Delta V_{l\,(10-23°C)} = Vi_l \cdot (V_{23°C} - V_{10°C}) = 95{,}4 \times 10^{-6} \tag{3.6}$$

$$\frac{\Delta V_l}{V_0} = \frac{95{,}4 \times 10^{-6}}{100\%} = 3 \cdot \varepsilon_{axiale} \Rightarrow \varepsilon_{axiale} = 31{,}7\mu def \tag{3.7}$$

$$\frac{\varepsilon_{axiale}}{\Delta T} = 2{,}45\mu def/°C \tag{3.8}$$

où :

$\Delta V_{l\,(10\text{-}23°C)}$ Changement de volume du liquide entre 10 et 23°C ;

V_0 Volume total et initial du matériau ;

Vi_l Volume des vides interstitiels remplis entièrement de liquide (DS = 100%) ;

$V_{23°C}$ Volume massique du liquide à 23°C ;

$V_{10°C}$ Volume massique du liquide à 10°C ;

ΔT Écart de température.

Alors, à partir des valeurs de 2,45 et de 26,8, pour l'éprouvette PSE, la tendance linéaire suivante est obtenue : y = 0,0245 + 26,8. Cette équation représente le coefficient de dilatation linéique théorique de l'éprouvette PSE lors de son refroidissement et ce, en fonction du DS. Ensuite, les calculs (équations 3.5 à 3.8) peuvent être effectués pour les éprouvettes PSS7, PSS14 et PSS19. Ces éprouvettes possèdent une teneur en vides de 4,5%.

Le Tableau 3.5 effectue une synthèse des équations trouvées expérimentalement et théoriquement pour le coefficient de dilatation linéique entre +10 et +23°C pour les éprouvettes partiellement saturées et ce, lors du refroidissement et lors du réchauffement.

Tableau 3.5 Synthèse des équations trouvées expérimentalement et théoriquement pour le coefficient de dilatation linéique lors du refroidissement et lors du réchauffement entre +10 et +23°C pour les éprouvettes partiellement saturées

État	Refroidissement		Réchauffement	
	Équations		Équations	
	théoriques	expérimentales	théoriques	expérimentales
PSE	y = 0,0245x + 26,8	y = 0,0152x + 26,8	y = 0,0245x + 26,9	y = 0,0806x + 26,9
PSS7	y = 0,0406x + 26,8	y = 0,0209x + 26,8	y = 0,0406x + 26,9	y = 0,0836x + 26,9
PSS14	y = 0,0464x + 26,8	y = 0,0341x + 26,8	y = 0,0464x + 26,9	y = 0,0521x + 26,9
PSS19	y = 0,0493x + 26,8	y = 0,0395x + 26,8	y = 0,0493x + 26,9	y = 0,1002x + 26,9

Il faut mentionner que les équations obtenues expérimentalement pour le coefficient de dilatation linéique des éprouvettes partiellement saturées, lors du refroidissement, collent assez bien aux équations élaborées, bien qu'il y a peu de données expérimentales, des variations importantes pour celles-ci et l'attribution d'une valeur unique de 26,8 à l'ordonnée pour toutes les éprouvettes (Tableau 3.5). Aussi, il est tout à fait normal que la pente des équations obtenue expérimentalement soit inférieure à celle obtenue théoriquement en raison des hypothèses considérées. Tout simplement, la pente reflète l'effet d'un liquide sur le coefficient de dilatation linéique.

Cependant, les équations obtenues expérimentalement pour le coefficient de dilatation linéique des éprouvettes partiellement saturées lors du réchauffement semblent tout à fait surréalistes. Il faut mentionner que les points expérimentaux mesurés lors du réchauffement présentent des variations très élevées (Figure 3.16).

Entre -18 et +10°C, le coefficient de dilatation linéique pour les éprouvettes S, PSS7, PSS14 et PSS19 sont similaires dans les deux sens (↓T et ↑T, Tableau 3.4, moyennes de 25,6 à 26,0

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

x 10^{-6}/°C). Toutefois, cette similitude n'est pas si véritable que cela. En effet, la Figure 3.17 illustre le rapport entre les coefficients linéiques pendant le réchauffement (↑T, $\alpha_{réchauf}$) et lors du refroidissement (↓T, $\alpha_{refroid}$), entre -18 et +10°C, pour chaque cycle de GD.

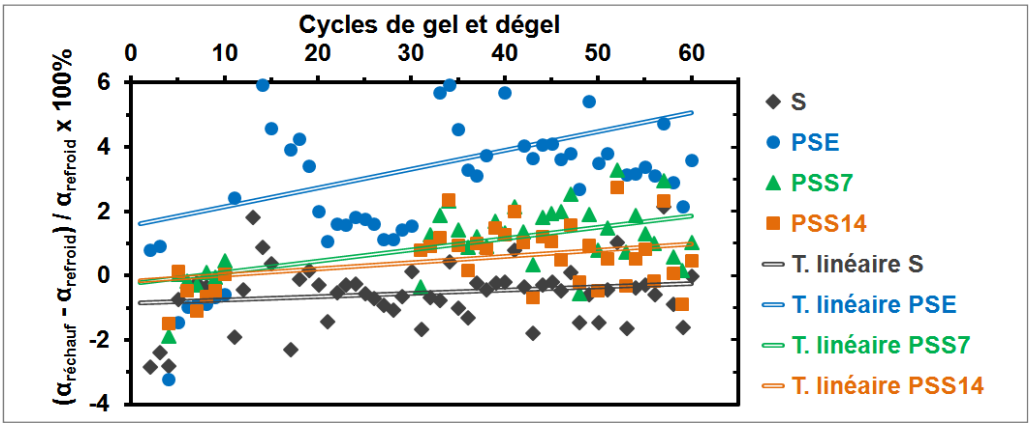


Figure 3.17 Évolution du rapport entre le coefficient de dilatation linéique lors du réchauffement (↑T, $\alpha_{réchauf}$) et celui lors du refroidissement (↓T, $\alpha_{refroid}$) lors d'un même cycle de GD pour la plage de température de -18 à +10°C

D'un cycle de GD à l'autre, l'éprouvette S subi une contraction qui est négligeable (valeur négative, Figure 3.17). Pour les éprouvettes PSE, PSS7 et PSS14, elles s'allongent au cours des cycles de GD. Les pentes donnent un indice sur l'évolution de l'allongement des éprouvettes des différents états. Certes, cette évolution dépend des dommages générés à l'éprouvette, comme la formation de microfissures, absorption d'eau dans le mastic ou infiltrations d'eau à l'interface bitume-granulat en raison des multiples cycles de GD et des quelques saturations partielles réalisés.

Par ailleurs, de -18 et +10°C, le coefficient de dilatation linéique pour les éprouvettes S, PSS7, PSS14 et PSS19 sont similaires (Tableau 3.4, moyennes de 25,6 à 26,0 x 10^{-6}/°C). La formation de glace au sein des saumures semble, à priori, affecter que très peu la déformation axiale des éprouvettes PSS7, PSS14 et PSS19. Toutefois, il en est tout autrement pour l'éprouvette PSE, le coefficient de dilatation linéique est relativement bas (↓T et ↑T, Tableau 3.4, moyennes de 20,6 à 21,3 x 10^{-6}/°C). Ce résultat s'explique, en partie, par la présence d'eau pure au sein du matériau. En effet, la dilatation importante de l'éprouvette lors de la

formation de glace en cours de refroidissement et à sa contraction élevée observée lors de sa fusion en cours de réchauffement vient contrecarrer une partie de l'évolution de la déformation usuelle de l'enrobé bitumineux avec la température (ε^{Ther}). À cet effet, la Figure 3.18 illustre les coefficients de dilatation linéique de l'ensemble des éprouvettes entre -18 et +10°C en fonction du degré de saturation (valeurs moyennes de ↓T et ↑T). Rappelons que le degré de saturation (DS) est connu juste avant et après un ET, ce qui génère une diminution des valeurs illustrées à la Figure 3.18, comparativement à celles dénombrables dans le Tableau 3.4.

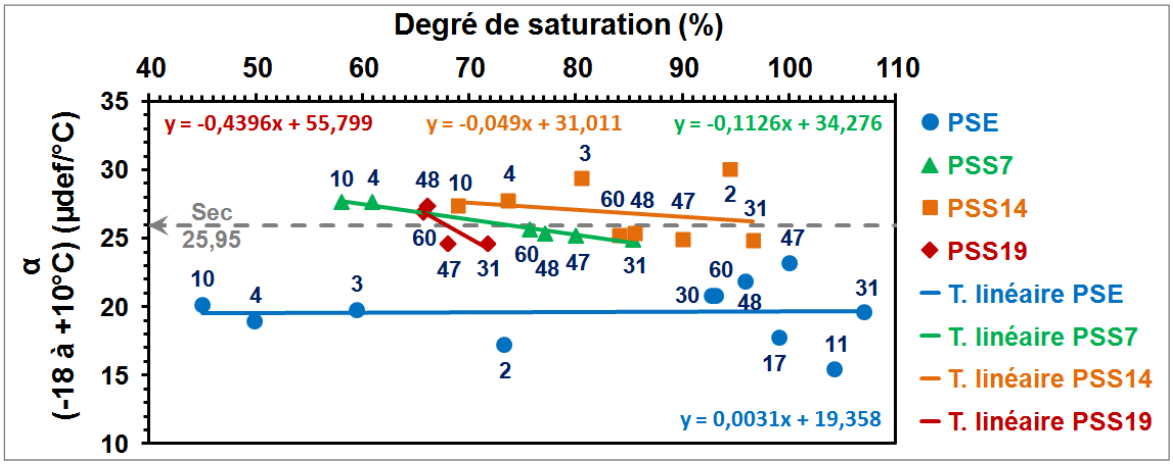


Figure 3.18 Coefficients de dilatation linéique (α) pour toutes les éprouvettes entre -18 et +10°C en fonction du degré de saturation (numéro du cycle de GD en étiquette)

De -18 à +10°C, trois éléments peuvent affectés le coefficient de dilatation de l'enrobé bitumineux : 1) dilatation et contraction généré par le changement de phase, 2) dilatation et contraction du liquide, et 3) de la glace.

Dilatation et contraction du liquide – Auparavant, il a été montré que le liquide et plus, particulièrement la hausse du DS, fait augmenter le coefficient de dilatation linéique de l'enrobé et ce, en comparaison de celui de l'enrobé à l'état sec. Ceci est observable à la Figure 3.18 pour l'éprouvette PSS7, PSS14 et PSS19 pour des DS inférieurs à environ 75%, 80% et 68% respectivement.

Dilatation et contraction générées par le changement de phase – En raison de la dilatation et contraction générées par le changement de phase, ceci vient réduire le coefficient de dilatation linéique de l'enrobé bitumineux. À la Figure 3.18, la réduction du coefficient de dilatation linéique est observable pour l'ensemble des éprouvettes, mais plus particulièrement, pour un DS variant de 44 à 107%, et supérieur à 75%, 80% et 68% pour les éprouvettes PSE, PSS7, PSS14 et PSS19 respectivement. Par ailleurs, à l'exception de l'éprouvette PSS19, plus la teneur en sel est faible (0 à 14%), plus le coefficient de dilatation connaît une réduction rapide et passe sous celle de l'éprouvette à l'état sec avec la progression du DS (Figure 3.18).

Dilatation et contraction de la glace – Quant à la glace, de -20 à 0°C, elle présente un coefficient de dilatation linéique deux plus élevé à celui de l'enrobé bitumineux, soit de 54 x 10^{-6}/°C. Ce coefficient de dilatation n'est pas affecté par la présence (ou teneur) en sel (Voitkovskii, 1960 ; Cox, 1983 ; Fukusako, 1990). Alors, la présence de glace fait augmenter celui de l'enrobé bitumineux. Donc, cela peut possiblement expliquer la valeur constante du coefficient de l'éprouvette PSE avec l'augmentation du DS (y = 0,0031x + 19,358), bien que le changement de phase réduit considérablement le coefficient de dilatation. Pour terminer, il serait intéressant de réaliser la mesure du coefficient de dilatation linéique de l'ensemble des éprouvettes partiellement saturées, notamment quand il n'y a pas de changement de phase, soit lorsqu'il y a présence de glace sur l'ensemble de la plage de température considérée.

3.4.5 Essais additionnels

3.4.5.1 Introduction

Après les 100 cycles de gel et dégel, soit les six ET, deux cycles complémentaires de GD ont été réalisés, mais cette fois, en réduisant la température minimale à -46°C, au lieu de -18°C, de manière à observer la température de formation de glace de l'ensemble des saumures.

3.4.5.2 Cycles de gel et dégel complémentaires de -46 à +23°C

Pour la réalisation de ces deux cycles complémentaires de GD deux modifications ont été apportées. D'une part, afin d'obtenir le même taux de conditionnement (56°C/h) que celui imposé aux 100^{iers} cycles de GD, une rampe d'une heure entre +10 et -46°C a été intégré à ces nouveaux cycles de GD. D'autre part, afin d'obtenir une température stabilisée et uniforme au sein des éprouvettes, un palier de température de 15 heures à -46°C et à +10°C a été imposé. La Figure 3.19 présente l'ET imposé pour la réalisation de ces deux cycles complémentaires de GD (où j = 7 est le nombre actuel de l'ET ; x = 2 est le nombre de répétitions ; i = 101 & 102 est le nombre actuel de cycles de GD).

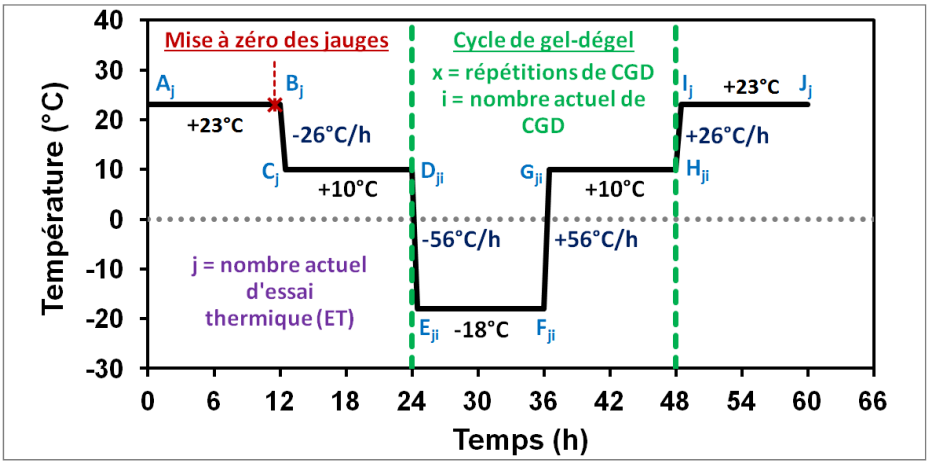


Figure 3.19 Évolution de la température imposée dans l'enceinte pour la réalisation des deux cycles complémentaires de GD

3.4.5.3 Résultats types

La présentation des mesures des profils de déformation axiale, des températures de surface et au cœur de l'éprouvette PSS7 suivant les nouveaux cycles de GD, tel que décrit à la Figure 3.19, est ici effectuée. De prime abord, la Figure 3.20 montre l'évolution de la déformation de l'éprouvette PSS7 au cours du 101ème cycle de GD. Les résultats de la Figure 3.20 montrent que la formation de la glace de la saumure crée à deux moments distincts des dilatations (ε_S) et que sa fusion crée également deux contractions distinctes (ε_F).

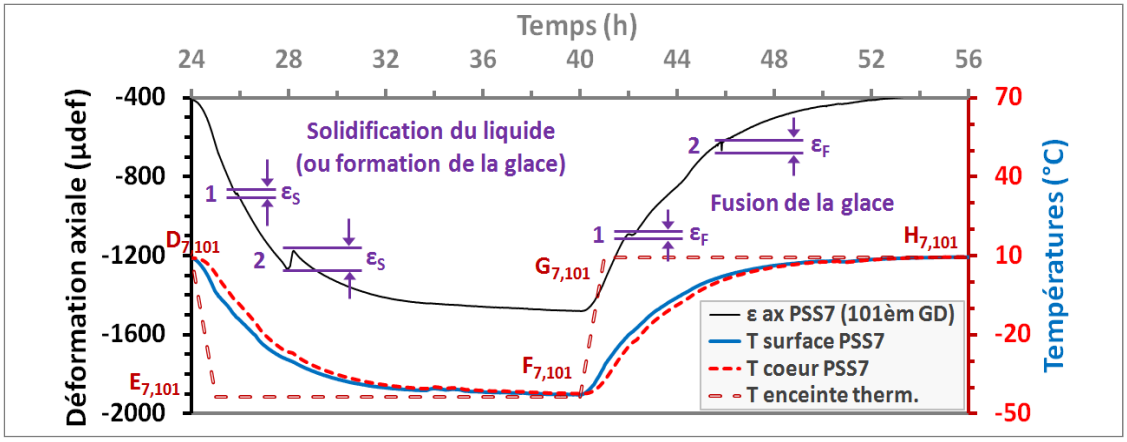


Figure 3.20 Déformation axiale (ε_{axiale}) et températures dans l'enceinte, à la surface et au cœur de l'éprouvette PSS7 lors du 101ème CGD, et détermination de la dilatation générée lors de la formation de la glace (ε_S) et de la contraction liée à sa fusion (ε_F)

Ensuite, la Figure 3.21 illustre de façon détaillée l'évolution de la température de surface et au cœur de l'éprouvette PSS7 au cours du 102ème cycle de GD. Les résultats présentés à la Figure 3.21 montrent la présence de quatre points d'inflexion : 1) deux points d'inflexion associés à des températures de formation de la glace (ou de la solidification du liquide, T_S) et, 2) deux points d'inflexion associés aux températures de fusion de la glace (T_F).

Les observations effectuées à la Figure 3.20 et à la Figure 3.21 peuvent être expliquées par deux éléments. Primo, la température théorique de solidification de la saumure à une concentration en sel de 7,4% (PSS7) est de -4,7°C[40], ce qui peut expliquer les déformations (ε_S no 1 et ε_F no 2, Figure 3.20) et les points d'inflexion lorsque la température à la surface et au cœur de l'éprouvette PSS7 se situe entre -5 et -12°C (solidification no 1 et fusion no 2, Figure 3.21). Secundo, la température eutectique (température minimale de solidification) d'une solution aqueuse de chlorure de sodium (NaCl) est de -21,1°C[41], ce qui peut expliquer les déformations (ε_S no 2 et ε_F no 1, Figure 3.20) et les points d'inflexion lorsque la

[40] Weast et coll. (1982).

[41] Pour une concentration massique de 23,3% (Rock, 2010; Environnement Canada, 2004).

température à la surface et au cœur de l'éprouvette PSS7 se situe entre -18 et -28°C (solidification no 2 et fusion no 1, Figure 3.21).

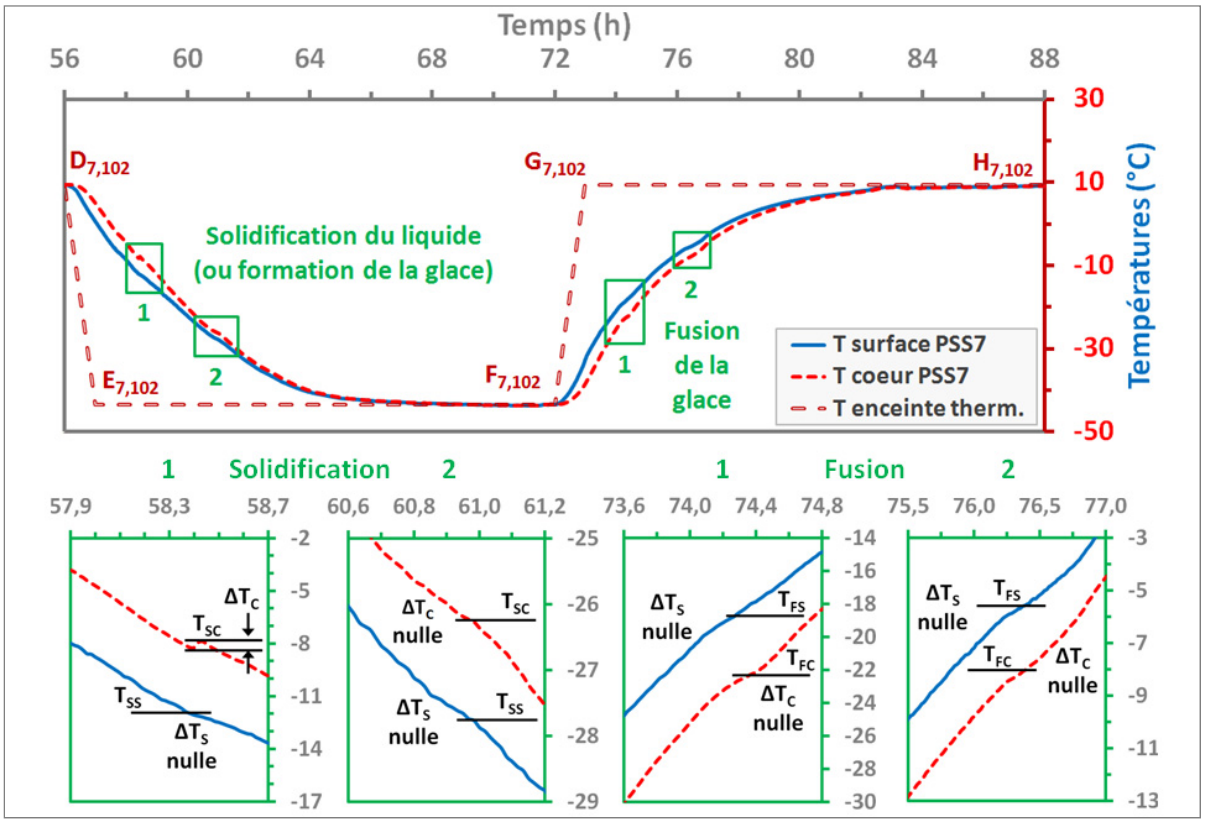


Figure 3.21 Températures à la surface et au cœur de l'éprouvette PSS7 lors du 102ème cycle de GD, et détermination des variations de température (ΔT_S et ΔT_C) lors de la formation de la glace à la surface (T_{SS}) et au cœur (T_{SC}) ou à sa fusion à la surface (T_{FS}) et au cœur (T_{FC})

Notamment, lors de la phase de refroidissement, lorsque la température au sein de l'éprouvette passe sous la température de solidification, il y a d'abord formation de glace (glace formée de cristaux d'eau pure) au sein de la saumure. Cette 1ère formation de glace génère une dilatation de l'éprouvette PSS7 (ε_S no 1 et ε_F no 2, Figure 3.20). Ensuite, cette formation de glace engendre subséquemment un accroissement de la concentration en ions de la solution interstitielle avoisinante, réduisant progressivement la température de solidification de la solution. Toutefois, la température de solidification de la solution restante ne peut jamais être inférieure à la température eutectique (température minimale de solidification de la solution aqueuse de NaCl). À cet effet, lorsque la température au sein de

l'éprouvette se trouve à être inférieure à la température eutectique de la saumure (-21,1°C), le reste de la solution aqueuse se solidifie complètement. Ceci explique ainsi qu'il est possible d'observer une 2ème formation de glace, qui est complète, au sein de la saumure. En effet, cette 2ème formation de glace génère une 2ème dilatation de l'éprouvette PSS7 (ε_S no 2) qui est nettement plus importante que la précédente (ε_S no 1, Figure 3.20).

Comparativement aux déformations générées par les formations et les fontes de la glace (ε_S et ε_F, Figure 3.20), les points d'inflexion au niveau de l'évolution de la température, en surface (T_{SS} et T_{FS}) et au cœur (T_{SC} et T_{FC}) de l'éprouvette PSS7, sont très faibles, peu perceptibles (Figure 3.21). Également, les variations de température (ΔT_S et ΔT_C) générées lors des formations et des fusions de la glace sont très faibles ou nulles (Figure 3.21). Bien que, les points d'inflexions soient faibles et peu perceptibles, il est possible de les repérer car ils se produisent aux mêmes moments que les déformations ε_S et ε_F.

3.4.5.4 Résultats relatifs aux éprouvettes contenant de la saumure

A partir des mesures des profils de déformation axiale, de températures de surface et au cœur des éprouvettes contenant de la saumure (PSS7, PSS14 et PSS19) suivant les nouveaux cycles de GD, une comparaison entre les résultats obtenus pour les 60iers cycles et les deux cycles complémentaires de GD est réalisée au niveau de la formation de glace et de sa fusion.

A l'exception des valeurs de variations de température mesurées à la surface et cœur des éprouvettes (ΔT_S et ΔT_C), les valeurs établies à partir des 60iers cycles sont comparables à celles obtenues à partir des deux cycles complémentaires de GD au niveau de la formation de glace (Tableau 3.6). La réalisation des deux cycles complémentaires de GD à une température inférieure à la précédente, -46°C au lieu de -18°C, permet de constater deux points de solidification pour les saumures à des concentrations en sel de 7 et 14% et ce, à la surface et au cœur des éprouvettes (lignes 1 et 2, $T_{SS\ mesurée}$ et $T_{SC\ mesurée}$). L'ensemble des saumures se solidifient une première fois à une température inférieure à celle théorique ($T_{S\ théorique}$ = -4,7, -9,6 ou -15,7°C selon la concentration en sel de la saumure). Les valeurs

mesurées à la surface et au cœur des éprouvettes varient entre -17,3 et -5,2°C (ligne 1 pour $T_{SS\ mesurée}$ et $T_{SC\ mesurée}$). Ces valeurs sont tout à fait comparables aux valeurs obtenues lors des 60^{iers} cycles de GD.

Tableau 3.6 Comparaison entre les résultats obtenus pour les 60^{iers} et les deux cycles complémentaires de GD au cours de la phase de refroidissement

État			PSS7		PSS14		PSS19	
Éléments \ Cycles			0 - 60	101 - 102	0 - 60	101 - 102	0 - 60	101 - 102
DS (%)			58 à 90	88 à 93	74 à 102	98 à 102	53 à 87	76 à 83
Formation de glace	$T_{SS\ mesurée}$ (°C)	1	-13,8 à -5,2 (X = -10,7)	-13,4 à -11,7 (X = -12,6)	n. o.	-17,3 (X = -17,3)	n. o.	
		2	n. o.	-29,7 à -27,8 (X = -28,8)	n. o.	-31,1 à -27,6 (X = -29,4)	n. o.	-30,1 à -29,0 (X = -29,6)
	$T_{SC\ mesurée}$ (°C)	1	-14,9 à -7,2 (X = -8,8)	-8,2 à -7,9 (X = -8,1)	-15,9 à -12,8 (X = -14,7)	-14,0 (X = -14,0)	n. o.	
		2	n. o.	-26,5 à -26,2 (X = -26,4)	n. o.	-26,6 à -24,9 (X = -25,8)	n. o.	-25,2 à -24,4 (X = -24,8)
	$T_{S\ théorique}$		-4,7°C		-9,6°C		-15,7°C	
	$T_{eutectique}$		-21,1°C à une concentration en sel de 23,3%					
	ΔT_S (°C)	1	0 à 0,3	0	0	0	n. o.	0
		2	n. o.	0	n. o.	0	n. o.	0
	ΔT_C (°C)	1	0 à 0,7	0 à 0,3	0,4 à 1,2	0 à 0,1	n. o.	n. o.
		2	n. o.	0 à 0,2	n. o.	0 à 0,1	n. o.	0
	ε_S (µdef)	1	0 à 18	5 à 14	0 à 10	0 à 2	n. o.	n. o.
		2	n. o.	58 à 90	n. o.	49 à 51		24 à 61

$T_{SS\ mesurée}$	Température de solidification du liquide à la surface de l'éprouvette ;		
$T_{SC\ mesurée}$	Température de solidification du liquide au cœur de l'éprouvette ;		
$T_{S\ théorique}$	Température de solidification théorique du liquide ;		
$T_{eutectique}$	Température eutectique d'une solution aqueuse de NaCl ;		
ΔT_S	Variation de température lors de la solidification du liquide à la surface de l'éprouvette ;		
ΔT_C	Variation de température lors de la solidification du liquide au cœur de l'éprouvette ;		
ε_S	Dilatation (déformation) générée par la solidification du liquide ;		
1	1ère solidification ;	2	2ème solidification ;
X	Valeur moyenne ;	n. o.	Non observable.

En outre, les saumures se solidifient une seconde fois lorsque la température passe sous la température eutectique ($T_{eutectique}$ = -21,1°C). À la surface des éprouvettes ($T_{SS\ mesurée}$, ligne

Rapport-Gratuit.com

2), les valeurs varient entre -31,1 et -26,9°C pour toutes les saumures. Au cœur des éprouvettes ($T_{SC\ mesurée}$, ligne 2), les valeurs sont regroupées et varient entre -26,6 et -24,4°C pour toutes les saumures. La dilatation générée au cours de la première solidification est faible (valeurs de 0 à 18µdef pour ε_S, ligne 1), mais pour la deuxième solidification, la dilatation est beaucoup plus importante (valeurs de 24 à 90µdef pour ε_S, ligne 2). À ce stade, les saumures sont complètement solidifiées. Cette solidification complète des saumures à des températures inférieures à -26,6°C génère des dilatations (ε_S) nettement plus élevées (valeurs comprises entre 24 et 90µdef), comparativement à ce qui a pu être observé lors des 60^{iers} cycles de GD (maximum de 18µdef). Cela doit nécessairement générer des dommages plus importants aux matériaux contenant de la saumure lorsque la température passe sous -26,6°C. Toutefois, en cours de refroidissement, la chaleur latente générée lors du changement de phase et mesurée à la surface (ΔT_S) et au cœur (ΔT_S) des éprouvettes est faible pour ces deux cycles complémentaires de GD (valeurs de 0 à 0,2°C) comparativement à ce qui a été mesuré lors des 60^{iers} cycles de GD (valeurs de 0 à 1,2°C).

Rappelons que lors de la phase de réchauffement d'une éprouvette au cours d'un cycle de GD, il est toujours plus difficile d'observer les éléments utilisés pour l'analyse, notamment en ce qui à trait à la température de fusion de la glace (Tableau 3.7). La réalisation des deux cycles complémentaires de GD, au cours desquels les éprouvettes ont été soumises à une température minimale nettement plus basse, permet d'observer deux températures de fusion pour les saumures à une concentration de 7 et 14% en sel (lignes 1 et 2, $T_{FS\ mesurée}$ et $T_{FC\ mesurée}$, Tableau 3.7). La glace au sein des saumures fond une $1^{ère}$ fois lorsque la température se trouve près de la température eutectique ($T_{F\ eutectique}$ = -21,1°C). Au cœur des éprouvettes ($T_{FC\ mesurée}$, ligne 1), les valeurs des températures mesurées (ou estimées en considérant le moment où une $1^{ère}$ contraction se produit) sont regroupées et varient entre -22,5 et -21,8°C pour toutes les éprouvettes avec saumures. Ces valeurs sont très près de la température eutectique (-21,1°C). Toutefois, à la surface des éprouvettes ($T_{FS\ mesurée}$, ligne 1), ces valeurs sont difficilement mesurées (ou estimées), sinon elles sont dispersées et au-dessus de la température eutectique (-19,1 à -13,0°C) pour l'ensemble des saumures. De plus, il est possible d'observer une seconde fonte de la glace pour les éprouvettes avec des saumures à

une concentration en sel de 7 et 14% (PSS7 et PSS14). Les valeurs mesurées au cœur des éprouvettes varient de -8,8 à -8,0°C (ligne 2, $T_{FC\ mesurée}$), mais ce n'est pas le cas à la surface des éprouvettes (ligne 2, $T_{FS\ mesurée}$, +1,7 à +1,8°C).

Tableau 3.7 Comparaison entre les résultats obtenus pour les 60^{iers} et les deux cycles additionnels de gel-dégel au niveau de la fusion de la glace des saumures

État			PSB7		PSB14		PSB19	
Éléments \ Cycles			0 - 60	101 - 102	0 - 60	101 - 102	0 - 60	101 - 102
DS (%)			58 à 90	88 à 93	74 à 102	98 à 102	53 à 87	76 à 83
Fusion de la glace	$T_{FS\ mesurée}$ (°C)	1	n. o.	-19,1* ; -18,8	n. o.	-18,7 à -18,2	n. o.	-14,2* à -13,0*
		2		+1,7* ; -5,5		+1,8*		n. o.
	$T_{FC\ mesurée}$ (°C)	1	n. o.	-22,5 à -21,5	n. o.	-22,0 à -21,8	n. o.	-21,9 à -21,8
		2		-8,0		-8,8		n. o.
	$T_{eutectique}$		-21,1°C à une concentration en sel de 23,3%					
	$T_{F\ théorique}$		-4,7°C		-9,6°C		-15,7°C	
	ε_F (µdef)	1	n. o.	3 à 6	n. o.	4 à 12	n. o.	0
		2		49		5 à 40 (69)		n. o.

$T_{FS\ mesurée}$	Température de fusion de la glace mesurée à la surface de l'éprouvette ;		
$T_{FC\ mesurée}$	Température de fusion de la glace mesurée au cœur de l'éprouvette ;		
$T_{F\ théorique}$	Température de fusion théorique de la glace ;		
$T_{F\ eutectique}$	Température eutectique d'une solution aqueuse de NaCl ;		
ε_F	Contraction (déformation) générée par la fonte de la glace de la saumure ;		
()	Sommation de plusieurs valeurs pouvant aller jusqu'à 5 ;		
*	Aucune variation de température est observable, mais la température considérée correspond au moment où la déformation en contraction (ε_F) s'est produite ;		
1	1ère fusion ;	2	2ème fusion ;
X	Valeur moyenne ;	n. o.	Non observable.

Finalement, la contraction mesurée lors de la première fonte de la glace est faible (valeurs de 0 à 12µdef, ligne 1, ε_F). Cependant, pour la seconde fonte, la contraction est nettement plus importante (valeurs de 49 à 69 µdef, ligne 2, ε_F). À ce moment, la glace des saumures est complètement fondue.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

3.5 Variation de la teneur en vides des éprouvettes, effet sur le DS

Tout comme l'évolution du degré de saturation au fil du temps (§ 3.4.2), l'évolution du volume de vides (Vi) des éprouvettes peut constituer un indicateur quant à l'endommagement généré par les cycles de GD. La détermination du volume de vides interstitiel initial (Vi_I) des éprouvettes, soit avant la 1ère saturation partielle et la réalisation des ET, est aisée (méthodes hydrostatique et volumétrique, § 2.4.9.1 et 0). À cet effet, la teneur en vides initiale (Vi_I) des éprouvettes, déterminée selon les deux méthodes, est spécifiée au Tableau 3.8, laquelle est fondée sur la détermination du volume de l'éprouvette.

Ensuite, le collage de casques aux éprouvettes complique sensiblement la détermination de la teneur en vides du matériau suite aux cycles de gel et dégel (Vi_{GD}). Notamment, la méthode hydrostatique ne peut être retenue en raison des éléments de différentes densités (enrobé bitumineux, casques en aluminium, thermocouples, jauge et époxy), il ne reste que la méthode volumétrique pour la détermination de la teneur en vides de l'enrobé suite aux cycles de GD (Vi_{GD}).

Dans le cadre du programme expérimental actuel, la méthode volumétrique a été utilisée. Ceci consiste à mesurer : le diamètre de l'éprouvette à neuf localisations (3 mesures aux 1/3, 1/2 et 2/3 de l'hauteur de l'éprouvette) et l'hauteur à quatre localisations de l'éprouvette équipée de casques avant et après la réalisation des cycles de GD. Ces mesures permettent de connaître la variation d'hauteur et de diamètre pour le calcul de la teneur en vides suite aux cycles de GD.

Malheureusement, dans le cadre du programme actuel, la hauteur des éprouvettes équipées de casques n'a pas été mesurée avant la réalisation des cycles de GD. Il est donc nécessaire de la supposer. Toutefois, seulement la hauteur totale initiale de l'éprouvette et l'épaisseur des casques sont connues. Il est alors nécessaire d'estimer une épaisseur d'époxy possible pour obtenir la hauteur de l'éprouvette casquée initialement. En fait, une épaisseur minimale (ép. min.) et maximale (ép. max.) a été supposée en se basant sur les valeurs d'épaisseurs

obtenues pour les éprouvettes de type E*. Autrement, on peut considérer qu'il n'y a pas eu de variation d'hauteur (Δh_{nulle}) car il n'est pas possible de la déterminer avec précision. Ces trois options sont analysées et exposées au Tableau 3.8 : 1) Δh_{nulle} ; 2) ép. min. ; et 3) ép. max. Ces options vont mener à l'obtention de trois teneurs en vides (Vi_{GD}) et trois variations de teneurs en vides (ΔVi) des éprouvettes suite aux 102 cycles de GD. Ainsi, ΔVi calculée suivant les 3 options sera minimale, moyenne ou maximale. La variation de la teneur en vides est calculée de la façon suivante : $\Delta Vi = Vi_{GD} - Vi_{Ivolumétrique}$. De plus, la valeur de la densité maximale du mélange (dmm) est considérée comme inchangée, malgré les cycles de GD, afin de calculer Vi_{GD}.

Tableau 3.8 Évolution de la teneur en vides des éprouvettes au fil des cycles GD

État	Éprouvette									
	Type	No	Vi_I (%)		Vi_{GD} (%)			ΔVi (%) (Vi_{GD} - $Vi_{I\ volumétrique}$)		
			Hydrostat.	Volumét.	1 Δh_{nulle}	2 ép. max.	3 ép. min.	1 min.	2 moy.	3 max.
S	T	8-D1	4,3	4,5	4,7	4,9	5,3	0,2	0,4	0,8
PSE	T	8-B2	4,4	4,6	5,5	6,4	6,7	0,9	1,8	2,1
PSS7	T	8-B3	4,5	4,7	4,9	5,5	5,9	0,2	0,8	1,2
PSS14	T	8-C1	4,5	4,7	5,1	5,3	5,7	0,4	0,6	0,9
PSS19	T	8-A3	4,5	4,7	5,0	5,3	5,6	0,3	0,6	1,0

Quelque soit l'option considérée, l'évolution de la teneur en vides (ΔVi) avec les cycles de GD est observable pour toutes les éprouvettes : faible pour l'éprouvette testée à l'état S, similaire entre les éprouvettes PSS7, PSS14 et PSS19, et très marquée pour l'éprouvette PSE (Tableau 3.8). En particulier, pour l'éprouvette PSE, l'évolution relative de ΔVi en fonction du nombre de cycles de GD est d'au moins 20% après le $102^{ème}$ cycle. Quoiqu'une évolution relative de près de 50% semble tout à fait réaliste si on considère qu'un DS de 150% a été mesuré avant la réalisation des deux derniers cycles de GD pour l'éprouvette PSE. Également, l'évolution de la teneur en vides suite à des cycles de GD a été rapportée par Feng et coll. (2010). Après huit cycles de GD seulement, ces chercheurs ont mesuré une

évolution relative de près de 4% pour un enrobé bitumineux ayant une teneur en vides de l'ordre de 6±1%.

3.6 Conclusions

Suite à la réalisation des cycles de gel et dégel (GD, de -18 à +10°C), les résultats de nos essais montrent qu'il est possible d'y faire pénétrer de plus en plus de liquide au sein des éprouvettes saturées en eau (PSE) ou en saumure à une concentration en sel de 14% (PSS14). Notamment, les valeurs du degré de saturation des éprouvettes PSE et PSS14 progressent avec le nombre de cycles de GD. Cela peut être expliqué par le processus d'endommagement au sein de ces éprouvettes : infiltrations d'eau à l'interface bitume-granulat, absorption d'eau par le mastic ou formation de microfissures au sein du matériau.

En règle générale, il semble que les températures de solidification de l'eau et des saumures au sein de l'enrobé bitumineux soient affectés lorsque le degré de saturation (DS) est supérieur à 70%.

D'une part, à basse température, soit de -18 à +10°C, le coefficient de dilatation linéique de l'enrobé bitumineux est très peu affecté par la présence des saumures, ce qui n'est pas le cas de l'enrobé partiellement saturé avec de l'eau et même, pour des degrés de saturation aussi faibles que 44%. D'autre part, à température intermédiaire, soit de +10 à +23°C, les coefficients de dilatation linéique des éprouvettes partiellement saturées avec de l'eau et des saumures sont assez similaires, mais supérieurs à celui de l'éprouvette à l'état sec.

Dans tous les cas, l'éprouvette contenant de l'eau est soumise aux plus importantes dilatations lors de la formation de la glace et aux contractions lors de la fonte de la glace en comparaison aux autres éprouvettes contenant des saumures. Pour l'éprouvette avec de l'eau (PSE), même pour un degré de saturation (DS) aussi faible que 44%, des contractions et des dilatations sont mesurées lors du changement de phase liquide-solide.

La réalisation des deux cycles complémentaires de gel et de dégel (GD) de -46 à +10°C a permis d'observer deux températures de solidification et deux températures de fusion des saumures au sein des éprouvettes. La baisse de la température dans l'éprouvette au-dessous de -26,6°C entraîne une solidification complète des saumures et génère des déformations qui sont nettement plus importantes que celles observées lors de la réalisation des cycles de gel et dégel (GD) de -18 à +10°C. Aussi, durant la réalisation de ces deux cycles complémentaires de GD et lors de la fonte complète de la glace aux alentours de 0°C, les contractions générées aux éprouvettes sont significatives et supérieures à ce qui a pu être observé lors de la réalisation des cycles de GD de -18 à +10°C.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS ET ANALYSES DU VOLET #1B, LES ESSAIS DE MODULE COMPLEXE (EE*)

4.1 Introduction

L'essai de module complexe (EE*) constitue un essai qualifié de non destructif. Il a comme avantages de permettre un suivi de l'évolution des propriétés mécaniques de chaque éprouvette au fil du temps, de présenter des résultats nettement plus homogènes et plus cohérents qu'un essai destructif qui est effectué sur un lot d'éprouvettes présentant des caractéristiques légèrement différentes (Castañeda Pinzon, 2007). De plus, les résultats de l'EE* sont nettement plus quantitatifs que ceux d'un essai destructif qui sont plutôt qualitatifs. Ces avantages permettent de tester un nombre plus faible d'éprouvettes, comparativement à un essai destructif, afin d'évaluer un paramètre (Castañeda Pinzon, 2007).

Dans le programme expérimental actuel, l'EE* permet de quantifier l'endommagement généré par les CGD, qui ont été réalisés lors des ET. La quantification de l'endommagement de l'enrobé bitumineux suivants les CGD et les différents états est ici présentée et analysée en détail.

Pour permettre une analyse rigoureuse, il est impératif, dans un premier temps, de synthétiser l'évolution du degré de saturation (DS) des éprouvettes en cours des ET et EE* car cela affecte l'endommagement généré par les cycles de GD et la rigidité du matériau. Dans un deuxième temps, la qualité de chaque EE* est vérifiée afin de voir leur validité et les résultats expérimentaux sont tracés selon les représentations classiques. Ensuite, le modèle viscoélastique linéaire 2S2P1D est utilisé afin de modéliser le comportement de l'enrobé bitumineux dans le domaine viscoélastique linéaire (VEL) suivants les différents états étudiés et à la suite des ET. Les paramètres du modèle 2S2P1D et les constantes de l'équation WLF sont déterminés pour permettre une comparaison aisée et globale entre les résultats d'essais relatifs aux différents états étudiés. Par la suite, le recours à la rationalisation des résultats

expérimentaux dans le plan de Cole-Cole et de l'espace de Black permet de vérifier si le comportement de l'enrobé bitumineux est similaire d'un état à l'autre. Lorsqu'il y a similitude au niveau du comportement, certains paramètres du modèle 2S2P1D (h, k, δ et β) sont similaires et peuvent être fixés pour ces états. Ensuite, l'effet du fluide (eau ou saumure) est vérifié. Pour terminer, la quantification du dommage généré à l'enrobé bitumineux par les cycles de GD suivants les différents états est réalisée. L'ensemble de ces étapes sont présentées en détail dans les sections subséquentes.

4.2 Saturation partielle des éprouvettes

4.2.1 Introduction

Pour la saturation partielle des éprouvettes de type E*, la durée d'immersion sous vide a été progressivement augmentée en cours d'ET car ces éprouvettes se sont avérées plus difficiles à saturer. Ceci s'explique en partie par la présence d'époxy, de ruban adhésif et de polymère de polysulfure qui servent respectivement à coller et protéger les jauges collées en surface des éprouvettes. Notamment, environ 70% de la surface latérale des éprouvettes est recouverte de ces produits limitant ainsi leur saturation partielle et ce, sans compter que les extrémités sont collées à des casques. En conséquent, pour ces éprouvettes (type E*), les degrés de saturation atteint sont nettement plus faibles que ceux mesurés pour les éprouvettes de type T. Par ailleurs, la saturation partielle au sein des éprouvettes est fort probablement non uniforme en raison du positionnement des jauges et des produits de protection qui est plus importants à la mi-hauteur qu'aux extrémités des éprouvettes. Notons, par ailleurs, que les saturations partielles ont pu être effectuées à tout moment, parfois avant les EE* ou avant les ET. L'objectif principal étant d'avoir des degrés de saturation supérieurs à 40% avant de réaliser les EE*, tel qu'il a été obtenu lors des essais thermiques (Figure 3.2).

4.2.2 Effets sur la rhéologie et l'endommagement de l'enrobé

Il est primordial de connaître le degré de saturation (DS) des éprouvettes en cours d'EE* car la présence de liquide dans le matériau influence sa rigidité. À haute température, l'eau ou la

saumure peut générer une perte de cohésion de l'enrobé bitumineux (§ 1.2.4.6 et 1.2.4.7). Cette perte s'accentue avec la température et la durée de l'exposition à l'eau (§ 1.2.4). Notamment, dans le cadre d'un EE*, la température atteint les +35°C. De plus, à basse température, l'eau ou la saumure présente dans les vides du matériau vient rigidifier le matériau lorsqu'elle se transforme en glace. Cependant, cette transformation peut éventuellement endommager le matériau et induire la création de microfissures (§ 1.2.4).

4.2.3 Évolution des degrés de saturation

Pour prendre en compte le DS des éprouvettes dans l'analyse, l'évolution du DS des éprouvettes partiellement saturées est représentée du Tableau 4.1 au Tableau 4.3.

Globalement, pour l'ensemble des éprouvettes de type E*, le DS varie de 42 à 67% après la 1ère saturation partielle (Tableau 4.1). L'étendue du DS au cours des essais est de : 68, 27, 34 et 16% pour les éprouvettes PSE, PSS7, PSS14 et PSS19 respectivement (colonne étendue, Tableau 4.1). Cette évolution du DS peut donner un indice quant au niveau de dommage éventuel au sein du matériau. À cet effet, en égard aux étendues des DS, la sévérité du dommage ainsi que la perte de rigidité devrait être les plus importantes pour les éprouvettes (en ordre décroissant) : PSE, PSS14, PSS7 et PSS19.

Tableau 4.1 Degré de saturation des éprouvettes de type E* après la saturation

État	Degré de saturation (%) après la saturation partielle qui précède :							Étendue (%) (DS_{MAX} – DS_{MIN})	Éprouvette (% vides)
	1er EE*	1er ET	2ème ET	4ème EE*	4ème ET	5ème ET	6ème ET		
PSE	54	---	---	77	92	106	122	68	3,4
PSS7	66	---	78	84	87	94	93	27	4,2
PSS14	42	54	57	59	69	68	76	34	3,1
PSS19	67	---	77	75	76	80	83	16	4,3

Pour l'ensemble des éprouvettes et lors de la réalisation des EE*, le DS varie de 40 à 84% (Tableau 4.2). Il est certain que cette variation du DS, d'un essai à l'autre, va influer sur la

Rapport-Gratuit.com

rigidité des éprouvettes. Cette variation du DS est plus marquée pour les éprouvettes PSE (37%) et PSS7 (31%), comparativement aux éprouvettes PSS14 (17%) et PSS19 (19%) (colonne étendue, Tableau 4.2).

Tableau 4.2 Degré de saturation des éprouvettes de type E* avant et après les EE*

État	**Degré de saturation (%) avant et après la réalisation des EE***							**Étendue (%)** (DS_{MAX} – DS_{MIN})	**Éprouvette** (% vides)
	1er EE*	**2ème EE***	**3ème EE***	**4ème EE***	**5ème EE***	**6ème EE***	**7ème EE***		
PSE	48-46	---	41-40	77-68	71-71	73-72	79-n.m.	37	3,4
PSS7	62-54	53-53	71-69	84-77	66-66	74-73	n.m-60	31	4,2
PSS14	42-42	43-43	44-44	59-52	53-52	50-49	50-n.m.	17	3,1
PSS19	60-52	48-48	61-59	67-64	51-51	63-61	54-45	19	4,3

Au cours du 1er au 3ème cycles de GD, le DS varie de 46 à 78% (Tableau 4.3). Bien que la saturation partielle ait été effectuée sous vide, les valeurs de DS obtenues correspondent bien aux valeurs mesurées par Lu et coll. (2005), soit de 50 à 65%, après une immersion dans l'eau pendant 3 semaines pour des éprouvettes ayant une teneur en vides de 4%.

Tableau 4.3 Degré de saturation des éprouvettes de type E* avant et après les ET

ET	**Degré de saturation (%) avant et après la réalisation des essais thermiques (ET)**								**Éprouvette (% vides)**
	1er	**2ème**	**3ème**	**4ème ***		**5ème ***		**6ème**	
GD / État	**1**	**2-3**	**4-10**	**11-16**	**17-30**	**31-47**	**48-60**	**61-100**	
PSE	46-46 **		36-36	88-84	80-74	103-n.m.	83-79	n.m.-104	3,4
PSS7	54-53	78-73	63-48	82-79	76-73	88-n.m.	80-78	n.m.-86	4,2
PSS14	54-54	57-54	44-35	65-62	60-57	64-n.m.	55-53	n.m.-73	3,1
PSS19	50-50	67-61	57-48	75-70	66-64	77-n.m.	70-69	n.m.-71	4,3

* Des problèmes mécaniques ont nécessité l'arrêt des équipements (AE) et interrompus le 4ème et 5ème essai thermique (ET).
** Pour l'éprouvette PSE, les cycles de gel et dégel nos 1 à 3 ont été réalisés dans une même séquence.
n. m. Non mesuré à ce moment.

4.3 Essais réalisés

4.3.1 Introduction

Les EE* sont réalisés en contrôle de déplacement à l'aide des extensomètres de 165mm placés sur les casques en aluminium (§ 2.7.2.2). Toutefois, ce dispositif ne permet pas de bien connaître la déformation axiale de l'éprouvette d'enrobé bitumineux. Alors, il est nécessaire de se référer aux mesures de déformation axiale réalisées par les jauges collées sur ces mêmes éprouvettes (§ 2.4.11.4) afin de réaliser la correction des valeurs de module complexe (E*) mesurés par les extensomètres de 165mm (détails à la § 2.7.9.2). Notamment, ce sont les mesures corrigées des extensomètres de 165mm qui seront présentées et analysées.

Par ailleurs, en raison de problème d'ordre mécanique qui ait survenu lors du 1er EE*, les éprouvettes suivants les états S, PSE et PSS14 ont été endommagées. Ces éprouvettes ont été remplacées par des éprouvettes non instrumentées de jauges. Pour obtenir des conditions similaires au niveau de la saturation partielle, ces éprouvettes ont été recouvertes d'époxy sur environ 70% de leur surface latérale.

Également, les éprouvettes de remplacement ont une teneur en vides qui diffère de celle considérée au départ, soit de 3,1 à 4,8% au lieu de 4,2 à 4,3% (Tableau 4.4).

4.3.2 Présentation

Le Tableau 4.4 présente la synthèse des EE* réalisés sur l'enrobé bitumineux suivant les différents états, avant et après les séquences d'ET. Pour chaque état, sept EE* ont été réalisés, soit à 0, 1, 3, 10, 30, 60 et 100 CGD.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Tableau 4.4 Essais de module complexe (EE*) réalisés sur chacune des éprouvettes d'enrobé bitumineux avant et après chaque essai thermique (ET)

Teneur en vides (%) [A]	**Éprouvette** (type) [B]	**État** (type)	**Degré de saturation** (%)	**Nombre d'essais de module complexe** (XEE*)	**Températ-ures d'essais visées** (°C)	**Amplitude de déform-ation** (µdef)	**Fréquences Préconisées** (Hz)
4,8	E*	S	00	7EE*	+15 et -35 à +35 par incréments de 10°C.	50	10 3 1 0,3 0,1 0,03 10
3,4	E*	PSE	≥ 40	7EE*			
4,2	E*	PSS7	≥ 40	7EE*			
3,1	E*	PSS14	≥ 40	7EE*			
4,3	E*	PSS19	≥ 40	7EE*			

[A] Déterminée selon la méthode hydrostatique (§ 2.4.9.1) ;
[B] L'instrumentation de ces éprouvettes est présentée à la section 2.4.11.4 ;
S Éprouvette à l'état sec ;
PSE Éprouvette partiellement saturée en eau ;
PSS7 Éprouvette partiellement saturée en saumure avec une concentration en sel de 7,4% ;
PSS14 Éprouvette partiellement saturée en saumure avec une concentration en sel de 13,8% ;
PSS19 Éprouvette partiellement saturée en saumure avec une concentration en sel de et 19,4%.

4.3.3 Durée minimale pour l'ensemble des étapes et des essais

Les EE* s'effectuent en alternance avec les saturations partielles (SP) des éprouvettes et la réalisation des ET. Le Tableau 4.5 indique la durée minimale pour réaliser l'ensemble du programme d'essais. Ceci n'inclut pas la préparation et la prise de mesures.

Tableau 4.5 Durée minimale pour la réalisation de tous les essais

Description	**Durée (jours)**		**Nombre**		**Répétitions**	**Total (jours)**
Saturation partielle	0,25 / éprouvette	×	4 éprouvettes	×	5	5
Module complexe	3 / éprouvette	×	5 éprouvettes	×	7	105
Conditionnements avant et après un cycle GD	1,5 / toutes les éprouvettes			×	6	9
Un cycle de gel et dégel	1 / toutes les éprouvettes			×	100	100
					Grand total	219

Alors, la réalisation des étapes relatives à la saturation partielle, la réalisation des cycles de GD et des EE* nécessitent un minimum de 219 jours (Tableau 4.5). À cet effet, les divers équipements (pompe à vide, dessiccateur, enceinte thermique et presses hydrauliques) sont utilisés sur une longue période. Rappelons que suivant certaines problématiques, une longue période peut séparer la réalisation de deux EE*, tel que montré à la section 4.3.4.

4.3.4 Temps écoulé depuis le premier essai de module complexe

La Figure 4.1 indique le temps écoulé en jours entre la fin du X^{ème} EE* et le début du 1er EE*. Ceci constitue un indicateur quant au vieillissement de l'enrobé car le bitume s'oxyde et durci avec le temps. A partir du 4ème EE*, le temps écoulé augmente considérablement. Une période d'environ 3 ans est notable entre le 1er et le 7ème EE* (Figure 4.1).

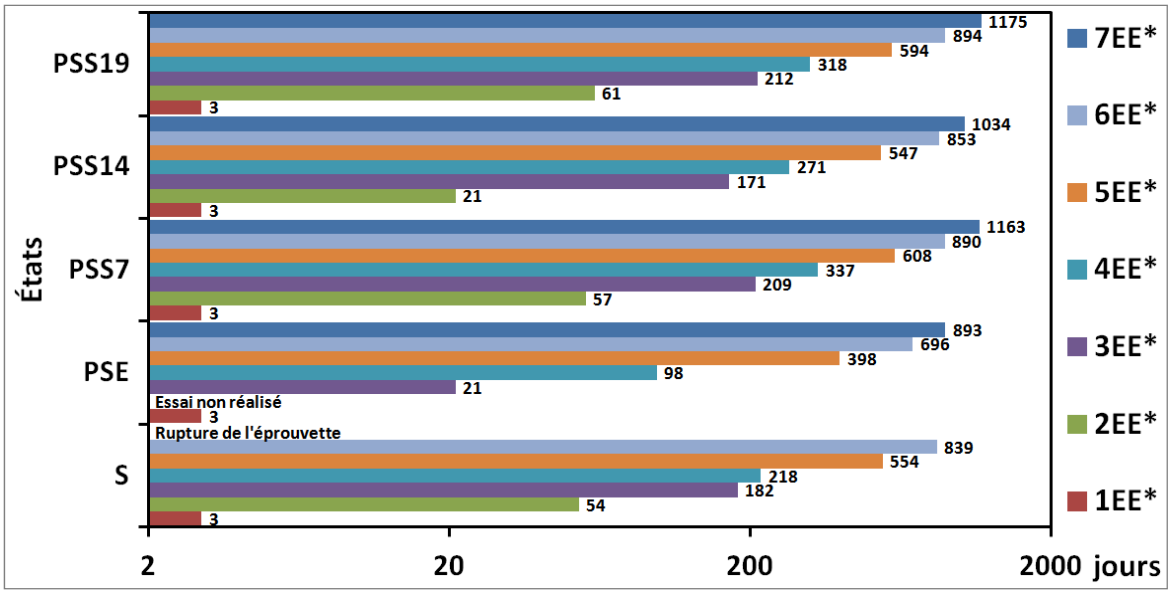


Figure 4.1 Temps écoulé entre la fin du X^{ème} EE* et le début du 1er EE*

4.4 Vérification de la qualité des essais de module complexe

Les EE* sont réalisés à +15 et de -35 à +35°C par incréments de 10°C sous sollicitations sinusoïdales et suivant une fréquence de sollicitation variant de 0,03 à 10Hz. A chaque palier

de température et chaque fréquence, la qualité des résultats d'essais est vérifiée en considérant les conditions suivantes :

- indice de qualité (IQ) de chacun des signaux (σ et ε) idéalement inférieur à 15% ;
- écart de déformation d'un extensomètre par rapport à la valeur moyenne des trois extensomètres ($\Delta\varepsilon_{exti} = [(\varepsilon_{Aaxi} - \varepsilon_{Aax}) / \varepsilon_{Aax}] \times 100$) idéalement inférieur à 25% : indicateur relatif à l'homogénéité des déformations au sein de l'éprouvette.

Le Tableau 4.6 présente l'étendue des IQ et $\Delta\varepsilon_{exti}$ obtenus pour l'ensemble des EE*. Les résultats obtenus sont de bonne qualité, à l'exception de ceux de l'éprouvette PSS7 pour les 1EE* à 7EE* et des 6EE* à 7EE* pour la majorité des éprouvettes. Cette perte de qualité pour les EE* est majoritairement attribuable à l'endommagement généré par les cycles de GD. De plus, la formation de glace au sein du matériau peut parfois atténuer la qualité d'un EE* car cela génère une variation de rigidité de l'éprouvette.

Tableau 4.6 Indices de qualité (IQ) et écarts ($\Delta\varepsilon_{exti}$) obtenus au cours des essais de module complexe (EE*)

ÉTAT	Exigence	Numéro de l'essai de module complexe (XEE*)						
		1EE*	2EE*	3EE*	4EE*	5EE*	6EE*	7EE*
S	IQ ≤ 15%	1 - 9	1 - 8	1 - 10	1 - 7	1 - 8	1 - 9	Rupture éprouv.
	$\Delta\varepsilon_{exti}$ ≤ 25%	0 - 20	0 - 12	0 - 15	0 - 19	0 - 16	0 - 46	
PSE	IQ ≤ 15%	1 - 13	Pas d'essai	1 - 12	1 - 15	1 - 8	1 - 28	1 - 9
	$\Delta\varepsilon_{exti}$ ≤ 25%	0 - 31		0 - 23	0 - 17	0 - 17	0 - 29	1 - 34
PSS7	IQ ≤ 15%	1 - 15	1 - 36	1 - 23	1 - 11	1 - 11	1 - 58	1 - 9
	$\Delta\varepsilon_{exti}$ ≤ 25%	0 - 43	0 - 55	0 - 55	0 - 29	0 - 30	0 - 24	0 - 64
PSS14	IQ ≤ 15%	1 - 13	1 - 8	1 - 9	1 - 8	1 - 10	1 - 22	1 - 12
	$\Delta\varepsilon_{exti}$ ≤ 25%	0 - 41	0 - 19	0 - 22	0 - 15	0 - 23	0 - 88	7 - 67
PSS19	IQ ≤ 15%	1 - 10	1 - 15	1 - 10	1 - 10	1 - 9	1 - 6	1 - 29
	$\Delta\varepsilon_{exti}$ ≤ 25%	2 - 27	1 - 20	0 - 18	0 - 21	0 - 21	0 - 15	0 - 41

Cependant, il faut mentionner que le collage des casques aux éprouvettes a été réalisé à l'aide du banc de collage et que cela se traduit par une qualité plus faible dès le 1er EE*. Aussi, le casque supérieur en aluminium présente une partie en surplomb qui génère une répartition

inégale de la contrainte à l'éprouvette. Il est certain que le collage du casque supérieur à l'éprouvette à l'aide de la presse aurait grandement amélioré la qualité des essais (détails à la § 2.4.10).

La rupture de l'éprouvette à l'état S est survenue au 7ème EE*, ce qui peut paraître surprenant car les CGD ne devraient pas l'avoir endommagée. Toutefois, pour cette éprouvette et au 6ème EE*, il était possible d'observer une instabilité au niveau des signaux en raison d'un écart supérieur à 25% : valeurs de $\Delta\varepsilon_{exti}$ variant de 0 à 46% (Tableau 4.6). De plus, la rupture et la destruction totale de l'éprouvette à l'état PSE est survenue à la fin du 7ème EE*, soit à +35°C. Pour l'éprouvette à l'état PSS7, il n'y a pas eu de rupture, mais la qualité du 7ème EE* est grandement remise en doute et de façon modérée, pour les EE* précédant. Donc, les résultats du 7ème EE* de l'éprouvette PSS7 et ceux du 6ème et du 7ème EE* de l'éprouvette PSS14 doivent être considérés avec prudence car les $\Delta\varepsilon_{exti}$ sont supérieurs à 60% (cases surlignées en jaune, Tableau 4.6). Subséquemment, les points expérimentaux de ces trois EE* ont été marquées à l'aide de couleurs rougeâtres (§ 4.8 et les suivantes).

Avant de comparer les résultats des EE* de l'enrobé bitumineux testé sous les divers états, il est préférable de regarder en détail les résultats d'un seul EE*. Ceci permet de se familiariser avec les méthodologies utilisées pour la présentation des résultats, la réalisation de la modélisation du comportement VEL de l'enrobé bitumineux et la quantification des dommages générés par les cycles de GD et la réalisation d'un EE* (§ 4.5 à 4.7).

4.5 Résultats types d'un essai de module complexe pour l'enrobé testé à l'état sec

4.5.1 Introduction

Un EE*, relatif à l'enrobé bitumineux testé à l'état sec (S), est présenté en détail dans cette section. Plus précisément, cet EE* a été réalisé sur l'enrobé bitumineux qui a été soumis auparavant à trois cycles de gel et dégel (3GD) : nommé E*-S-DS00%-3GD-3EE*.

4.5.2 Présentation des résultats

Les différentes composantes du module complexe varient avec la température et la fréquence de sollicitation, considérées pour chaque essai. Huit températures et six fréquences ont été considérées. Le Tableau 4.7 expose ces températures et fréquences considérées pour chaque EE*.

Tableau 4.7 Températures et fréquences utilisées lors d'un EE*

Températures (°C)	+15, -35, -25, -15,-5, +5, +15, +25 et +35
Fréquences (Hz)	10 ; 3 ; 1 ; 0,3 ; 0,1 ; 0,03 et 10

Plus spécifiquement, le 1er +15°C (Tableau 4.7), dénommé +15°C AVANT, n'est pas représenté dans les résultats d'essai et n'a donc pas été utilisé dans la modélisation, bien qu'il sert à vérifier s'il y a endommagement continuel du matériau lors de l'essai, notamment entre les deux +15°C ($D_{\text{entre les +15°C}}$). La 2ème fréquence de 10Hz (Tableau 4.7) n'est pas représentée dans les résultats d'essai et n'est donc pas utilisée pour la modélisation du comportement de l'enrobé bitumineux, bien qu'elle sert précisément à vérifier s'il y a endommagement du matériau par la séquence de cyclage de sollicitation (D_{SCS}) à chaque palier de température. La quantification de ces dommages lors d'un EE* est exposée à la section 4.7.

Les résultats expérimentaux de |E*|, φ, E_1, E_2, et a_T sont usuellement exprimés à l'aide des représentations subséquentes (§ 4.5.2.1 à 4.5.2.3).

4.5.2.1 Courbes dans le plan de Cole-Cole et l'espace de Black

Les courbes du module complexe dans le plan Cole-Cole et dans l'espace de Black sont illustrées à la Figure 4.2 et à la Figure 4.3. Il est possible d'observer que les points expérimentaux forment une courbe unique (Figure 4.2 et Figure 4.3) et qu'alors, le matériau

obéit au principe d'équivalence temps-température (PETT) et ce, malgré le fait que le bitume soit modifié au polymère (PG 70-28).

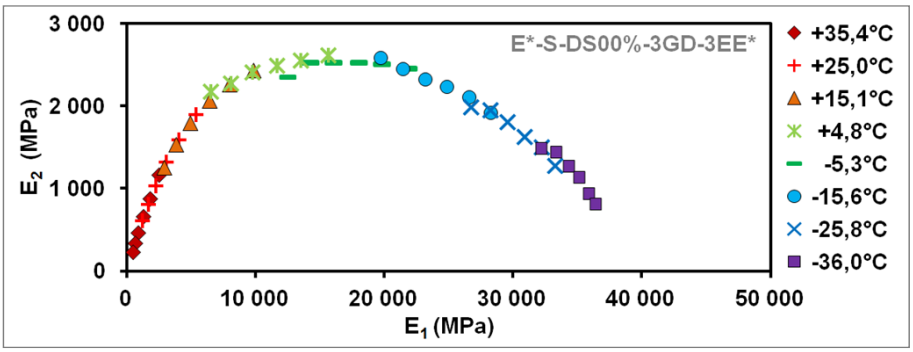


Figure 4.2 Module complexe dans le plan de Cole et Cole

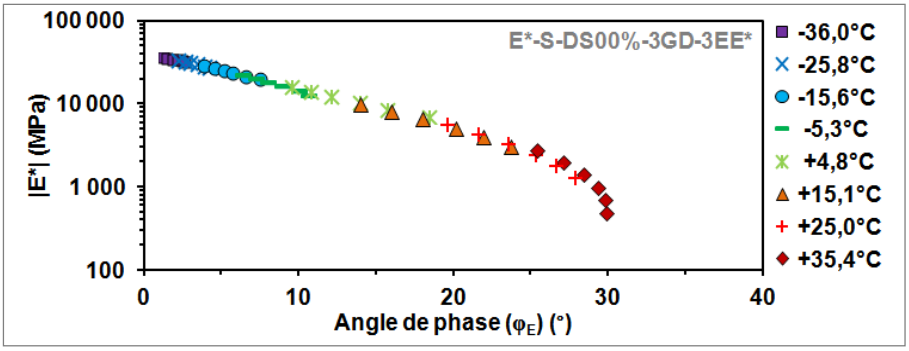


Figure 4.3 Module complexe dans l'espace de Black

À la Figure 4.3, il n'est pas possible d'observer une baisse nette de l'angle de phase avec la diminution de |E*|, tel qu'illustrée à la Figure 1.10, malgré l'utilisation d'une température haute de l'ordre de +35°C. L'utilisation d'une température supérieure à +35°C ne semble pas souhaitable en raison de la faible rigidité de l'enrobé bitumineux à cette température et la précision limitée de la cellule de force de la presse hydraulique MTS 810. Malgré le fait que cette cellule soit calibrée de 0 à 25kN, elle a, à l'origine, une capacité de 100kN. L'utilisation de la presse MTS 858 pourrait être envisagée en raison de sa plus grande précision.

4.5.2.2 Courbes isochrones et isothermes du module complexe

Les courbes isochrones et isothermes de l'enrobé bitumineux de type EB-14 à l'état sec sont illustrées à la Figure 4.4 et à la Figure 4.5. Ces courbes montrent l'influence de la fréquence et de la température sur la norme du module complexe respectivement.

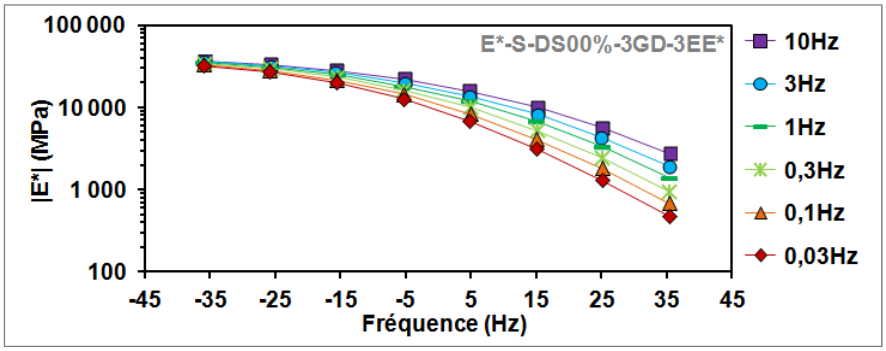


Figure 4.4 Isochrones du module complexe

Les faibles pentes des isothermes permettent de mentionner que la susceptibilité cinétique de l'enrobé est assez faible dans la plage de température préconisée (Figure 4.5). Ceci s'explique par la plage élevée des températures d'utilisation du bitume [70 - (-28) = -98°C] composant l'enrobé bitumineux testé. De plus, le vieillissement important de l'enrobé généré par les multiples chauffages (fabrication à la centrale d'enrobage et en laboratoire) a nécessairement réduit sa susceptibilité cinétique (Figure 4.5) et thermique (Figure 4.4).

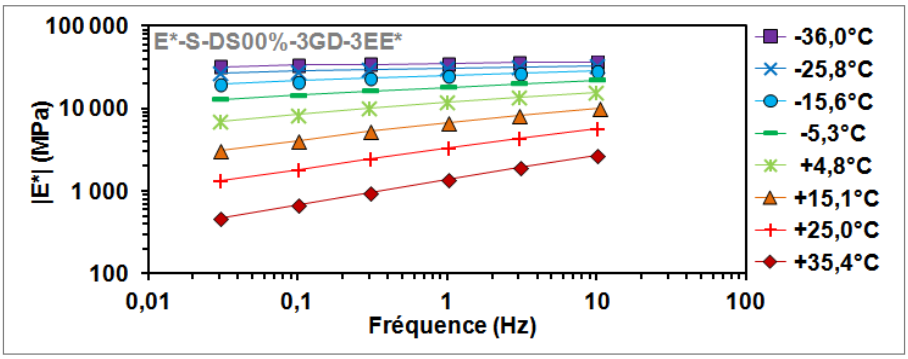


Figure 4.5 Isothermes du module complexe

4.5.2.3 Courbes maîtresses

Étant donné que le comportement du matériau étudié respecte le principe d'équivalence temps-température (PETT), une courbe unique de la norme et de l'angle de phase du module complexe peuvent être tracée pour une température de référence donnée, qui est actuellement de -5,5°C (Figure 4.6 et Figure 4.7).

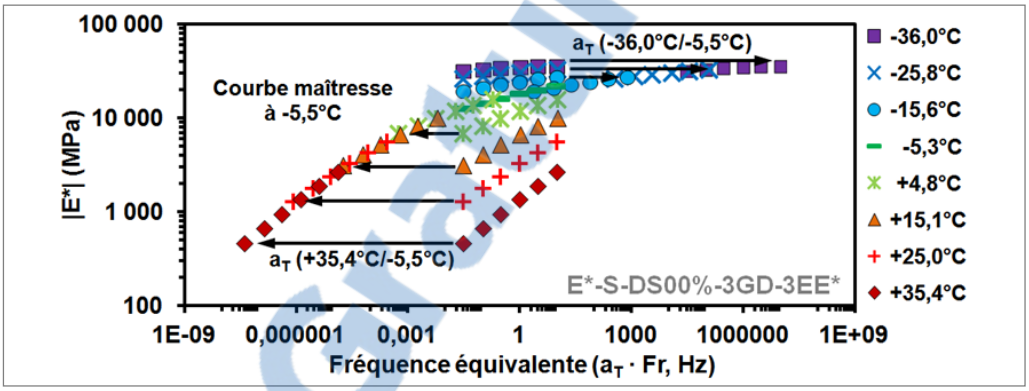


Figure 4.6 Courbe maîtresse de la norme du module complexe (T_R = -5,5°C)

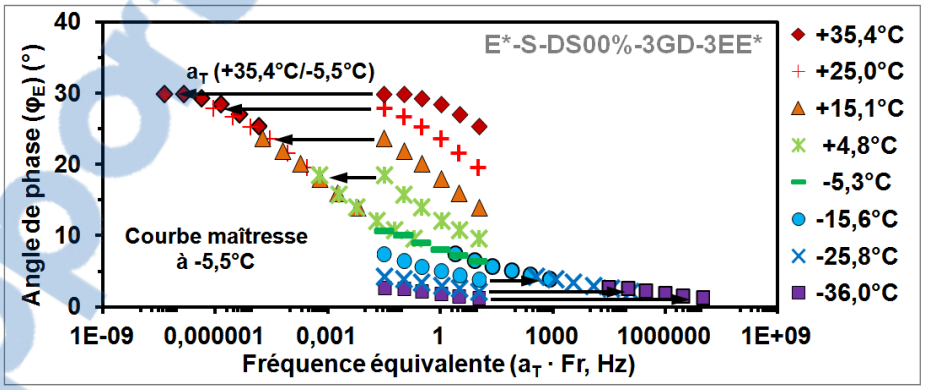


Figure 4.7 Courbe maîtresse de l'angle de phase (ϕ_E) (T_R = -5,5°C)

Les courbes maîtresses sont obtenues en effectuant une translation parallèle à l'axe des fréquences de chaque isotherme. Ceci s'effectue à l'aide de coefficients de translation (a_T). Étant donné que les coefficients de translation (a_T) traduisent, plus particulièrement, le principe d'équivalence temps-température (PETT), alors ils permettent de s'affranchir de la

Rapport-Gratuit.com

température pour modéliser le comportement viscoélastique du matériau (§ 4.6). Leur connaissance est donc essentielle. Par ailleurs, cet affranchissement est possible en se référant à une fréquence équivalente (Figure 4.6 et Figure 4.7).

L'évolution des a_T en fonction de la température est présentée à la Figure 4.8, tout comme celle de la formule analytique WLF (équation (1.8), p. 56). Les constantes C_1 et C_2 de cette formule sont déterminées par la méthode des moindres carrés. Plus exactement, le coefficient de translation (a_T) a une valeur de 1 à la température de référence (Figure 4.8).

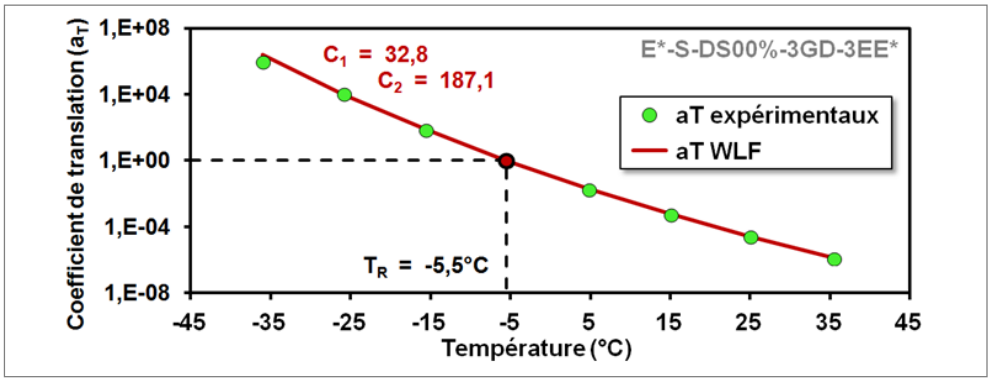


Figure 4.8 Évolution du coefficient de translation (a_T) avec la température

4.6 Résultats types et modélisation du comportement VEL de l'enrobé à l'état sec

4.6.1 Introduction

Le modèle 2S2P1D est utilisé dans le cadre de cette thèse pour simuler le comportement VEL de l'enrobé bitumineux. Ce modèle a été présenté au Tableau 1.17 (p. 59). Les résultats de l'essai de module complexe sont approchés par le modèle en suivant la procédure de calibration présentée à la section suivante.

4.6.2 Calibration du modèle 2S2P1D

La calibration du modèle 2S2P1D consiste à déterminer, à une température de référence donnée (T_R), les sept paramètres (E_{00}, E_0, k, h, δ, β et τ_E) pour que le module complexe du modèle soit le plus près possible de celui des points expérimentaux, quelle que soit la fréquence. L'effet de la température est ensuite pris en considération à $\tau_E(T)$. Ce paramètre est le seul qui varie avec la température. Or, τ_E est une fonction de la température appelé temps de relaxation (Mondher, 1997). Il est relié à la viscosité ou au module complexe du matériau.

E_0 est déterminé dans le plan de Cole-Cole (Figure 4.9) et dans l'espace de Black (Figure 4.12). La valeur du module vitreux (E_0) correspond à la limite supérieure du module complexe lorsque la fréquence tend vers l'infini. À fréquence très élevée, le module tend vers un nombre réel, dont l'angle de phase à une valeur nulle, c'est-à-dire vers un matériau purement élastique.

La valeur du module statique (E_{00}) est paramétrée dans le domaine des basses fréquences et/ou des températures élevées (Figure 4.9 et Figure 4.12). C'est la limite inférieure du module lorsque la pulsation (ω) tend vers 0. E_{00} est supérieur à zéro pour les enrobés bitumineux. Le comportement de l'enrobé bitumineux tend alors vers un matériau purement élastique.

Les constantes k, h et δ, relatives aux corps à fluage parabolique, sont calibrées principalement dans le plan de Cole-Cole (Figure 4.9). Leurs valeurs ont un effet sur la forme de la courbe. La constante k constitue la pente à basse température et la constante h, la pente à haute température. La constante δ est le facteur de forme influençant le maximum de la courbe.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

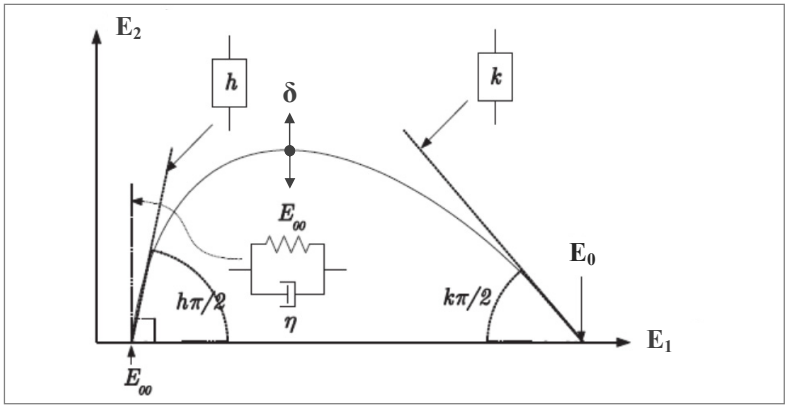


Figure 4.9 Influence des paramètres du modèle 2S2P1D sur la courbe du module complexe dans le plan Cole-Cole
Adaptée de Tapsoba (2012, p. 166)

Le paramètre β du modèle 2S2P1D a été introduit pour caractériser le comportement visqueux pur des bitumes à haute température. Si $E_{00} = 0$, ce qui est valable pour les bitumes, la pente du module représenté sur la courbe maîtresse tend vers 1 lorsque la fréquence tend vers 0. Ainsi, pour les faibles fréquences, la pente de log |E*| = h[log(ω)] est proche de 1. En particulier, le paramètre β permet de modifier cette gamme. Si $\beta_1 < \beta_2$, alors la pente du module E_1^* calculé avec β_1 tend plus rapidement vers 1 que la pente du module E_2^* (calculé avec β_2) lorsque la fréquence tend vers 0 (Figure 4.10). En outre, plus β est élevée, plus la viscosité η du modèle est élevée, et donc plus le module complexe est élevé.

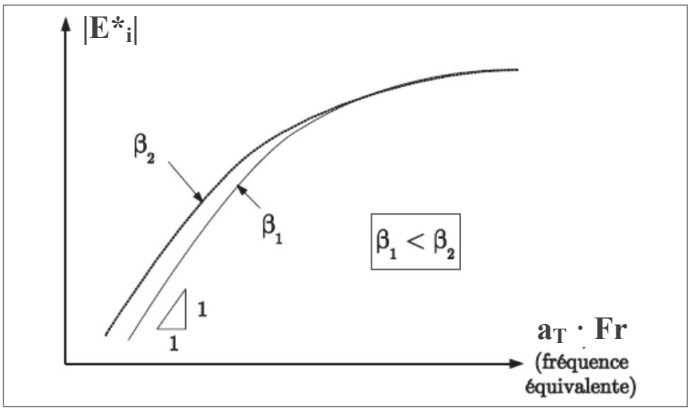


Figure 4.10 Détermination de la constante β à partir de la courbe maîtresse du module complexe
Tirée de Nguyen (2009, p. 135)

La valeur de τ_E est ajustée à chaque isotherme T (Figure 4.5). L'évolution de τ_E en fonction de la température peut être approchée par une loi de type WLF lorsque le principe d'équivalence temps-température (PETT) est vérifié. Dans cette situation, τ_E est entièrement déterminé par les constantes C_1 et C_2 de la loi WLF et par le paramètre τ_{0E} : équation (1.8) à la page 56. On a alors $\tau_E(T_R) = \tau_{0E}$.

4.6.3 Simulation du comportement VEL de l'enrobé à l'état sec

La représentation des résultats expérimentaux et les simulations dans le plan de Cole-Cole et l'espace de Black sont illustrées aux Figure 4.11 et Figure 4.12.

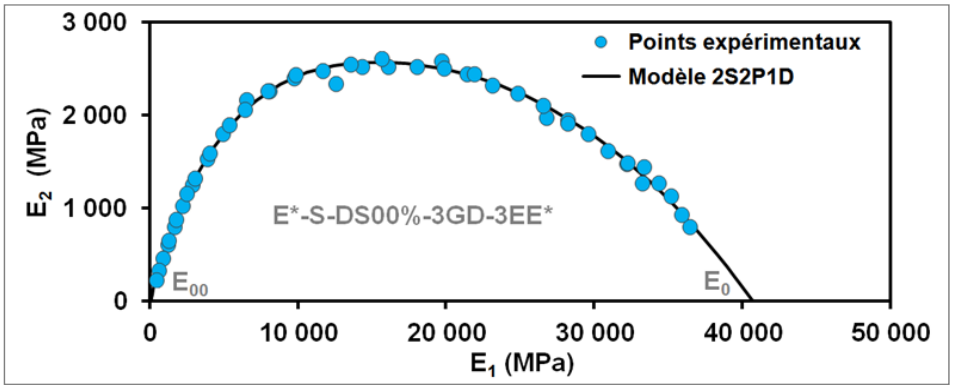


Figure 4.11 Module complexe de l'enrobé à l'état sec après 3 cycles de GD dans le plan Cole-Cole et simulation avec le modèle 2S2P1D

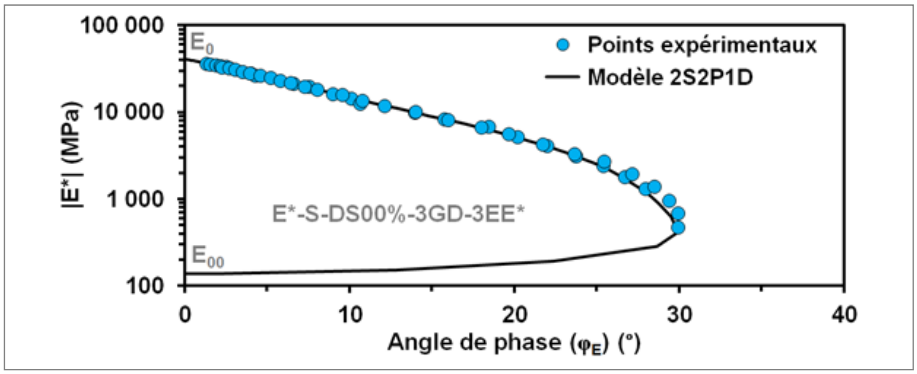


Figure 4.12 Module complexe de l'enrobé à l'état sec après 3 cycles de GD dans l'espace de Black et simulation avec le modèle 2S2P1D

Les simulations réalisées montrent que le modèle 2S2P1D simule bien le comportement viscoélastique de l'enrobé bitumineux testé à l'état sec (Figure 4.11 et Figure 4.12). Cependant, il devient difficile de déterminer avec précision la valeur du module statique (E_{00}) car la baisse de l'angle de phase n'est pas nette (Figure 4.12).

Aussi, les simulations donnent de très bons résultats pour les courbes maîtresses relatives à la norme et à l'angle de phase du module complexe sur l'ensemble des fréquences utilisées (Figure 4.13 et Figure 4.14).

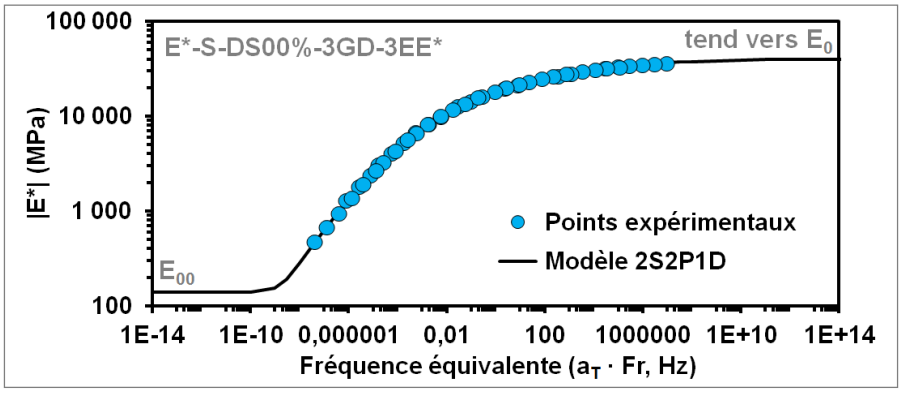


Figure 4.13 Courbe maîtresse de |E*| de l'enrobé à l'état sec après 3 cycles de GD et simulation avec le modèle 2S2P1D (T_R = -5,5°C)

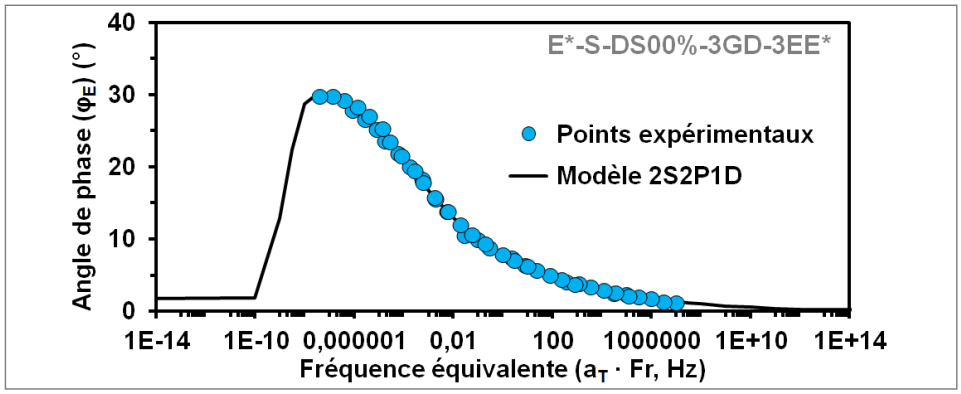


Figure 4.14 Courbe maîtresse de ϕ_E de l'enrobé à l'état sec après trois cycles de gel-dégel et simulation avec le modèle 2S2P1D (T_R = -5,5°C)

Par ailleurs, si le principe d'équivalence temps-température est vérifié, il est possible d'exprimer $\tau_E(T)$ en fonction du coefficient de translation $a_T(T)$ par la relation suivante : $\tau_E(T) = a_T \times \tau_{0E}$. La constante τ_{0E} est alors définie par $\tau_{0E} = \tau_E(T_R)$, où T_R est la température de référence. Les représentations de l'évolution de τ_E avec la température et la formule analytique WLF sont illustrées à la Figure 4.15. La courbe $\tau_E(T)$ en fonction de la température est très bien approchée par la formule WLF.

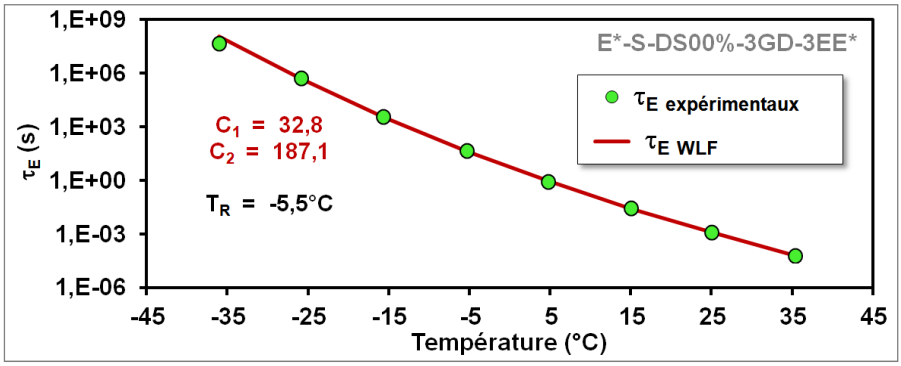


Figure 4.15 Évolution du tau (τ_E) avec la température

4.7 Résultats types et quantification des dommages

4.7.1 Quantification des dommages à l'aide des valeurs de |E*| modélisées

Le module complexe décrit le comportement temporel ou spécifique aux petites déformations. Il permet de connaître la cohésion du matériau pour divers couples température-fréquence de sollicitation. Lorsque le matériau s'endommage, sa cohésion est touchée et son module complexe est modifié. À partir des résultats de modules complexes obtenus avant et après chaque ET et pour chacun des états étudiés, l'évaluation des dommages peut alors être tracée. Comme la valeur temporelle d'un module complexe est fortement tributaire de la température et de la fréquence de sollicitation, lesquelles ne peuvent pas être exactement les mêmes d'un EE* à l'autre, il convient de modéliser le comportement à partir des résultats expérimentaux de chacun des EE* réalisés et ce, en vue d'en extrapoler les valeurs pour des couples température-fréquence de sollicitation

prédéfinis. Dans ces conditions, il est possible de quantifier de façon rigoureuse l'évolution du dommage global de l'enrobé bitumineux suite aux ET. Pour ce faire, le modèle 2S2P1D et l'équation WLF ont été retenus : le comportement de l'enrobé est décrit par sept (7) constantes pour l'un et deux (2) constantes pour l'autre. Les courbes maîtresses de la norme (|E*|) et de l'angle de phase (φ_E) du module complexe du 1er EE* constitue la référence. Dans un premier temps, la température de référence (T_R) choisie pour l'élaboration de l'ensemble des courbes maîtresses est -5,5°C. À partir de ce 1er EE*, l'évolution de la rigidité des éprouvettes d'enrobé suite aux ET se fait de façon globale à partir du calcul d'un coefficient de rigidité (C*, équation (2.31), page 133) qui permet de calculer le dommage global (D_{XGD}, équation (2.36), page 134). La Figure 4.16 illustre le niveau de dommage mesuré au 3ème EE*, soit après 3 cycles de GD (D_{XGD}).

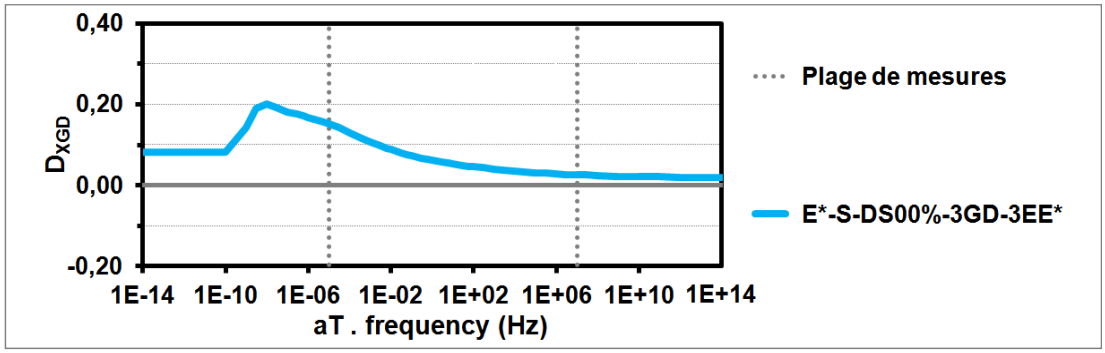


Figure 4.16 Variation du dommage en fonction de la fréquence équivalente (aT · Fr) calculée suivant le 2ème ET, soit au 3ème EE* (D_{XGD}) (T_R = -5,5°C)

De plus, l'effet du dommage sur le comportement du matériau et plus particulièrement, sur l'évolution de l'angle de phase (ϕ_C) est quantifié, à l'aide de l'équation (2.35) de la page 134. La Figure 4.17 illustre la variation du phi mesuré au 3ème EE*, soit après 3 cycles de GD (ϕ_C).

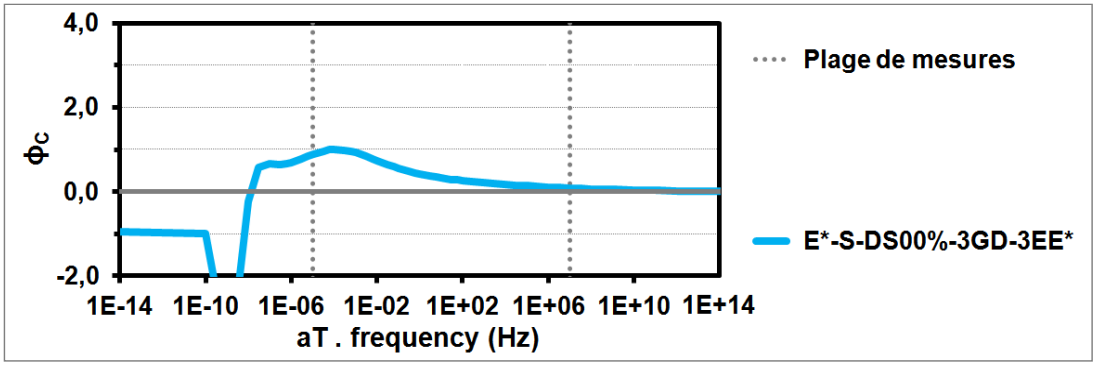


Figure 4.17 Variation du phi en fonction de la fréquence équivalente (aT · Fr) calculée suivant le 2ème ET, soit au 3ème EE* (ϕ_C) (T_R = -5,5°C)

Dans les deux cas (Figure 4.16 et Figure 4.17), le dommage générée à l'enrobé bitumineux se traduit par un effet plus marqué à hautes températures (aT · Fr faible) qu'à basses températures. En effet, cela est attribuable au comportement viscoélastique de l'enrobé.

Par ailleurs, il est important de vérifier, que la réalisation de l'EE* n'endommage pas l'enrobé. En effet, il est couramment considéré que la mesure du module complexe n'est pas en soit dommageable. Or, nos essais sont réalisés sur des éprouvettes à l'état partiellement saturé. Il est donc nécessaire de valider cette hypothèse pour l'ensemble des états étudiés. Pour ce faire, il faut se référer, non pas aux valeurs modélisées, mais bien aux valeurs calculées de la norme du module complexe (|E*|) issues des mesures expérimentales de l'EE*. Nous traitons en détail de cet aspect à la section suivante.

4.7.2 Quantification des dommages à l'aide des valeurs de |E*| calculées expérimentalement

Afin de mieux comprendre la quantification des dommages éventuellement générés par la réalisation d'un EE*, il est nécessaire d'effectuer un retour à la Figure 2.12 de la page 118.

Premièrement, à chaque palier de température, il est possible de vérifier si l'enrobé bitumineux est endommagé par la séquence de cyclage de sollicitation (SCS). Ceci s'effectue en comparant les valeurs des mesures de |E*| calculées au 1er et au 2ème 10Hz, soit au début et

à la fin d'une SCS, pour en déterminer un dommage qui soit attribuable à la SCS à un palier de température donné (D_{SCS}, équation (2.6), page 117).

Deuxièmement, il est possible de vérifier si l'enrobé bitumineux s'endommage continuellement pendant la réalisation d'un EE*. Ceci s'effectue en comparant les valeurs des mesures de |E*| calculées au 1er et au 2ème +15°C (+15°C AVANT et +15°C APRÈS), pour en déterminer un dommage qui soit attribuable aux SCS entre les +15°C et au CGD induit par la réalisation d'un EE* ($D_{entre\ les\ +15°C}$, équation (2.7), page 118).

Le Tableau 4.8 présente les valeurs des mesures de |E*| calculées expérimentalement lors du 3ème EE* sur l'enrobé à l'état sec et les valeurs des dommages calculés (D_{SCS} et $D_{entre\ les\ +15°C}$). Plus exactement, le calcul de D_{SCS} s'effectue simplement en comparant les valeurs de couleur bleu à un même palier de température (valeurs obtenues à 10Hz, Tableau 4.8). Pour le calcul de $D_{entre\ les\ +15°C}$, il faut comparer les valeurs de même couleur entre les deux paliers de 15°C (Tableau 4.8). Notamment, plusieurs valeurs sont obtenues pour $D_{entre\ les\ +15°C}$ et elles varient selon la fréquence de sollicitation.

Par ailleurs, il est possible d'observer que le dommage éventuellement généré par une séquence de cyclage de sollicitations (D_{SCS}) augmente avec la température (Tableau 4.8 et Figure 4.18).

Également, la quantification du dommage entre les deux +15°C ($D_{entre\ les\ +15°C}$) peut être simple si les températures sont similaires, comme dans le présent cas (15,0 vs 15,1°C), sinon il faut effectuer une correction aux mesures de |E*|. La méthode utilisée pour cette correction est expliquée en détail à la section 4.12.1 (p. 249). Aussi, il est possible d'observer que ce dommage éventuel augmente avec la fréquence de sollicitation (Tableau 4.8 et Figure 4.19).

Tableau 4.8 Résultats obtenus lors du 3ème EE* sur l'enrobé testé à l'état sec et quantification des dommages D_{SCS} et $D_{entre\ les\ +15°C}$

Palier de température (°C)	Fréquence (Hz)	|E*| (MPa)	D_{SCS}	$D_{entre\ les\ +15°C}$
15,0	10,05	10230	0,009	
	3,02	8379		
	1,01	6836		
	0,30	5370		
	0,10	4242		
	0,03	3268		
	10,04	10133		
-36,0	10,04	36411	0,001	
	10,06	36360		
-25,9	10,08	33256	0,002	
	10,02	33186		
-15,6	10,03	28241	0,002	
	10,00	28177		
-5,3	9,94	22005	0,002	
	10,10	21966		
4,8	9,90	15812	0,006	
	10,13	15724		
15,1	10,32	10104	0,007	0,012
	3,00	8250		0,015
	1,01	6711		0,018
	0,30	5237		0,025
	0,10	4114		0,030
	0,03	3133		0,041
	10,04	10036		0,010
25,0	9,92	5666	0,012	
	10,02	5599		
35,4	10,03	2722	0,016	
	10,07	2678		

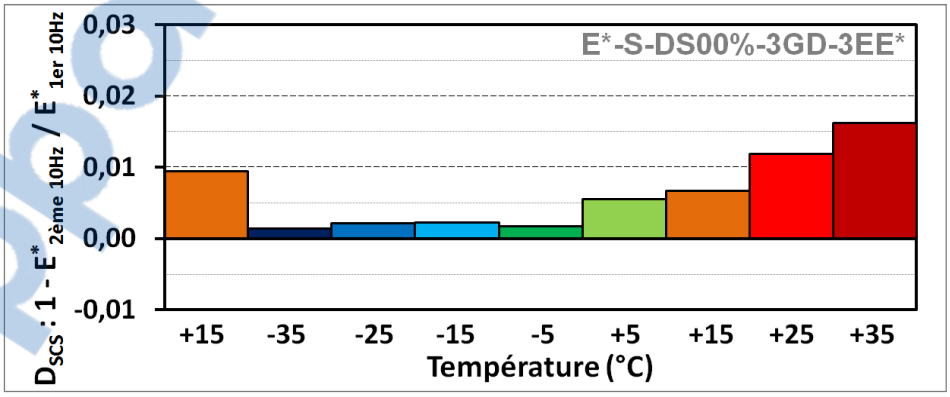


Figure 4.18 Évolution du dommage généré par la séquence de cyclage de sollicitations (D_{SCS}) en fonction du palier de température

Rapport-gratuit.com

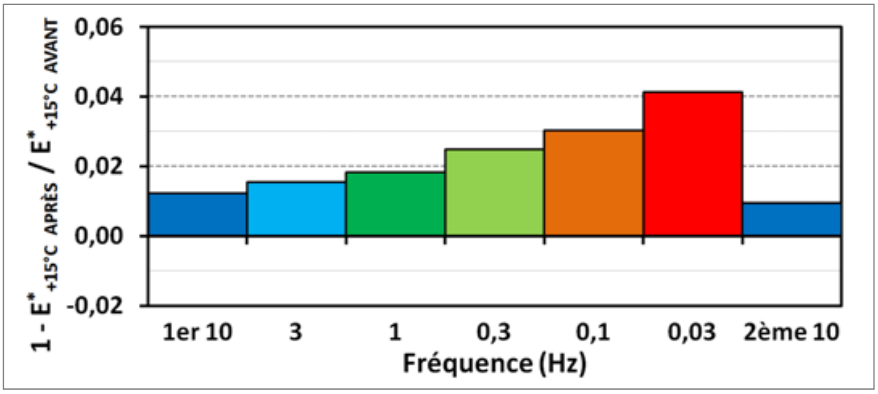


Figure 4.19 Niveau de dommage généré entre les deux paliers de +15°C ($D_{\text{entre les +15°C}}$) selon la fréquence considérée

Soulignons que, le niveau de ces "dommages", que l'on pourrait qualifier de dommages apparents, varie avec la température et la fréquence considérées et peut être, en partie, attribuable au comportement viscoélastique du matériau.

4.8 Comparaison globale des résultats d'essais

4.8.1 Représentations classiques des résultats

La Figure 4.20 présente les modules complexes suivant les EE* et les ET dans le plan de Cole et Cole, pour les cinq états étudiés. Pour l'enrobé à l'état sec (Figure 4.20A), il est possible d'observer que les points expérimentaux forment une courbe unique et ce, malgré tous les ET réalisés. Dans le cas de l'éprouvette à l'état partiellement saturé en eau ou en saumures, certaines fluctuations ponctuelles sont observables au cours d'un EE* et suivant les ET (Figure 4.20B à E). Les fluctuations au cours d'un EE* s'expliquent par la formation de glace au sein du matériau qui affecte sa rigidité.

La Figure 4.21 présente les modules complexes dans l'espace de Black, pour les cinq états étudiés. Pour l'enrobé à l'état sec (Figure 4.21A), à faible rigidité, l'angle de phase augmente toujours suite aux ET à l'exception du dernier ET ($5^{\text{ème}}$). Cette baisse de l'angle de phase peut s'expliquer, en partie, par un certain durcissement du bitume au fil du temps. Pour les

éprouvettes à l'état partiellement saturé en eau ou en saumures (Figure 4.21B à D), à faible rigidité, l'angle de phase semble diminuer avec le nombre d'ET. Toutefois, il faut être prudent quand à cette observation car les températures d'essais ne sont pas exactement les mêmes. Également, il faut souligner que la correction des mesures réalisées pour les extensomètres de 165mm placés sur les casques peut venir fausser légèrement le comportement réel à haute température.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

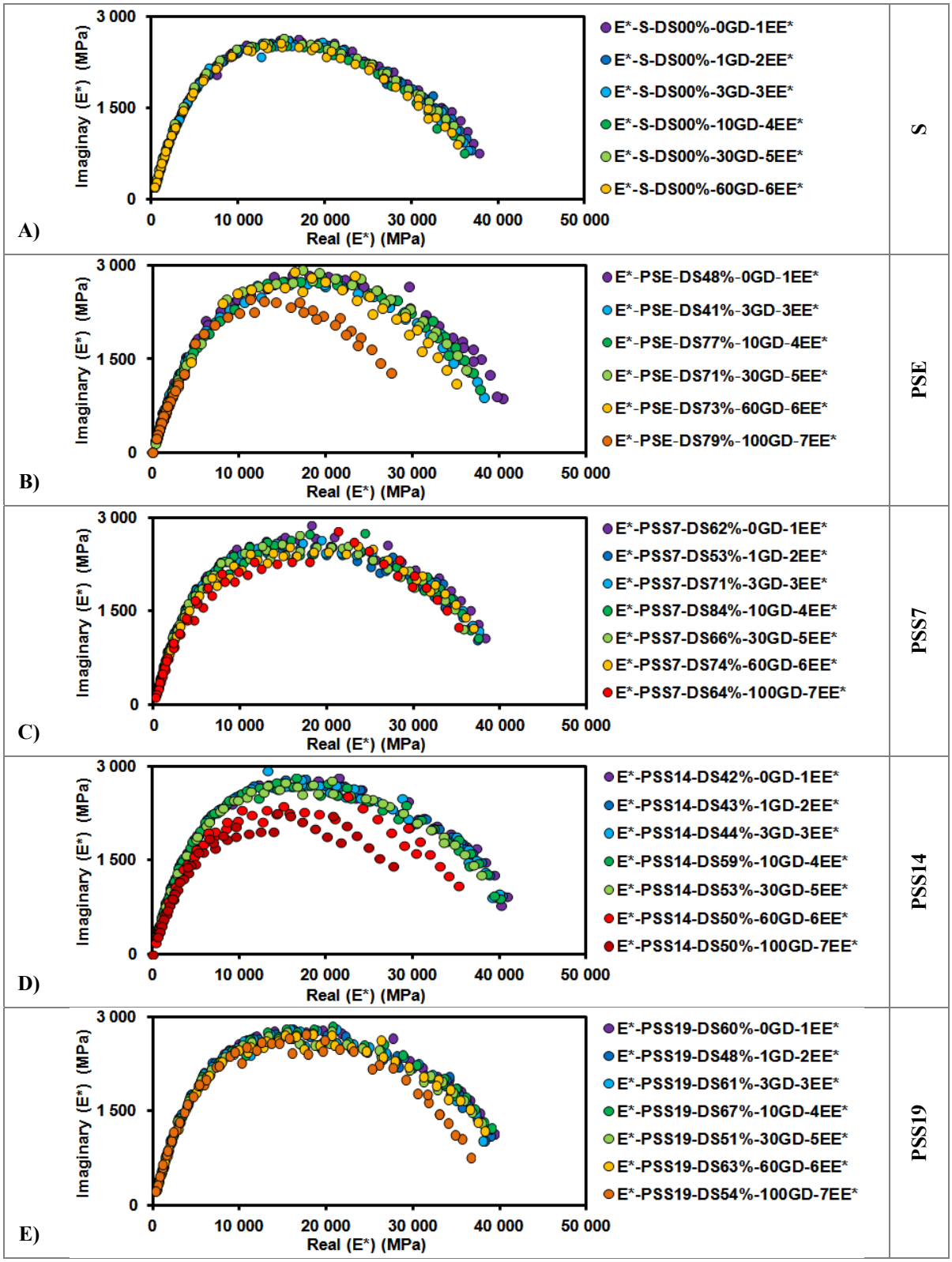


Figure 4.20 Modules complexes suivant les EE* et les ET dans le plan de Cole-Cole, pour les cinq états étudiés

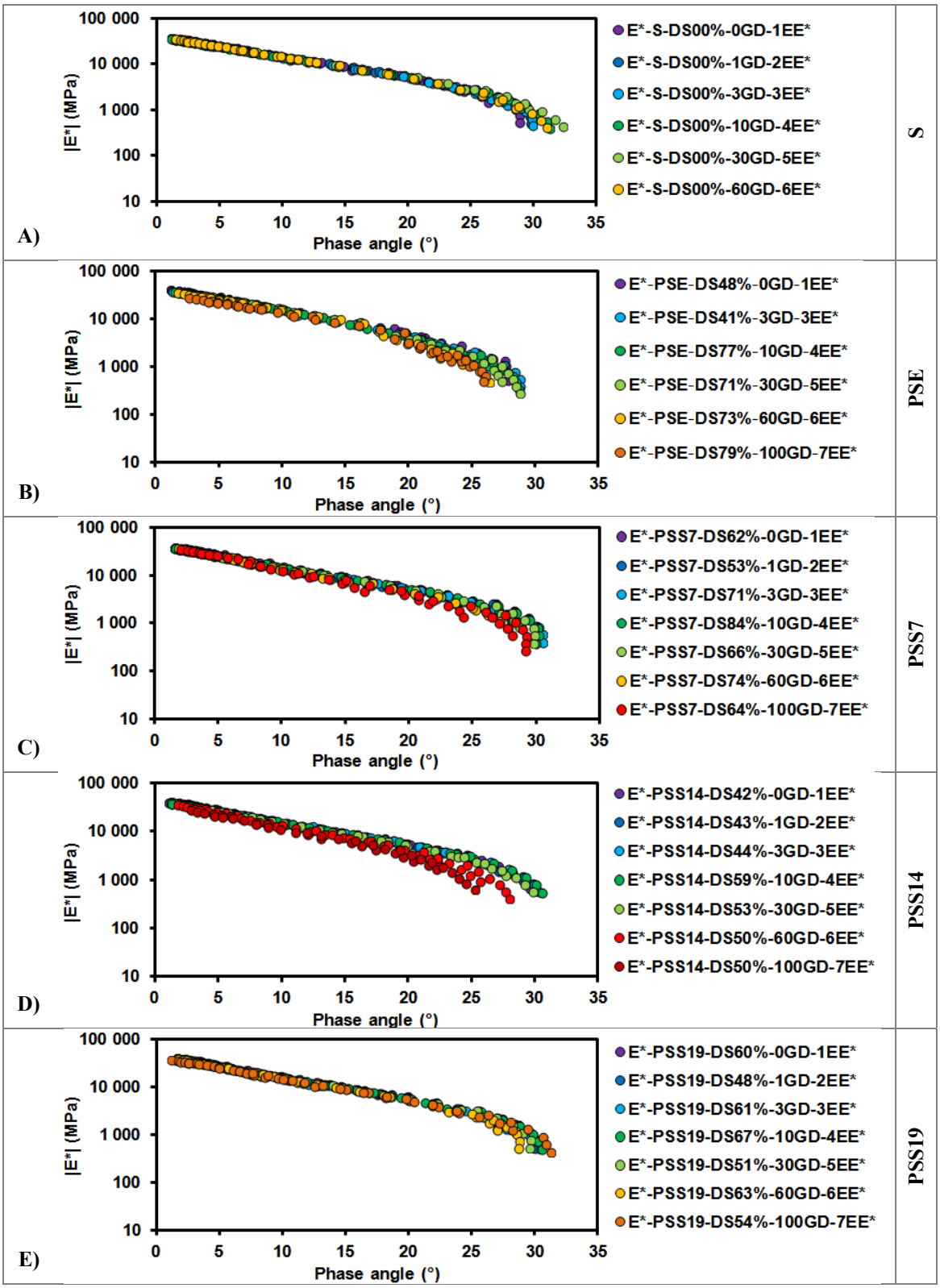


Figure 4.21 Normes des modules complexes suivants les EE* et les ET dans l'espace de Black, pour les cinq états étudiés

4.8.2 Détermination des paramètres 2S2P1D

La modélisation du comportement en petites déformations de l'enrobé bitumineux suivants les états étudiés et soumis à des cycles de GD a été réalisée à l'aide du modèle 2S2P1D et l'équation WLF. Le Tableau 4.9 présente la synthèse des paramètres du modèle 2S2P1D et l'équation WLF déterminés pour l'enrobé testés suivants les ET, pour les cinq états étudiés.

Tableau 4.9 Détermination des paramètres du modèle 2S2P1D et l'équation WLF suivant les différents ET, pour les cinq états étudiés (T_R = -5,5°C)

État	Cycles de gel-dégel réalisés	Essai de module réalisé	Constantes								
			2S2P1D							WLF	
			E_{00} (MPa)	E_0 (MPa)	k	h	δ	β	τ_{E0} (s)	C_1	C_2
S	0 GD	1 EE*	160	41337	0,14	0,40	2,52	3969	77,1	41,1	235,6
	1 GD	2 EE*	131	40818	0,14	0,40	2,52	3905	46,7	32,2	183,4
	3 GD	3 EE*	144	40443	0,14	0,40	2,55	3455	47,5	32,5	186,6
	10 GD	4 EE*	119	40126	0,14	0,41	2,58	3113	23,1	26,6	152,8
	30 GD	5 EE*	109	40454	0,14	0,41	2,50	3018	25,5	34,8	214,7
	60 GD	6 EE*	134	40087	0,14	0,40	2,60	3215	35,7	37,6	218,8
	100 GD	7 EE*	----	----	----	Rupture de l'éprouvette au début de l'essai				----	----	----
PSE	0 GD	1 EE*	177	44320	0,15	0,39	2,94	4001	93,6	47,5	268,0
	1 GD	2 EE*	----	----	----	----	----	Non mesuré	----	----	----	----	----
	3 GD	3 EE*	131	42800	0,15	0,40	3,21	5220	71,2	61,7	343,4
	10 GD	4 EE*	98	42463	0,16	0,39	3,49	8712	61,2	17,5	126,9
	30 GD	5 EE*	94	42066	0,16	0,40	4,06	6983	21,6	65,4	394,2
	60 GD	6 EE*	126	39260	0,16	0,35	2,76	11765	4,8	36,0	214,7
	100 GD	7 EE*	97	32854	0,17	0,39	4,13	3620	3,1	37,0	214,3
PSS7	0 GD	1 EE*	110	44051	0,14	0,39	2,53	5929	14,5	34,3	207,8
	1 GD	2 EE*	170	43947	0,13	0,39	2,54	3283	11,2	30,5	183,9
	3 GD	3 EE*	117	42503	0,14	0,40	2,64	4286	8,8	31,1	198,0
	10 GD	4 EE*	148	43900	0,13	0,40	2,61	3730	2,9	25,9	170,6
	30 GD	5 EE*	125	42632	0,14	0,40	2,68	4968	1,8	25,8	184,7
	60 GD	6 EE*	251	43922	0,13	0,36	2,47	3069	0,7	31,3	215,1
	100 GD	7 EE*	121	40763	0,15	0,41	4,02	3422	0,5	27,8	212,6
PSS14	0 GD	1 EE*	152	46337	0,13	0,40	2,58	3991	54,7	30,9	180,9
	1 GD	2 EE*	157	46301	0,13	0,40	2,51	3910	35,1	32,6	195,8
	3 GD	3 EE*	167	45030	0,14	0,40	2,52	3393	33,6	40,1	253,3
	10 GD	4 EE*	143	45256	0,14	0,40	2,50	3823	19,3	29,8	186,2
	30 GD	5 EE*	162	45303	0,14	0,40	2,63	3599	9,8	28,6	187,4
	60 GD	6 EE*	164	40773	0,14	0,39	3,46	3657	4,2	30,9	204,8
	100 GD	7 EE*	213	36907	0,13	0,36	2,86	6914	0,1	15,2	105,7
PSS19	0 GD	1 EE*	118	45717	0,14	0,39	2,47	6384	14,4	30,2	185,1
	1 GD	2 EE*	155	44924	0,14	0,39	2,52	3358	11,6	29,8	190,9
	3 GD	3 EE*	143	44832	0,14	0,40	2,55	3570	10,2	28,6	187,7
	10 GD	4 EE*	146	44849	0,14	0,40	2,56	3387	7,4	30,5	203,3
	30 GD	5 EE*	136	44084	0,14	0,40	2,55	4467	8,0	31,1	215,4
	60 GD	6 EE*	164	44444	0,14	0,40	2,70	4000	11,4	33,5	215,0
	100 GD	7 EE*	108	41027	0,15	0,42	2,96	3241	12,6	19,0	124,4

La Figure 4.22 et la Figure 4.23 illustrent l'évolution de la rigidité normalisée de l'enrobé bitumineux, soit le module statique (E_{00}) et le module vitreux (E_0) respectivement, en fonction du nombre de cycles de GD pour chacun des cinq états étudiés. Dans le cas de l'enrobé aux états S et PSE, la baisse du module statique (E_{00}, Figure 4.22) et celle du module vitreux (E_0, Figure 4.23) est visible avec le nombre de cycles de gel-dégel (GD).

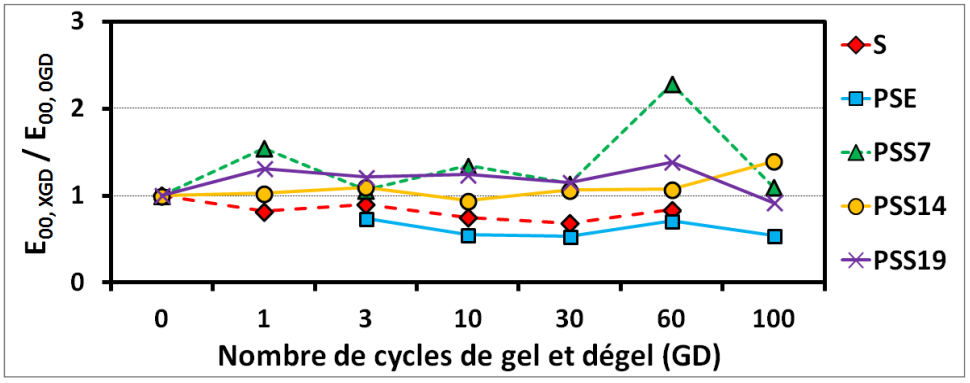


Figure 4.22 Évolution du module statique suivant le nombre de cycles de GD ($E_{00, XGD}$) et normalisé en référence au module statique avant les ET ($E_{00, 0GD}$) (paramètres déterminés du modèle rhéologique 2S2P1D)

Pour les enrobés partiellement saturés en saumures, la rigidité à haute température (E_{00}) reste sensiblement stable avec les cycles de GD (Figure 4.22), alors que la rigidité à basse température (E_0) finie par chuter après 30 ou 60 cycles de GD (Figure 4.23).

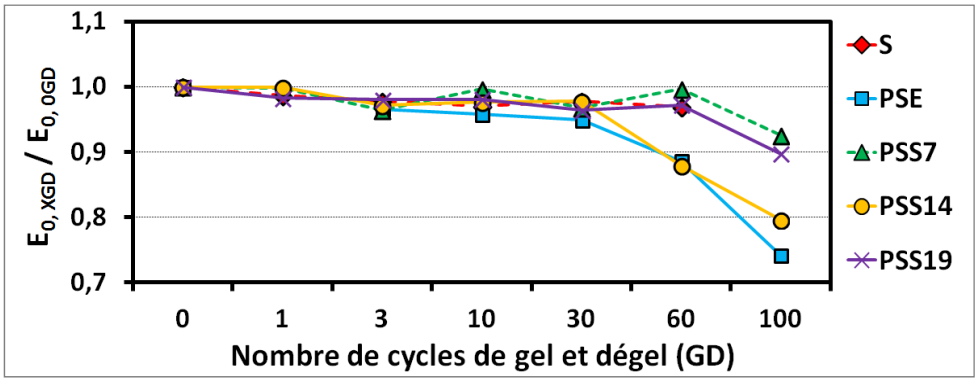


Figure 4.23 Évolution du module vitreux suivant le nombre de cycles de GD ($E_{0, XGD}$) et normalisé en référence au module vitreux avant les ET ($E_{0, 0GD}$) (paramètres déterminés du modèle rhéologique 2S2P1D)

4.9 Comparaison normalisée des résultats

4.9.1 Utilité de cette méthode

Malgré des rigidités nettement différentes, il est possible de vérifier si des matériaux (bitumes, mastics, graves et enrobés) ont un comportement similaire en petites déformations et ce, sans avoir au préalable déterminé les paramètres d'un modèle rhéologique. Pour ce faire, il est nécessaire de normaliser les résultats de modules complexes en référence aux modules statique et vitreux, propre à un EE*, et de tracer les résultats suivant une échelle s'échelonnant de 0 à 1. En particulier, il est possible d'appliquer cette méthode au plan Cole et Cole (Figure 4.24), à l'espace de Black (Figure 4.25) et aux courbes maîtresses. Il suffit tout simplement d'avoir déterminé au préalable les rigidités minimale (E_{00}, le module statique) et maximale (E_0, le module vitreux) du matériau (détails à la section 4.6.2). Si une courbe unique est formée pour les différents EE*, on peut admettre que les différents matériaux présentent un comportement similaire. En conséquent, les paramètres k, h, δ, β du modèle rhéologique 2S2P1D sont nécessairement similaires. Par ailleurs, cela est observable, lorsque les matériaux sont constitués d'un même bitume. Cette normalisation des résultats expérimentaux est utilisée afin de vérifier la similitude du comportement de l'enrobé bitumineux suivants les divers états et au fil des cycles de GD. L'ensemble des résultats de modules complexes normalisés est présenté à la Figure 4.24 et à la Figure 4.25 pour le plan de Cole-Cole et l'espace de Black respectivement. Les résultats présentés à la Figure 4.24A et à la Figure 4.25A montrent que le comportement de l'enrobé à l'état S reste similaire suivants les cycles de GD. Par ailleurs, plus la teneur en sel est élevée, plus les éprouvettes partiellement saturés avec des saumures présentent un comportement qui reste sensiblement constant avec les cycles de GD (Figure 4.24C à E et Figure 4.25C à E). Par contre, le comportement de l'éprouvette testée à l'état PSE évolue considérablement avec les cycles de GD (Figure 4.24B et Figure 4.25B). Notamment, pour cet état, un point d'inflexion, et plus particulièrement une cassure et une translation, est clairement visible au sein de la courbe (Figure 4.25B). Cela semble indiquer que le comportement de l'éprouvette partiellement saturée avec de l'eau (PSE) est nettement différent des autres éprouvettes testées suivants les états étudiés.

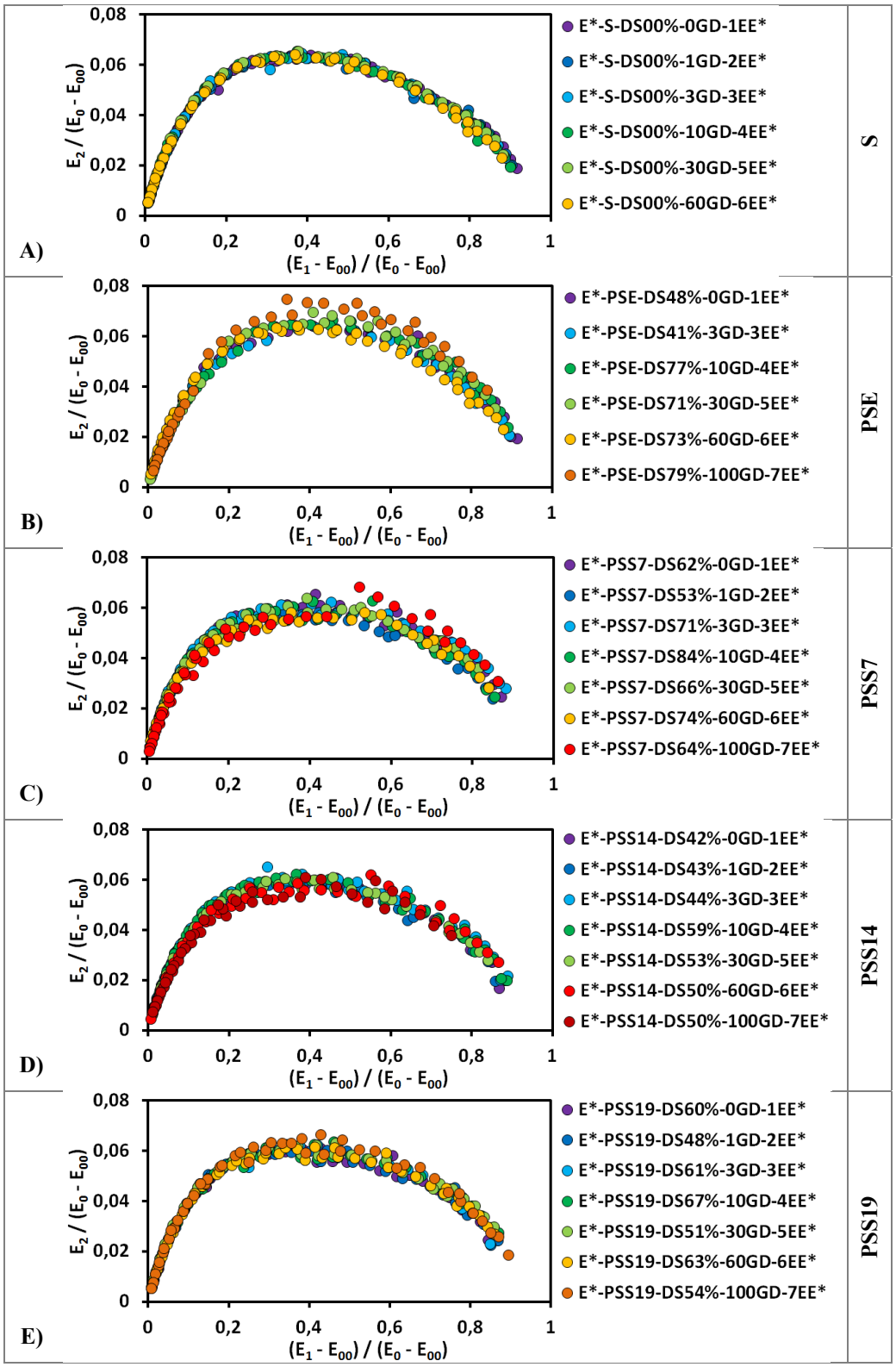


Figure 4.24 Plan de Cole-Cole normalisé suivant les ET et les EE* pour les cinq états étudiés

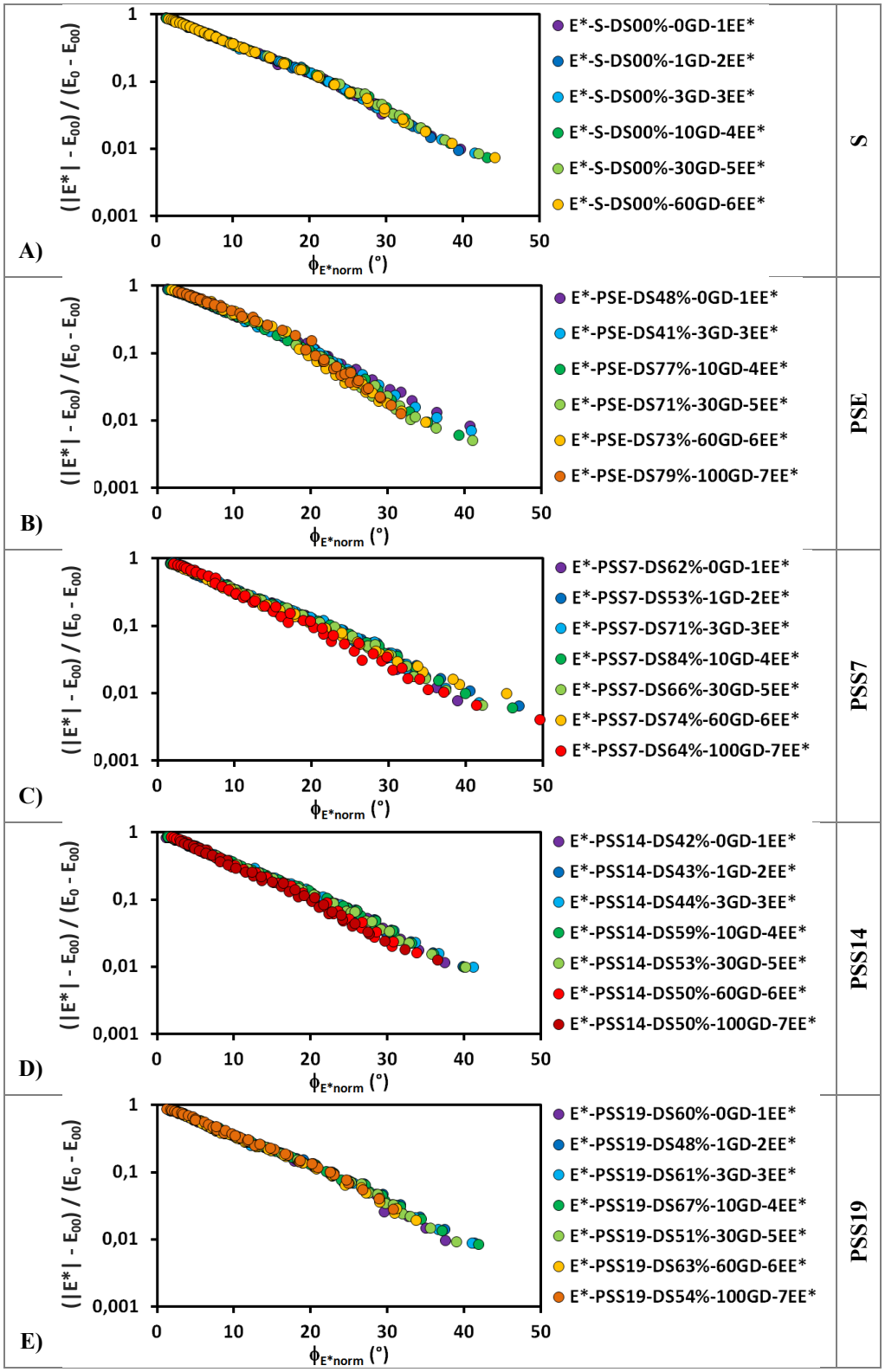


Figure 4.25 Espace de Black normalisé suivant les ET et les EE* pour les cinq états étudiés

La superposition des plans Cole-Cole normalisés de l'ensemble des résultats, tel que présenté à la Figure 4.26, permet de constater que le comportement de l'enrobé selon les différents états étudiés est similaire sauf pour l'état PSE et plus particulièrement, suivant le 4ème ET (5ème, 6ème et 7ème EE*, carrés de couleur vert pâle, jaune ou orange). En conséquent, il est possible de considérer une même valeur pour chacun des paramètres k, h, δ, β du modèle rhéologique 2S2P1D pour les éprouvettes de l'enrobé bitumineux testées dans les états S, PSS7, PSS14 et PSS19.

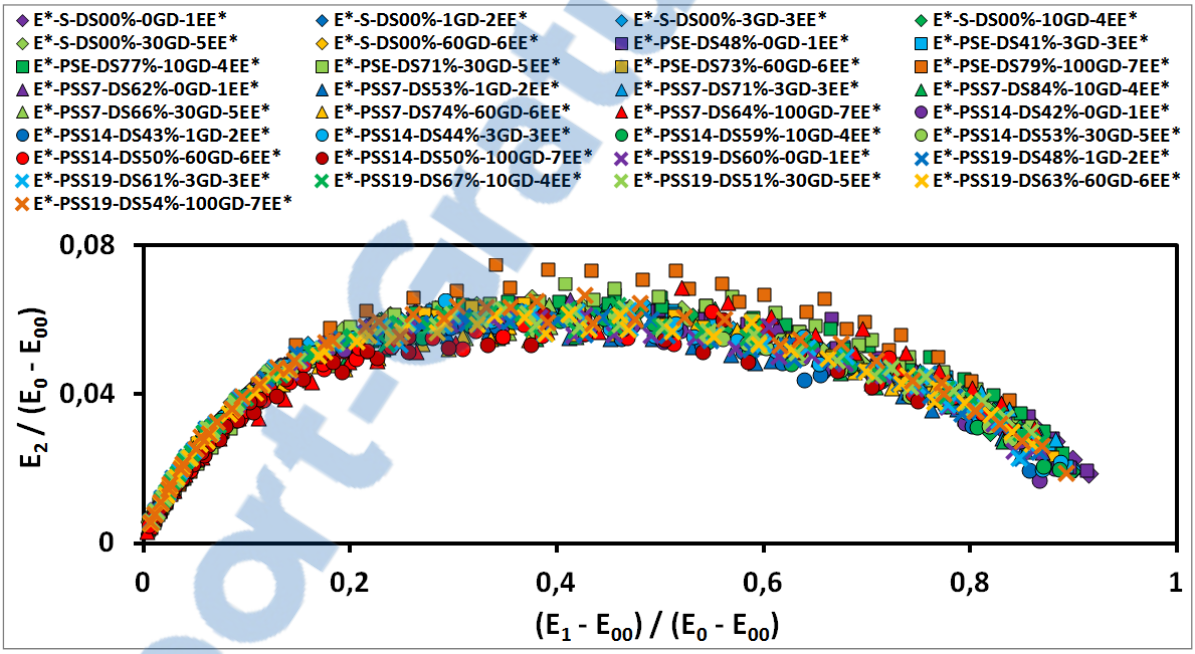


Figure 4.26 Plans de Cole-Cole normalisés pour tous les essais des cinq états

4.9.2 Modélisations des modules complexes en considérant des paramètres fixés pour le modèle rhéologique 2S2P1D

Rappelons que le fait de fixer des paramètres et particulièrement k, h, δ et β est envisageable lorsque les différents matériaux ont un comportement similaire. De plus, en fixant les paramètres k, h, δ et β dans la modélisation des modules complexe, ceci a comme avantage de se soustraire à la variabilité inhérente aux conditions propres et variables lors de la réalisation d'un EE* et à l'imprécision relative à la détermination, de façon manuel, des paramètres lors de la modélisation.

Rapport-Gratuit.com

La normalisation de l'Espace de Black et des plans de Cole-Cole (Figure 4.24 et Figure 4.25) a permis de mettre en perspective que le comportement est similaire pour les états S, PSS7, PSS14 et PSS19. En regardant, plus en détail, les valeurs obtenues du calage individualisé du modèle 2S2P1D aux valeurs mesurées pour chaque EE*, tel que présentées au Tableau 4.9, on constate qu'effectivement les valeurs de ces paramètres sont très similaires pour les éprouvettes d'enrobé testées aux états S, PSS7, PSS14 et PSS19. Pour ces états, une valeur moyenne pour chacun des paramètres k, h, δ et β est calculée à partir de l'ensemble des valeurs obtenues du 1er au 7ème EE*, à l'exception du 7ème EE* du PSS7, du 6ème et 7ème EE* du PSS14 et du 7ème EE* du PPS19. En effet, pour ces exceptions les écarts aux valeurs moyennes sont trop importants. Par conséquent, pour les états S, PSS7, PSS14 et PSS19, les valeurs moyennes de k, h, δ et β sont fixées à 0,140 ; 0,40 ; 2,56 et 4000 respectivement. Pour l'éprouvette testée à l'état PSE, les paramètres k, h, δ et β sont fixés à 0,155 ; 0,40 ; 3,40 et 4000 respectivement. Les valeurs révisées des paramètres k, h, δ et β sont reportées au Tableau 4.10. Il est important de souligner que le fait de changer la valeur de ces paramètres nécessite une révision complète de tous les autres paramètres du modèle 2S2P1D et de l'équation WLF. À partir des nouvelles valeurs de k, h, δ et β, le calage de 2S2P1D et WLF pour tous les EE* a été reconsidéré de manière à caler aux mieux les résultats expérimentaux.

En considérant les nouvelles valeurs révisées pour 2S2P1D et WLF, une nouvelle modélisation a été effectuée pour chacun des EE*. Les points expérimentaux et les valeurs modélisées avec les nouveaux paramètres fixés dans le plan de Cole-Cole et l'espace de Black sont illustrés à la Figure 4.27 et à la Figure 4.28.

La valeur des tau (τ) et la représentation de l'équation WLF sont illustrées à la Figure 4.29. Pour les éprouvettes partiellement saturées en eau et avec des saumures à des concentrations en sel de l'ordre de 7 et 14% (Figure 4.29B à D), le principe d'équivalence temps-température est de moins en moins respecté au fil des cycles de GD : accentuation de l'écart entre les points expérimentaux et la formule WLF.

L'évolution de la fonction de translation a_T en fonction de la température et la représentation de l'équation WLF sont illustrées à la Figure 4.30. Le coefficient de translation (a_T) sert à l'établissement des courbes maîtresses illustrées à la Figure 4.31 et à la Figure 4.32.

En référence à ces dernières figures (Figure 4.27 à Figure 4.32), de façon générale, la modélisation avec des paramètres k, h, δ et β fixés se traduit généralement par un bon calage des points expérimentaux.

Tableau 4.10 Paramètres 2S2P1D fixés pour tous les essais

État	Cycles de gel-dégel réalisés	Essai de module réalisé	Constantes												
			2S2P1D						WLF			WLF			
			E_{00} (MPa)	E_0 (MPa)	k	h	δ	β	τ_{0E} (S) (-5,5°C)	C_1	C_2	τ_E (S) (+4,7°C)	C_1	C_2
S	0 GD	1 EE*	150	41499	0,14	0,40	2,56	4000	80,8	36,8	206,3	1,64	36,8	225,5
	1 GD	2 EE*	149	41009	0,14	0,40	2,56	4000	47,7	32,0	181,2	0,93	31,2	196,8
	3 GD	3 EE*	138	40719	0,14	0,40	2,56	4000	47,9	32,8	187,1	0,92	29,5	187,2
	10 GD	4 EE*	103	40385	0,14	0,40	2,56	4000	37,5	35,1	202,1	0,74	31,4	199,6
	30 GD	5 EE*	125	40998	0,14	0,40	2,56	4000	26,0	35,3	214,8	0,64	32,4	215,3
	60 GD	6 EE*	124	40000	0,14	0,40	2,56	4000	34,2	37,4	217,8	0,74	34,5	218,4
	100 GD	7 EE*	----	----	----	Rupture de l'éprouvette au début de l'essai						----	----	----
PSE	0 GD	1 EE*	131	44115	0,16	0,40	3,40	4000	175,9	48,1	266,4	1,0920	32,9	210,1
	1 GD	2 EE*	----	----	----	----	----	----	Non mesuré			----	----	----
	3 GD	3 EE*	130	42689	0,16	0,40	3,40	4000	84,8	61,6	343,6	0,3711	59,4	344,0
	10 GD	4 EE*	143	42459	0,16	0,40	3,40	4000	53,5	17,2	126,9	0,0599	17,7	126,4
	30 GD	5 EE*	164	42640	0,16	0,40	3,40	4000	8,7	37,1	214,7	0,0037	37,8	214,5
	60 GD	6 EE*	268	40663	0,16	0,40	3,40	4000	8,3	59,9	329,8	0,0015	40,1	214,0
	100 GD	7 EE*	203	34656	0,16	0,40	3,40	4000	1,0	37,7	214,1	0,0016	35,5	214,8
PSS7	0 GD	1 EE*	151	44734	0,14	0,40	2,56	4000	13,2	30,5	184,8	0,4023	33,6	222,5
	1 GD	2 EE*	131	42301	0,14	0,40	2,56	4000	14,4	32,9	202,9	0,4302	31,4	214,8
	3 GD	3 EE*	129	42661	0,14	0,40	2,56	4000	7,6	27,3	170,3	0,2974	28,5	198,2
	10 GD	4 EE*	138	42578	0,14	0,40	2,56	4000	3,4	18,6	117,9	0,1684	14,9	118,8
	30 GD	5 EE*	152	44957	0,14	0,40	2,56	4000	1,2	23,9	174,6	0,0831	22,3	168,6
	60 GD	6 EE*	199	42664	0,14	0,40	2,56	4000	1,1	30,1	215,3	0,0541	20,5	152,0
	100 GD	7 EE*	173	42277	0,14	0,40	2,56	4000	0,1	25,4	212,9	0,0069	24,0	213,0
PSS14	0 GD	1 EE*	157	44384	0,14	0,40	2,56	4000	68,2	31,3	183,9	1,976	37,2	239,7
	1 GD	2 EE*	150	45531	0,14	0,40	2,56	4000	49,9	34,6	204,3	1,206	36,3	237,3
	3 GD	3 EE*	148	44511	0,14	0,40	2,56	4000	37,8	30,7	187,2	1,151	28,5	187,6
	10 GD	4 EE*	136	44377	0,14	0,40	2,56	4000	24,2	30,1	186,2	0,813	26,5	186,9
	30 GD	5 EE*	147	44677	0,14	0,40	2,56	4000	9,7	31,4	211,5	0,426	29,0	211,9
	60 GD	6 EE*	236	37653	0,14	0,40	2,56	4000	1,9	21,2	137,8	0,073	18,1	139,6
	100 GD	7 EE*	250	35000	0,14	0,40	2,56	4000	0,1	15,2	111,8	0,014	11,9	113,0
PSS19	0 GD	1 EE*	150	45901	0,14	0,40	2,56	4000	15,8	30,0	185,1	0,53	28,5	195,0
	1 GD	2 EE*	141	44260	0,14	0,40	2,56	4000	19,3	30,8	190,8	0,66	27,8	194,8
	3 GD	3 EE*	129	44463	0,14	0,40	2,56	4000	11,0	26,9	177,8	0,52	25,1	189,1
	10 GD	4 EE*	140	44941	0,14	0,40	2,56	4000	7,2	30,2	203,3	0,37	28,2	203,6
	30 GD	5 EE*	150	44991	0,14	0,40	2,56	4000	6,7	31,4	215,3	0,36	28,9	215,8
	60 GD	6 EE*	150	43884	0,14	0,40	2,56	4000	9,8	33,0	215,0	0,44	32,4	225,1
	100 GD	7 EE*	119	41284	0,14	0,40	2,56	4000	6,7	27,3	178,8	0,41	25,2	179,4

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

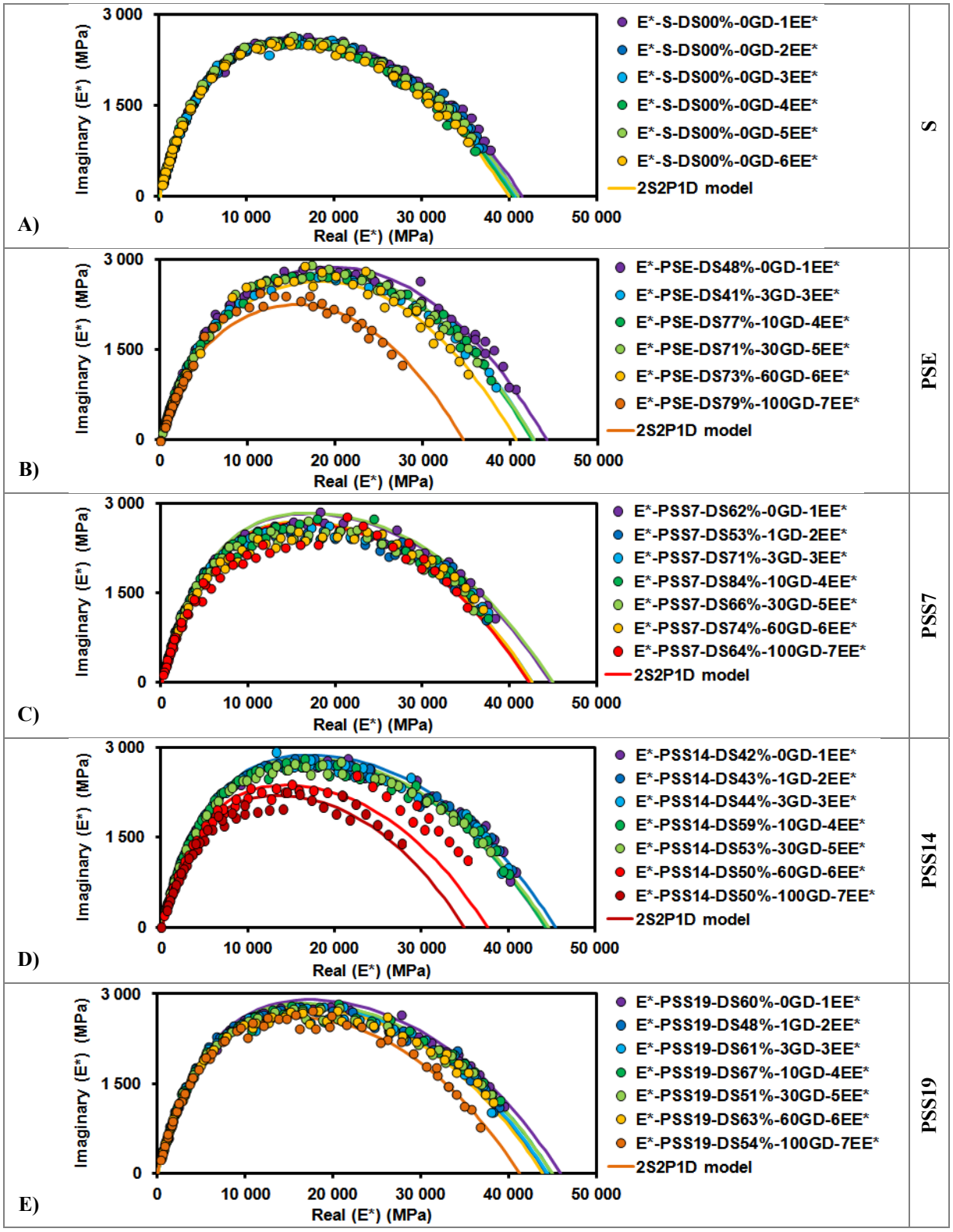


Figure 4.27 Module complexe dans le plan de Cole et Cole pour tous les essais des cinq états avec des paramètres fixés pour le modèle 2S2P1D

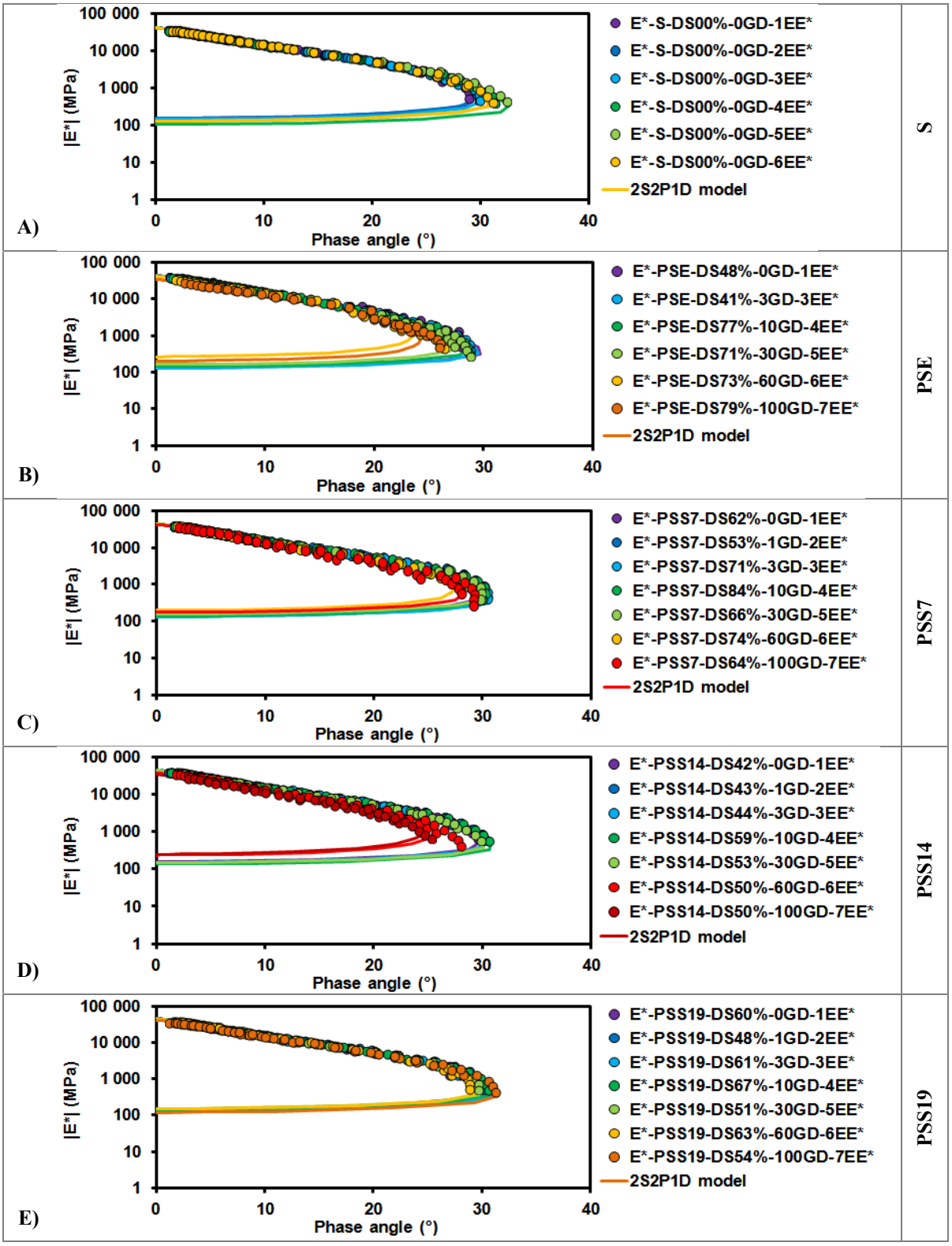


Figure 4.28 Norme du module complexe dans l'espace de Black pour tous les essais avec des paramètres fixés pour le modèle 2S2P1D

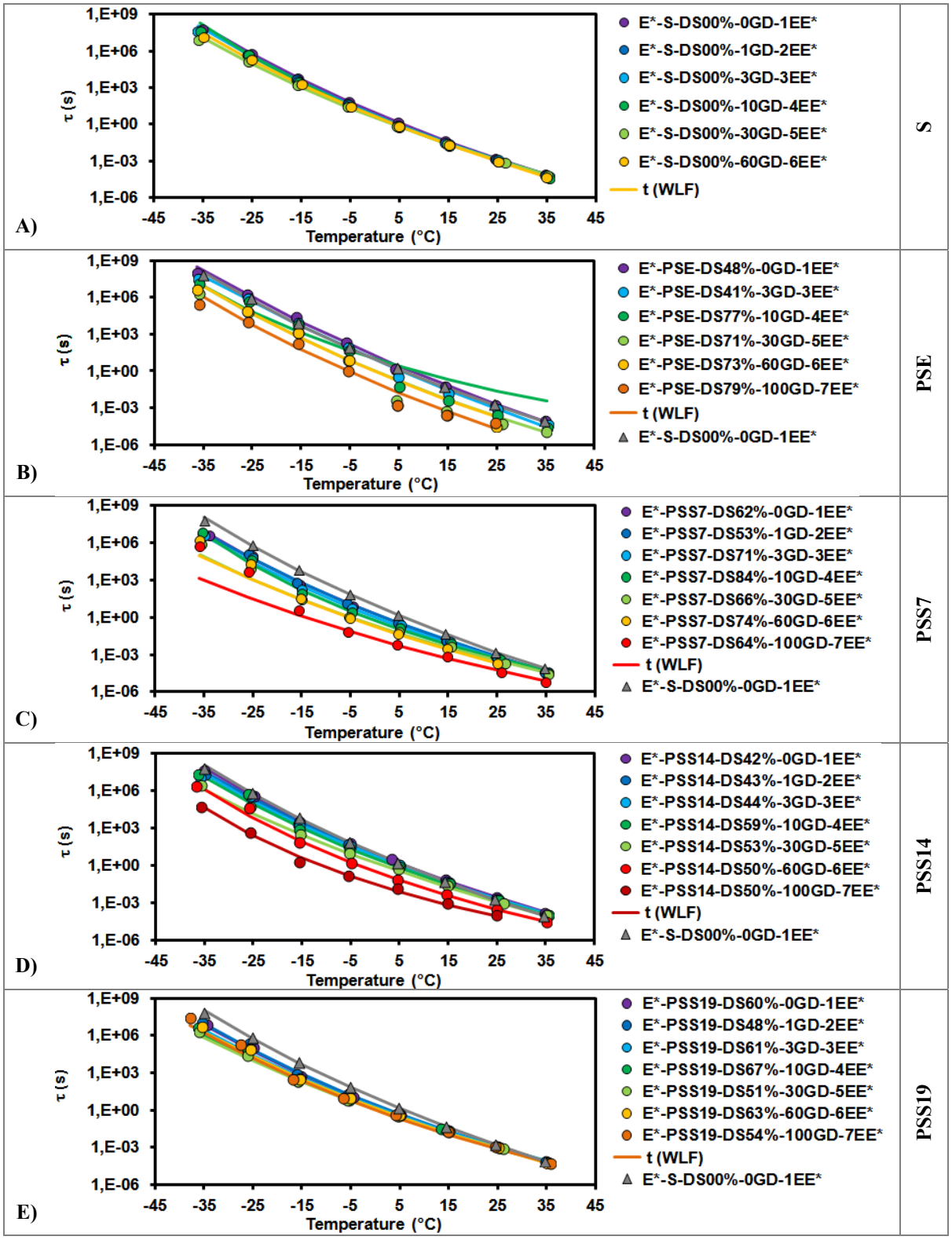


Figure 4.29 Évolution du tau avec la température pour les cinq états étudiés en considérant des paramètres fixés pour le modèle 2S2P1D (référence : E*-S-DS00%-0GD-1EE*)

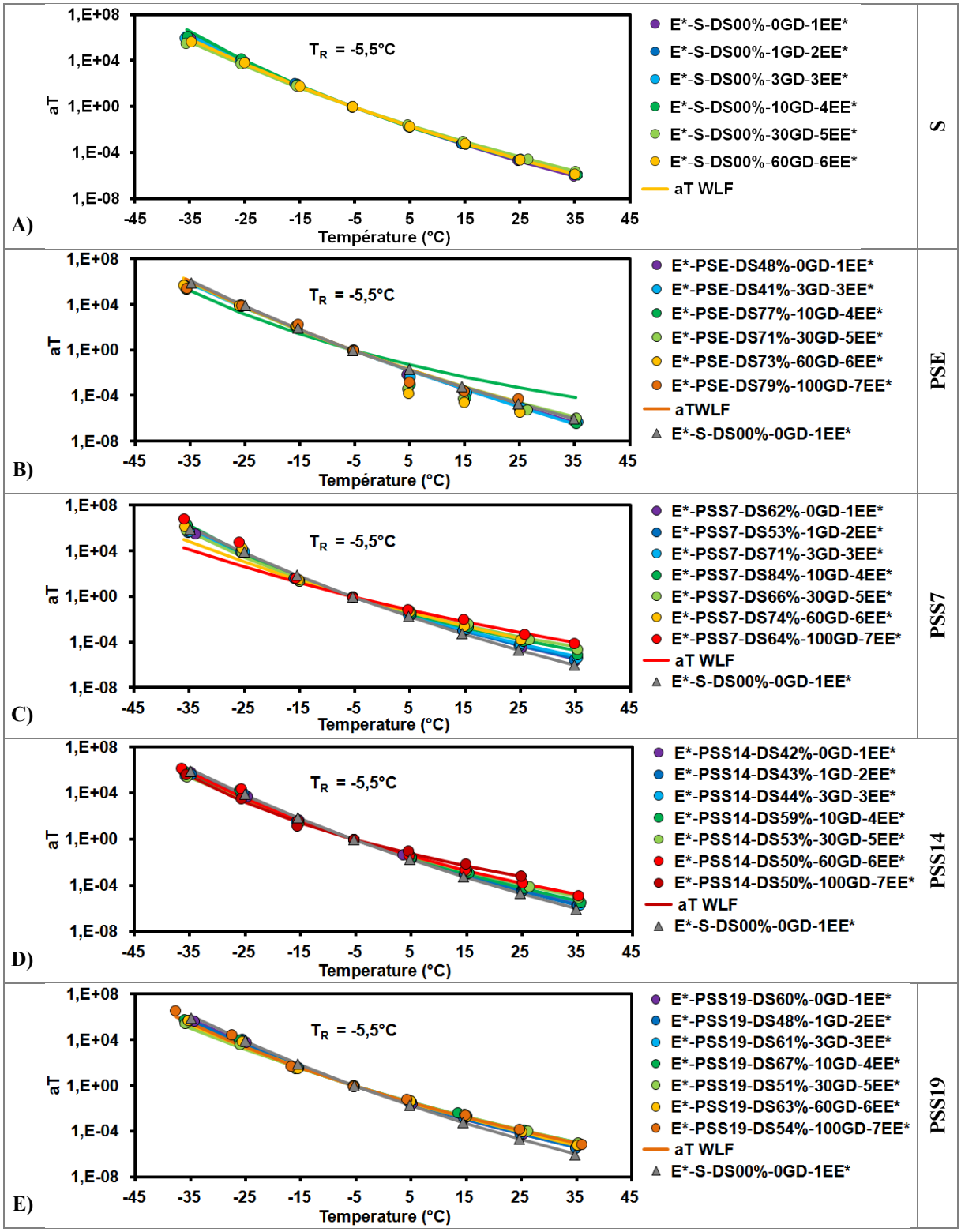


Figure 4.30 Évolution d'a_T avec la température pour les cinq états étudiés avec des paramètres fixés pour 2S2P1D et WLF (références : θ de -5,5°C et E*-S-DS00%-0GD-1EE*)

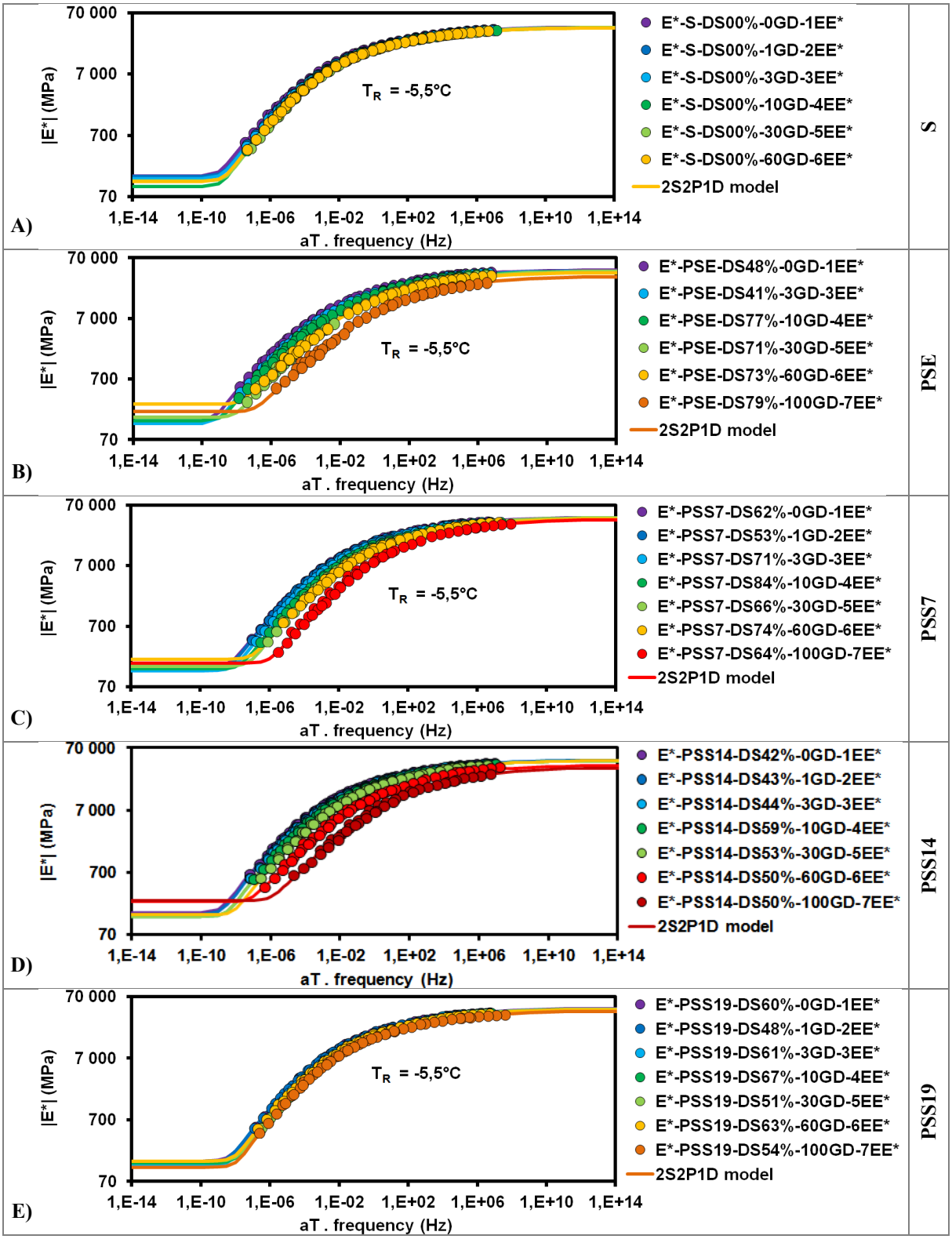


Figure 4.31 Courbe maîtresse de la norme du module complexe pour tous les essais des états étudiés avec paramètres fixés pour 2S2P1D (température de référence de -5,5°C, T_R)

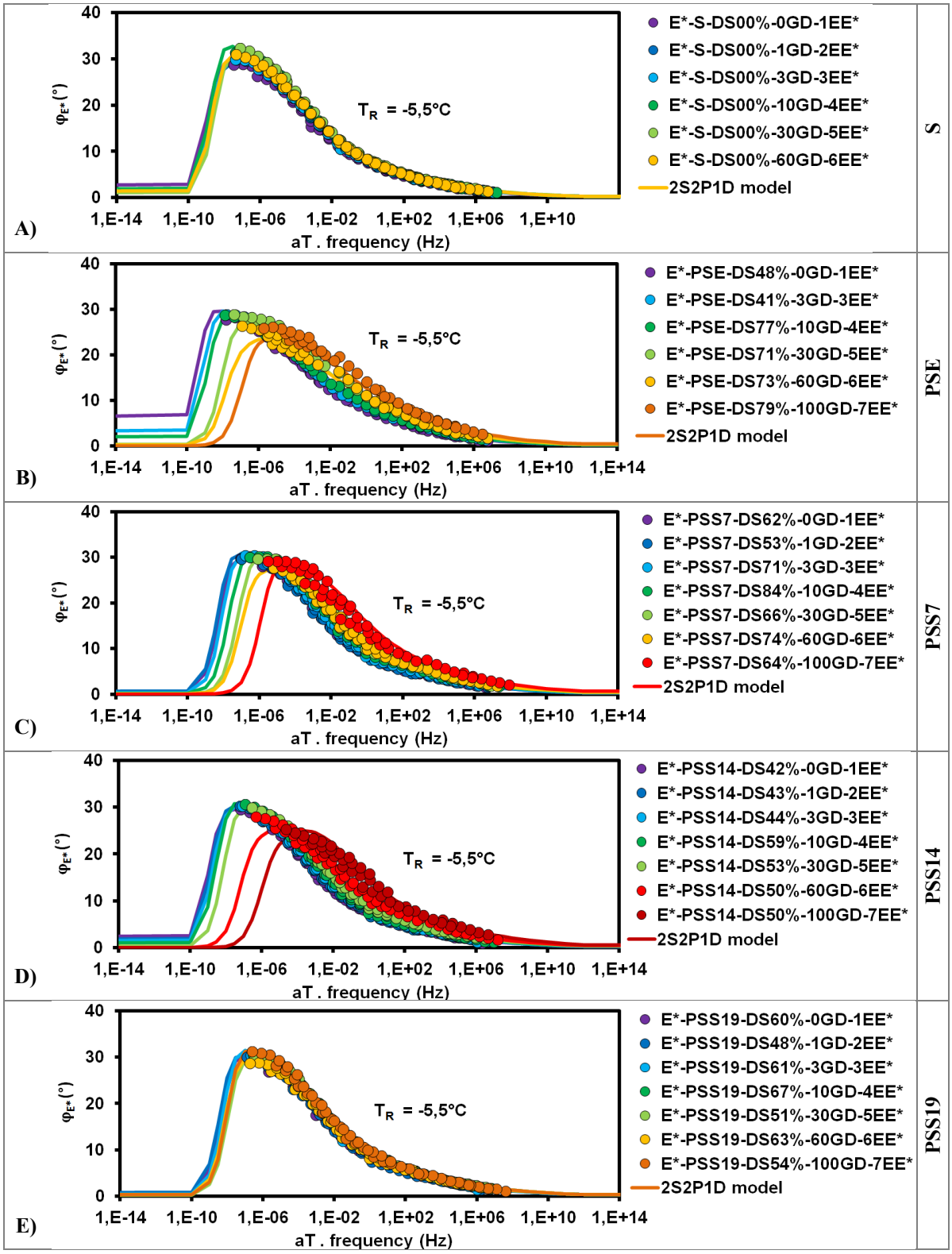


Figure 4.32 Courbe maîtresse de l'angle de phase du module complexe pour tous les essais avec paramètres fixés pour le modèle 2S2P1D (température de référence de -5,5°C, T_R)

Étant donné que les valeurs des paramètres k, h, δ et β sont fixées, la répercussion des cycles de GD peut s'effectuer simplement en analysant les valeurs des modules statique (E_{00}) et vitreux (E_0) et du temps de relaxation (τ_E à une température donnée et τ_{E0} à la température de référence).

La Figure 4.33 illustre l'évolution du module vitreux suivant le nombre de cycles de GD ($E_{0,\,XGD}$) et normalisé en référence au module vitreux avant les ET ($E_{0,\,0GD}$) pour chaque état. Pour chaque état, les valeurs d'E_0 restent sensiblement constantes et ce, même après 30 ou 60 cycles de gel et dégel, tel qu'illustrée à la Figure 4.33.

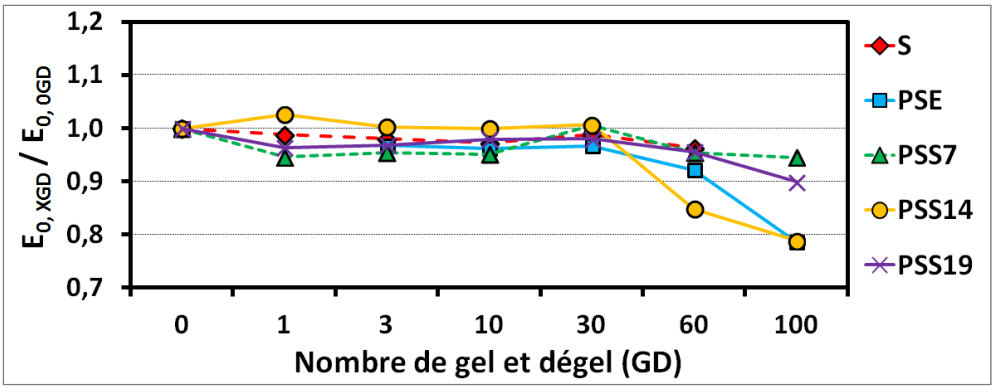


Figure 4.33 Normalisation d'E_0 par état avec le nombre de cycles GD (paramètres fixés pour le modèle rhéologique 2S2P1D)

La Figure 4.34 illustre l'évolution du module statique suivant le nombre de cycles de GD ($E_{00,\,XGD}$) et normalisé en référence au module vitreux avant les ET ($E_{00,\,0GD}$) pour chaque état. Pour les valeurs d'E_{00} (Figure 4.34), seul l'enrobé aux états S et PSS19 présente une légère baisse avec le nombre de cycles de GD. Cela semble tout à fait improbable. Il semble bien, qu'encore une fois, les valeurs d'E_{00} ne permettent pas de se coller à la réalité (Figure 4.22 et Figure 4.34), soit à l'observation d'une diminution de la rigidité de l'enrobé bitumineux avec le nombre de cycles de GD, tel que montrée par les valeurs d'E_0 (Figure 4.33). Finalement, ceci peut être expliqué par un manque de résultats aux hautes températures et aux basses fréquences, lesquels permettraient une meilleure détermination de la valeur d'E_{00}. Il est possible d'observer cela en visualisant la Figure 4.31B à E. À certaines

occasions, la valeur d'E_{00} (valeur en ordonnée) déterminée par la modélisation (ligne pleine) semble contradictoire vis-à-vis de l'ensemble des résultats expérimentaux. En effet, la Figure 4.31 illustre bien que la rigidité de l'enrobé bitumineux suivants les différents états diminue avec le nombre de cycles de GD, ce qui devrait être le cas pour E_{00}. Or, l'évolution des valeurs du module statique (E_{00}) va, à certaines occasions, à contre-sens de la diminution des modules complexes illustrée par les courbes maîtresses au fil des CGD.

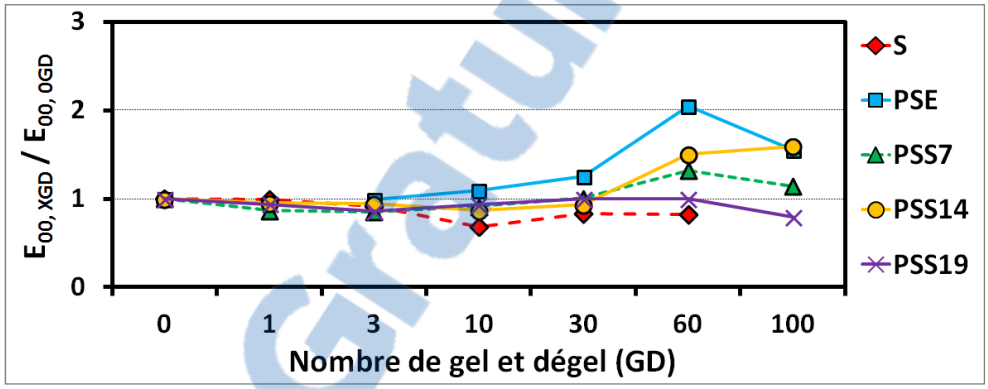


Figure 4.34 Normalisation d'E_{00} par état avec le nombre de cycles GD (paramètres fixés pour le modèle rhéologique 2S2P1D)

4.10 Influence du liquide et de la glace sur la rhéologie de l'enrobé bitumineux

4.10.1 Introduction

L'eau et les saumures au sein de l'enrobé bitumineux génère des effets multiples selon leur état. A l'état liquide, l'eau et les saumures génèrent une perte de cohésion (ou de rigidité) de l'enrobé bitumineux. Lorsqu'il y a formation de glace, l'enrobé bitumineux se rigidifie. Il est alors important de connaître la température de solidification des liquides afin de départager leurs effets sur le comportement en petites déformation de l'enrobé bitumineux (§ 4.10.2).

4.10.2 Détermination de la température de solidification

Il est possible de se référer aux valeurs de tau (Figure 4.29) et d'a_T (Figure 4.30) afin de déterminer les températures à lesquelles la solidification du liquide vient générer une

Rapport-Gratuit.com

incidence importante sur la rhéologie de l'enrobé. Notamment, la solidification du liquide vient accentuer la hausse des valeurs de tau et d'a_T avec la baisse de température. Toutefois, l'exercice peut devenir difficile à réaliser si les accentuations sont faibles (ou peu perceptibles). Pour cerner la (ou les) température(s) correspondante à un changement de comportement du matériau, il est proposé de comparer les valeurs du temps de relaxation mesurées à celles modélisées. Il faut souligner que l'équation WLF est établie avec l'ensemble des résultats expérimentaux, notamment lorsque l'eau et les saumures sont sous forme liquide et solide. L'équation WLF est une fonction continue, et pour laquelle le calage est déterminé à partir de la méthode des moindres carrés. Or, si la formation de glace induit un changement notable dans le comportement rhéologique du matériau, la modélisation est alors globalement plus imprécise, marquée par des écarts significatifs aux points d'inflexion. Pour cibler ces points d'inflexion, il est alors proposé de tracer l'évolution, en fonction de la température, des écarts entre les temps de relaxation mesurés suivants les ET (τ (T)) et ceux modélisés correspondants (τ_{WLF} (T)) et ce, exprimés de manière relative aux temps de relation modélisés (τ_{WLF} (T)). La même approche peut être appliquée à la fonction de translation (a_T (T)). Ce concept est illustré à la Figure 4.35 et Figure 4.36 en considérant une température de référence de -5,5°C, et à la Figure 4.37 et Figure 4.38 en considérant une T_R de +4,7°C.

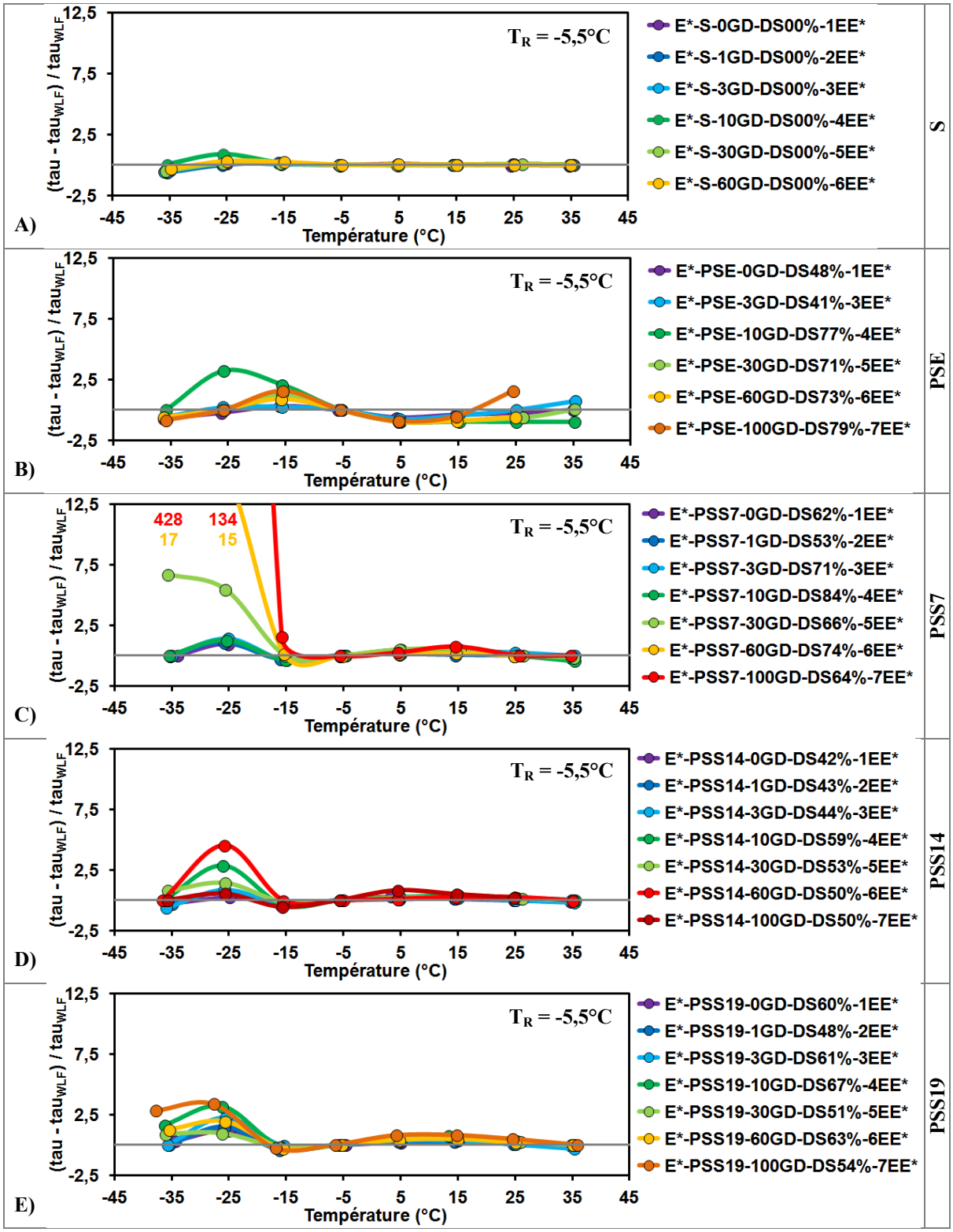


Figure 4.35 Delta tau sur tau_{WLF} en fonction de la température pour les cinq états étudiés et EE* réalisés (paramètres 2S2P1D fixés et constantes WLF déterminés à T_R = -5,5°C)

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

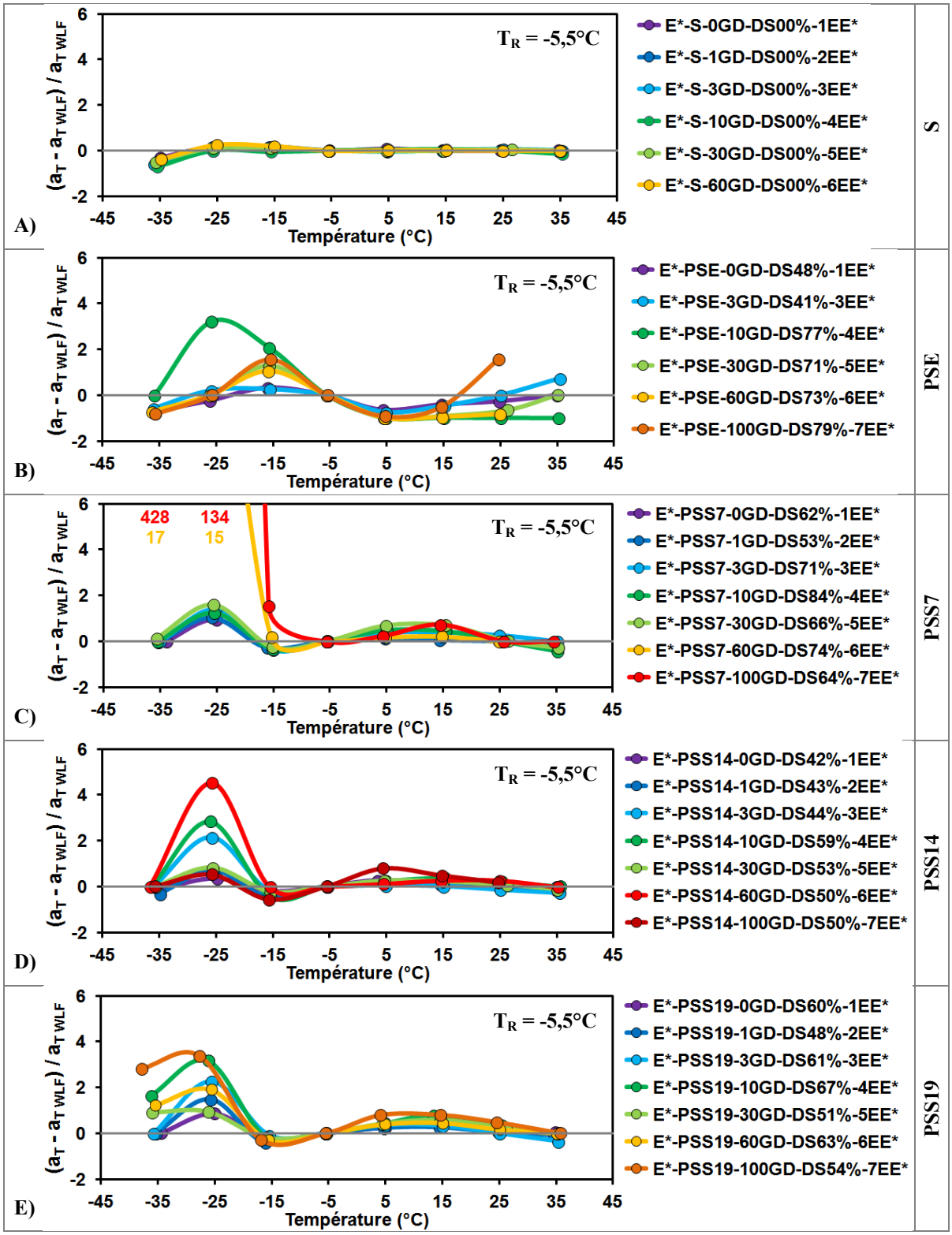


Figure 4.36 Delta a_T tau sur a_{TWLF} en fonction de la température pour les cinq états étudiés et EE* réalisés (paramètres 2S2P1D fixés et constantes WLF déterminés à T_R = -5,5°C)

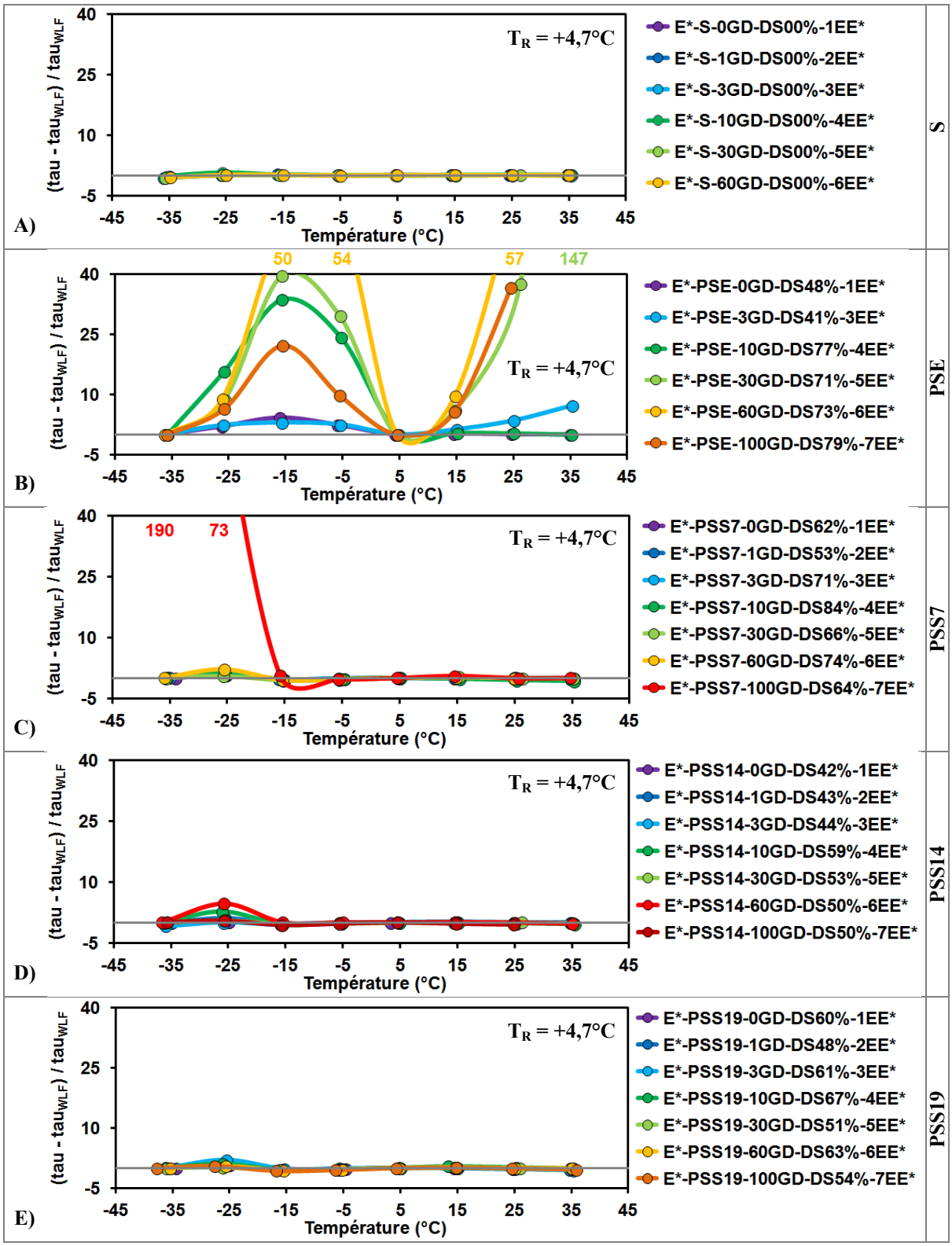


Figure 4.37 Delta tau sur tau_{WLF} en fonction de la température pour les cinq états étudiés et EE* réalisés (paramètres 2S2P1D fixés et constantes WLF déterminés à T_R = +4,7°C)

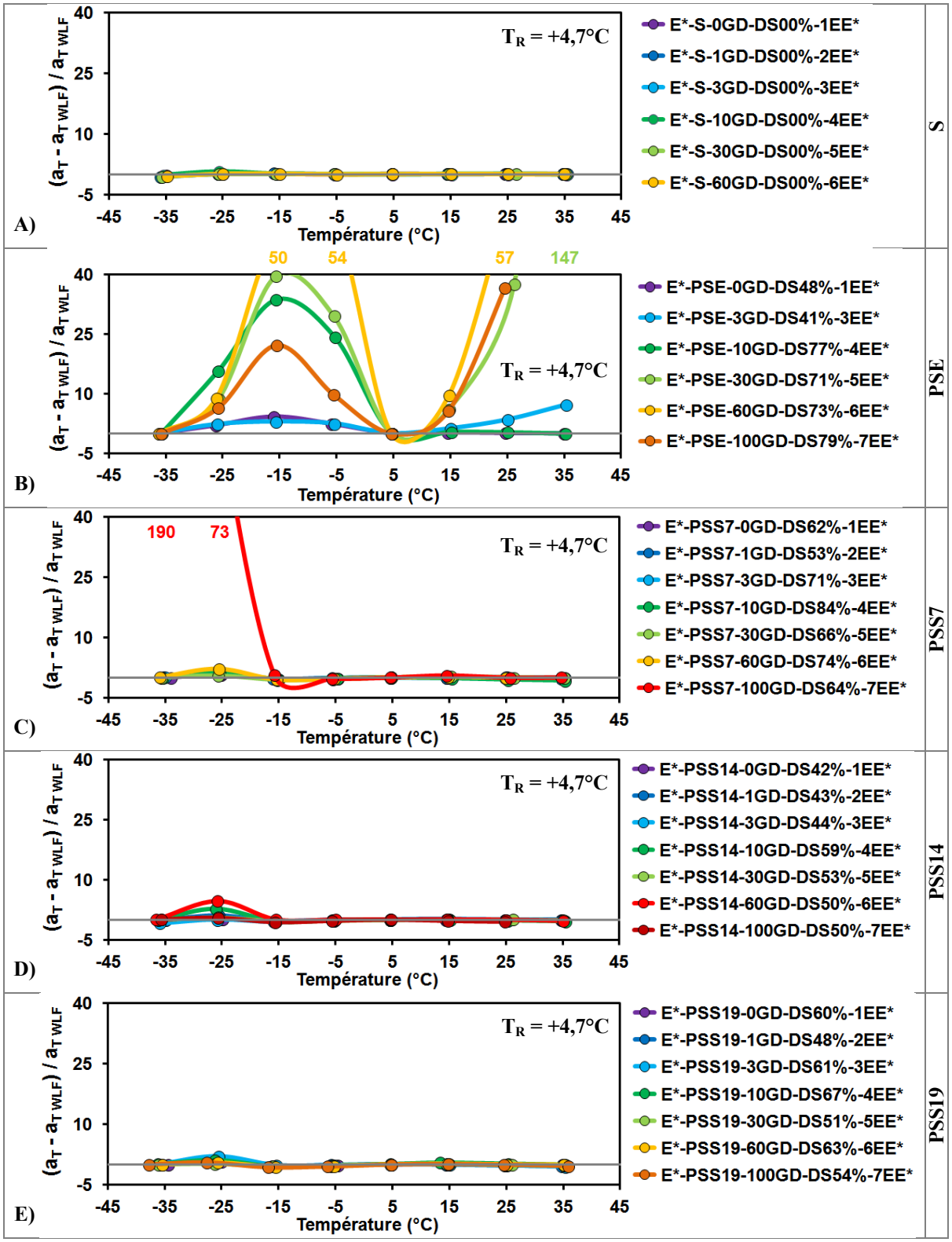


Figure 4.38 Delta a_T sur a_{TWLF} en fonction de la température pour les cinq états étudiés et EE* réalisés (paramètres 2S2P1D fixés et constantes WLF déterminés à T_R = +4,7)

Le Tableau 4.11 présente la synthèse relative à la détermination de la température de solidification du fluide en considérant les deux températures de référence (-5,5°C ou +4,7°C) et associée aux points d'inflexion mis en relief de la Figure 4.35 à la Figure 4.38 inclusivement.

Tableau 4.11 Synthèse relative à la détermination de la température de solidification du fluide en considérant deux températures de référence

Liquide	**Température de solidification (°C)**			
	T_R = -5,5°C		**T_R = +4,7°C**	
	Delta tau (Figure 4.35)	**Delta a_T (Figure 4.36)**	**Delta tau (Figure 4.37)**	**Delta a_T (Figure 4.38)**
Eau	-25, -15 et +5	-25, -15 et +5	-15 et -5	-15 et -5
Saumure 7%	-25, +5 et +15	-25, +5 et +15	-25	-25
Saumure 14%	-25, +5 et +15	-25, +5 et +15	-25	-25
Saumure 19%	-25, +5 et +15	-25, +5 et +15	-25	-25

Que l'on considère les deltas tau ou les deltas a_T, on doit nécessairement arriver aux mêmes conclusions. Les résultats présentés au Tableau 4.11 montrent bien que tel est le cas dans le cadre actuel.

L'analyse en considérant une température de référence de -5,5°C, conduit à tirer comme conclusions que la solidification du liquide est observable aux basses températures (-25 et -15°C), mais également aux hautes températures (+5 et +15°C). Ce résultat est aberrant. Cette situation est liée au fait que le calage de la fonction WLF est établi à une T_R qui correspond à une température pivot qui conduit de part et d'autre de T_R à des écarts non négligeables entre les valeurs mesurées et les valeurs modélisées. Pour pallier à la situation, il est nécessaire de considérer une température de référence qui soit suffisamment élevée, à l'extérieure de la zone possible de solidification des liquides. Une température de référence de +4,7°C permet de répondre à cette exigence. En considérant les résultats à une T_R de +4,7°C, on en déduit que la solidification du liquide est effective et complète à -5 et -15°C dans le cas de l'eau et à -25°C dans le cas des saumures. Il n'est pas possible de déterminer une température plus précise de solidification car l'EE* est réalisé par des incréments de

température de 10°C. Toutefois, en considérant les degrés de saturation (DS) des éprouvettes lors des EE* (Tableau 4.2), ces températures de solidification concordent très bien avec celles établies aux sections 3.4.3.2 et 3.4.5.4 pour l'eau et les saumures respectivement.

La connaissance de la température de solidification de l'eau et des saumures permet de mieux départager leurs effets sur la rhéologie de l'enrobé bitumineux et ce, en relation à leur état, soit à l'état liquide ou solide. Dans le cadre de cette thèse, les effets des liquides et des solides (la glace) sur la rhéologie de l'enrobé sont analysés en détail aux sections 4.10.3 et 4.10.4 respectivement.

4.10.3 Effet des liquides sur la rhéologie de l'enrobé

4.10.3.1 Introduction

Aucun EE* n'a été réalisé à l'état sec sur chacune des cinq éprouvettes testées, ce qui aurait permis de quantifier plus facilement l'effet du fluide sur le comportement en petites déformations de l'enrobé bitumineux et ce, sur l'ensemble de la plage de températures. Il est alors impératif de comparer les résultats des éprouvettes partiellement saturées avec celle à l'état sec pour connaître l'effet des fluides sur la rhéologie de l'enrobé bitumineux. Ceci complexifie la comparaison car chaque éprouvette possède des caractéristiques bien distinctes, soit : teneur en vides, répartitions des constituants et des vides. Également, il faut être prudent quant aux conclusions tirées car elles reposent que sur une valeur unique (une éprouvette) par état.

La comparaison entre les éprouvettes partiellement saturées et celle à l'état sec (état S) est ici effectuée à une température où les fluides au sein de l'enrobé bitumineux sont à l'état liquide. Subséquemment, des températures de -5,5[42] et +4,7°C sont considérées. Afin de quantifier la

---

[42] Il faut souligner que cette température est importante car elle continue la température de référence, bien que l'eau au sein de l'éprouvette PSE soit gelée à cette température : constitue un solide, au lieu d'un liquide.

répercussion des liquides sur le comportement rhéologique de l'enrobé bitumineux, il est possible de se référer aux valeurs de du module statique (E_{00}) et du temps de relaxation (τ) obtenues par modélisation. Toutefois, il a été montré que les valeurs d'E_{00} ne sont pas adéquates et il est alors improductif d'utiliser ces valeurs pour quantifier l'effet des liquides sur le comportement de l'enrobé bitumineux. Le temps de relaxation (τ) peut être associé à la rigidité de l'enrobé bitumineux. Notamment, une diminution du temps de relaxation est observable lorsqu'il y a une hausse de température et peut alors être associée à une baisse de rigidité[43].

4.10.3.2 Effet des liquides sur la rhéologie de l'enrobé avant de réaliser les cycles de gel et dégel

Les valeurs de tau à T_R (-5,5°C) et à une température donnée (+4,7°C) des enrobés aux états étudiés, avant de réaliser des cycles de GD (0 GD), en fonction du DS et normalisées en référence à celle de l'enrobé à l'état sec sont tracées à la Figure 4.39 et à la Figure 4.40. Le terme "état i" désigne aussi bien les éprouvettes à l'état partiellement saturé que celle à l'état sec (S). Pour une température de +4,7°C, en général, la valeur normalisée des tau diminue avec la hausse du degré de saturation des éprouvettes (Figure 4.40). Pour l'éprouvette PSE et à une température de référence de -5,5°C, il est possible de constater que la valeur normalisée du tau, qui s'effectue en comparaison à l'état sec, a significativement augmentée en raison de la solidification de l'eau à cette température (Figure 4.39). Pour l'ensemble des éprouvettes partiellement saturées, la valeur normalisée de tau est inversement proportionnel à la teneur en vides et au degré de saturation (Figure 4.39 et Figure 4.40). Notamment, il faut souligner que les éprouvettes S, PSE et PSS14 ont été à l'origine remplacées, ce qui explique les écarts au niveau de la teneur en vides. De plus, cet écart de vides peut expliquer la difficulté à faire

---

[43] La même analyse a été effectuée à l'aide des valeurs de la norme du module complexe |E*| à +15°C et 10Hz. Étant donné que ces valeurs ne sont pas issues des modélisations, il a été décidé de les présenter à l'ANNEXE VII. Également, les valeurs tirées sont celles des éprouvettes actuelles et d'origines qui ont des teneurs en vides distinctes et similaires respectivement.

ressortir avec précision l'effet de chacun des fluides sur le comportement rhéologique de l'enrobé bitumineux.

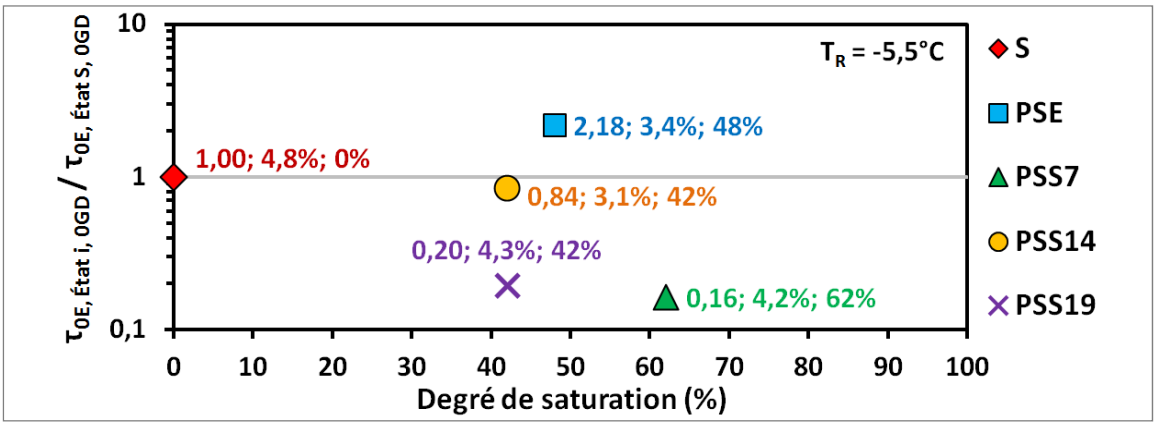


Figure 4.39 Valeurs de tau à T_R (-5,5°C) des enrobés aux états étudiés, avant de réaliser des cycles de GD (0 GD), en fonction du DS et normalisées en référence à celle de l'enrobé à l'état sec (valeurs du rapport, teneur en vides et degré de saturation indiquées)

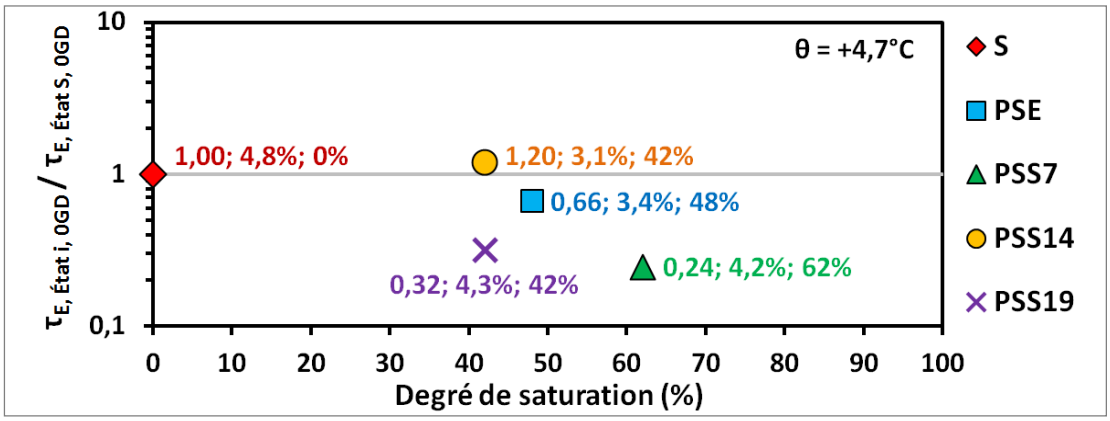


Figure 4.40 Valeurs de tau des enrobés à une température de +4,7°C, aux états étudiés et à 0 GD, en fonction du DS et normalisées en référence à celle de l'enrobé à l'état S (valeurs du rapport, teneur en vides et degré de saturation indiquées)

4.10.3.3 Effet des liquides sur la rhéologie de l'enrobé au fil des cycles de gel et dégel

En considérant l'état sec en référence, la section précédente a montré que la présence de liquide modifie la rhéologie de l'enrobé. On peut se demander comment évolue ce

phénomène au fil des cycles de GD. Pour ce faire, le temps de relation est alors normalisé, non plus à l'état sec, mais plutôt en référence à la valeur de temps de relaxation propre à chacun des états avant le début des ET (état i, 0 GD). Les valeurs calculées et normalisées en fonction du nombre de CGD sont présentées à la Figure 4.41 et à la Figure 4.42. Pour chacun des états étudiés, la valeur normalisée des tau diminue avec le nombre de GD (Figure 4.41 et Figure 4.42). De nouveau, il a été convenu de représenter le résultat relatif à l'éprouvette à l'état PSE, bien que l'eau au sein du matériau soit gelée à -5,5°C. A l'exception de l'éprouvette PSS14, il y a peu ou pas de baisse des valeurs normalisées entre le 30ème et 60ème CGD (Figure 4.41). Bien que les éprouvettes ont été soumises à 30 cycles de GD additionnels et qu'une baisse des valeurs normalisées devraient être observé, il semble bien que le vieillissement des éprouvettes pendant cette période, près de 300 jours entre les EE*, a été suffisamment important pour compenser la baisse éventuelle des valeurs (Figure 4.41).

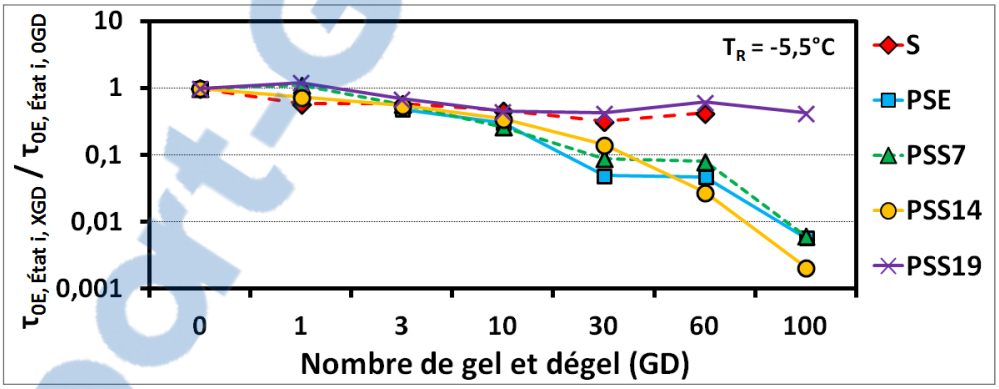


Figure 4.41 Normalisation de la valeur de tau de l'enrobé à la température de référence (T_R) de -5,5°C, à l'état i et à X GD par rapport à celle obtenue pour ce même enrobé à 0 GD (paramètres fixés)

La diminution des tau normalisés est modérée pour les éprouvettes aux états S et PSS19 et significative pour celles aux états PSE, PSS7 et PSS14 (Figure 4.41 et Figure 4.42). Cette baisse des tau témoigne nécessairement d'une perte de rigidité de l'enrobé testés sous les divers états avec le nombre de CGD. Par ailleurs, ce même constat s'applique pour une normalisation des valeurs des tau à des températures de +15, +25 et +35°C qui ne sont pas ici présentées. Notamment, pour les états PSE, PSS7 et PSS14, il est possible d'observer une

Rapport-Gratuit.com

baisse continuelle des tau au fil des CGD tant et aussi longtemps que le fluide au sein de l'enrobé n'est pas gelé (θ > à 0°C pour l'eau et > à -15°C pour les saumures à une teneur en sel de 7 et 14%, Figure 4.29). Cela témoigne d'un certain ramollissement du bitume induit par les CGD et d'un changement au sein de la matrice de l'enrobé générant définitivement une baisse de rigidité du matériau.

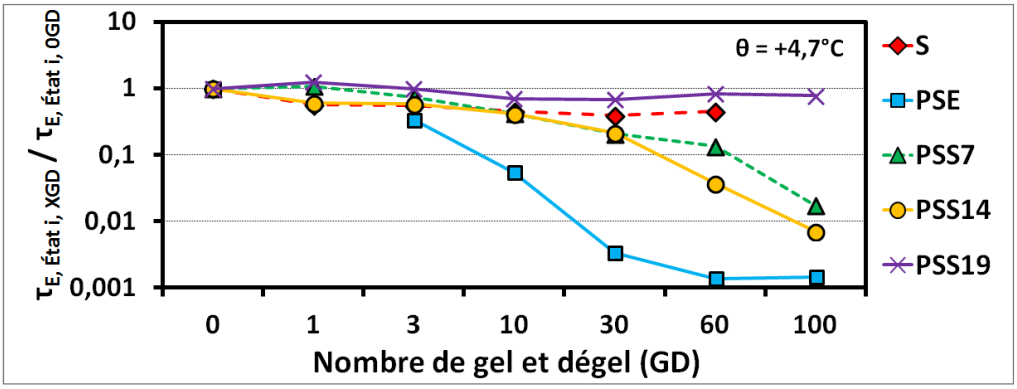


Figure 4.42 Normalisation de la valeur de tau de l'enrobé à une température de +4,7°C, à l'état i et à X GD par rapport à celle obtenue pour ce même enrobé à 0 GD (paramètres fixés)

À partir de la Figure 4.42, il est possible de quantifier l'effet du fluide par rapport au degré de saturation (DS) des éprouvettes. Ceci s'effectue en corrélation avec le tau de l'éprouvette à l'état sec correspondant à un nombre donné de cycles de GD. Le ratio est calculé à partir des valeurs de tau mesurées lors des 6^{iers} EE* car la valeur au 7ème EE* est manquante pour l'éprouvette à l'état sec (Figure 4.43). Le nombre de cycles de GD est indiqué près des points expérimentaux (Figure 4.43). Il faut mentionner que les éprouvettes PSE et PSS14 ont une teneur en vides de 3,4 et 3,1%, lesquelles sont nettement inférieures à celle de l'éprouvette à l'état sec (4,8%). Donc, pour ces deux éprouvettes, les ratios devraient être nettement inférieurs et la fonction polynomiale approchée et tracée à la Figure 4.43 devrait inévitablement passée par la valeur de 1,00 au lieu d'une valeur de 3,1284 à un DS de 0%. Pour chaque liquide, à l'exception de l'eau, l'effet du DS sur la rigidité de l'enrobé bitumineux reste stable au fil des cycles de GD et ce, pour la plage de DS comprise entre 40 et 81%, tel qu'établi lors des EE* (Figure 4.43). Évidemment, les ratios tracés en fonction du

DS sont certainement tributaires de l'endommagement généré par les cycles de GD, à l'exception de ceux obtenus à 0 GD. Par ailleurs, au cours des cycles de GD, les valeurs du DS peuvent être remises en doute car elles ont été établies avec la teneur en vides initiale des éprouvettes, laquelle évolue en raison de la création de micro fissures au sein du matériau au fil des ET.

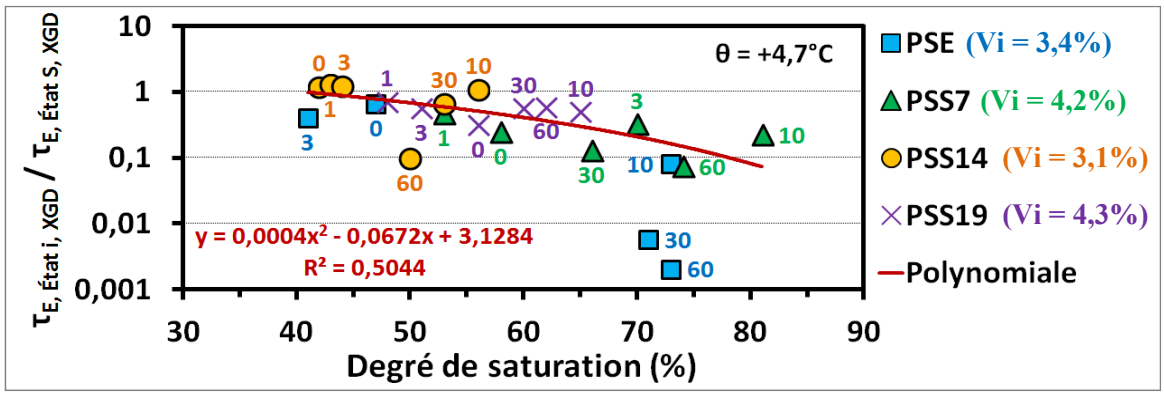


Figure 4.43 Normalisation de la valeur de tau de l'enrobé à une température de +4,7°C, à l'état i et à X GD par rapport à celle obtenue pour l'enrobé à cette même température à l'état sec (S) et à X GD (paramètres fixés, #CGD en étiquette)

4.10.3.4 Effet couplé du liquide et des cycles de gel et dégel sur la rhéologie de l'enrobé

Pour mettre en relief l'effet couplé du liquide et des CGD sur la rhéologie de l'enrobé, il est alors proposé de tracer, en fonction des CGD, le temps de relaxation normalisé, cette fois, en référence au temps de relaxation de l'éprouvette à l'état sec avant le début des ET.

Il faut mentionner que les cycles de GD des ET sont réalisés de -18 à +10°C (Figure 2.9). Or, dans cette plage de température, il y a formation de glace uniquement pour l'eau et les saumures à une concentration en sel de 7 et 14% car leur point de solidification mesuré au centre des éprouvettes (T_{SC}) mis en relief au chapitre 3 (§ 3.4.3.2) est d'environ -1, -9 et -15°C respectivement. Pour la saumure à une concentration en sel de 19%, son point de solidification est inférieur à -18°C et même, sous les -20°C. Donc, pour la saumure à une concentration en sel de 19%, il y a formation et fonte de glace uniquement dans le cas où

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

l'éprouvette est soumise à un EE*, pour lequel la plage de température varie de -35 à +35°C. De ce fait, l'éprouvette PSS19 va nécessairement connaître un endommagement inférieur au cours des ET, comparativement aux éprouvettes PSS7 et PSS14 (détails additionnels à la § 3.4.5.4). Cette affirmation est confirmée par les résultats présentés à la Figure 4.41, Figure 4.42 et Figure 4.44.

La Figure 4.44 montre que la diminution des tau normalisés est la plus élevée pour l'éprouvette partiellement saturée avec de l'eau (PSE). Malgré un écart au niveau de la teneur en vides, les éprouvettes PSS7 et PSS14 connaissent une diminution des tau normalisés, à toute fin pratique identique (pentes similaires), si on se permet de soustraire les EE* de mauvaise qualité, tel que mis en relief au Tableau 4.6 à partir des écarts ($\Delta\varepsilon_{exti}$) (points entourés de cercles de couleur rouge). Pour faciliter l'analyse de la Figure 4.44, les valeurs du DS et de V_i de chaque éprouvette sont indiquées respectivement au haut et à la droite. Pour l'éprouvette PSS19, la valeur des tau normalisés augmente lorsque le DS diminue.

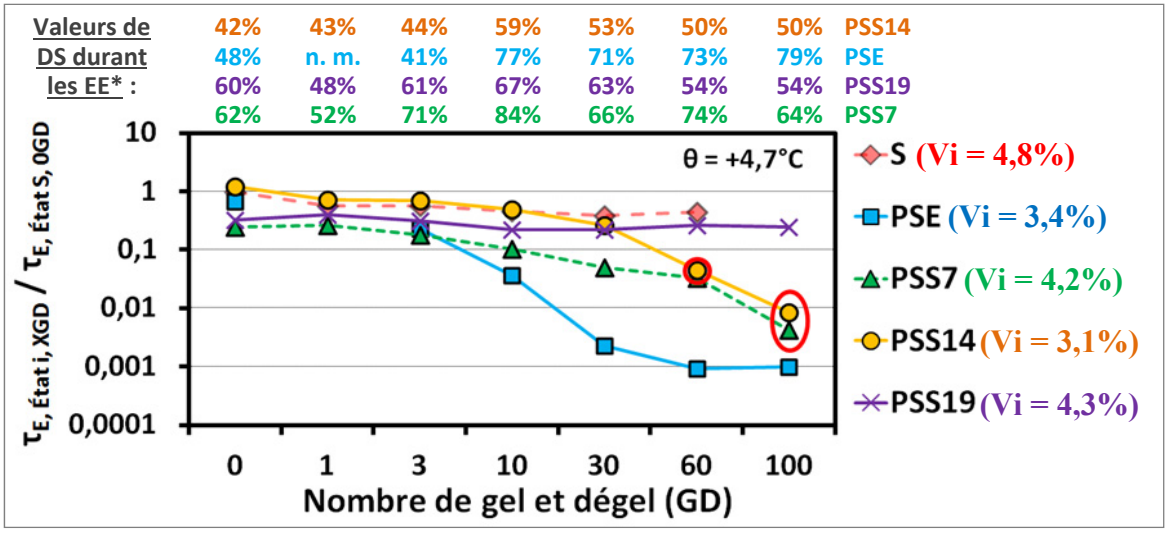


Figure 4.44 Normalisation de la valeur de tau de l'enrobé à une température de +4,7°C, à l'état i et à X GD par rapport à celle obtenue pour l'enrobé à cette même température, à l'état sec (S) et à 0 GD (paramètres fixés)

L'effet couplé du fluide et des CGD engendrant la plus grande diminution du tau s'établi pour (en ordre décroissant) : l'eau et les saumures à une concentration en sel de 14, 7 et 19%

(Figure 4.44). Nous pensons que la diminution de tau devrait être supérieure pour l'éprouvette avec de la saumure à une concentration en sel de 7% au lieu de celle avec de la saumure à 14%. Notamment, des dilatations et des contractions plus importantes ont été mesurées lors de la formation et de la fonte de la glace pour l'éprouvette PSS7, comparativement à celle PSS14, lors de la réalisation des ET sur les éprouvettes de type T (§ 3.4.5.4). Il faut souligner qu'une seule éprouvette est testée par état et donc, cela peut être liées à des conditions spécifiques de dégradation pour l'éprouvette PSS14 ou à la qualité inférieure des EE* pour l'éprouvette PSS7 en début d'ET, l'avantageant, soit par la possibilité d'une rigidité initiale mesurée inférieure, expliquant le classement obtenu avec ces essais mécaniques (EE*).

4.10.4 Effet de la glace sur la rhéologie de l'enrobé

4.10.4.1 Introduction

Pour quantifier la répercussion de la présence (ou la formation) de glace sur l'enrobé bitumineux, il est possible de se référer aux valeurs d'E_0 et de tau (τ) obtenues par modélisation. Afin de réduire l'ampleur de l'analyse, seules les valeurs d'E_0 sont présentées en détail. Il faut souligner que la comparaison entre les éprouvettes partiellement saturées et celle à l'état sec (état S) doit être effectuée à une température où il y a formation de glace, soit minimalement de -15 et -25°C pour l'eau et les saumures respectivement.

Soulignons que le module d'élasticité (ou de Young) de la glace varie beaucoup, soit de 294 à 11 474MPa (Nakaya, 1958 ; Voitkovskii, 1960 ; Weeks et coll., 1967 ; Gagnon et coll., 2001). Par ailleurs, selon Gagnon et coll. (2001), le module de la glace diminue de 10 000 à 1 000MPa avec la hausse de la concentration en sel de la saumure.

4.10.4.2 Effet de la glace avant les cycles de gel et dégel

L'évolution suivant le DS des valeurs normalisées du module vitreux (E_0) pour chacun des états étudiés par rapport à celui à l'état sec et avant de soumettre les éprouvettes aux ET est

présentée à la Figure 4.45. Pour les éprouvettes partiellement saturées en saumures à des concentrations en sel de 7 et 19% (PSS7 et PSS19), la hausse de la rigidité de l'enrobé bitumineux par la présence de glace est tout à fait notable (Figure 4.45). Dans le cas des éprouvettes partiellement saturées en eau (PSE) et en saumure à une concentration en sel de 14% (PSS14), la hausse de rigidité par la formation de glace est peu probante ou faible car cela est plutôt attribuable à la faible teneur en vides (3,4 et 3,1%), comparativement à l'éprouvette à l'état sec (4,8%).

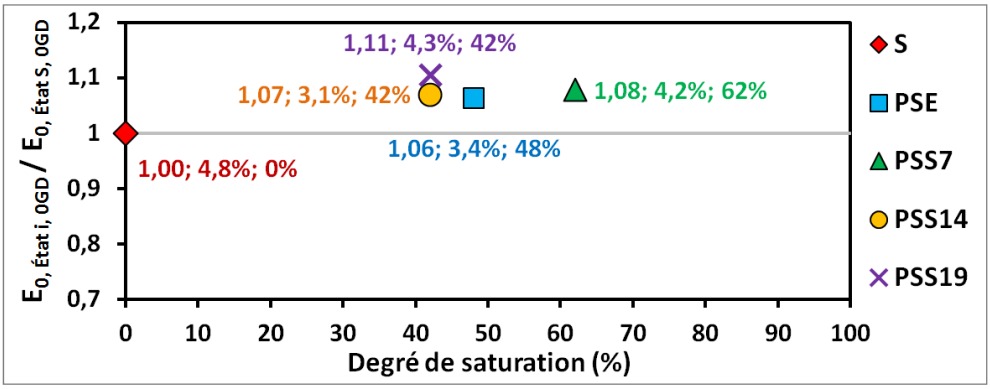


Figure 4.45 Normalisation d'E_0 de l'enrobé bitumineux à l'état i et à 0 GD par rapport à celle obtenue pour l'enrobé à l'état sec et en fonction du DS (paramètres fixés) (valeurs du ratio ; teneur en vides ; degré de saturation)

L'effet du degré de saturation (DS) sur la hausse de la rigidité de l'enrobé bitumineux à très basse température est indéniable, mais n'a pu être mis en lumière à la Figure 4.45. Il est donc nécessaire de poursuivre l'analyse en examinant l'effet de la glace en relation avec les cycles de GD.

4.10.4.3 Effet de la glace au fil des cycles de gel et dégel

Pour analyser l'effet de la glace sur la rhéologie de l'enrobé au fil des CGD, il est impératif de comparer les résultats de modules complexes pour lesquels la solidification est complète au sein du matériau. C'est notamment le cas lorsqu'on se réfère aux valeurs des modules vitreux (E_0). La Figure 4.46 présente, en fonction du nombre de cycles de GD, la variation du module vitreux propre à chacun des états étudiés (E_0, État i, X GD), mais de façon

normalisée en référence à celui correspondant à chacun de ces états avant les CGD (E_0, État i, 0 GD).

Pour chacun des états étudiés sur la rhéologie de l'enrobé, et jusqu'au 30ème cycle de GD, la du module vitreux (E_0) reste sensiblement stable (Figure 4.46). Bien qu'avec la progression des CGD l'endommagement progresse, la présence de glace vient rigidifier le matériau et atténue la réduction du module vitreux (E_0). Par ailleurs, en raison du comportement viscoélastique de l'enrobé bitumineux, l'endommagement à moins d'effet sur sa rigidité à très basse température qu'à très haute température, et donc sur la valeur du module vitreux (E_0), tel qu'observé à la Figure 4.46.

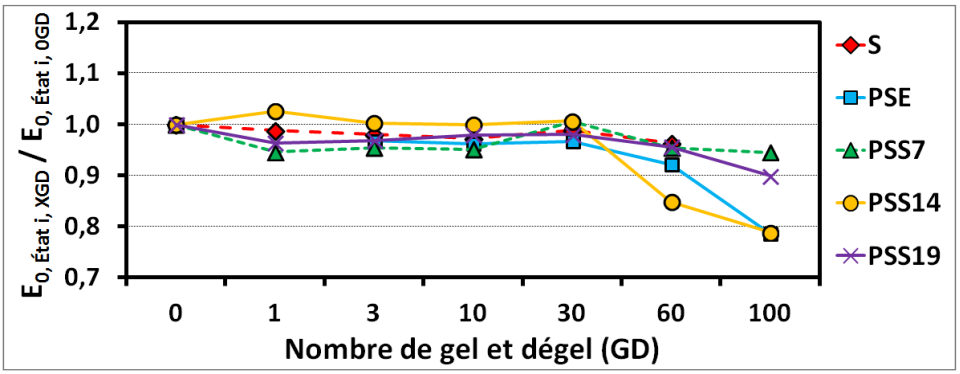


Figure 4.46 Normalisation d'E_0 de l'enrobé bitumineux à l'état i et à X GD par rapport à celle obtenue pour ce même enrobé à 0 GD (paramètres fixés pour le modèle 2S2P1D)

Aussi, il est intéressant de quantifier l'effet de la glace par rapport au degré de saturation (DS) des éprouvettes. Ceci peut se faire en corrélant la valeur normalisée du module vitreux (E_0) au fil des CGD, mais cette fois, en référence à la valeur du module vitreux à l'état sec pour les CGD correspondants. Notons que le rapport est calculé à partir des valeurs d'E_0 mesurées lors des 6iers EE* car la valeur au 7ème EE* est manquante pour l'éprouvette à l'état sec (Figure 4.47). Le nombre de cycles de GD est indiqué près des points expérimentaux (Figure 4.47). Il faut mentionner que les éprouvettes PSE et PSS14 ont une teneur en vides de 3,4 et 3,1%, nettement inférieure à celle à l'état sec (4,8%). Donc, à une teneur en vides supérieure, les valeurs du rapport d'E_0 pour ces deux éprouvettes devraient être nettement

inférieures (Figure 4.47). Pour chacun des états étudiés, l'effet du DS sur la rigidité de l'enrobé bitumineux gelé reste majoritairement stable au fil des cycles de GD et ce, pour la plage de DS comprise entre 40 et 81%, tel qu'établie lors des EE* (Figure 4.47). De plus, les rapports d'E_0 en fonction du DS sont inévitablement tributaires de l'endommagement généré par les cycles de GD, à l'exception de ceux obtenus à 0 GD.

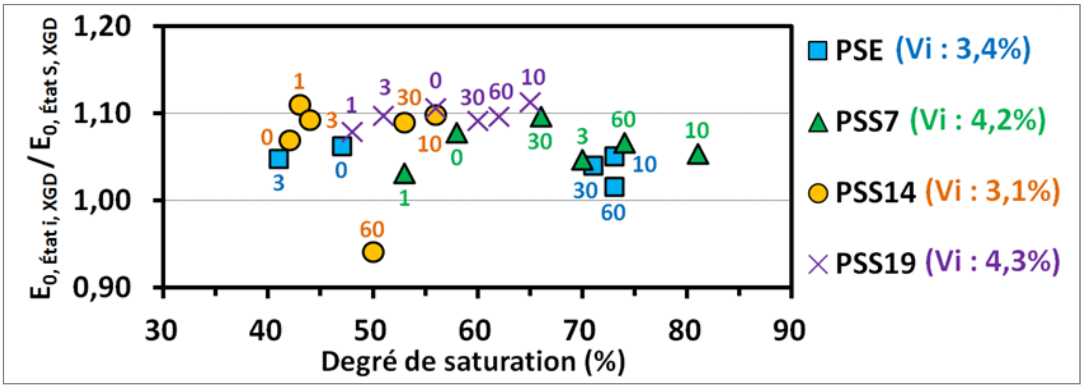


Figure 4.47 Normalisation de la valeur d'E_0 de l'enrobé bitumineux à l'état i et à X GD par rapport à celle obtenue pour l'enrobé à l'état sec (S) et à X GD (paramètres fixés pour le modèle 2S2P1D et numéro du CGD en étiquette)

4.10.4.4 Effet de la glace et des cycles de gel et dégel

Pour mettre en perspective l'effet couplé de la glace et des CGD, la normalisation du module vitreux (E_0) de chacun des états à X GD est effectuée par rapport à celui à l'état sec à 0 GD (Figure 4.48).

L'effet de la glace, y compris du DS, et des 30^{iers} cycles de GD est minime sur les valeurs du module de l'enrobé (E_0, Figure 4.48). À l'exception de l'éprouvette PSE, la diminution du module vitreux (E_0) est, à toute fin pratique identique pour l'ensemble des éprouvettes, si on se permet de soustraire les EE* de mauvaise qualité (points entourés de cercles de couleur rouge, Figure 4.48) et ce, malgré un écart au niveau de la teneur en vides. L'effet couplé de la glace et des cycles de GD sur la valeur d'E_0 est en faite notable uniquement pour l'éprouvette partiellement saturée en eau (PSE, Figure 4.48).

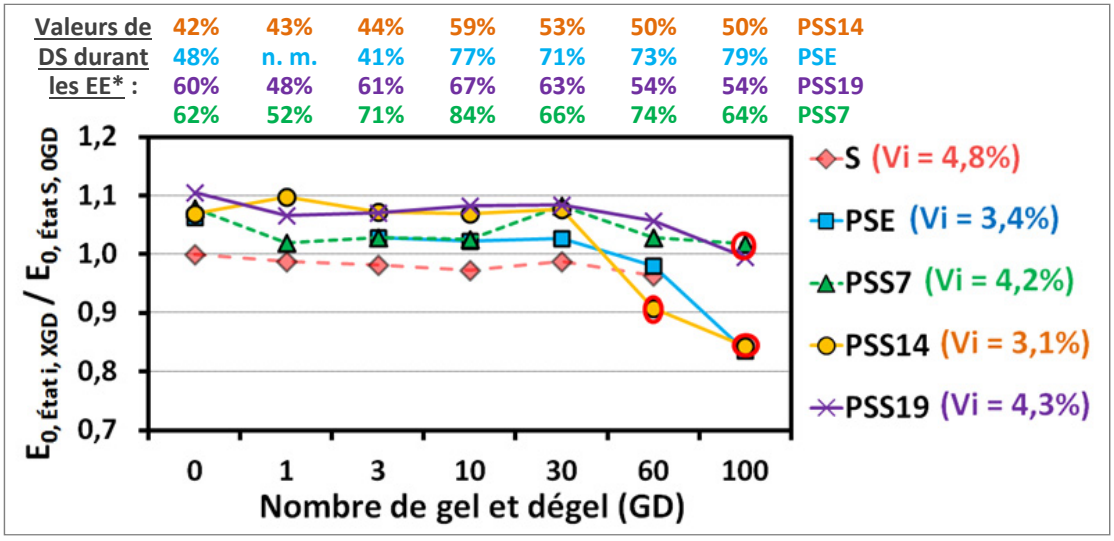


Figure 4.48 Normalisation de la valeur d'E_0 de l'enrobé à l'état i et à X GD par rapport à celle obtenue pour l'enrobé à l'état sec (S) et à 0 GD (paramètres fixés pour le modèle 2S2P1D)

Pour compléter l'analyse de l'effet couplé de la glace et des CGD, il est possible de se référer aux valeurs des tau, aux basses températures, pour chacun des enrobés testés suivants les divers états. Plus spécifiquement, l'analyse de l'évolution des valeurs des tau aux basses températures, soit lorsqu'il y a présence de glace, va nous permettre de mieux comprendre l'effet couplé de la glace et des CGD sur le comportement de l'enrobé bitumineux suivants les divers états. Pour chacun des états étudiés, l'évolution des valeurs des tau est illustrée à la Figure 4.29 (page 220). Il est nécessaire d'analyser le comportement de l'enrobé bitumineux où il y a présence de glace c'est-à-dire à des températures variant de -35 à -5°C pour l'éprouvette partiellement saturée en eau (PSE) et de -35 à -25°C pour les éprouvettes partiellement saturées en saumures (PSS7, PSS14 et PSS19). Plus spécifiquement, il faut se référer aux pentes formées par les valeurs des tau où il y a présence de glace. Notamment, pour les éprouvettes partiellement saturées (PSE, PSS7, PSS14 et PSS19), il est possible de constater que les pentes formées par les tau à basses températures restent similaires au fil des cycles de GD, ce qui n'est pas le cas aux hautes températures (Figure 4.29B à E). Cela témoigne, qu'aux basses températures, la rhéologie de l'enrobé bitumineux reste similaire lorsqu'il y a présence de glace, c'est-à-dire que ces propriétés mécaniques se conservent au fil des cycles de GD, tel qu'il a pu être observé à la Figure 4.48. En référence à la Figure

4.29, l'évolution des tau aux basses températures et au fil des CGD, nous révèle que l'endommagement de l'enrobé bitumineux, suivants les états partiellement saturés, est le plus marquée pour (en ordre décroissant) : PSE, PSS14, PSS7 et PSS19 (Figure 4.29B à E). Ce constat constitue un complément à l'analyse précédemment portée (Figure 4.48). Pour terminer, l'évolution des tau aux basses températures de l'éprouvette PSS19 au fil des cycles de GD est très similaire à celle de l'éprouvette S (Figure 4.29E et A), tel qu'observé à la Figure 4.48. Cela témoigne que l'évolution du comportement de l'enrobé bitumineux aux basses températures est très similaire suivant ces deux états.

4.11 Quantification des dommages apparents à l'aide de la modélisation

4.11.1 Évolution du dommage au cours des cycles de gel et dégel (D_{XGD})

À partir des courbes maîtresses de la norme du module complexe pour chacun des états étudiés (Figure 4.31), il est possible de déterminer l'évolution du dommage de l'enrobé bitumineux soumis à différents états en fonction des cycles de GD (D_{XGD}). Plus particulièrement, cette quantification du dommage s'effectue à l'aide de la modélisation réalisée pour chaque EE*. La rigidité de l'enrobé bitumineux au cours du 1er EE* (à 0 GD) de chaque état constitue la référence afin de quantifier le niveau de dommage au fil des cycles de GD.

Par ailleurs, il faut mentionner que la modélisation avec des paramètres fixés a été considérée comme valide uniquement sur la plage de mesures réalisées car elle ne prédisait pas des valeurs adéquates des modules statiques (E_{00}, § 4.9.2). En considérant une température de référence de -5,5°C (T_R), la plage de mesures correspond aux fréquences équivalentes de 1,E-05 à 1,E+07. Plus spécifiquement, cette plage de fréquences équivalentes coïncide aux valeurs de modules mesurées de -35 à +25°C (Figure 4.31) car certaines valeurs sont manquantes à +35°C.

La Figure 4.49 illustre l'évolution du dommage suite à la réalisation des cycles de GD ($D_{XGD} = 1 - |E^*|_{\text{État i, XGD}} / |E^*|_{\text{État i, 0GD}}$) en fonction de la fréquence équivalente pour chacun des états étudiés (T_R = -5,5°C).

Primo, pour chaque EE*, le niveau de dommage (D_{XGD}) dépend de la fréquence équivalente, soit de la fréquence et température considérées (Figure 4.49). Pourtant, on peut supposer que quelque soit la fréquence et la température d'essai utilisées, le dommage du matériau devrait être le même : il s'agit de la même éprouvette. Dû moins, cette affirmation devrait être valable pour l'enrobé à l'état sec car il n'y a pas de fluide et donc, pas de changement d'état de liquide à solide qui pourrait venir affecter la rigidité du matériau. Notamment, dans le cas des éprouvettes partiellement saturées (PSE, PSS7, PSS14 et PSS19), le dommage mesuré aux hautes températures peut être différent de celui mesuré aux basses températures car la formation de glace vient colmater les fissures, rigidifiant le matériau et compensant ainsi la chute du module qui témoigne de l'endommagement. Nous traitons en détail de cet aspect dans les sections suivantes.

Secundo, pour les éprouvettes partiellement saturées, les dommages les plus importants, suivants les cycles de GD, sont pour : PSE, PSS14, PSS7 et PSS19 (Figure 4.49B à E). Ce niveau de dommage a été pressenti en examinant l'évolution (ou l'étendue) du degré de saturation au fil des essais (§ 4.2.3). De plus, ce classement peut être expliqué par : 1) lors de la réalisation des cycles de GD de -18 à +10°C, il y a formation de glace uniquement pour l'eau et les saumures à une concentration en sel de 7 et 14% (§ 3.4.3.2) ; 2) la dilatation et la contraction générée par la solidification du liquide et la fonte de la glace est nettement plus élevée pour l'eau, comparativement aux saumures à des concentrations en sel de 7 et 14%, expliquant que l'éprouvette PSE s'endommage beaucoup plus ; 3) la formation de glace de la saumure à une concentration de 19% se produit sous les -20°C et donc, uniquement lors de la réalisation des EE* et non en cours des ET (plage de température s'échelonnant de -35 à +35°C).

Rapport-Gratuit.com

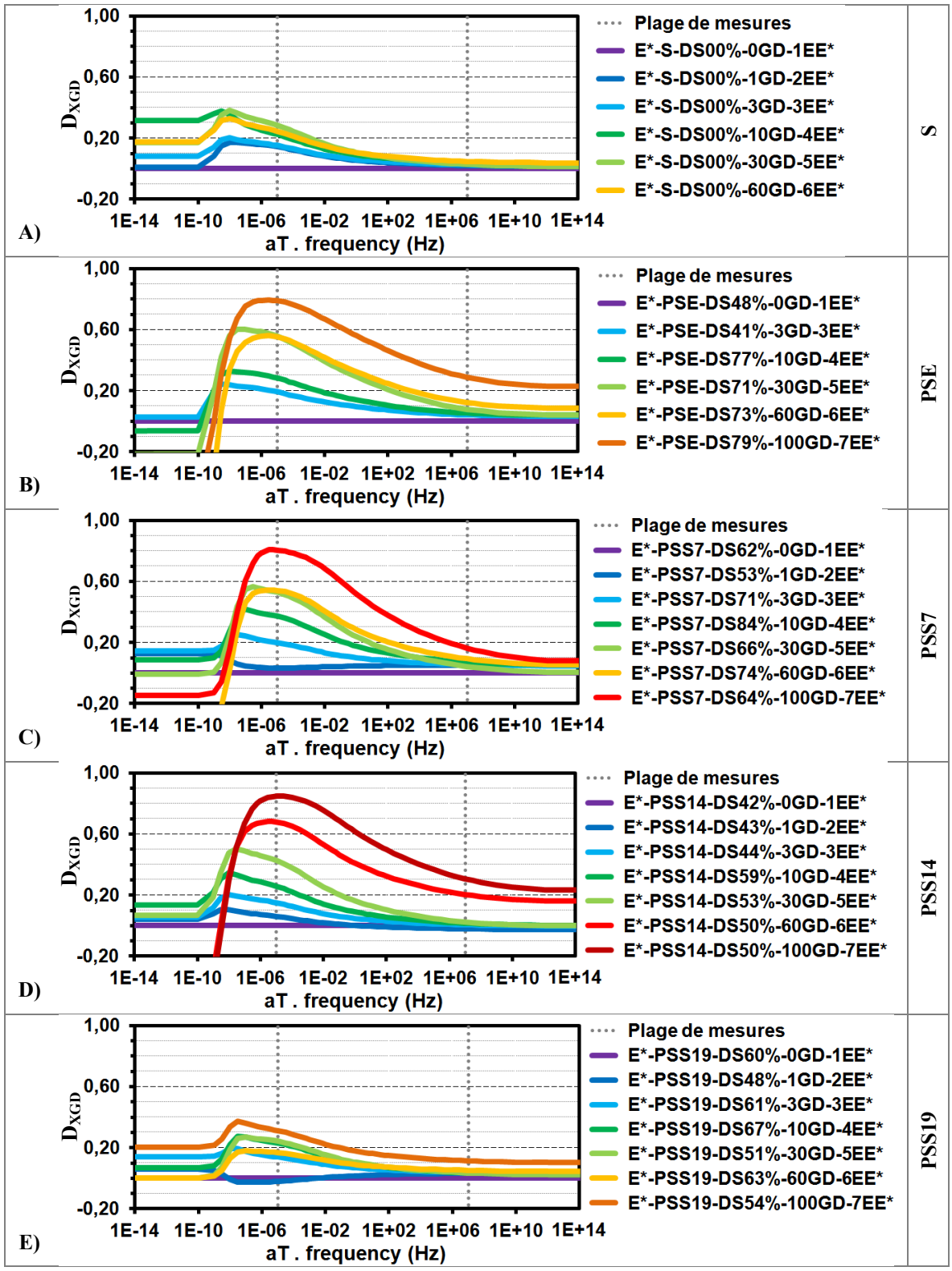


Figure 4.49 Évolution du dommage en fonction des cycles de GD (D_{XGD}) pour tous les essais des cinq états (T_R = -5,5°C)

Tertio, entre le 5ème et 6ème EE* (30ème au 60ème GD), une diminution du niveau de dommage est observable pour les éprouvettes S et PSS19 à hautes températures (ou basses fréquences équivalentes dans la plage de mesures). Près de 300 jours se sont écoulés entre le 5ème et 6ème EE* (Figure 4.1). Avec le temps, le bitume vieilli, s'oxyde et se rigidifie engendrant une hausse de la rigidité de l'enrobé qui se fait sentir plus à hautes qu'à basses températures. Ce durcissement du bitume vient plus que compenser la perte de rigidité générée par la réalisation des 30 CGD additionnels (30 à 60). Spécifiquement, le *Virginia Department of Transportation (VDOT)* propose une courbe de détérioration tout en tenant compte de la hausse de rigidité engendrée par le vieillissement du bitume (Martin et coll., 2003). Quarto, on s'attend à ce que le dommage de l'enrobé à l'état PSS19 soit supérieur à celui de l'enrobé à l'état S en raison : 1) création de micro fissures au sein du matériau et phénomène de gélifraction générés par le changement de phase (liquide à solide) de la saumure à très basse température des EE* ; 2) pertes de cohésion et d'adhésivité à hautes températures. Toutefois, selon les résultats présentés à la Figure 4.49, le dommage mesuré pour l'enrobé bitumineux à l'état S est supérieur à celui à l'état PSS19 (Figure 4.49). Cela semble totalement improbable, même si l'éprouvette S a une teneur en vides supérieure (4,8%) à celle de l'éprouvette PSS19 (4,3%). Nous traiterons de cet aspect aux sections 4.12.2 et 4.12.4.

4.11.2 Évolution du dommage apparent au cours des cycles de GD en considérant le déphasage de C* (ϕ_C)

Pour chacun des états étudiés, l'évolution de l'angle de phase du coefficient de rigidité ($\phi_C = \phi_{E\ XGD} - \phi_{E\ 0GD}$) permet de quantifier l'ampleur du dommage causé par les CGD au sein de l'enrobé bitumineux. En effet, dans le cas où les CGD engendrent un endommagement au sein de la microstructure de l'enrobé, alors l'angle de phase augmente progressivement. Pour chacun des états étudiés, l'évolution de ϕ_C est déterminée à partir des courbes maîtresses de l'angle de phase du module complexe (Figure 4.32) en référence au 1er EE*. La Figure 4.50 illustre l'évolution de l'angle de phase du coefficient de rigidité (C*) suite à la réalisation des CGD (ϕ_C) en fonction de la fréquence équivalente pour tous les EE* réalisés pour les cinq états étudiés (T_R = -5,5°C).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

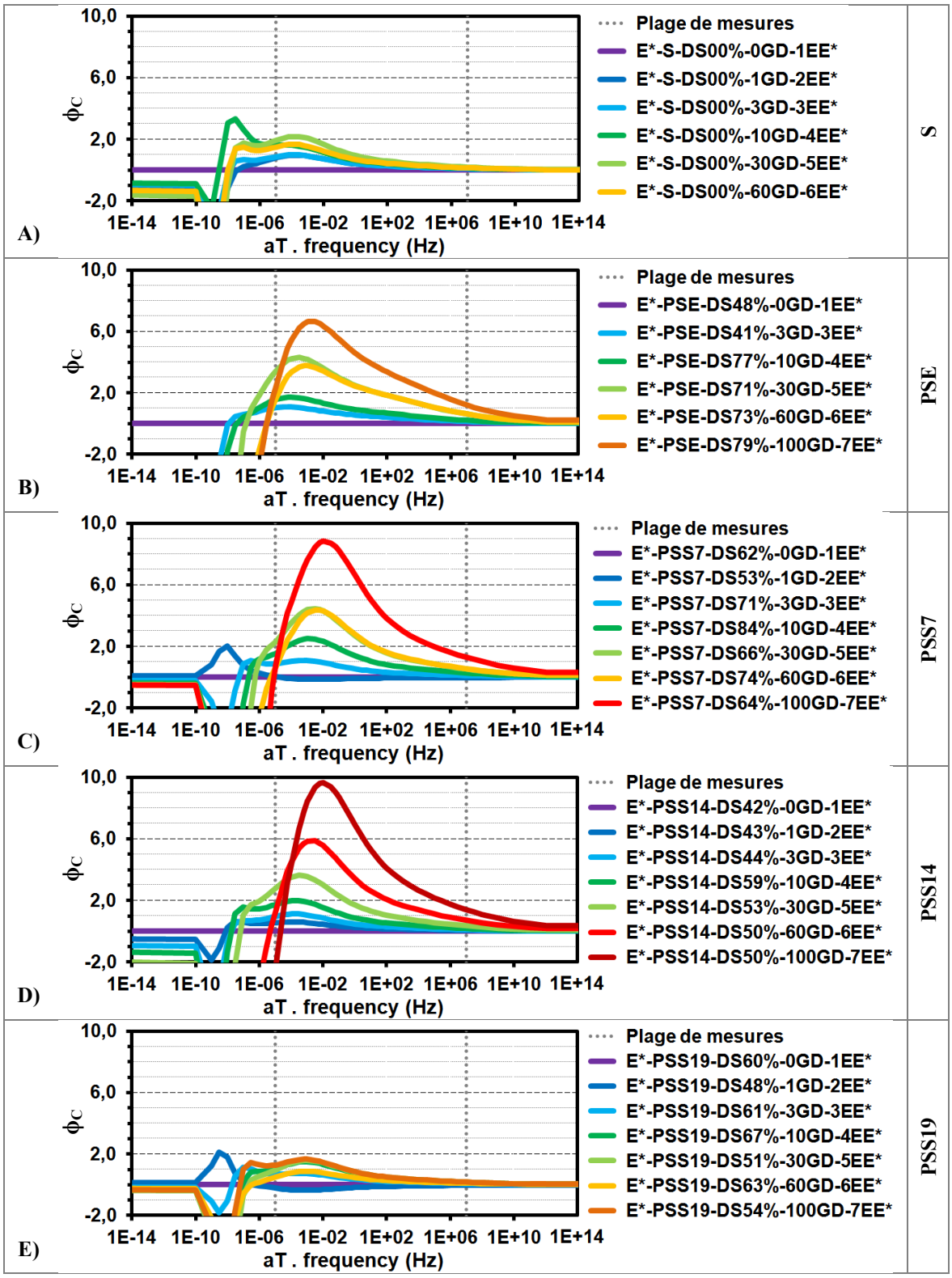


Figure 4.50 Évolution de phi en fonction des cycles de GD (ϕ_C) pour tous les essais des cinq états (T_R = -5,5°C)

Pour chaque EE*, l'évolution de l'angle de phase du coefficient de rigidité (ϕ_C) dépend de la fréquence équivalente. Également, tout comme pour le dommage apparent calculé (D_{XGD}), ϕ_C augmente avec le nombre de CGD, à l'exception des résultats se trouvant entre le 30ème et le 60ème GD pour les éprouvettes S, PSE, PSS7 et PSS19 (Figure 4.50A, B, C et E). Pour ces éprouvettes, cette chute de ϕ_C, au lieu d'une hausse, entre le 30ème et le 60ème GD, peut, en partie, être expliquée par le vieillissement et le durcissement du bitume. Quoiqu'il en soit, l'augmentation progressive de l'angle de phase (Figure 4.50) est tout à fait similaire à celle du dommage de l'enrobé (Figure 4.49).

4.12 Quantification des dommages apparents à l'aide des valeurs expérimentales de |E*|

4.12.1 Évolution du dommage entre les +15°C ($D_{entre\ les\ +15°C}$)

Comme nous l'avons souligné à la section 4.7.2, la comparaison entre les modules calculés suivant la réalisation d'un EE* est quantifiable en comparant les modules à 15°C établis avant et après le cycle de température imposé durant l'EE*. La quantification du dommage entre les +15°C ($D_{entre\ les\ +15°C}$) a été expliquée de façon détaillée à la section 4.7.2 (p. 203). Exception faite de sept cas (1er, 4ème et 5ème EE* pour PSS7, 7ème EE* pour PSS14, et 4ème et 7ème EE* pour PSS19), les températures réelles des mesures à +15°C effectués AVANT et APRÈS le cycle thermique d'un EE* sont toujours les mêmes, facilitant ainsi la comparaison et le calcul. Pour les sept exceptions, il a été nécessaire de corriger les valeurs de |E*| pour établir une comparaison rigoureuse. Notons qu'il est plus rigoureux de réaliser la correction sur les valeurs de |E*| mesurées APRÈS que sur celles réalisées AVANT car la modélisation a été réalisées sur celles-ci. Plus exactement, la détermination du tau pour le faire correspondre à la température de +15°C APRÈS est réalisée avec la formule WLF.

La Figure 4.51 illustre l'évolution du dommage apparent ($D_{entre\ les\ +15°C}$) établi à partir de la comparaison des valeurs de |E*| à +15°C AVANT et +15°C APRÈS en fonction de la fréquence de sollicitation (se référer à la Figure 2.12 pour de plus amples détails).

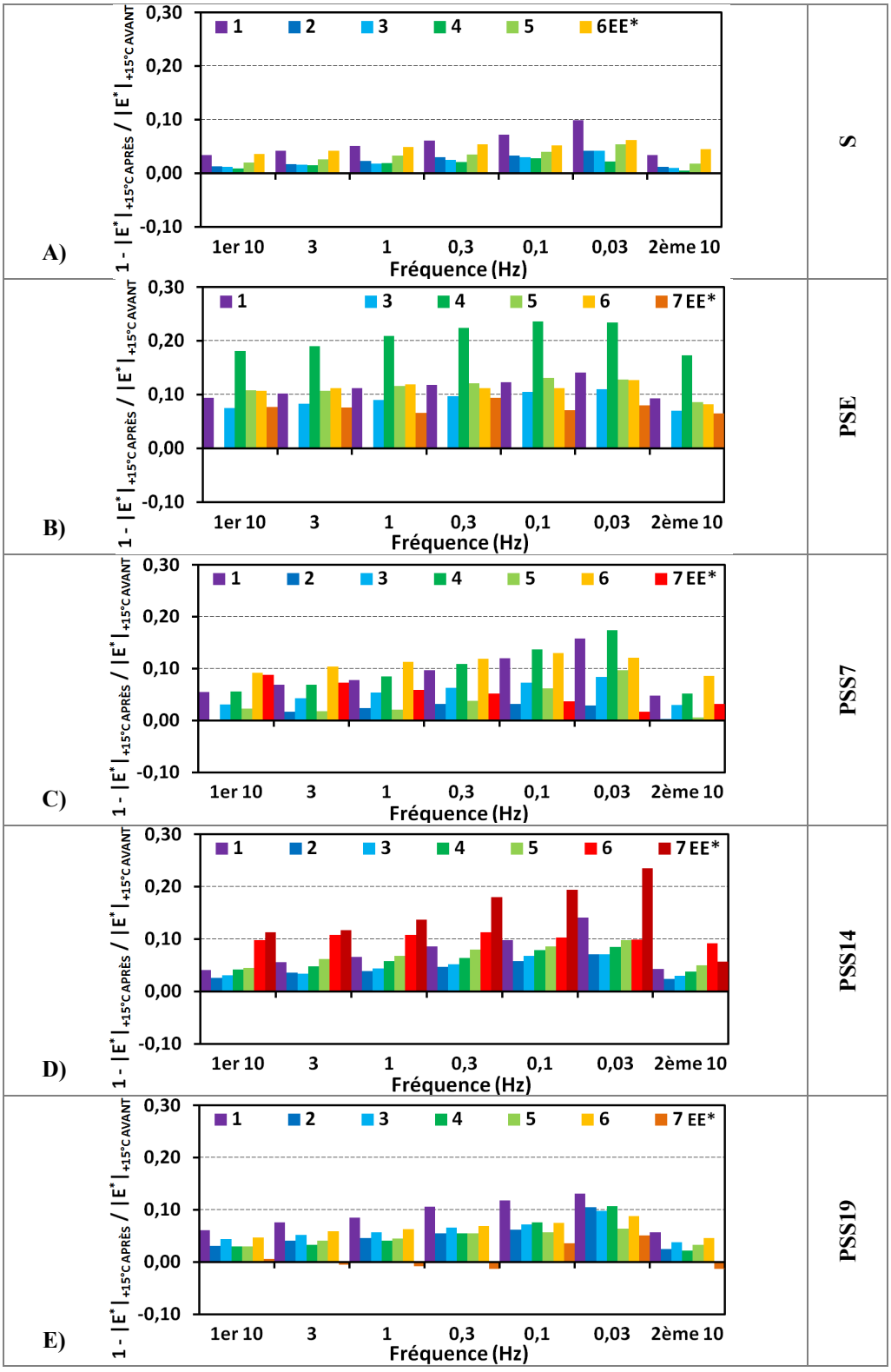


Figure 4.51 Évolution du dommage établi à partir de la comparaison des valeurs de |E*| à +15°C AVANT et +15°C APRÈS en fonction de la fréquence

Primo, pour un EE* donné, le dommage apparent calculé progresse avec la diminution de la fréquence. Par ailleurs, toujours pour un EE* donné, le niveau de dommage apparent calculé à partir des valeurs de |E*| mesurées aux 1ers ou aux 2èmes 10Hz des deux +15°C est très similaire, témoignant que la détermination des valeurs |E*| mesurées à chacun des 10Hz est précise (Figure 4.51 et Tableau 4.12, 1er 10 et 2ème 10).

Tableau 4.12 Évolution du dommage calculé à partir de la comparaison des valeurs de |E*| mesurées aux 1ers ou aux 2èmes 10Hz des deux +15°C (AVANT et APRÈS)

$D_{entre\ les\ +15°C}$ calculé à partir des deux	1EE*	2EE*	3EE*	4EE*	5EE*	6EE*	7EE*	État
1ers 10Hz	0,033	0,013	0,012	0,009	0,020	0,035	---	S
2èmes 10Hz	0,034	0,012	0,010	0,005	0,018	0,045		
1ers 10Hz	0,094	---	0,075	0,181	0,108	0,107	0,077	PSE
2èmes 10Hz	0,093		0,070	0,173	0,086	0,082	0,065	
1ers 10Hz	0,055	0,002	0,031	0,056	0,022	0,092	0,088	PSS7
2èmes 10Hz	0,048	0,003	0,030	0,052	0,006	0,086	0,031	
1ers 10Hz	0,040	0,026	0,030	0,042	0,045	0,098	0,113	PSS14
2èmes 10Hz	0,043	0,024	0,030	0,038	0,050	0,092	0,057	
1ers 10Hz	0,061	0,031	0,044	0,030	0,030	0,047	0,006	PSS19
2èmes 10Hz	0,057	0,025	0,038	0,022	0,033	0,046	-0,014	

Lorsqu'on analyse les résultats de la Figure 4.51 en considérant l'ensemble des EE*, on constate que le dommage apparent calculé au 1er EE* pour l'ensemble des états est important. Finalement, soulignons que le dommage apparent calculé au cours de l'EE* est le plus élevée pour les états suivants (en ordre décroissant) : PSE, PSS14, PSS7, PSS19 et S. Cependant, il faut souligner que plusieurs corrections au niveau des valeurs |E*| ont été effectuées pour l'état PSS7 en raison d'un écart de température entre les +15°C, ce qui influence certainement la détermination des valeurs de dommage.

4.12.2 Évolution du dommage apparent généré par la séquence de cyclage de sollicitation (D_{SCS})

La quantification du dommage apparent généré par la séquence de cyclage de sollicitation (D_{SCS}) a été expliquée de façon détaillée à la section 4.7.2 (p. 203). Néanmoins, il suffit tout simplement de comparer les valeurs de |E*| mesurées au début et à la fin d'une séquence de cyclage de sollicitation (SCS) réalisée à un palier de température donné. Par ailleurs, notons que la norme NF EN 12697-26 (AFNOR, 2004a) stipule que l'éprouvette ne peut plus être utilisée pour la suite de l'EE* si l'écart de rigidité (ou dommage) entre le début et la fin d'une séquence de cyclage de sollicitation, à un palier de température donné, dépasse 3%.

La Figure 4.52 présente pour chaque isotherme (ou palier de température) la synthèse du dommage apparent généré par la séquence de cyclage de sollicitation (D_{SCS}) pour chacun des EE* réalisé. Primo, pour l'ensemble des EE* et des états étudiés, le D_{SCS} se trouve presque toujours sous la limite imposée de 3% (0,03), à moins que le matériau soit suffisamment endommagé par les cycles de GD, tel qu'il en est pour les $5^{ème}$, $6^{ème}$ et $7^{ème}$ EE* (Figure 4.52). Secundo, de -35 à +5°C, le D_{SCS} est négligeable, soit ≤ 1% (0,01) pour l'ensemble des états étudiés et des EE* réalisés, à moins, encore une fois, que le matériau soit suffisamment endommagé ($5^{ème}$ au $7^{ème}$ EE*). Tertio, le D_{SCS} augmente avec la température et il est non négligeable (> 1%) pour les paliers de température de +15 à +35°C. Quarto, dans le cas où un endommagement négatif est mesuré, on considère que le matériau à conserver sa rigidité, plutôt qu'il a connu un gain de rigidité car il n'est pas confiné et que la densification de l'éprouvette en cours d'EE*, et menant à un gain de rigidité, est improbable. Quinto, le dommage mesuré au 1^{er} +15°C, comparativement à celui au $2^{ème}$ +15°C, est plus élevé. Sexto, il est ici plus difficile de discriminer les états en raison des faibles dommages mesurés (Figure 4.52).

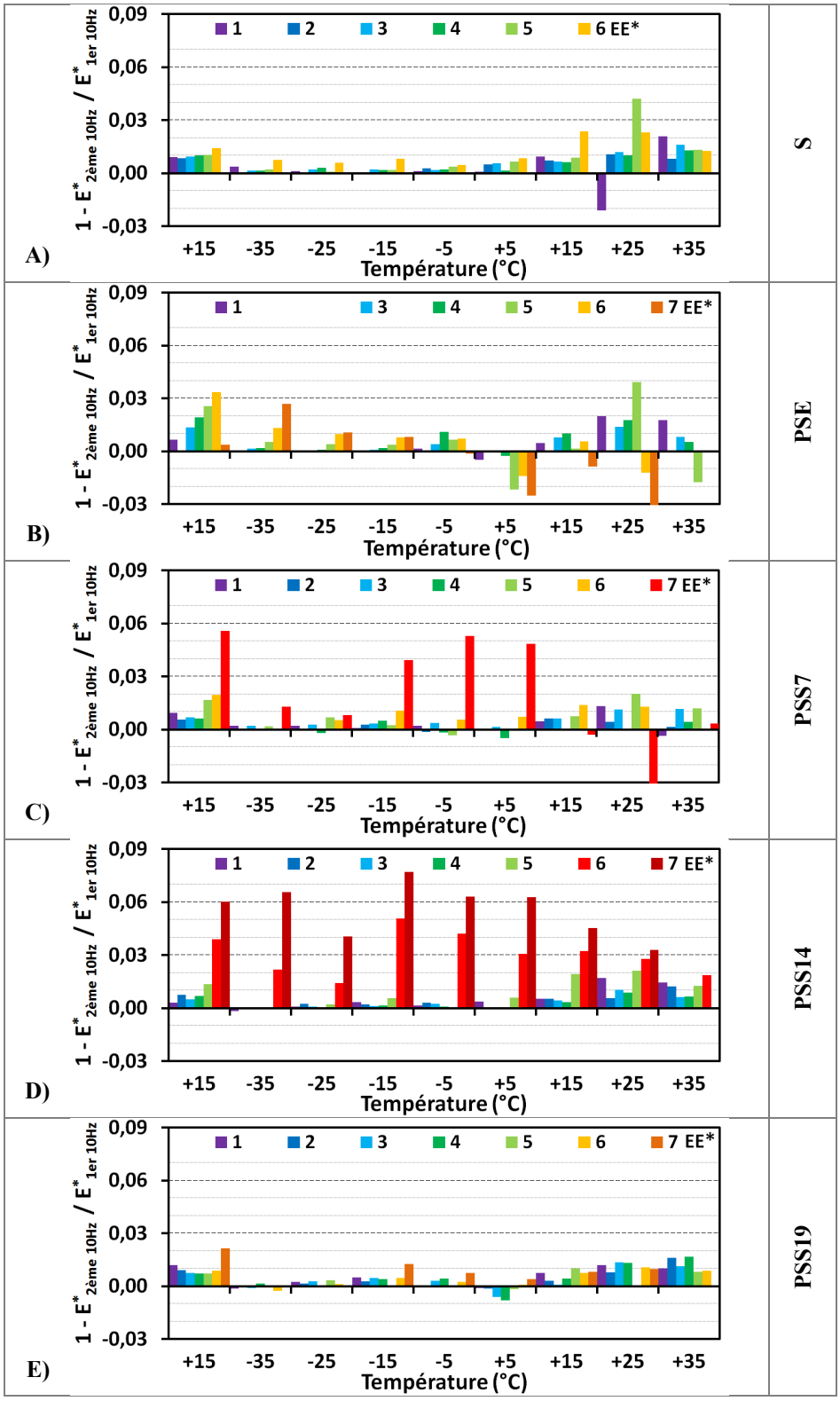


Figure 4.52 Évolution du dommage potentiellement généré par la séquence de cyclage de sollicitation (D_{SCS}) par palier de température

On peut se demander ce qu'il advient du dommage généré par chacune des séquences de cyclage de sollicitation (D_{SCS}). En effet, à chaque palier de température, on note un dommage (D_{SCS}, Figure 4.52). Est-il réversible ? Rappelons que le temps de repos de l'enrobé bitumineux entre chaque séquence de cyclage de sollicitation (SCS), est de l'ordre de six (6) heures, soit 21 600 secondes. Compte tenu du caractère visqueux et des temps de relaxation déterminés pour l'enrobé bitumineux suivants les divers états (Figure 4.29), il est clair que ce temps de repos permet l'atténuation complète de toute déformation différée. Quoiqu'il en soit, nous supposons, à priori, que le dommage généré par chaque séquence de cyclage à un palier de température donné est irréversible et donc, cumulatif lors de la réalisation d'un EE*.

4.12.3 Évolution du dommage généré par les séquences de cyclage (ΣD_{SCS})

À partir des résultats de dommage présentés à la section précédente (4.12.2), une sommation des dommages générés par chacune des séquences de cyclage de sollicitations (ΣD_{SCS}) est réalisée pour chaque EE* et chaque état. Plus spécifiquement, cette sommation des dommages (ΣD_{SCS}) va nous permettre de quantifier le dommage éventuel généré par le cycle de GD (plage de température s'échelonnant de -35 à +35°C) induit lors de la réalisation d'un EE*.

Le dommage cumulatif généré par les séquences de cyclage (ΣD_{SCS}) lors d'un EE* et pour chaque état est illustré à la Figure 4.53 en fonction de la température. Primo, pour les 5^{iers} EE* des cinq états étudiés, le dommage cumulatif (ΣD_{SCS}) reste sensiblement stable entre les températures de +15°C et +5°C (partie de gauche de la Figure 4.53). Secundo, en considérant les valeurs mesurées au cours des 5^{iers} EE* pour les cinq états étudiés, un dommage cumulatif de 0,02 à 0,09 est perceptible au cours de la réalisation d'un EE*. Tertio, pour les 5^{iers} EE* et jusqu'au $2^{ème}$ +15°C, d'un EE* à l'autre, le dommage cumulatif reste sensiblement similaire pour les éprouvettes S et PSS19 (Figure 4.53A et E), comparativement aux éprouvettes PSE, PSS7 et PSS14 (Figure 4.53B, C et D).

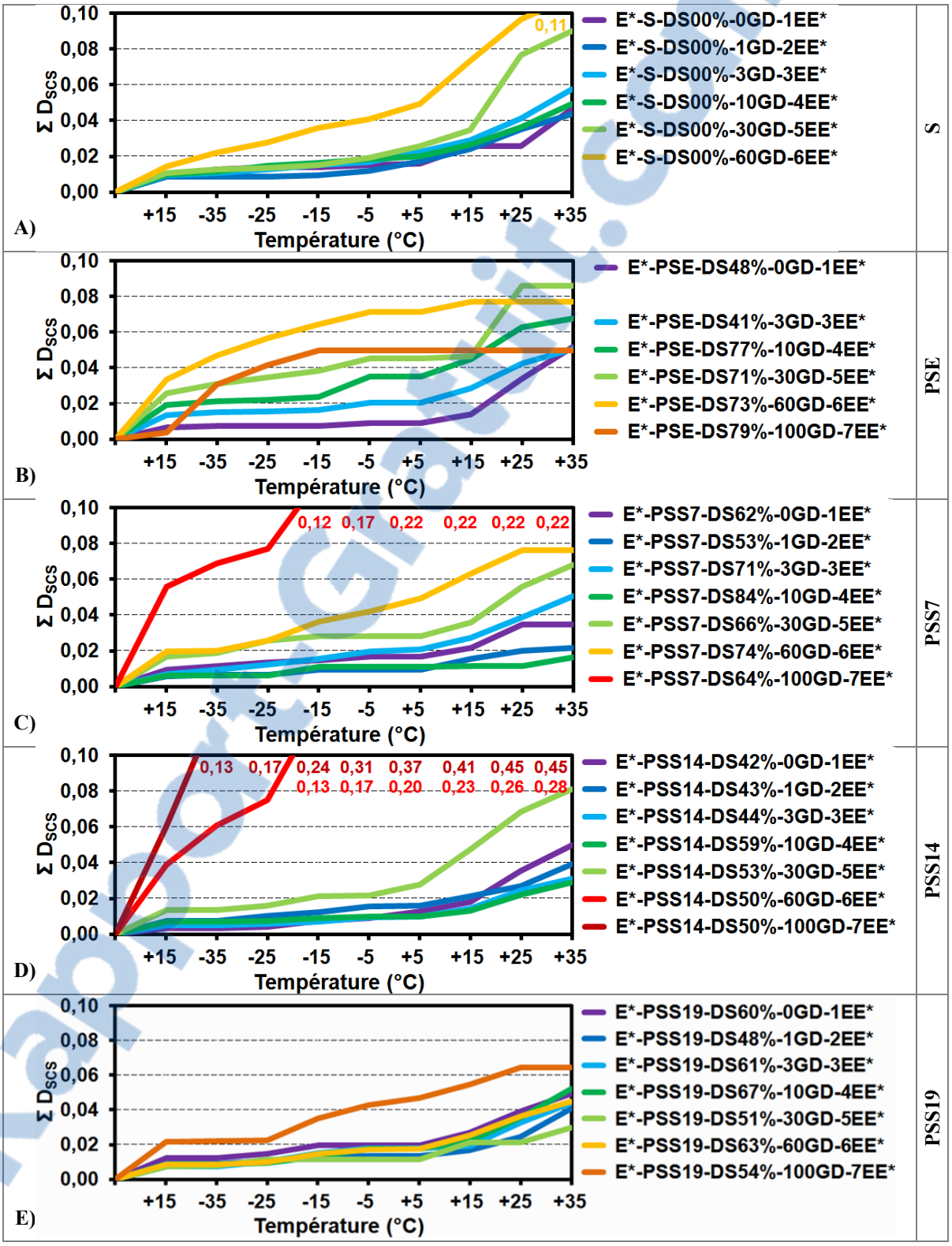


Figure 4.53 Dommage cumulatif généré par les séquences de cyclage de sollicitation (ΣD_{SCS}) lors d'un essai de module complexe (EE*)

Quarto, pour les éprouvettes PSE, PSS7 et PSS14, et d'un EE* à un autre, ce dommage cumulatif est de plus en plus important (Figure 4.53B, C et D), ce qui peut expliquer la hausse des pentes relative au dommage global suivant les cycles de gel et dégel (Figure 4.49, D_{XGD}). Quinto, il semble que ce dommage cumulatif ne peut pas expliquer à lui seul la progression importante du dommage lors d'un EE* et au fil des EE* : valeurs atteignant les 84% (Figure 4.49, D_{XGD}). À cet effet, il est certain que les cycles de GD générés lors des ET et les EE* jouent un rôle important quant à l'endommagement de l'enrobé bitumineux.

Par ailleurs, afin de préciser si le dommage généré par chacune des séquences de cyclage (D_{SCS}) est vraiment irréversible (cumulatif : ΣD_{SCS}), il est nécessaire de se référer aux valeurs de dommage calculées précédemment entre les deux +15°C ($D_{entre\ les\ +15°C}$, § 4.12.1).

Il faut souligner que le dommage entre les +15°C ($D_{entre\ les\ +15°C}$) évolue selon la fréquence de sollicitation. Il est alors indispensable de se référer au dommage entre les +15°C ($D_{entre\ les\ +15°C}$) calculé à une fréquence de 10Hz (Tableau 4.12) car les dommages générés par les séquences de cyclage de sollicitation (D_{SCS}, Figure 4.52) sont calculés en référence à cette même fréquence.

Également, pour fins de comparaison, il est également nécessaire de se référer à la même plage de mesures, soit celle s'échelonnant entre les deux +15°C. À cet effet, le dommage cumulatif est calculé entre les deux +15°C ($\Sigma D_{SCS\ entre\ les\ +15°C}$) et présenté au Tableau 4.13.

Les valeurs du dommage cumulatif entre les +15°C ($\Sigma D_{SCS\ entre\ les\ +15°C}$, Tableau 4.13) sont inférieures à celles du dommage calculé entre les +15°C ($D_{entre\ les\ +15°C}$, Tableau 4.12), ce qui montre, à priori, que l'hypothèse de dommages irréversibles est plausible (ΣD_{SCS}). La validation de cette hypothèse va nous permettre de vérifier si le cycle de GD induit lors de la réalisation d'un EE* génère réellement un dommage à l'enrobé bitumineux.

Tableau 4.13 Dommage cumulatif, généré par les séquences de cyclage, entre les +15°C en considérant les 1ers ou les 2èmes 10Hz aux températures de +15°C (AVANT et APRÈS)

$\Sigma D_{SCS\ entre\ les\ +15°C}$ calculé à partir des deux	1EE*	2EE*	3EE*	4EE*	5EE*	6EE*	7EE*	État
1ers 10Hz	0,016	0,017	0,023	0,020	0,026	0,049	---	S
2èmes 10Hz	0,017	0,016	0,020	0,016	0,024	0,059		
1ers 10Hz	0,009	---	0,021	0,035	0,045	0,071	0,050	PSE
2èmes 10Hz	0,007		0,015	0,026	0,021	0,044	0,046	
1ers 10Hz	0,017	0,009	0,021	0,011	0,028	0,049	0,218	PSS7
2èmes 10Hz	0,012	0,010	0,020	0,006	0,019	0,043	0,162	
1ers 10Hz	0,013	0,016	0,010	0,010	0,028	0,199	0,369	PSS14
2èmes 10Hz	0,015	0,014	0,009	0,006	0,034	0,192	0,354	
1ers 10Hz	0,020	0,014	0,018	0,018	0,011	0,018	0,047	PSS19
2èmes 10Hz	0,015	0,008	0,012	0,015	0,014	0,017	0,033	

4.12.4 Évolution du dommage généré par le cycle de GD du EE* (D_{GDEE*})

La quantification du dommage généré par le cycle de gel-dégel de l'EE* (D_{GDEE*}) s'effectue à l'aide des valeurs des dommages $D_{entre\ les\ +15°C}$ et $\Sigma D_{SCS\ entre\ les\ +15°C}$ calculés à une fréquence de sollicitation de 10Hz et ce, pour un même EE* (Tableau 4.12 et Tableau 4.13). Plus précisément, D_{GDEE*} est égale à : $D_{entre\ les\ +15°C}$ - $\Sigma D_{SCS\ entre\ les\ +15°C}$. Étant donné que les valeurs de D_{GDEE*} calculées avec les 1ers 10 Hz ou les 2èmes 10Hz sont très similaires, nous avons décidé de présenter uniquement la moyenne de ces deux valeurs.

À cet effet, la Figure 4.54 présente l'évolution du dommage généré par le cycle de gel et dégel lors de la réalisation de l'EE* (D_{GDEE*}) pour tout les états étudiés. Pour l'état sec (S), très peu ou aucun dommage ne devrait être enregistré en raison de l'absence de liquide au sein du matériau. Ceci semble tout à fait plausible en égard aux valeurs mesurées (-0,01 à 0,02, Figure 4.54A). L'éprouvette partiellement saturée en eau (PSE) connaît les dommages les plus importants en raison du cycle de gel et dégel induit lors de la réalisation d'un EE* : valeurs de 0,02 à 0,15 (Figure 4.54B).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

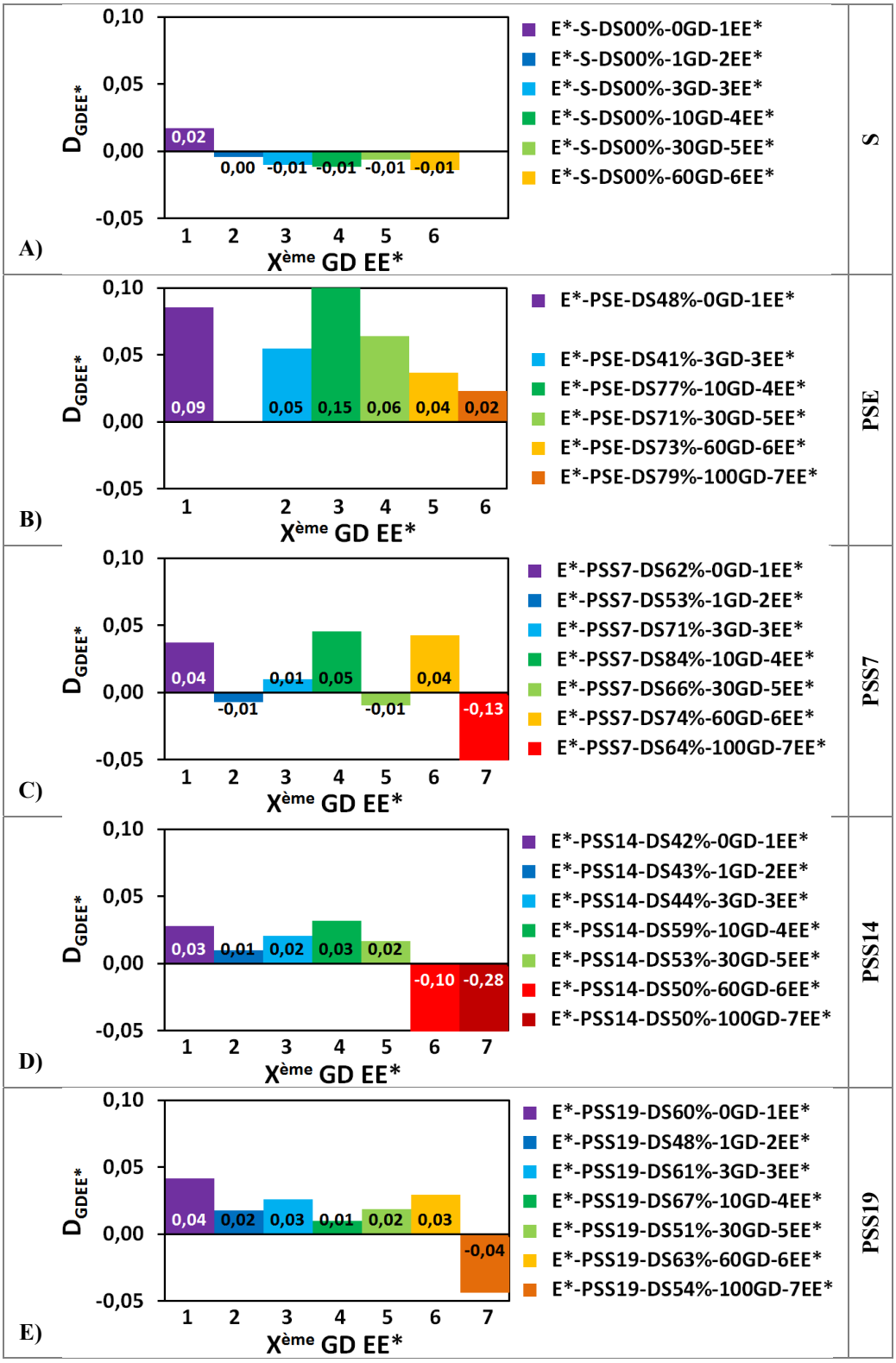


Figure 4.54 Évolution du dommage généré par le cycle de gel et dégel lors de la réalisation de l'essai de module complexe (D_{GDEE*}) pour tout les états

Ensuite, en considérant la moyenne du D_{GDEE*} pour les 4^{iers} EE* de chacune des éprouvettes partiellement saturées en saumure (PSS7, PSS14 et PSS19), ceux-ci sont très similaires : 0,015, 0,021 et 0,023 (Figure 4.54C à E). Ceci implique que lorsque les saumures se solidifient complètement au cours d'un EE* (θ < -25°C), le niveau de dommage généré au matériau est très similaire et ce, quel que soit la concentration en sel de la saumure. Pour l'ensemble des éprouvettes partiellement saturées (PSE, PSS7, PSS14 et PSS19), le dommage (D_{GDEE*}) généré par le cycle de GD lors du 1er EE* est le plus important[44], à moins que le degré de saturation (DS) ne soit nettement plus élevé lors des EE* subséquents (Figure 4.54B à E). Ceci est visible pour les 4èmes EE* des éprouvettes PSE, PSS7 et PSS14 (Figure 4.54B à D). Par ailleurs, à l'exception des derniers EE* où les indices de qualité sont mauvais, il y a peu de résultats d'hautes amplitudes du côté négatif (< -0,01) pour le D_{GDEE*} (Figure 4.54). Cela signifie que le dommage généré par les séquences de cyclage de sollicitation n'a pas été surestimé en considérant l'hypothèse d'irréversibilité durant la réalisation d'un EE*. Bien que six heures séparent les séquences de sollicitation (Figure 2.12 à la p. 118), le dommage généré par celles-ci n'est, en réalité, jamais récupéré totalement pendant ce temps et donc, pendant un EE*.

Toutefois, une période de 10 heures sépare les deux premières séquences de cyclage réalisées à +15 et -35°C, il est alors possible que le dommage généré pendant la première séquence (à +15°C AVANT) soit récupéré pendant cette période. Cela pourrait expliquer les valeurs de -0,01, observées à la Figure 4.54A pour l'état S, qui correspond à environ au dommage généré lors de la 1ère séquence (+15°C AVANT). Ce dommage serait réversible en raison d'une période de récupération suffisante et donc, il aurait été cumulé en trop pour le calcul de $\Sigma D_{SCS \text{ entre les } +15°C}$. Alors, en réalité, le D_{GDEE*} serait légèrement plus significatif, soit de 0,003 à 0,026 (0,3 à 2,6%). Ces valeurs s'appliquent pour l'ensemble des états et pour les 5^{iers} EE*.

---

[44] Également, lors des essais thermiques et pour l'éprouvette partiellement saturée en eau (PSE), la dilatation maximale est enregistrée lors du 1er cycle de GD (Figure 3.11).

Par ailleurs, le cycle de GD induit lors de la réalisation de l'EE* est très sévère, ce qui explique les valeurs assez élevées de dommage variant de 0,01 à 0,15 (D_{GDEE*}), car le taux de refroidissement de l'air dans l'enceinte thermique est très élevé, soit de l'ordre de 10°C/h de +15 à -35°C, et qu'une seule éprouvette est présente dans l'enceinte de la presse hydraulique. Notamment, le taux de refroidissement au sein de l'enceinte thermique pourrait être diminué pour mieux simuler les conditions in situ et le dommage généré par un cycle de GD réalisé lors des ET.

Somme toute, la méthodologie utilisée pour la quantification du D_{GDEE*} constitue une première (4ème innovation) et semble tout à fait valable. Celle-ci pourrait être exploitée pour les matériaux liés et composés d'eau, comme pour les matériaux retraités à froid et les bétons hydrauliques avec et sans fraisât.

4.13 Retour sur le dommage au fil des cycles de GD (D_{XGD})

La Figure 4.49 (p. 246) illustre que le niveau de dommage au fil des cycles de GD (D_{XGD}) est fonction de la fréquence équivalente. Afin de raffiner notre analyse et de se soustraire au maximum au dommage généré par les séquences de cyclage, il est alors nécessaire d'analyser les valeurs de |E*| mesurées à +15°C AVANT où le dommage cumulatif (ΣD_{SCS}, Figure 4.53) est au minimum. Également, à ce moment, on peut présumer que seul le dommage généré par les cycles de GD lors des essais précédents de module complexe (EE*) et thermiques (ET) est observable car plusieurs jours s'écoulent entre deux EE* consécutifs, ce qui a nécessairement permis à l'enrobé bitumineux de récupérer du dommage généré par les séquences de cyclage (ΣD_{SCS}) des EE* précédents. La réalisation d'essais en fatigue pour un nombre de cycles inférieur à 10 000 montre bien que le matériau récupère sa rigidité initiale après un temps de repos de plusieurs heures, c'est-à-dire que le matériau n'est nullement endommagé (Di Benedetto et coll., 2011). Le Tableau 4.14 présente une synthèse des valeurs de |E*| mesurées à +15°C AVANT et à une fréquence de 10Hz. Les valeurs de module à +15°C et 10Hz sont usuellement utilisées pour le dimensionnement des chaussées. Le

Tableau 4.15 présente le dommage calculé en considérant les valeurs de |E*| mesurées à +15°C AVANT et 10Hz (Tableau 4.14).

Tableau 4.14 Valeurs de |E*| mesurées à +15°C AVANT et 10Hz en fonction du nombre de cycles de gel et dégel (GD)

X EE*		1	2	3	4	5	6	7	**Vides**
Nombre de CGD des ET		0	1	3	10	30	60	100	**(%)**
|E*| (MPa) (+15°C-10Hz)	**S**	11637	10558	10230	9694	10257	9822	---	4,8
	PSE	11132	---	8762	7521	4468	3525	2996	3,4
	PSS7	10310	9726	9467	9240	9083	7664	5563	4,2
	PSS14	13045	12377	11979	11610	10681	7439	5127	3,1
	PSS19	11792	11456	11219	10936	10938	10609	9286	4,3

Tableau 4.15 Dommage déterminé à l'aide des valeurs de |E*| mesurées à +15°C AVANT et 10Hz en fonction du nombre de cycles de gel et dégel (GD)

X EE*		1	2	3	4	5	6	7	**Vides**
Nombre de CGD des ET		0	1	3	10	30	60	100	**(%)**
$D_{+15°C\ AVANT-10Hz}$	**S**	0	0,09	0,12	0,17	0,12	0,16	---	4,8
	PSE	0	---	0,21	0,32	0,60	0,68	0,73	3,4
	PSS7	0	0,06	0,08	0,10	0,12	0,26	0,46	4,2
	PSS14	0	0,05	0,08	0,11	0,18	0,43	0,61	3,1
	PSS19	0	0,03	0,05	0,07	0,07	0,10	0,21	4,3

Également, il est intéressant de vérifier les valeurs de |E*| mesurées à +15°C APRÈS-10Hz. Le Tableau 4.16 présente les valeurs de la norme du module complexe |E*| mesurées à +15°C APRÈS-10Hz en fonction du nombre de cycles de GD pour chacun des états étudiés. Le Tableau 4.17 présente le dommage calculé en considérant les valeurs de |E*| mesurées à +15°C APRÈS et 10Hz (Tableau 4.16).

Les dommages calculés avec les valeurs de |E*| mesurées AVANT (15°C-10Hz, Tableau 4.15) sont tout à fait comparables à ceux calculés avec les valeurs de |E*| mesurées APRÈS (15°C-10Hz, Tableau 4.17). Ceci implique que la projection du dommage au fil des cycles de GD des ET (D_{XGD}, Figure 4.49) en fonction de la fréquence équivalente peut être considéré

majoritairement comme invariable quelque soit les valeurs considérées à +15°C : +15°C AVANT ou +15°C APRÈS.

Tableau 4.16 Valeurs de |E*| mesurées à +15°C APRÈS et 10Hz en fonction du nombre de cycles de gel et dégel (GD)

X EE*		1	2	3	4	5	6	7	**Vides**
Nombre de CGD des ET		0	1	3	10	30	60	100	**(%)**
|E*| (MPa) (+15°C-10Hz)	**S**	11248	10422	10104	9610	10056	9474	---	4,8
	PSE	10082	---	8105	6159	3986	3147	2766	3,4
	PSS7	9930	9705	9177	8504	8056	6961	5072	4,2
	PSS14	12518	12056	11614	11128	10205	6710	4202	3,1
	PSS19	11072	11098	10724	10666	10608	10112	9720	4,3

Tableau 4.17 Dommage déterminé à l'aide des valeurs de |E*| mesurées à +15°C APRÈS et 10Hz en fonction du nombre de cycles de gel et dégel (GD)

X EE*		1	2	3	4	5	6	7	**Vides**
Nombre de CGD des ET		0	1	3	10	30	60	100	**(%)**
$D_{+15°C\ APRÈS-10Hz}$	**S**	0	0,07	0,10	0,15	0,11	0,16	---	4,8
	PSE	0	---	0,20	0,39	0,60	0,69	0,73	3,4
	PSS7	0	0,02	0,08	0,14	0,19	0,30	0,49	4,2
	PSS14	0	0,04	0,07	0,11	0,18	0,46	0,66	3,1
	PSS19	0	0	0,03	0,04	0,04	0,09	0,12	4,3

Il semble qu'une évolution infime du dommage à basse température (hautes fréquences) se traduit par un dommage considérable à haute température (basses fréquences, Figure 4.49 à la page 246). A priori, ceci est attribuable à deux éléments : 1) au comportement viscoélastique de l'enrobé bitumineux et, 2) au moyen de mesure utilisée, soit la mesure de la norme du module complexe. Premièrement, on peut penser que l'altération de la matrice, composée de bitume, de filler minéral, de granulats et de vides interstitiels, à un impact plus important à hautes températures qu'à basse température quel que soit l'état (S, PSE, PSS7, PSS14 et PSS19) de l'enrobé bitumineux. Notamment, ceci peut être mis en corrélation avec les isothermes du module complexe (Figure 4.5), la fréquence de sollicitation a nettement plus d'impact aux hautes qu'aux basses températures sur la valeur du module complexe. Deuxièmement, le dommage généré par les séquences de cyclage de sollicitation est plus

élevé aux hautes qu'aux basses températures. En effet, le dommage généré par les séquences de cyclage de sollicitations (ΣD_{SCS}) ne semble pas être récupéré avec le temps, toutefois une analyse beaucoup plus poussée serait nécessaire afin d'éclaircir les éléments relatifs au dommage généré par les séquences successives de sollicitation (D_{SCS} et ΣD_{SCS}). Plus particulièrement, on peut se demander si l'application d'une contrainte nulle ($\sigma = 0$) au cours du conditionnement de température et des séquences de cyclage de sollicitation génère une augmentation de volume[45] des éprouvettes et la perte de rigidité de l'enrobé bitumineux. En effet, bien que la presse cible une contrainte nulle, elle applique une force de ±25N sur l'éprouvette, donc l'éprouvette est soumise continuellement à des forces de compression et de traction qui peuvent finir par provoquer son allongement au fil de l'EE*. Plus particulièrement, cette oscillation de la force aurait plus d'impact à hautes, qu'à basses températures, sur l'allongement des éprouvettes en raison de la rigidité inférieure de l'enrobé bitumineux à ces températures.

Par ailleurs, le dommage de l'enrobé bitumineux à l'état sec au fil des cycles de GD des ET est assez élevé (Tableau 4.15 et Tableau 4.17). En considérant les niveaux de dommages présentés dans ces deux tableaux, la dégradation de l'enrobé bitumineux est supérieure pour les états (en ordre décroissant) : PSE, PSS14, PSS7, S et PSS19. Par ailleurs, il faut souligner que le dommage serait différent et probablement plus significatif pour les états PSE, PSS7, PSS14 et PSS19 si le calcul du dommage s'effectuait par rapport à un EE* (1er EE*) réalisé sur les éprouvettes, en premier lieu, à l'état sec, au lieu de l'état partiellement saturé. Cela pourrait avoir comme effet de montrer que l'enrobé à l'état sec s'endommage moins que les

---

[45] Les quatre jauges, deux axiales et deux diamétrales, collées à une éprouvette permettent de vérifier l'évolution du volume de cette dernière lors d'un EE*. Il faut se référer à la valeur centrée de la déformation, mesurée par les jauges, lors des sollicitations mécaniques (ε_{0ax}, détails à la § 5.4.5.3). Par ailleurs, l'analyse a porté uniquement sur les éprouvettes 8-A1 (PSE) et 8-A2 (PSS7), les mesures réalisées lors du 1er EE* (E*-PSE-DS54%-0GD-1EE* et E*-PSS7-DS62%-0GD-1EE*) et plus précisément, entre les deux paliers de température de +15°C. Les caractéristiques de ces éprouvettes sont données au Tableau-A III–11 (ANNEXE III). Une augmentation de volume a été constatée et est de 40 à 64µdef dans le sens axial et de 61 à 103µdef dans le sens diamétral de l'éprouvette.

autres états au fil des cycles de GD et ce, malgré une teneur en vides supérieure. De plus, la teneur en vides des éprouvettes est faible (3,1 à 4,8%) et il faut donc s'attendre que les dommages seraient nettement supérieurs si la teneur en vides était supérieure. Également, il aurait été intéressant de mesurer la rigidité des éprouvettes PSE, PSS7, PSS14 et PSS19 après un séchage afin de quantifier le niveau de récupération.

Pour terminer, Castaneda Pinzon (2007) propose l'insertion d'un facteur D qui permet de corréler la dégradation de l'enrobé bitumineux avec les courbes obtenues par le modèle de Huet, soit par la considération d'un décollement d'une partie de ses inclusions : décollement du bitume des particules minérales. Cela a comme avantage d'obtenir un dommage intrinsèque du matériau, indépendant de la température et la fréquence de sollicitation. Malheureusement, cet aspect n'a pas été vérifié dans le cadre de ce travail.

4.14 Conclusions

À priori, l'essai de module complexe constitue un essai non destructif. Toutefois, il a été montré que les séquences de cyclage de sollicitation aux différentes températures endommagent le matériau. Par ailleurs, le cycle de gel et dégel induit par l'essai de module complexe (de +15 à -35°C et de -35 à +35°C) endommage également le matériau lorsqu'il est partiellement saturé. Malgré cela, l'essai de module complexe a comme avantages de permettre un suivi de l'évolution des propriétés mécaniques de chaque éprouvette au fil du temps, de présenter des résultats plus homogènes et plus cohérents qu'un essai destructif. Ces avantages permettent de tester un nombre plus faible d'éprouvettes, comparativement à un essai destructif, afin de quantifier l'évolution de l'endommagement suivant les divers paramètres d'études, tel qu'il a été montré dans le présent travail. Toutefois, il est nécessaire que les éprouvettes aient une teneur en vides similaire, soit un écart maximal de 1%.

Ensuite, la réalisation d'un essai de module complexe sur l'ensemble des éprouvettes à l'état sec aurait permis de mieux quantifier l'effet des fluides et de la glace sur le comportement et l'endommagement de l'enrobé bitumineux partiellement saturé en eau ou en saumure.

Également, il est impératif d'effectuer un suivi du degré de saturation des éprouvettes en cours d'essai, car il affecte directement la rigidité du matériau et l'endommagement généré par les cycles de gel et dégel. De plus, l'évolution du degré de saturation au fil des saturations partielles peut donner un indice fiable quant au niveau de dommage du matériau.

Le modèle 2S2P1D permet généralement de bien simuler le comportement viscoélastique linéaire de l'enrobé bitumineux suivants les différents états et ce, sur toute la gamme de températures et de fréquences (plage de mesures). Toutefois, la détermination de la valeur d'E_{00} avec le modèle n'a pas été valable. En effet, il aurait fallu tester l'enrobé à plus haute température pour une meilleur détermination d'E_{00}.

Pour les éprouvettes partiellement saturées, le principe d'équivalente temps-température est de moins en moins respecté au fil des cycles de gel et dégel, et il possible d'observer des comportements distincts en dessous et au dessus de la température de solidification des fluides. En particulier, la présence de glace génère une hausse de la rigidité (ou valeurs d'E_0) de l'enrobé. A basses températures, lorsque les fluides sont solidifiés, les propriétés de l'enrobé bitumineux sont conservées, ce qui n'est pas le cas à plus hautes températures. En effet, le dommage de l'enrobé bitumineux semble avoir nettement plus d'impact à haute température qu'à basse température, ceci s'applique également pour l'éprouvette à l'état sec. Cet endommagement génère une baisse de la norme du module complexe et de tau témoignant d'un ramollissement du bitume et d'un changement au sein de la matrice (perte de liens) au fil des cycles de gel et dégel. A l'aide des calculs de $\Delta tau / tau_{WLF}$ et de $\Delta a_T / a_{TWLF}$, il a été possible d'identifier la température de solidification des fluides, cependant la température de référence doit être à l'extérieure de la plage de températures de solidification.

Par ailleurs, en raison de l'observation de comportements distincts en dessous et au dessus de la température de solidification des fluides, la modélisation aurait pu être réalisée sur chacun de ces comportements pour plus de rigueur. Toutefois, cette distinction fait en sorte qu'il peut y avoir très peu de points expérimentaux afin de réaliser la modélisation sur chacun des

Rapport-Gratuit.com

comportements, notamment aux basses températures. Cependant, cette double modélisation pourrait être facilitée en réalisant à priori un essai de module complexe sur l'ensemble des éprouvettes à l'état sec, soit avant leur saturation partielle. En effet, cela permettrait de bien déterminer les paramètres rhéologiques aux hautes et basses températures avant d'y inclure l'effet du fluide sur le comportement de l'enrobé bitumineux.

La méthodologie utilisée pour la quantification du dommage généré par le cycle de gel et dégel induit par la réalisation du module complexe (D_{GDEE*}) semble tout à fait valable. Celle-ci pourrait être exploitée pour les matériaux liés et composés d'eau, notamment pour les matériaux retraités à froid et les bétons hydrauliques avec et sans fraisât. De plus, le taux de refroidissement au sein de l'enceinte thermique pourrait être diminué pour mieux simuler la réalité et le dommage généré par ce cycle de gel et dégel.

Pour terminer, les niveaux de dommage présentés pourraient être nettement plus élevés pour des éprouvettes possédant une teneur en vides supérieure à celles du présent programme expérimental (≈ 4%).

CHAPITRE 5

RÉSULTATS ET ANALYSES DU VOLET #2, LES ESSAIS DE FATIGUE (EF)

5.1 Introduction

Le volet #1 du programme expérimental en lien avec les chapitres 3 et 4 a permis d'analyser l'effet de l'eau et de la saumure, à diverses concentrations en sel, sur l'endommagement de l'enrobé bitumineux exposé à des cycles de GD. Il a été clairement montré que la présence d'eau dans l'enrobé induit des dommages plus marqué dans de telles conditions de sollicitation. L'endommagement résulte essentiellement d'un phénomène physique et la phase déterminante demeure le changement d'état de l'eau en cours de refroidissement, soit lors de la formation de glace. La présence de sel dissous dans l'eau interstitielle a pour effet d'abaisser la température associée à la formation de glace, d'une part, mais de surcroit, elle donne lieu à un phénomène plus progressif, d'autre part, minimisant ainsi les effets néfastes. De manière à compléter notre réflexion quant à l'effet de la présence d'un liquide sur le comportement thermomécanique de l'enrobé bitumineux, le volet #2 du programme expérimental, porte sur les essais de fatigue de l'enrobé en présence d'eau. Les essais de fatigue sont réalisés sur des éprouvettes à l'état sec (S) et des éprouvettes partiellement saturées en eau (PSE). L'enrobé partiellement saturé en eau (PSE) a été considéré, comparativement à celui partiellement saturé en saumure (PSS), pour les essais de fatigue. Ce choix repose sur le fait même, qu'à priori, pour une température de l'ordre de +15°C, comparable à celle préconisée pour les essais de fatigue (+10°C), la présence d'eau affecte autant la rigidité (|E*|) de l'enrobé bitumineux que la présence des saumures (Figure-A VII2) et est d'autant plus marquée avec la réalisation des cycles de GD (Figure-A VII-3). Par ailleurs, la saturation partielle des éprouvettes avec de l'eau au lieu des saumures simplifie la logistique à tous les niveaux.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

5.2 Essais réalisés

Le Tableau 5.1 présente la synthèse des essais de fatigue réalisés dans le cadre du volet #2. Compte tenu que la teneur en vides affecte nettement la durée de vie de l'enrobé, les éprouvettes sont regroupées selon leur teneur en vides, soit : faible (< 3,5%), intermédiaire (3,5 à 4,5%) ou élevée (> 4,5%) et ce, pour chacun des deux états testés dans le cadre de ce programme expérimental (S et PSE). L'ensemble des éprouvettes, soit sans jauges (F_{SJ}), sont testées sur la presse MTS 858.

Tableau 5.1 Synthèse des essais de fatigue réalisés sur l'enrobé EB-14

État	Vides		Éprouvette	Collage des casques		Déformation (µdef)	
	Groupe	%	No *	Banc	Banc + presse	Ciblée	Mesurée
S	< 3,5	3,2	4C1	X		120	117
		3,1	2B1	X		130	128
		2,8	2B3		X	140	138
	3,5 à 4,5	4,1	4C3 (RNA)	X		90	87
		4,0	6A3	X		100	97
		4,1	1B3	X		110	107
		4,4	6A2		X	120	118
		4,1	5D1	X		130	129
		4,4	5A2 (RP)		X	135	131
	> 4,5	5,0	1A1	X		100	98
		5,1	3A3	X		130	128
PSE	< 3,5	3,5	2C1 (RP)		X	120	118
	3,5 à 4,5	4,5	2C4		X	100	91
		4,1	1C2	X		100	97
		4,4	6D2		X	110	106
		4,3	6B2		X	110	107
		4,3	1B1	X		110	108
		4,0	9B1	X		120	117
	> 4,5	4,9	9D2 (RP)	X		115	111

* Les éprouvettes surlignées en gris présentent certaines particularités au niveau de leur résultat et de leur validité. Pour les éprouvettes nos 5A2, 2C1 et 9D2, la durée de vie en fatigue est inférieure à 60 000 cycles, ce qui représente une rupture prématurée (RP). Pour l'éprouvette no 4C3, la rupture n'a pas été atteinte (RNA), malgré l'application de 10 millions de cycles de sollicitation. Ce résultat est parfois présenté avec l'ensemble des résultats dans les figures subséquentes, toutefois il n'est pas considéré dans la détermination de la courbe de Wöhler (§ 5.6.6 et 5.6.7). En effet, ce résultat permet de montrer la validité de la pente de la droite de fatigue établie pour les éprouvettes S.

Les essais et l'analyse des résultats d'essais de fatigue ont été réalisés suivant une procédure rigoureuse. Les essais de fatigue ont été réalisés à +10°C sous sollicitations sinusoïdales et suivant une fréquence de sollicitation de 10Hz. Le bon déroulement de chaque essai a été validé en considérant, notamment :

- température au début de l'essai de 10 ± 0,7°C ;
- indice de qualité (IQ) de chacun des signaux inférieur à 15% en cours d'essai ;
- écart de déformation d'un extensomètre par rapport à la valeur moyenne des trois extensomètres ($\Delta\varepsilon_{exti}$ (%) = [(ε_{Aaxi} - ε_{Aax}) / ε_{Aax}] × 100%) inférieur à 25% (homogénéité des déformations au sein de l'éprouvette) ;
- minimum de 60 000 cycles de sollicitation.

5.3 Saturation partielle des éprouvettes

Chaque éprouvette PSE a été saturée sous vide suivant la procédure décrite à la section 2.4.12. Notamment, la durée de l'immersion dans l'eau des éprouvettes varie de 90 à 165 minutes. Suite à la saturation partielle en eau, les éprouvettes ont été rapidement testées en fatigue suivant un délai inférieur à 36 heures après saturation. En conséquent, chaque éprouvette (enrobé bitumineux) est ainsi en contact avec de l'eau pour une courte période avant d'être soumise aux sollicitations mécaniques. Soulignons que d'autres recherches rapportées dans la littérature ont plutôt préconisé une immersion prolongée dans l'eau avant d'être testé, souvent de l'ordre de 1 à 3 semaines (§ 1.5.3.8). Bien qu'une courte période en contact avec l'eau ait été adoptée, ceci permet de vérifier, notamment si des degrés de saturation (DS) élevés au sein des éprouvettes à un impact important sur la résistance à la fatigue de l'enrobé bitumineux.

5.4 Résultats types d'un essai de fatigue

5.4.1 Introduction

De manière à montrer la méthodologie utilisée pour valider et exploiter les résultats d'un essai, les résultats de l'essai de fatigue de l'éprouvette no 5D1, testée à l'état sec (S), sont

présentés minutieusement dans cette section. Plus précisément, ce sont les résultats relatifs aux évolutions de(s) :

- la température à la surface de l'éprouvette ;
- l'échauffement à la surface de l'éprouvette ;
- indices de qualité des signaux ;
- éléments relatif à la déformation (amplitude, écarts de déformation et valeur centrée) ;
- éléments relatifs à la contrainte (amplitude et valeur centrée) ;
- l'angle de phase ;
- la norme du module complexe ;
- l'énergie dissipée.

Par ailleurs, pour de plus amples détails quant à l'étude et à la quantification des effets biaisant (échauffement, non linéarité et thixotropie) existants lors d'essais réalisés en continu et soumis à moins de 10 000 cycles de sollicitation, il est recommandé de consulter les références suivantes : Di Benedetto et coll. (2011) et Nguyen et coll. (2012).

5.4.2 Évolution de la température à la surface de l'éprouvette

L'observation de l'évolution de la température à la surface de l'éprouvette permet de :

- vérifier si la température au début de l'essai respecte l'exigence de 10 ± 0,7°C ;
- vérifier si la consigne de conditionnement de l'enceinte thermique au cours de l'essai est appropriée ;
- quantifier l'échauffement de l'éprouvette lors de sa sollicitation.

La température de l'éprouvette constitue un élément important à respecter en cours d'essai car elle influence directement sa rigidité et la durée de vie en fatigue. La Figure 5.1 présente l'évolution de la température de surface de l'éprouvette no 5D1. Au début de l'essai, la température à la surface de l'éprouvette est de +10,02°C, ce qui respecte l'exigence de 10 ± 0,7°C. Ensuite, la température à la surface de l'éprouvette progresse avec les cycles de sollicitation et atteint 10,48°C après 32 109 cycles. Par ailleurs, après les 40 000 premiers

cycles de sollicitation, la température se stabilise jusqu'à la fin de l'essai, soit jusqu'à la rupture de l'éprouvette à 194 362 cycles.

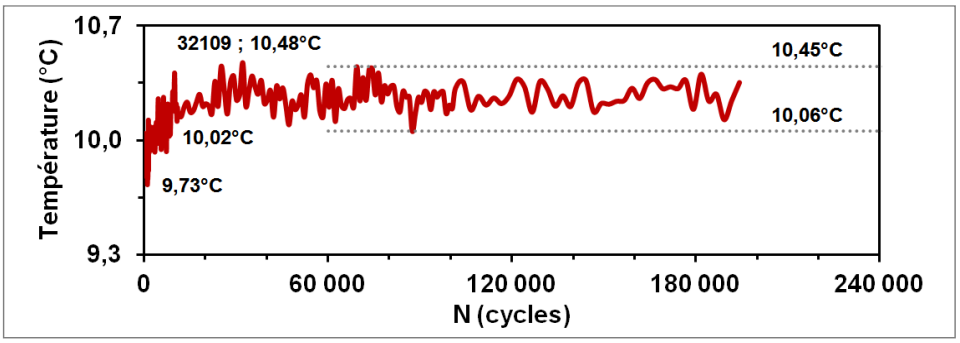


Figure 5.1 Évolution de la température à la surface de l'éprouvette 5D1

Toutefois, il est possible de constater que la température à la surface de l'éprouvette peut varier jusqu'à ±0,2°C (entre les lignes horizontales pointillées grises, Figure 5.1). Cette variation de température à la surface de l'éprouvette est importante. Ceci peut être expliqué par le fait même que la sonde de température placée en surface n'a pas été recouverte de pâte (simplement appuyée sur la surface) et a donc été soumise à la variation de température et la forte circulation d'air au sein de l'enceinte thermique de la presse MTS 858. En effet, la sonde de température ne mesure pas uniquement la température à la surface de l'éprouvette, mais également celle de l'air de l'enceinte thermique. Comme mentionné précédemment, le DGCB de l'ENTPE utilise une sonde recouverte de caoutchouc, ce qui permet de mieux mesurer la température de surface de l'éprouvette.

5.4.3 Évolution de l'échauffement à la surface de l'éprouvette

L'évolution de l'échauffement est établie à partir de la température initiale à la surface de l'éprouvette. La Figure 5.2 illustre l'évolution de l'échauffement à la surface de l'éprouvette à l'état sec no 5D1. L'échauffement progresse rapidement durant les 9 860ers cycles et atteint un maximum de 0,5°C après 32 109 cycles. Également, après les 40 000 premiers cycles de sollicitation, l'échauffement se stabilise et marque la fin de la phase I. Bien que la ventilation au sein de l'enceinte thermique soit très élevée et peut réduire davantage l'échauffement de

l'éprouvette, l'échauffement mesuré à la surface est faible pour une éprouvette sollicitée à une amplitude de déformation de 129µdef. Cet échauffement devrait être près du double (Nguyen et coll., 2012). Par ailleurs, un abaissement de température de l'ordre de 0,2°C est mesuré au début de l'essai, ce qui est incohérent. L'utilisation d'une sonde de température recouverte de caoutchouc permettrait d'éviter ces deux aspects.

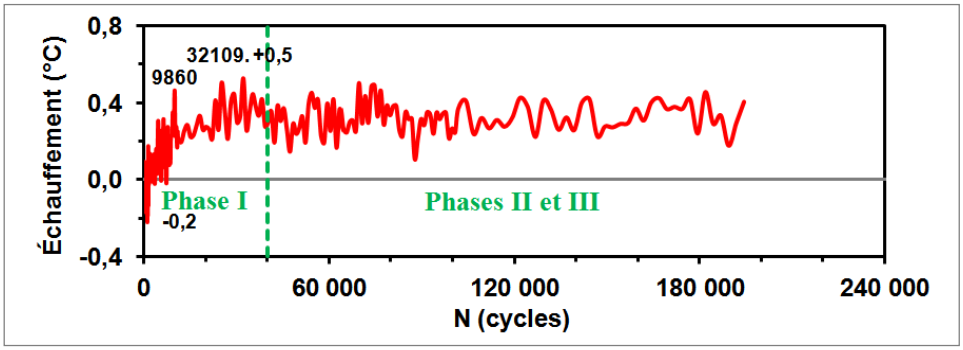


Figure 5.2 Évolution de l'échauffement à la surface de l'éprouvette 5D1 (ε_{Aax} = 129µdef ; $T_{consigne}$ = 10°C)

5.4.4 Indice de qualité des signaux

Il est également primordial de vérifier la qualité des sollicitations mécaniques imposées. Pour chaque paramètre, contrainte ou déformations, un indice de qualité des signaux (IQ) est déterminé et vérifié. L'indice de qualité permet de traduire en quelque sorte l'écart entre ce qu'il est ciblé, la consigne, et ce que l'on obtient réellement. Pour une sollicitation sinusoïdale, l'IQ représente essentiellement la somme des écarts entre les valeurs d'acquisition suivant un cycle donnée et les valeurs correspondantes, mais suivant la fonction approchée, établie suivant la méthode des moindres carrées (équation (2.20) à la page 124 et ANNEXE V).

La Figure 5.3 illustre l'évolution des indices de qualité pour l'ensemble des signaux de contrainte et de déformations (valeur moyenne et valeurs des extensomètres nos 1, 2 et 3). Les IQ doivent être inférieurs à 10% idéalement (ligne pointillée verte) ou à 15% pour l'ensemble de l'essai (ligne pointillée rouge, Figure 5.3). Usuellement, les indices sont élevés

au début et à la fin de l'essai. Avant 100 cycles de sollicitation, l'amplitude de déformation axiale ciblée (ε_{Aax}) n'est pas atteinte et stabilisée, donc cela implique que la presse s'ajuste continuellement impliquant des indices de qualité élevés. Par ailleurs, à la fin de l'essai, l'éprouvette se trouve dans un état instable, soit au moment de la phase de rupture expliquant une hausse des IQ.

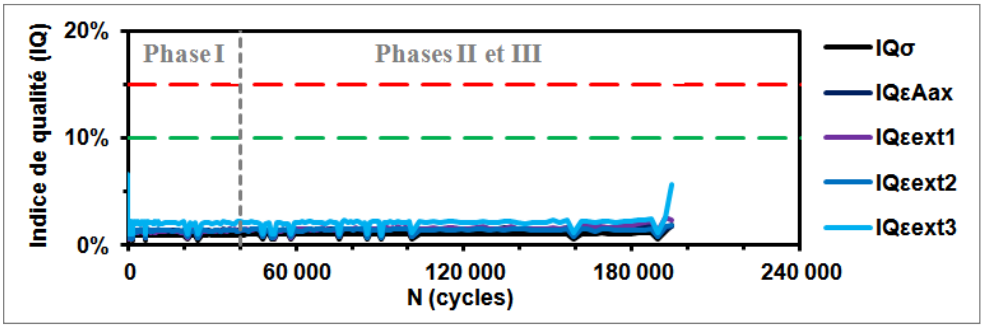


Figure 5.3 Évolution de l'indice de qualité des signaux de σ et ε

5.4.5 Éléments relatifs à la déformation

5.4.5.1 Évolution de l'amplitude de déformation

L'évolution de l'amplitude de la déformation axiale (ε_{Aax}) est présentée à la Figure 5.4. Il est possible d'observer que l'acquisition débute au 8ème cycle et non au 1er cycle, tel qu'exigé ou souhaité.

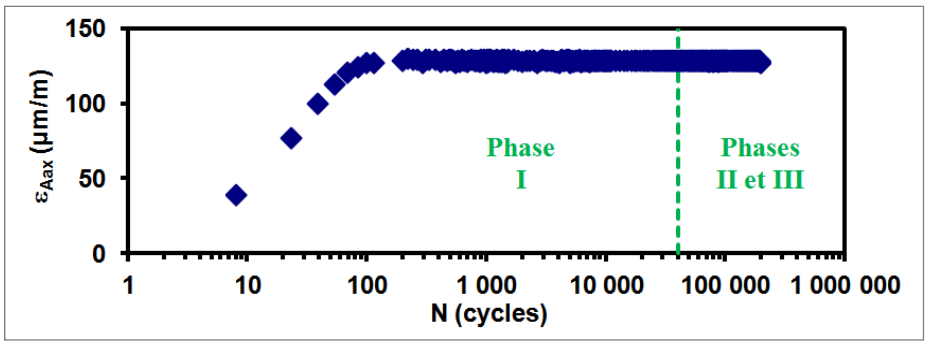


Figure 5.4 Évolution de l'amplitude de déformation axiale moyenne

De plus, il faut près de 100 cycles de sollicitation pour atteindre la déformation cible imposée (ε_{Aax}, Figure 5.4). Par la suite, la déformation imposée (ε_{Aax}) reste constante. Cette déformation axiale (ε_{Aax}) constitue la moyenne des déformations axiales mesurées par les trois extensomètres en cours d'essai.

5.4.5.2 Évolution des écarts de déformation

Afin de respecter les conditions d'homogénéité au sein de l'éprouvette, il est nécessaire que la déformation mesurée par chacun des extensomètres (ε_{Aaxi}) présente un écart inférieur à 25% ($\Delta\varepsilon_{ext}$) par rapport à la déformation moyenne (ε_{Aax}). L'évolution des écarts de déformations mesurées par les trois extensomètres lors de l'essai de fatigue réalisé sur l'éprouvette no 5D1 en mode de contrôle de déformation est présentée à la Figure 5.5. Au début de l'essai, l'exigence de 25% est bel et bien respectée (Figure 5.5).

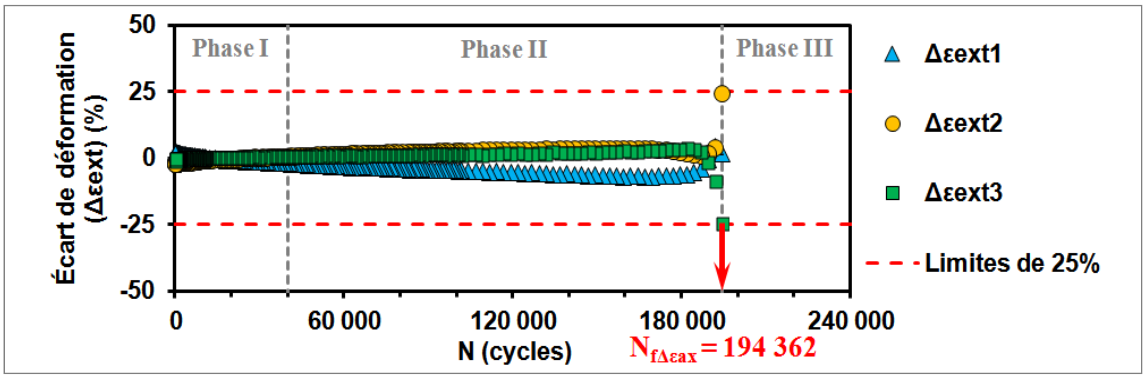


Figure 5.5 Évolution des écarts de déformations mesurées par les 3 extensomètres lors de l'essai de fatigue réalisé sur l'éprouvette 5D1 en mode de contrôle de déformation

Par ailleurs, lors de l'essai, l'atteinte d'un écart ($\Delta\varepsilon_{ext}$) de 25% témoigne que le champ de déformation n'est plus homogène au sein de l'éprouvette (Soltani, 1998 ; Baaj, 2002). L'écart supérieur à 25% est atteint notamment à la rupture, à la phase III, de l'éprouvette. Plus particulièrement, la durée de vie établie à partir d'un écart de 25% ($\Delta\varepsilon_{ext}$) est de 194 362 cycles de sollicitation pour l'éprouvette no 5D1 ($N_{f\Delta\varepsilon ax}$, Figure 5.5).

5.4.5.3 Évolution de la valeur centrée de la déformation

Nos essais de fatigue ont été réalisés en contrôle de déformation, en traction-compression, et en ciblant que la déformation moyenne de l'éprouvette (ε_{Aax}) soit centrée sur une valeur nulle (ε_{0ax}). Pour l'éprouvette no 5D1, cette valeur nulle (ε_{0ax}) est illustrée à la Figure 5.6.

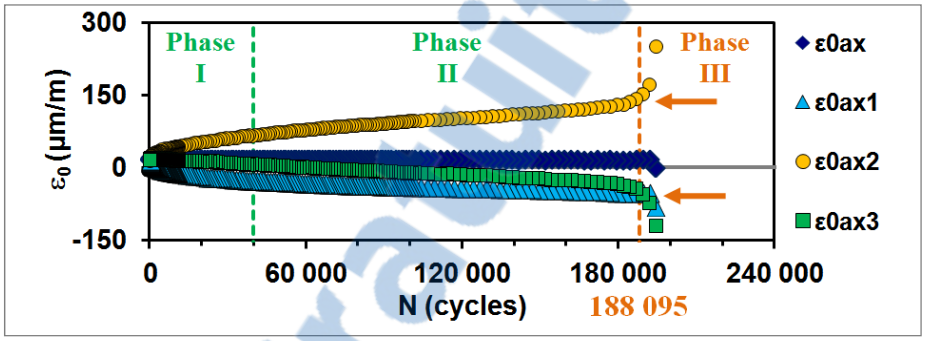


Figure 5.6 Évolution des centres de déformation (éprouvette # 5D1)

Bien qu'en cours d'essai, la déformation moyenne (ε_{0ax}) puisse rester autour d'une valeur nulle de déformation, la déformation propre mesurée par chacun des extensomètres (ε_{0ax1}, ε_{0ax2} ou ε_{0ax3}) évolue assez rapidement en cours d'essai. A la Figure 5.6, il est possible d'observer qu'au cours de l'essai de fatigue, l'éprouvette se relaxe (jusqu'à +137µdef) du côté de l'extensomètre no 2 (ε_{0ax2}) et flue (jusqu'à -72µdef) du côté des extensomètres nos 1 et 3 (ε_{0ax1} et ε_{0ax3}) avant d'entrer dans la phase de rupture (phase III). Bien que la phase III puisse être cernée avec l'évolution des centres de déformation, soit à 188 095 cycles de sollicitations, celle-ci n'est pas considérée dans l'établissement de la rupture et la durée de vie de l'éprouvette. Par ailleurs, ces amplitudes de déformation, +137 et -72µdef, sont relativement faibles selon Baaj (2002). Toutefois, ces phénomènes de relaxation et de fluage peuvent certainement affecter le moment de la rupture de l'éprouvette, soit la valeur de sa durée de vie. Les éléments en lien à ces phénomènes seront approfondis à la section 5.5.4.1.

Rapport-Gratuit.com

5.4.6 Éléments relatifs à la contrainte

5.4.6.1 Évolution de l'amplitude de la contrainte

La Figure 5.7 illustre l'évolution de l'amplitude de la contrainte (σ_A) sinusoïdale appliquée au cours de l'essai réalisé sur l'éprouvette no 5D1. L'amplitude de la contrainte progresse rapidement jusqu'à l'atteinte de la déformation imposée (≈ 100 cycles). Après la stabilisation de la déformation imposée, l'amplitude de la contrainte chute progressivement jusqu'à la fin de l'essai.

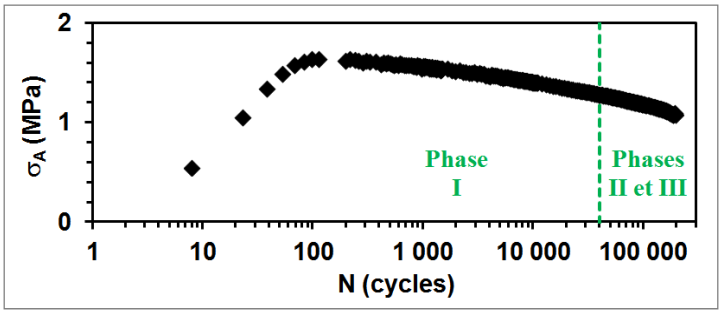


Figure 5.7 Évolution de l'amplitude de la contrainte

5.4.6.2 Évolution de la valeur centrée de la contrainte

La Figure 5.8 illustre la valeur centrée de la contrainte (σ_0) au cours de l'essai de fatigue réalisé sur l'éprouvette no 5D1. La valeur centrée de la contrainte (σ_0) évolue très rapidement au cours des 100^{iers} cycles de sollicitation, soit jusqu'à l'atteinte de la déformation ciblée. La valeur centrée de la contrainte est négative et témoigne que l'éprouvette est légèrement en compression (Figure 5.8, valeurs négatives). Ce constat témoigne que pour obtenir l'amplitude de la déformation ciblée, il est nécessaire d'appliquer une force légèrement plus élevée en compression qu'en traction due, notamment, à la rigidité plus élevée de l'enrobé bitumineux en compression.

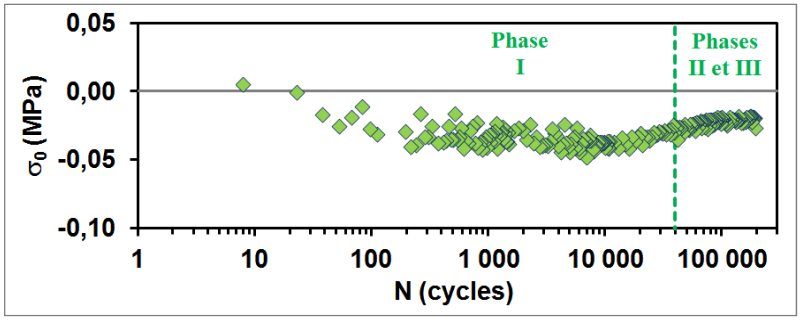


Figure 5.8 Évolution de la valeur centrée de la contrainte

Ensuite, la valeur centrée de la contrainte continue à progresser lentement dans le domaine en contraction jusqu'à environ 10 000 cycles. L'échauffement induit, majoritairement dans les 10 000^{iers} cycles (Figure 5.2), crée une dilatation de l'éprouvette et une diminution de la rigidité de l'enrobé. En conséquent, pour maintenir la même valeur centrée de déformation (ε_0, Figure 5.6) qu'initialement, il est nécessaire d'appliquer une contrainte en compression plus élevée pour contrer cette dilatation, se traduisant par un éloignement de zéro de la valeur centrée de la contrainte (σ_0) par rapport à ce qui est observé au début de l'essai. Subséquemment, soit après les 10 000^{iers} cycles, l'augmentation de la contrainte en compression finit par provoquer le fluage de l'éprouvette générant ainsi une baisse de la contrainte en compression et le retour progressif de la valeur centrée de contrainte (σ_0) vers zéro et plus précisément, vers la valeur obtenue à l'origine avant l'échauffement ($\approx 100^{ème}$ cycle de sollicitation).

5.4.7 Évolution de l'angle de phase

Lors des 100^{iers} cycles de sollicitation, l'angle de phase (ϕ_E) augmente rapidement de quelques degrés (Figure 5.9). Cette évolution est due à la non linéarité de l'enrobé bitumineux (détails à la § 5.4.8). Par la suite, cette augmentation est plus modérée, mais encore marquée, jusqu'à 40 000 cycles où, à ce moment, la température (ou l'échauffement) se stabilise. Cette évolution plus modérée de l'angle de phase (ϕ_E) est due à l'échauffement et à la thixotropie du bitume (phase I). Ensuite, l'évolution de l'angle est quasi linéaire (phase II) jusqu'à l'atteinte de la phase de rupture de l'éprouvette (phase III). Lors de la phase de

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

rupture, l'angle de phase (ϕ_E) subit une diminution ou une augmentation rapide, ce qui traduit de l'importanceé de l'endommagement du matériau (Baaj, 2002). Dans le cadre de l'essai de fatigue réalisé sur l'éprouvette no 5D1, ce changement rapide au sein de l'angle de phase (ϕ_E) se produit après 189 348 cycles de sollicitation. La durée de vie associée à ce changement rapide au niveau de l'angle de phase est représentée par le terme $N_{fmax\phi}$.

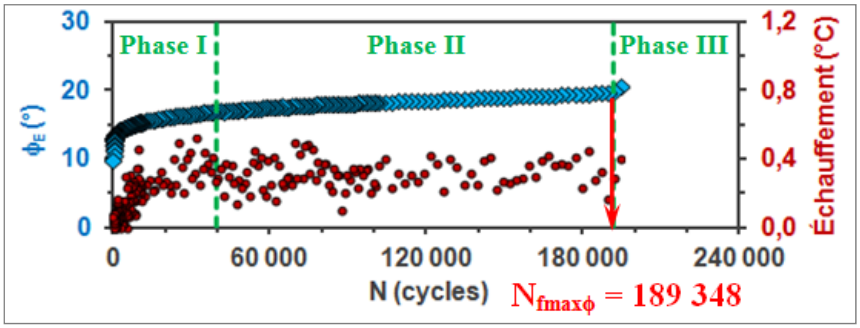


Figure 5.9 Évolution de l'angle de phase
(ε_{Aax} = 129µdef ; $T_{consigne}$ = 10°C)

5.4.8 Évolution de la norme du module complexe

A partir des amplitudes de déformation (ε_{Aax}) et de la contrainte (σ_A), la valeur de la norme du module complexe est calculée (|E*|). La Figure 5.10 illustre l'évolution de la norme du module complexe de l'éprouvette no 5D1, testée à l'état sec à 10°C et à 10Hz, en fonction du nombre de cycles de sollicitation. La chute de |E*| est très rapide au cours des 100^{iers} cycles de sollicitation. Ceci est attribuable à la non linéarité de l'enrobé bitumineux. Notamment, au début de l'essai, la valeur de |E*| est de 14 023MPa pour une amplitude de déformation de 39µm/m et elle est de 12 914MPa pour une ε_{Aax} de 129µm/m (Figure 5.10). Ceci représente une chute de |E*| de près de 8% pour un écart d'amplitude de 89µm/m. Ensuite, jusqu'à 40 000 cycles de sollicitation, la chute de |E*| devient nettement plus atténuée, elle est attribuable à l'échauffement et à la thixotropie du bitume (phase I). Pendant la phase II, la chute de |E*| est quasi linéaire. A la Figure 5.10, la chute de 50% de |E*| est atteinte à la fin de l'essai, plus exactement à la rupture de l'éprouvette ($N_{f50\%}$ = 194 362 cycles).

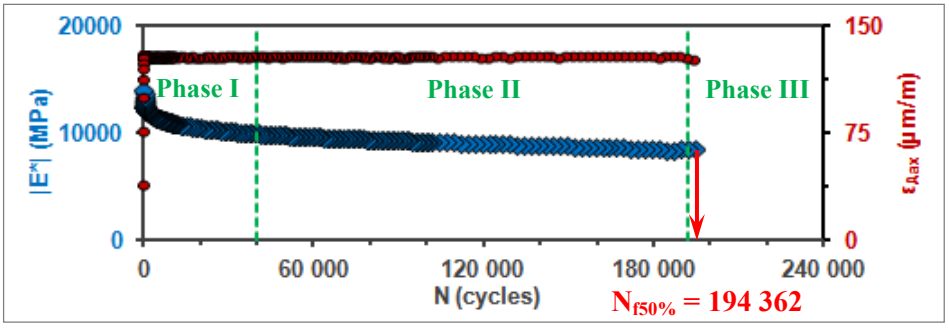


Figure 5.10 Évolution de la norme du module complexe de l'éprouvette 5D1, testée à l'état sec à 10°C-10Hz, en fonction du nombre de cycles

5.4.9 Évolution de l'énergie dissipée par cycle

A l'aide des valeurs de l'angle de phase, de l'amplitude de la contrainte et de la déformation, il est possible de calculer l'énergie dissipée générée par cycle de sollicitation : $W_N = \pi \varepsilon_{Aax} \sigma_A \sin \phi_E$. Dans le cadre de l'essai de fatigue réalisé sur l'éprouvette no 5D1, l'énergie dissipée reste sensiblement constante jusqu'à la phase III (Figure 5.11). Ordinairement, dans le cadre d'essai en contrôle de déformation, l'énergie dissipée par cycle est une fonction décroissante avec le nombre de cycles. En effet, cela s'explique par le fait même que la déformation reste constante, la contrainte diminue, même si l'angle de phase augmente. Ici, la hausse de l'angle de phase (Figure 5.9) semble compenser la faible diminution de la contrainte (Figure 5.7) en cours de sollicitation se traduisant par une énergie dissipée par cycle constante tout au long de l'essai (Figure 5.11). L'énergie dissipée au sein du matériau génère entre-autres de la chaleur, ce qui explique l'augmentation de sa température (§ 5.4.2).

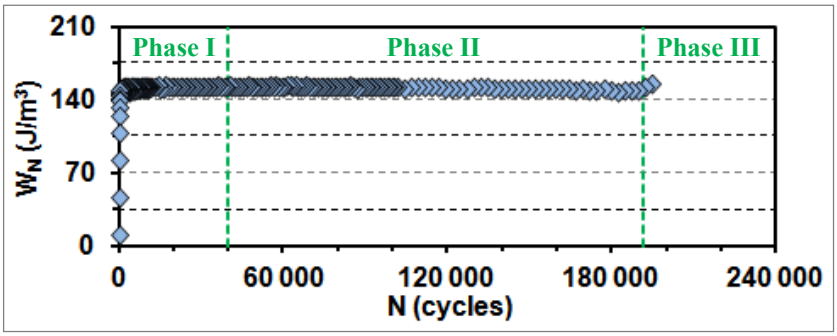


Figure 5.11 Évolution de l'énergie dissipée par cycle (W_N)

5.5 Comparaison des résultats des essais de fatigue pour les deux états

5.5.1 Introduction

En considérant la méthodologie et les éléments présentés dans la section précédente (§ 5.4), il est possible d'effectuer une comparaison rigoureuse entre les résultats d'essais de fatigue (EF) de l'enrobé bitumineux testé à l'état sec (S) et ceux réalisés à l'état partiellement saturé en eau (PSE). Le détail de l'ensemble des résultats des EF est présenté à l'ANNEXE VIII.

5.5.2 Éléments relatifs à la température

5.5.2.1 Évolution de la température à la surface des éprouvettes

À prime abord, l'analyse des courbes de l'évolution de la température en cours d'essai montre que la température mesurée à la surface des éprouvettes fluctue beaucoup. Dans un cours laps de temps, la fluctuation de la température est de l'ordre de ±0,2°C (voir l'ANNEXE VIII). Afin d'atténuer l'effet de cette fluctuation de température, l'évolution de l'échauffement est déterminée à partir de la température moyenne mesurée à la surface de l'éprouvette au cours des 300^{iers} cycles.

5.5.2.2 Évolution de l'échauffement à la surface des éprouvettes

La Figure 5.12 illustre l'échauffement à la surface des éprouvettes testées à l'état sec (S). Il est possible d'observer que l'échauffement augmente avec l'amplitude de déformation[46]. L'échauffement peut atteindre rapidement des valeurs maximales variant de 0,40 à 0,66°C après 12 900 à 42 200 cycles de sollicitation pour les éprouvettes à l'état S (Figure 5.12). Après l'atteinte de l'échauffement maximal, l'échauffement se stabilise. De façon générale,

[46] Il faut également préciser, qu'usuellement, pour une même amplitude de sollicitation, la baisse de teneur en vides génère une hausse de l'échauffement en raison de la hausse absolue de la teneur en bitume au sein du matériau et l'augmentation de la rigidité du matériau qui nécessite plus de contrainte pour le déformer.

pour l'ensemble des éprouvettes, la fin de la phase I, qui concerne les effets de thixotropie du bitume et de l'échauffement de l'éprouvette, peut être fixée à 40 000 cycles (ligne verticale, pointillée et orange à la Figure 5.12). Pour les éprouvettes PSE, un constat similaire est porté au niveau de l'échauffement et ce, malgré la présence d'eau au sein du matériau, laquelle aurait pu atténuer l'échauffement (Figure 5.13).

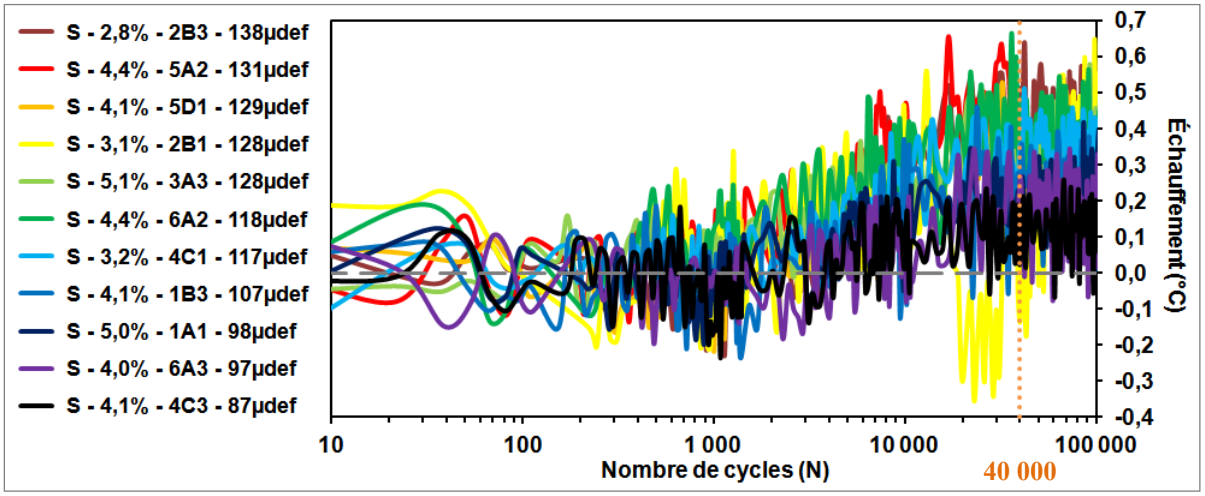


Figure 5.12 Évolution de l'échauffement à la surface des éprouvettes testées à l'état sec (S), à +10°C-10Hz, en fonction du nombre de cycles de sollicitation

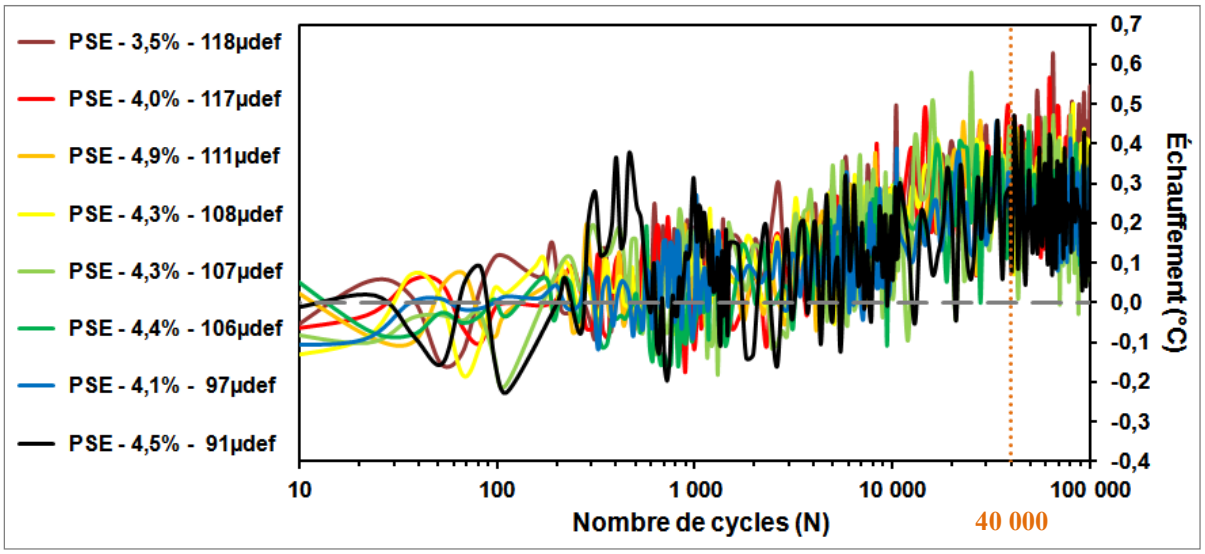


Figure 5.13 Évolution de l'échauffement à la surface des éprouvettes à l'état partiellement saturé en eau (PSE), testées à +10°C-10Hz, selon le du nombre de cycles de sollicitation

Pour terminer, l'échauffement est fonction de l'évolution de l'énergie dissipée au sein du matériau (§ 5.5.8).

5.5.3 Indice de qualité des signaux

A l'exception du début et de la fin des essais de fatigue, les indices de qualité (IQ) ont toujours été inférieurs à 5% et 10% pour les éprouvettes aux états S et PSE respectivement. Notamment, la présence d'eau modifie légèrement le comportement du matériau et donc, sa réponse à l'asservissement habituelle de la presse.

5.5.4 Éléments relatifs à la déformation

5.5.4.1 Évolution des écarts de déformation

Dans le cas des essais de fatigue jugés conformes que nous avons réalisés, l'écart de déformation pour chacun des extensomètres par rapport à la moyenne des trois ($\Delta\varepsilon_{exti}$) a toujours été inférieur à 13% en début de l'essai. Dans la majorité des essais réalisés sur les éprouvettes S, les écarts restent sensiblement constants pendant l'essai et ce, jusqu'à la phase de rupture (III). Toutefois, dans le cas des éprouvettes PSE, ces écarts varient nettement plus pendant l'essai, dénotant ainsi une instabilité et un endommagement plus rapide au sein des l'éprouvettes.

Également, l'utilisation de la presse pour le collage d'un des casques à l'éprouvette permet d'obtenir un meilleur alignement et d'obtenir des écarts pour tous les trois extensomètres ($\Delta\varepsilon_{exti}$) inférieurs à 25% au début de l'essai dans 90% des cas, comparativement à l'utilisation du banc de collage (66% des cas), pour les éprouvettes S et PSE.

Il faut mentionner que pour les essais de fatigue, il existe toujours un écart de déformation entre les extensomètres et la moyenne en raison de l'excentricité de la force appliquée à l'éprouvette et/ou de la répartition non homogène de vides, de granulats et de bitume

générant ainsi une variabilité de la rigidité au sein du matériau et subséquemment une déformation non uniforme de l'éprouvette sous sollicitation.

5.5.4.2 Évolution de la valeur centrée de la déformation

Bien qu'en cours d'essai, la déformation moyenne reste autour d'une valeur nulle (ou donnée) de déformation (ε_0), la déformation propre mesurée par chacun des extensomètres ($\varepsilon_{0\,ax1}$, $\varepsilon_{0\,ax2}$ ou $\varepsilon_{0\,ax3}$) évolue assez rapidement, tel qu'illustrée, auparavant, à la Figure 5.6.

Cependant, l'utilisation de la presse pour le collage du casque supérieur à l'éprouvette permet d'obtenir un meilleur alignement et des déformations centrées pour chacun des extensomètres ($\varepsilon_{0\,ax1}$, $\varepsilon_{0\,ax2}$ et $\varepsilon_{0\,ax3}$) nettement inférieurs à 100μdef dans 80% des cas, comparativement à l'utilisation du banc de collage (45% des cas), pour les éprouvettes S et PSE.

5.5.5 Éléments relatifs à la contrainte

5.5.5.1 Évolution de l'amplitude de contrainte

Les évolutions d'amplitude de contrainte (σ_A) en fonction des cycles de sollicitation pour les éprouvettes aux états sec (S) et partiellement saturé en eau (PSE) sont présentées à la Figure 5.14 et à la Figure 5.15 respectivement. Après l'atteinte de l'amplitude de déformation, aux alentours du $100^{ème}$ cycle de sollicitation (ligne pointillée grise), l'amplitude de contrainte diminue toujours jusqu'à la phase de rupture des éprouvettes.

Pour les éprouvettes testées suivant une même amplitude de déformation (éprouvettes S nos 2B1, 5D1 et 3A3), la baisse de la teneur en vides se traduit par une hausse de l'amplitude de contrainte (Figure 5.14). En effet, la baisse de la teneur en vides produit une augmentation de la rigidité de l'enrobé bitumineux et il est donc nécessaire d'appliquer une contrainte plus élevée pour atteindre ladite amplitude de déformation.

Par ailleurs, l'amplitude de contrainte est pratiquement doublée entre les éprouvettes nos 1A1 et 2B3 (éprouvettes S, Figure 5.14), ceci s'explique, d'une part, par la baisse de la teneur en vides qui génère une hausse de rigidité (module) et d'autre part, dans une mesure plus importante, par la hausse de l'amplitude de déformation, qui nécessitent d'appliquer une contrainte nettement plus élevée.

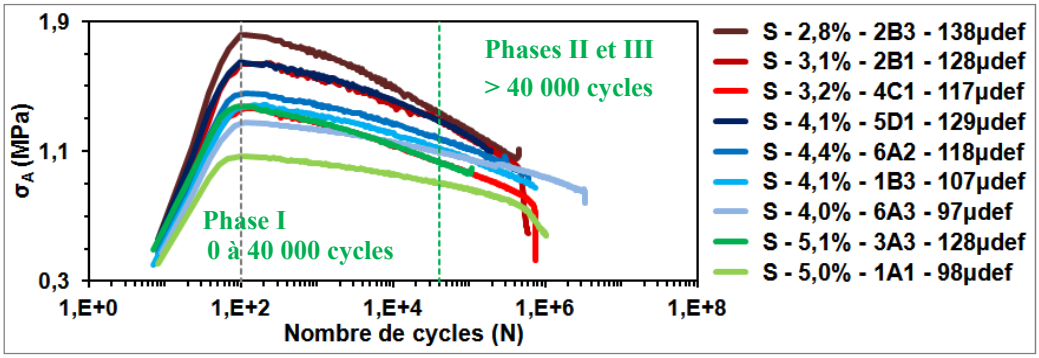


Figure 5.14 Évolution de l'amplitude de contrainte en fonction des cycles de sollicitation pour les éprouvettes testées à l'état sec (S), à +10°C et 10Hz

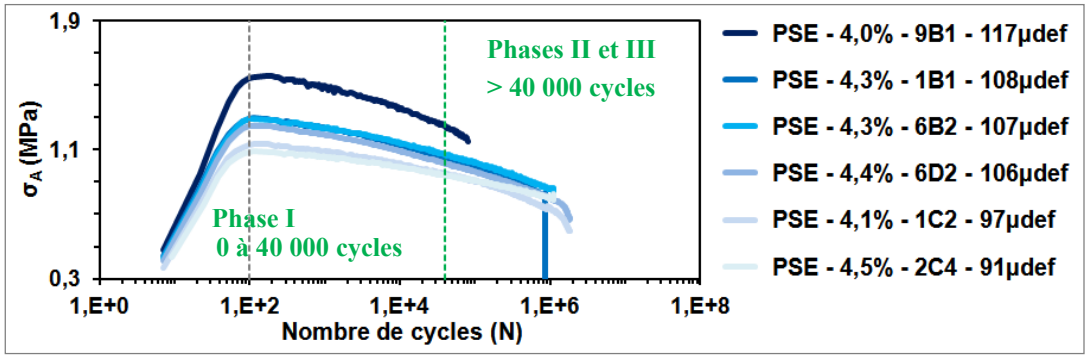


Figure 5.15 Évolution de l'amplitude de contrainte en fonction des cycles pour les éprouvettes testées à l'état partiellement saturé en eau (PSE), à +10°C et 10Hz

5.5.5.2 Évolution de la valeur centrée de la contrainte

Pour les éprouvettes à l'état sec (S) et ayant une teneur en vides intermédiaire (3,5 à 4,5%)[47], les résultats montrent que plus la déformation imposée est élevée, plus la valeur centrée de la contrainte se trouve dans le domaine en contraction (valeurs négatives, Figure 5.16). Ceci témoigne que plus la déformation imposée est élevée, plus l'écart entre les résistances à la compression et en traction du matériau s'accentue.

Pour les éprouvettes nos 6A3, 1B3 et 6A2 testées à l'état sec, la fluctuation de la valeur centrée est nettement plus élevée, comparativement aux éprouvettes nos 4C3 et 5D1, montrant ainsi que l'asservissement obtenu lors de ces essais est de moins bonne qualité (Figure 5.16). Par ailleurs, il n'existe pas de corrélation entre l'ampleur de ces fluctuations et le type de collage réalisé : banc de collage uniquement ou combinaison du banc et de la presse. Aussi, plus l'amplitude de déformation est élevée, plus il faut de cycles pour que la valeur centrée de la contrainte (σ_0) se stabilise : 40 000 à 60 000 cycles (lignes pointillées vertes, Figure 5.16). Ceci est attribuable à l'échauffement (et à la dilatation de l'éprouvette) qui se produit au cours des cycles précédents.

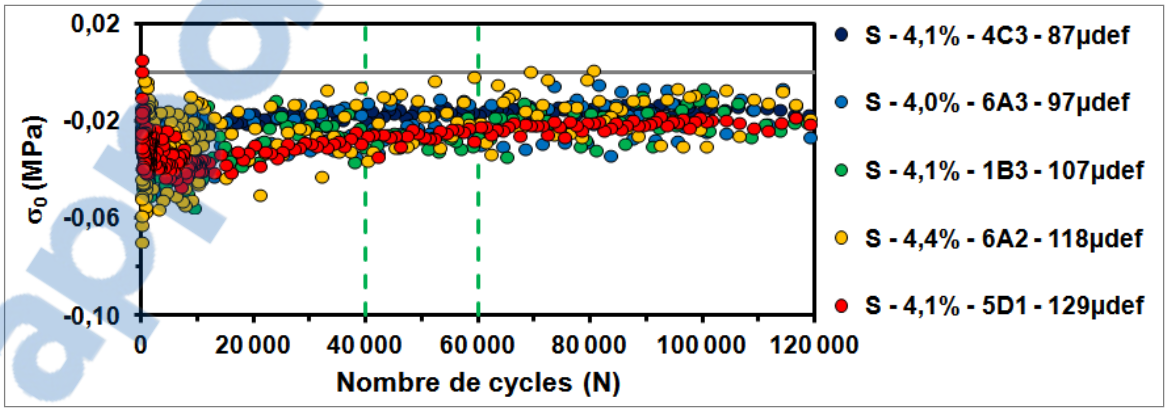


Figure 5.16 Évolution de la valeur centrée de contrainte (σ_0) pour les éprouvettes à l'état sec (S), sans jauges (F_{SJ}) et ayant une teneur en vides intermédiaire (3,5 à 4,5%)

[47] Pour des raisons de clarté, seuls les résultats relatifs à ces éprouvettes sont présentés.

Rapport-Gratuit.com

Également, pour les éprouvettes à l'état partiellement saturé en eau (PSE) et ayant une teneur en vides intermédiaire (3,5 à 4,5%), les résultats montrent que plus l'amplitude de déformation imposée est élevée, plus la valeur centrée de la contrainte se trouve dans le domaine en contraction (Figure 5.17), tout comme les éprouvettes S (Figure 5.16). Pour les éprouvettes PSE, la fluctuation de la valeur centrée est nettement plus élevée, comparativement aux éprouvettes S, montrant ainsi que l'asservissement obtenu lors de ces essais est plus difficilement obtenu (Figure 5.17). De plus, pour des amplitudes de déformation similaires à celles des éprouvettes testées à l'état sec (même couleurs), il semble que les valeurs centrées soient un peu plus près de zéro pour les éprouvettes testées à l'état PSE.

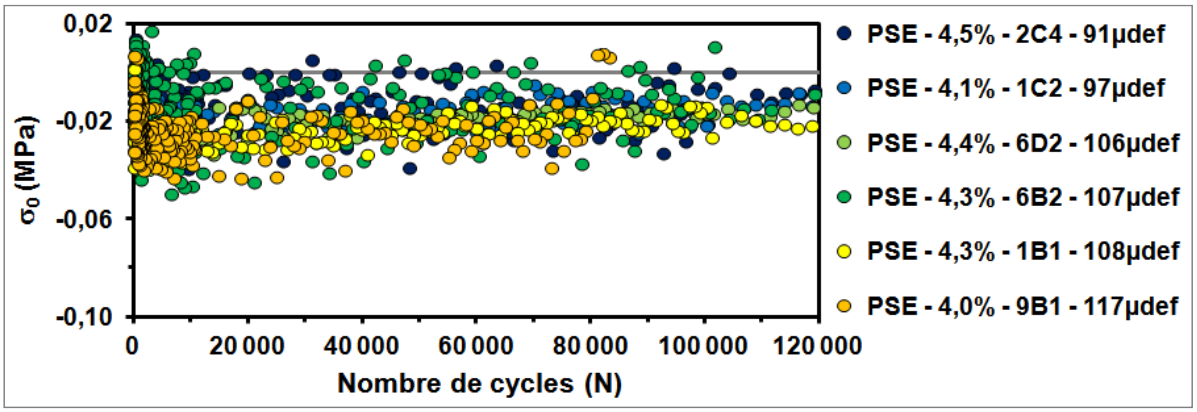


Figure 5.17 Évolution de la valeur centrée de contrainte pour les éprouvettes à l'état partiellement saturé en eau, sans jauges et ayant une teneur en vides intermédiaire

D'autre part, le positionnement de la valeur centrée de la contrainte (σ_0) est attribuable à un écart entre les modules en compression et en traction du matériau. Pour mieux quantifier l'écart entre ces modules, il est possible de considérer le rapport entre la valeur centrée de la contrainte et l'amplitude de contrainte (§ 5.5.5.3).

5.5.5.3 Évolution du rapport entre la valeur centrée et l'amplitude de contrainte

Pour les éprouvettes à l'état sec (S), le rapport entre la valeur centrée (σ_0) et l'amplitude de contrainte imposée (σ_A) présente une valeur négative qui varie majoritairement de 0 à 5%

(moyenne de 1 à 3%) (Figure 5.18). En conséquent, afin d'obtenir l'amplitude de déformation cible, il est nécessaire d'appliquer une force légèrement plus élevée en compression qu'en traction. Par ailleurs, plus la déformation imposée est élevée, plus la rigidité en traction du matériau diminue se traduisant par un éloignement de la valeur centrée (σ_0) de zéro pour les éprouvettes à l'état S (Figure 5.18). Pour les éprouvettes à l'état PSE, le même constat peut être porté (Figure 5.19). Il semble bien que l'augmentation de la déformation imposée se traduit par une perte de linéarité nettement plus importante du côté en traction qu'en compression, ce qui engendre un éloignement de la valeur centrée (σ_0) de zéro.

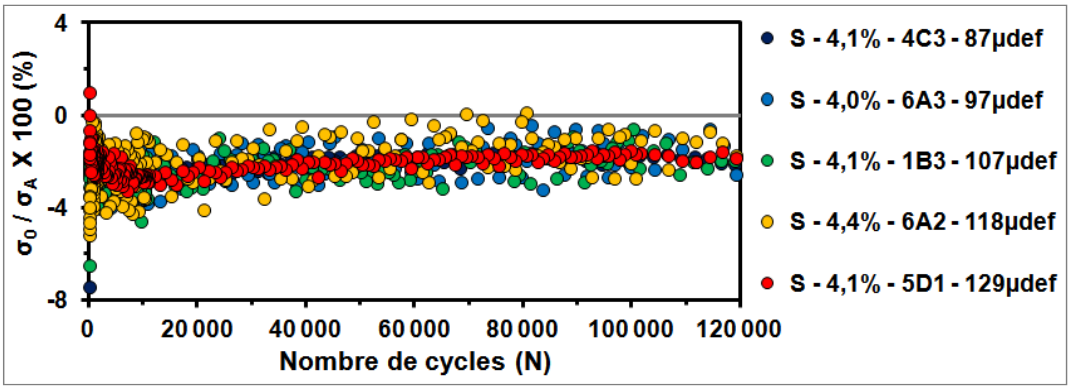


Figure 5.18 Rapport entre la valeur centrée et l'amplitude de contrainte pour les éprouvettes à l'état S, sans jauges et ayant une teneur en vides de 3,5 à 4,5%

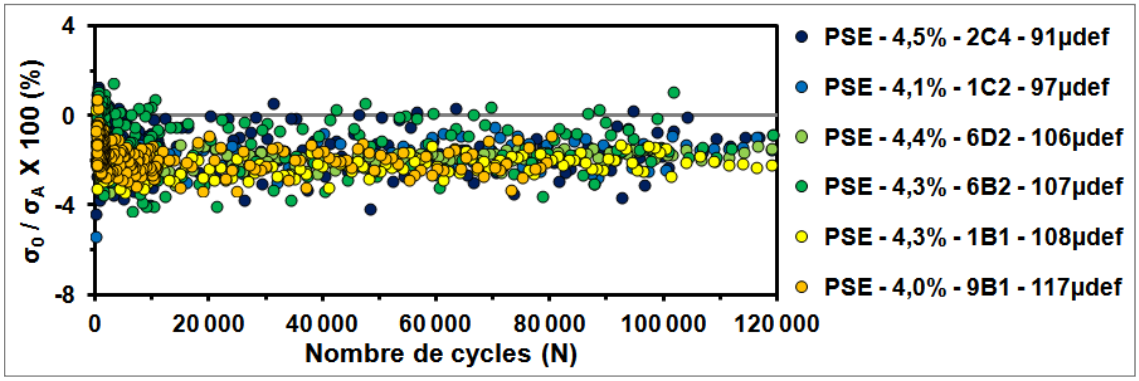


Figure 5.19 Rapport entre la valeur centrée et l'amplitude de contrainte pour les éprouvettes à l'état PSE, sans jauges et ayant une teneur en vides de 3,5 à 4,5%

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

5.5.6 Évolution de la norme du module en cours de sollicitation

La Figure 5.20 illustre l'évolution de la norme du module complexe (|E*|) des éprouvettes à l'état sec (S) en fonction du nombre de cycles de sollicitation. Les couleurs rougeâtre, bleutée et verdâtre sont utilisées pour identifier les groupements associés aux teneurs en vides, soient : faible, intermédiaire et élevée respectivement. De plus, une couleur foncée représente une amplitude de déformation élevée.

Lorsque la déformation imposée est stabilisée, soit à partir du 100ème cycle de sollicitation (ligne pointillée grise), il apparaît que les valeurs de la norme du module complexe des éprouvettes à l'état S soient majoritairement inversement proportionnelles à l'amplitude de déformation imposée (Figure 5.20). Cela est cohérent et s'explique par le comportement non linéaire de l'enrobé bitumineux. Aussi, la diminution (pente) de la norme du module complexe suivant les cycles de sollicitation est proportionnelle à l'amplitude de déformation pour les éprouvettes S d'un même groupe (teneur en vides similaire, Figure 5.20).

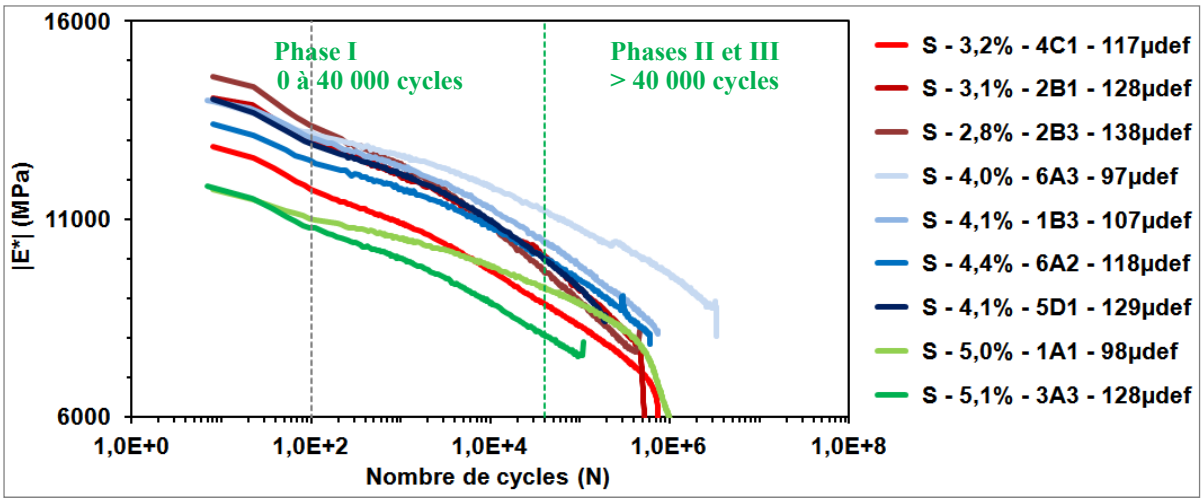


Figure 5.20 Évolution de la norme du module complexe des éprouvettes testées à l'état sec, +10°C-10Hz en fonction du nombre de cycles

La Figure 5.21 illustre l'évolution de la norme du module complexe (|E*|) des éprouvettes à l'état partiellement saturé en eau (PSE) en fonction du nombre de cycles de sollicitation.

Lorsque la déformation imposée est stabilisée, soit après le 100ème cycle de sollicitation (ligne pointillée grise), la pente de la norme du module complexe suivant les cycles de sollicitation est nettement plus abrupte avec la hausse de l'amplitude de déformation pour les éprouvettes PSE (Figure 5.21).

A l'exception des éprouvettes S nos 2B1, 4C1 et 1A1, et des éprouvettes PSE nos 6D2 et 1C2, il est rare de pouvoir observer une chute rapide et progressive de la norme du module complexe permettant d'observer entièrement la phase de rupture (III) puisque de façon générale la rupture des éprouvettes s'est présentée de manière soudaine. A cet égard, des précisions sont apportées sur cet aspect à la section 5.5.9, portant sur la rupture des éprouvettes.

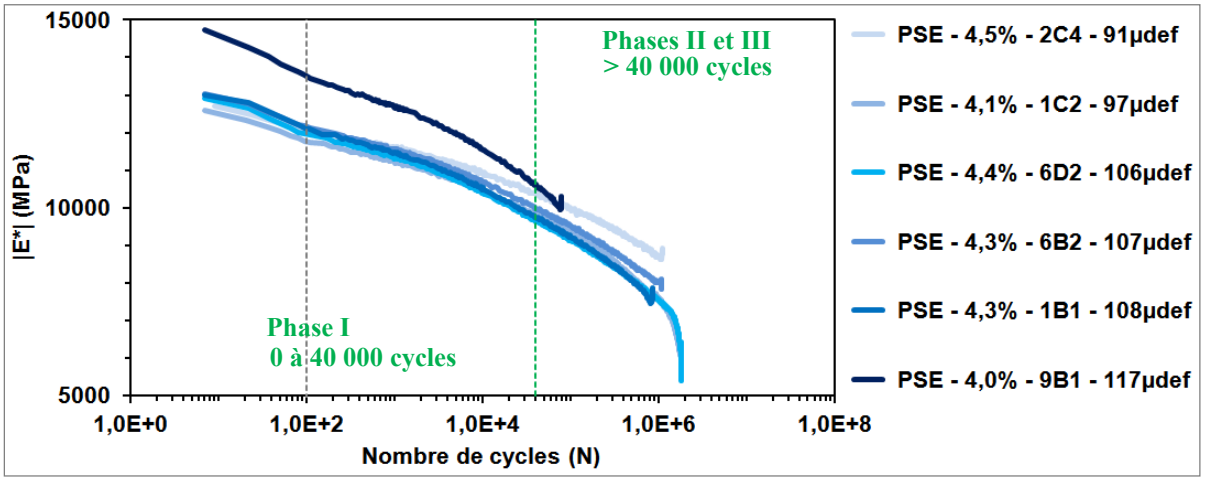


Figure 5.21 Évolution de la norme du module complexe des éprouvettes testées à l'état partiellement saturé en eau, à +10°C-10Hz, en fonction du nombre de cycles

5.5.7 Évolution de l'angle de phase

La Figure 5.22 illustre l'évolution de l'angle de phase en fonction du nombre de cycles pour les éprouvettes testées à l'état S. Pour toutes ces éprouvettes, l'évolution de ϕ_E augmente avec l'amplitude de déformation. En effet, du commencement jusqu'au 100ème cycle de sollicitation, l'évolution de ϕ_E est attribuable à la progression de la déformation imposée (ε_{Aax}) jusqu'à sa stabilisation, mais plus particulièrement à la non linéarité de l'enrobé

bitumineux. De 100 à 40 000 cycles, la progression de ϕ_E est attribuable à la thixotropie du bitume et à l'échauffement de l'éprouvette. Notamment, la progression de ϕ_E est d'autant rapide que l'amplitude de déformation est importante. Par la suite, la progression de ϕ_E est quasi linéaire, attribuable majoritairement au taux d'endommagement (fatigue) du matériau. Par ailleurs, au 100ème cycle de sollicitation, ϕ_E varie de 11,7 à 13,2° pour les éprouvettes S de teneur en vides intermédiaire (+10°C et 10Hz).

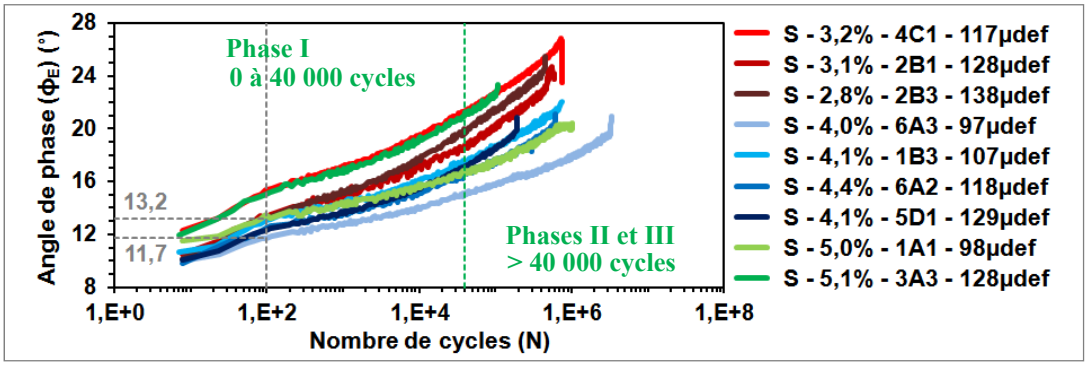


Figure 5.22 Évolution de l'angle de phase en fonction des cycles à +10°C et 10Hz pour les éprouvettes à l'état sec

La Figure 5.23 illustre l'évolution de l'angle de phase en fonction du nombre de cycles pour les éprouvettes à l'état PSE.

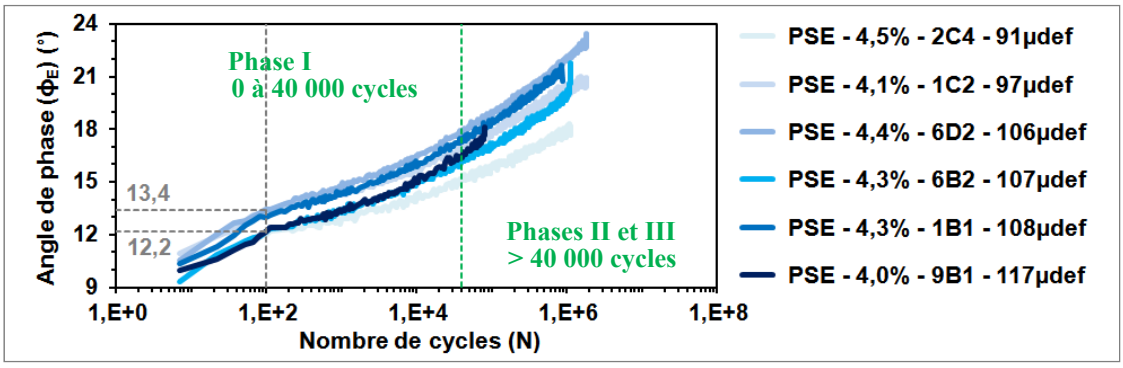


Figure 5.23 Évolution de l'angle de phase en fonction des cycles à +10°C et 10Hz pour les éprouvettes PSE à teneur en vides intermédiaire

Également, pour les éprouvettes PSE, l'évolution de ϕ_E augmente avec l'amplitude de déformation. Aussi, au 100ème cycle de sollicitation, ϕ_E varie de 12,2 à 13,4° pour les éprouvettes PSE de teneur en vides intermédiaire, comportement analogue à celui observé pour les éprouvettes S. A priori, la présence d'eau ne semble pas affecter l'angle de phase (ϕ_E) de l'enrobé bitumineux à +10°C et 10Hz.

5.5.8 Évolution de l'énergie dissipée par cycle en cours de sollicitation

Usuellement, dans le cadre d'essai de fatigue réalisé en mode de déformation, l'évolution de l'énergie dissipée par cycle ($W_N = \pi \varepsilon_{Aax} \sigma_A \sin \phi_E$) est une fonction décroissante avec le nombre de cycles. Cela s'explique par le fait que la déformation reste constante, la contrainte diminue, même si l'angle de phase augmente.

Dans le cadre de nos essais, l'énergie dissipée reste constante ou augmente graduellement jusqu'à la phase de rupture de l'éprouvette et ce, aussi bien pour les éprouvettes testées à l'état sec (S) que pour celles testées à l'état humide (PSE) (Figure 5.24 et Figure 5.25). Ceci est attribuable à la hausse de l'angle de phase (§ 5.5.7) qui compense largement la diminution de la contrainte en cours de sollicitation (§ 5.5.5.1). Aussi, l'augmentation de l'amplitude de déformation se traduit par une hausse de l'énergie par cycle (Figure 5.24 et Figure 5.25).

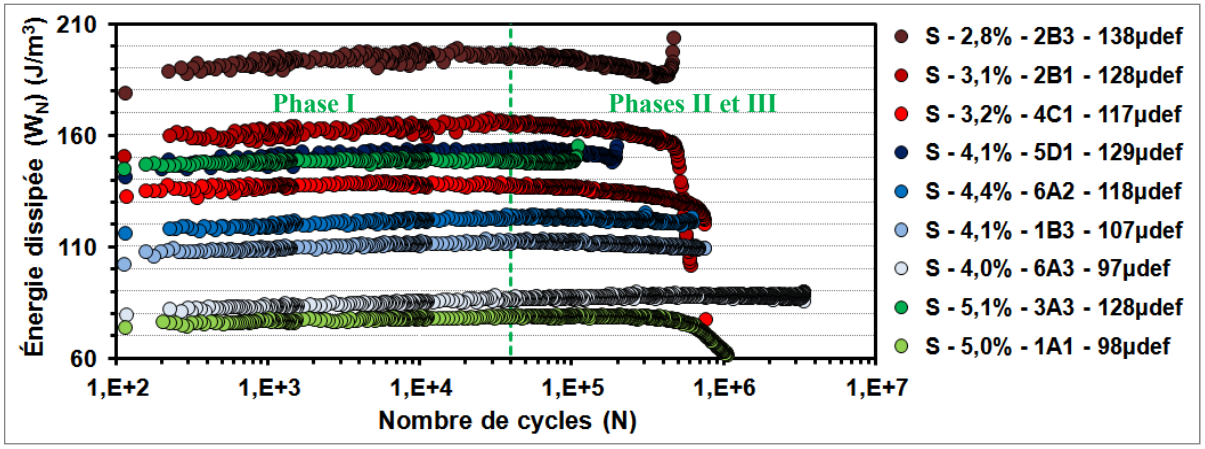


Figure 5.24 Évolution de l'énergie dissipée par cycle pour les éprouvettes S (+10°C-10Hz)

Dans le présent travail, l'énergie dissipée n'est pas considérée comme critère de rupture, toutefois elle est utilisée dans la méthode DGCB (§ 5.6.1 et 5.6.2). L'énergie dissipée au sein du matériau explique l'augmentation de sa température (voir § 5.5.2.1).

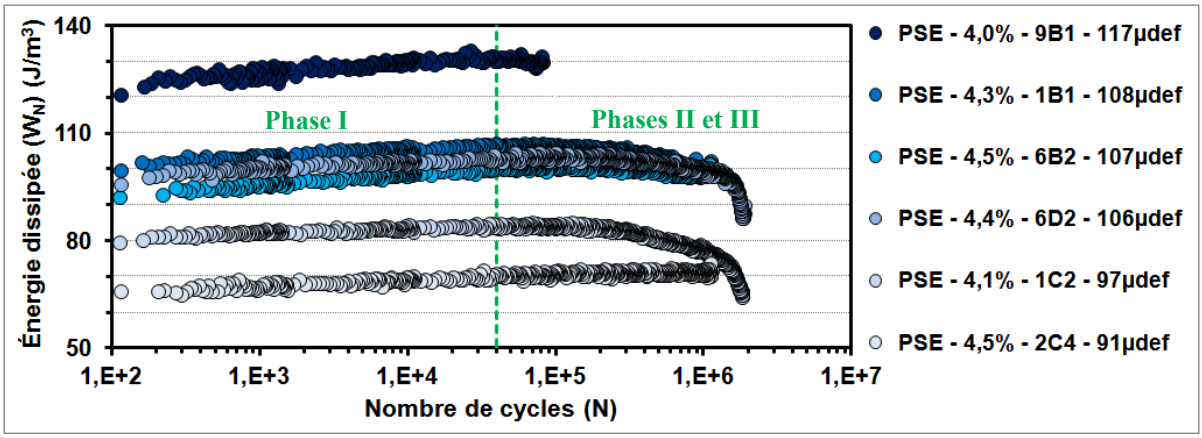


Figure 5.25 Évolution de l'énergie dissipée par cycle pour les éprouvettes PSE (10°C-10Hz)

5.5.9 Rupture en fatigue des éprouvettes

Pour l'ensemble des éprouvettes testées en fatigue, la rupture, ainsi que la durée de vie (N_f), sont déterminées selon les critères suivants : réduction de moitié (50%) de la norme du module complexe initial $|E^*_0|$ ou rupture complète de l'éprouvette ($N_{f50\%}$, Figure 5.10) et atteinte de la transition entre les phases II et III ($N_{fII-III}$).

La valeur de $N_{f50\%}$ permet d'effectuer la comparaison des résultats d'essais avec des études antérieures.

La valeur de $N_{fII-III}$ est déterminée en lien avec l'écart de déformation des extensomètres par rapport à la déformation moyenne et l'évolution de l'angle de phase en cours de sollicitation. Pour l'ensemble de nos essais, la valeur de $N_{f\Delta\varepsilon ax}$ correspond au nombre de cycles pour lequel au moins un extensomètre présente un écart à la moyenne supérieur à 25% (Figure 5.5). Également, lorsque que l'écart de déformation d'un extensomètre par rapport à la moyenne ($\Delta\varepsilon_{exti}$) dépassait 25%, l'essai est arrêté dans un bref délai car les conditions

d'homogénéité au sein de l'éprouvette ne sont plus rencontrées. Plus exactement, la valeur de $N_{fII\text{-}III}$ représente la moyenne de $N_{f\Delta\varepsilon ax}$ et $N_{fmax\phi}$, où $N_{fmax\phi}$ correspond au nombre de cycles de sollicitation au moment où l'angle de phase atteint une valeur maximale juste avant son évolution rapide (ϕ_{Emax}, Figure 5.9).

Le Tableau 5.2 expose le ou les critères qui ont été atteint, annoté par un "X", lors de la sollicitation des éprouvettes testées dans ce programme expérimental pour chacun des états étudiés (S ou PSE). Toutefois, lorsqu'il y a rupture physique de l'éprouvette, les trois critères ($50\% \cdot |E^*_0|$, ϕ_{Emax} et $\Delta_{\varepsilon exti} > 25\%$) sont nécessairement rencontrés et des "X" de couleur grise sont alors annotés au tableau. Dans ce cas précis, la durée de vie est très similaire entre les différents critères retenus.

Tableau 5.2 Critère de rupture atteint lors de l'essai

État	Vides		Éprouvette	Déformation imposée (µdef)	Critères de rupture			
	Groupe	%	No		Rupture physique	$50\% \cdot \|E^*_0\|$	$\Delta_{\varepsilon exti} > 25\%$	ϕ_{Emax}
S	< 3,5	3,2	4C1	117	**X**	X	X	X
		3,1	2B1	128		**X**	**X**	**X**
		2,8	2B3	138	**X**	X	X	X
	3,5 à 4,5	4,0	6A3	97	**X**	X	X	X
		4,1	1B3	107	**X**	X	X	X
		4,4	6A2	118	**X**	X	X	X
		4,1	5D1	129	**X**	X	X	X
		4,4	5A2	131	**X**	X	X	X
	> 4,5	5,0	1A1	98		**X**	**X**	**X**
		5,1	3A3	128	**X**	X	X	X
PSE	< 3,5	3,5	2C1	118			**X**	
	3,5 à 4,5	4,5	2C4	91			**X**	
		4,1	1C2	97			**X**	
		4,4	6D2	106	**X**	X	X	X
		4,3	6B2	107	**X**	X	X	X
		4,3	1B1	108	**X**	X	X	X
		4,0	9B1	117	**X**	X	X	X
	> 4,5	4,9	9D2	111	**X**	X	X	X

Pour les éprouvettes S et PSE, la rupture physique de l'éprouvette est observée 8 fois sur 10 et 5 fois sur 8 respectivement (Tableau 5.2). Ceci est tout à fait particulier car un essai de fatigue réalisé en contrôle de déformation engendre habituellement un endommagement progressif et l'atteinte d'une chute de raideur de 50% se produit bien avant la rupture physique de l'éprouvette (voir § 1.5.3.5). La rupture soudaine des éprouvettes, sans observer la phase III ou très peu, a également été notée par Touhara (2012) pour des éprouvettes d'un enrobé testé à l'état sec et composé d'un bitume modifié (PG 64-28), similaire à celui utilisé dans le programme expérimental actuel (PG 70-28).

5.6 Analyse des résultats des essais de fatigue

5.6.1 Introduction

Pour évaluer correctement le comportement en fatigue d'un enrobé bitumineux basé sur son évolution de sa rigidité en cours d'essai, il est nécessaire de corriger sa perte de rigidité due aux effets biaisant (non linéarité, thixotropie et échauffement) et d'obtenir la perte de rigidité attribuable essentiellement à l'endommagement par fatigue. En assumant une évolution linéaire de la norme du module complexe (|E*|) avec le nombre de cycles pour quelques intervalles donnés dans la phase II, les effets biaisant peuvent être déterminés assez aisément dans le cas d'un essai homogène, et les valeurs de |E*| peuvent alors être corrigées, comme le propose la méthode du DGCB (Di Benedetto et coll., 1996 ; Di Benedetto et coll., 1997a ; Soltani, 1998 ; Baaj, 2002 ; Di Benedetto et coll., 2004 ; Baaj, 2005). De plus, à partir de cette méthode, le dommage mesuré peut être corrigé afin d'obtenir le dommage réel du matériau à la transition des phases II et III, soit à la rupture de ce dernier.

5.6.2 Méthodologie pour l'analyse de l'endommagement par fatigue

Pour une analyse rigoureuse, il est nécessaire de corriger la valeur de la norme du module complexe |E*| mesurée au début de l'essai de fatigue. Cette correction permet de se soustraire à la non linéarité de l'enrobé bitumineux et d'obtenir la valeur du module initial $|E^*_0|$, soit au 1^{er} cycle de sollicitation.

Dans l'étude actuelle, la déformation imposée ne se stabilise qu'après 100 cycles de sollicitation. Une extrapolation linéaire des valeurs de module de 200 à 300 cycles est retenue afin de déterminer la valeur de $|E^*_0|$. Ce choix s'explique par un manque de données entre les cycles nos 100 et 200 en raison d'un problème d'acquisition[48]. À cet effet, l'extrapolation linéaire aurait pu très bien être réalisée avec les valeurs de module entre les cycles nos 100 et 300 si l'acquisition le permettait. Par ailleurs, cette façon de faire se justifie également par le fait même que l'évolution de température au sein de l'éprouvette est négligeable pour les 300^{iers} cycles de sollicitation (Di Benedetto et coll., 2011 ; Nguyen et coll., 2012). Tout particulièrement, la valeur du module initial $|E^*_0|$ permet de déterminer et de tracer le dommage de l'enrobé bitumineux en fonction du nombre de cycles de sollicitation. A l'aide du critère de rupture retenu ($N_{fII-III}$), le dommage à la transition des phases II et III est déterminé (D_{III}). Le dommage critique au point de rupture peut s'écrire : $D_{III} = (|E^*_0| - E_{III}) / |E^*_0|$, où E_{III} constitue la valeur de la norme du module lors de la transition entre les phases II et III. Le dommage ainsi calculé intègre la perte de module induit par l'endommagement par fatigue, mais également celle lié aux effets biaisant.

Le dommage critique (D_{III}) peut être corrigé (D_{IIIc}) pour se soustraire aux effets biaisant : thixotropie du bitume et échauffement du matériau. Cela est rendu possible en considérant un endommagement linéaire (ou évolution linéaire du module complexe) avec le nombre de cycles au sein d'intervalles fixés dans la phase II. Quatre intervalles (i) sont considérés :

- intervalle -1 (i = -1) : 30 000 à 60 000 cycles ;
- intervalle 0 (i = 0) : 40 000 à 80 000 cycles ;
- intervalle 1 (i = 1) : 50 000 à 150 000 cycles ;
- intervalle 2 (i = 2) : 150 000 à 300 000 cycles.

[48] Notamment, l'aquisition de données entre les cycles nos 1 et 1000 devrait se faire en une séquence au lieu de 2 (1 à 120 et 120 à 1000) afin d'éviter le manque de données entre les cycles nos 100 à 200. Par ailleurs, sur l'ensemble d'un essai de fatigue, l'acquisition des données devrait être augmentée pour permettre une meilleure analyse.

Rapport-Gratuit.com

Alors, D_{IIIc} est calculé à partir des équations (5.1) et (5.2), qui intègrent l'analyse de l'endommagement réalisée par l'ENTPE (méthode DGCB) et présentée par Di Benedetto et coll. (2004) :

$$D_{IIIc} = D_{III} - C_i \times (|E^*_0| - E_{00i}) / |E^*_0| \quad (5.1)$$

$$D_{IIIc} = D_{III} - (|E^*_0| - E_f) / |E^*_0| \quad (5.2)$$

où C_i et E_{00i} dépendent de l'intervalle i. E_{00i} étant la valeur de rigidité au 1er cycle, obtenue par extrapolation linéaire sur l'intervalle i. Les valeurs de C_i, proposées par Di Benedetto et coll. (2004), sont de 5/6, 4/5, 3/4 et 2/3 pour les intervalles nos -1, 0, 1 et 2 respectivement. Il est important de noter que l'intervalle considéré pour l'analyse dépend de $N_{fII-III}$. L'intervalle à considérer est celui le plus élevé, mais à la fois inférieur à $N_{fII-III}$. Le paramètre E_f a une valeur presque identique, pour chacun des quatre intervalles (Soltani, 1998 ; Baaj, 2002), et constitue la valeur du module initial du matériau de chaque intervalle i, c'est-à-dire sans les effets biaisant. La valeur d'E_f est calculée ainsi :

$$E_f = - Ci (|E^*_0| - E_{00i}) + |E^*_0| \quad (5.3)$$

5.6.3 Détermination des modules initiaux $|E^*_0|$ pour les deux états

Le Tableau 5.3 présente les valeurs de la norme du module initial $|E^*_0|$ déterminé pour les éprouvettes testées à l'état sec (S) et celles testées à l'état partiellement saturé en eau (PSE). Seulement les éprouvettes dont la durée de vie en fatigue était supérieure à 60 000 cycles ont été considérées.

Étant donné que la teneur en vides influence la valeur de $|E^*_0|$, seul les résultats des éprouvettes dont la teneur en vides est similaire ont également été considérés pour fins de comparaison, tel que présentés à la Figure 5.26 (groupe 3,5 à 4,5% pour les éprouvettes S et PSE).

Tableau 5.3 Valeur du module initial $|E_0^*|$ des éprouvettes testées à 10°C-10Hz, à l'état sec (S) ou partiellement saturé en eau (PSE) en fonction de l'amplitude de déformation (ε_{Aax})

Caractéristiques des éprouvettes				Conditions d'essai				Détermination de $\|E^*_0\|$ (MPa)		
Vides		No	Type	État de saturation		Température	ε_{Aax}	Valeurs	Moyenne	Écart-type
Groupe	%			Fluide	DS (%) *	(°C)	(µdef)		(x̄)	(σ)
< 3,5	3,2	4C1	F_{SJ}	S (air)	---	+9,8 à +10,0	118	11 735	12 694	850
	3,1	2B1				+9,6 à +10,0	129	12 993		
	2,8	2B3				+9,9 à +10,0	138	13 355		
3,5 à 4,5	4,1	4C3	F_{SJ}			+9,7 à +10,0	88	11 932	12 707	494
	4,0	6A3				+9,8 à +10,0	98	13 205		
	4,1	1B3				+9,5 à +9,7	107	12 961		
	4,4	6A2				+9,7 à +9,8	118	12 540		
	4,1	5D1				+9,8 à +10,0	129	12 898		
> 4,5	5	1A1	F_{SJ}			+9,9 à +10,0	98	11096	10928	238
	5,1	3A3				+9,5 à +9,6	128	10759		
3,5 à 4,5	4,5	2C4	F_{SJ}	PSE (eau)	83 - 70	+9,9 à +10,2	91	12 116	12 309	604
	4,1	1C2			91 - 77	+9,9 à +10,1	97	11 863		
	4,4	6D2			98 - 74	+9,9 à +10,0	105	11 937		
	4,3	6B2			84 - 68	+9,8 à +10,0	107	12 218		
	4,3	1B1			85 - 59	+9,3 à +9,6	108	12 216		
	4,0	9B1			100 - 98	+9,9 à +10,1	117	13 506		

* Degré de saturation de l'éprouvette durant la réalisation de l'essai de fatigue.

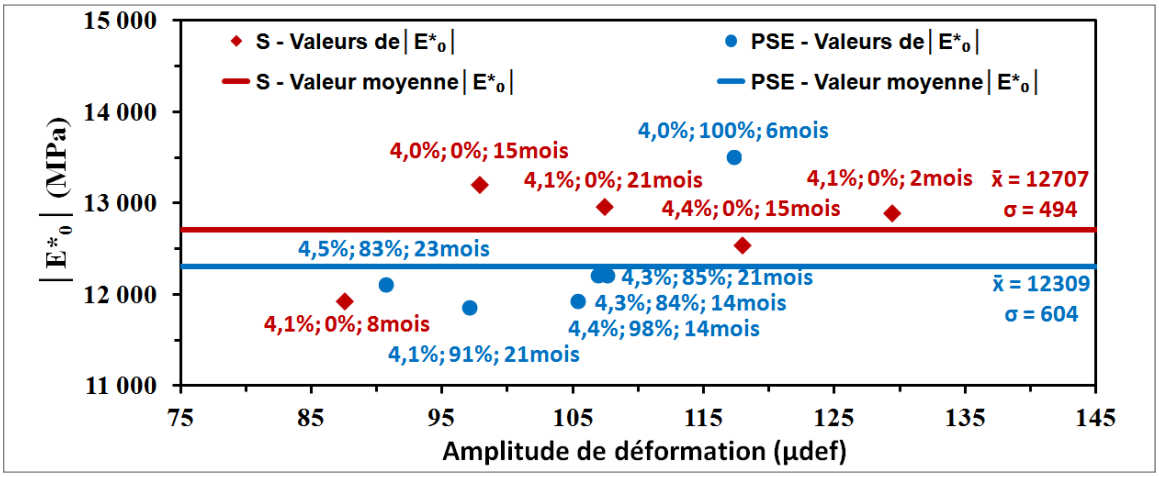


Figure 5.26 Valeurs de la norme du module complexe initial en fonction de l'amplitude de déformation pour les éprouvettes testées à l'état S ou PSE, à +10°C-10Hz (Teneur en vides, degré de saturation, et temps écoulé entre le carottage et la réalisation de l'essai)

Pour chaque état, les valeurs de $|E^*_0|$ sont sensiblement similaires (écarts types faibles, Tableau 5.3 et Figure 5.26). Par ailleurs, il ne semble pas y avoir de corrélation claire entre la

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

valeur de la norme du module initial et l'amplitude de déformation imposée (Figure 5.26). Il est possible de constater cela dans les ouvrages de : Nguyen (2009), Touhara (2012) et Tapsoba (2012). A priori, la valeur du module initial devrait chuter avec l'augmentation de l'amplitude de la déformation en raison du comportement non linéaire de l'enrobé.

En outre, les valeurs de $|E^*_0|$ sont inférieures pour les éprouvettes testées à l'état partiellement saturé en eau (PSE), comparativement à celles testées à l'état sec (S). En considérant une valeur unique, moyenne pour chacun des deux états (trait continu, Figure 5.26), la rigidité de l'enrobé en présence d'eau (PSE) est réduite d'environ 3%.

De plus, les écarts aux niveaux de la teneur en vides, du degré de saturation et du temps écoulé entre le carottage et la réalisation de l'essai de fatigue ne semblent pas avoir affectés les résultats d'un même groupe d'éprouvette (S ou PSE, Figure 5.26).

5.6.4 Évolution du dommage pour les éprouvettes à l'état S

A la suite de la détermination de la norme du module initial $|E^*_0|$, il devient aisé de déterminer l'évolution du dommage en cours de sollicitation ($D = 1 - |E^*_N|/|E^*_0|$), où $|E^*_N|$ représente la rigidité du matériau au cycle N.

La Figure 5.27 présente l'évolution du dommage (D) des éprouvettes testées à l'état sec selon les différentes amplitudes de déformation imposées et ce, en fonction du nombre de cycles de sollicitation. Le taux (ou la pente) d'endommagement est de plus en plus élevé avec la hausse de l'amplitude de déformation et la baisse de la teneur en vides (Figure 5.27). À la Figure 5.27, il est difficile d'observer l'influence de l'amplitude de déformation imposée et de la teneur en vides sur la valeur du dommage menant à la rupture de l'éprouvette (D_{III}, dommage au début de la phase III). À cet effet, la section suivante (§ 5.6.4.1) met en relation l'évolution du dommage, qui mène à la rupture (D_{III}), en fonction de l'amplitude de déformation et même, de la teneur en vides.

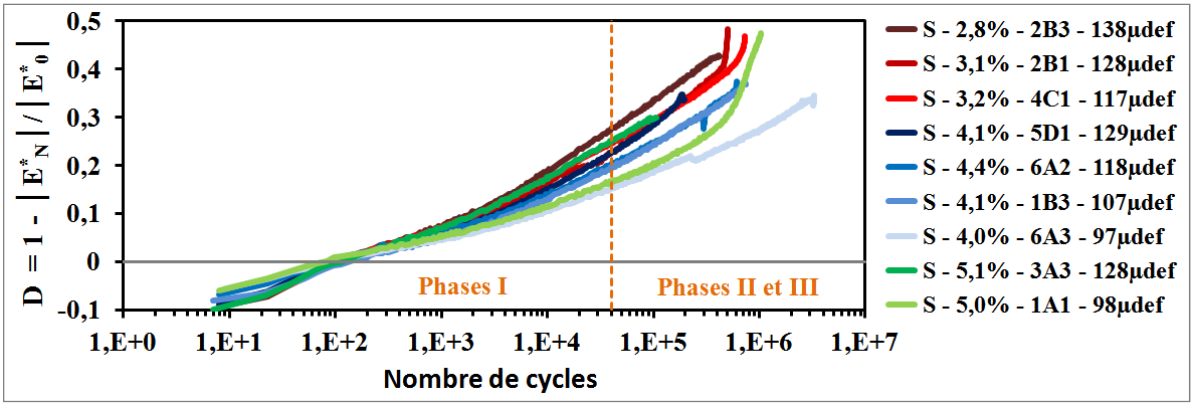


Figure 5.27 Évolution du dommage (D) en fonction du nombre de cycles pour les éprouvettes testées à +10°C, 10Hz et à l'état sec

Logiquement, le dommage devrait être de zéro au 1er cycle de sollicitation (Figure 5.27). Toutefois, il faut se rappeler qu'au début de l'essai de fatigue la déformation ciblée n'est pas atteinte immédiatement, ce qui se traduit par une surestimation de la valeur de la norme du module en raison du comportement non linéaire de l'enrobé bitumineux. Notamment, le dommage est de zéro lorsque la déformation ciblée est atteinte, donc aux alentours du 100ème cycle de sollicitation (Figure 5.27) et ce, bien que la valeur de $|E^*_0|$ ait été obtenue par une extrapolation linéaire des valeurs de module mesurées du 200 au 300ème cycle de sollicitation.

5.6.4.1 Niveau de dommage menant à la rupture (D_{III})

La Figure 5.28 illustre la relation entre le niveau de dommage qui mène à la rupture (D_{III}) et la déformation imposée pour les éprouvettes testées à l'état sec (S). D_{III} évolue avec l'amplitude de déformation. Ceci a également été observé par Di Benedetto et coll. (2004), Touhara (2012) et, Tapsoba et coll. (2013). L'accroissement du dommage (D_{III}) avec l'amplitude de déformation s'explique par l'accentuation des effets biaisant (échauffement et thixotropie) lors de l'essai de fatigue. En tenant compte de la teneur en vides (groupe), la corrélation de D_{III} avec l'amplitude de déformation prend une tournure différente (Figure 5.29).

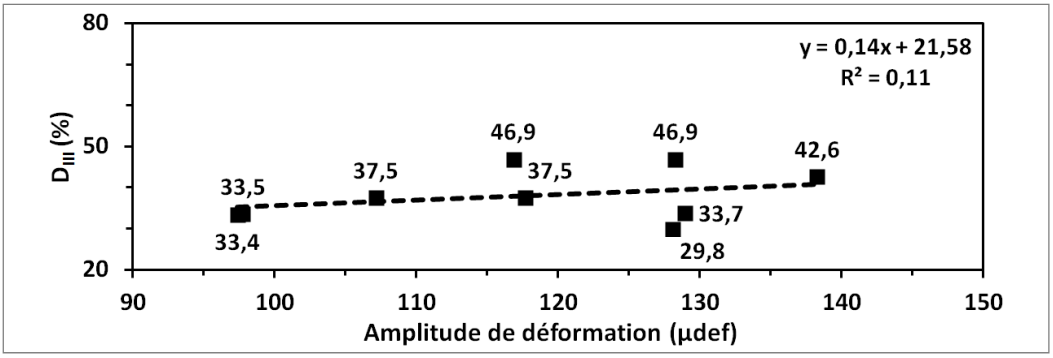


Figure 5.28 Niveau de dommage menant à la rupture (D_{III}) pour les éprouvettes à l'état sec, testées à +10°C et 10Hz, en fonction de l'amplitude de déformation

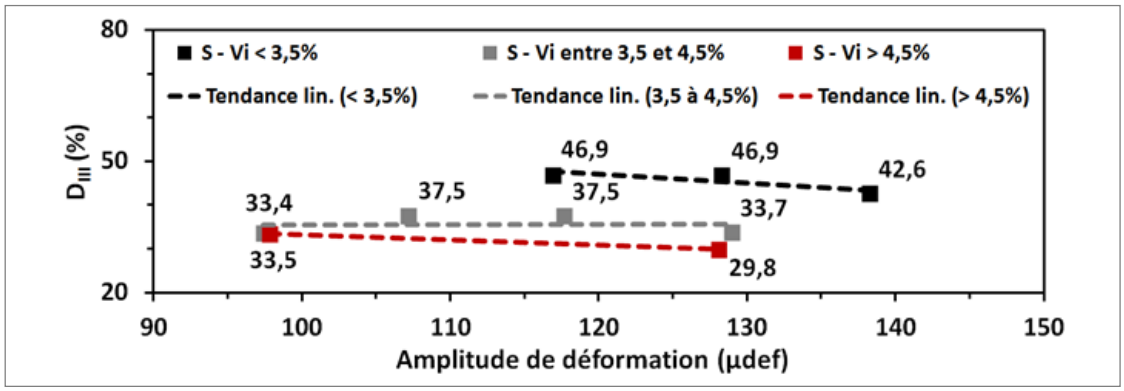


Figure 5.29 Niveau de dommage menant à la rupture pour les éprouvettes à l'état sec, testées à 10°C et 10Hz, en fonction de l'amplitude de déformation et teneur en vides

5.6.4.2 Évolution du dommage corrigé menant à la rupture (D_{IIIc})

Le Tableau 5.4 expose les paramètres utilisés pour le calcul du dommage corrigé associé à la rupture (D_{IIIc}) pour les essais en fatigue réalisés sur les éprouvettes à l'état sec (S), à +10°C et 10Hz.

La Figure 5.30 illustre présente la relation entre la valeur de D_{IIIc} et l'amplitude de déformation. L'évolution du dommage corrigée (D_{IIIc}) en fonction de l'amplitude de déformation imposé montre une légère corrélation (courbe de tendance en ligne pointillée grise, Figure 5.30). Or certains auteurs ont trouvé des valeurs moyenne de D_{IIIc} variant de

22,7 à 30,4% avec un écart type variant de 1,4 à 6,2% selon le type d'enrobé bitumineux (Di Benedetto et coll., 2004 ; Touhara, 2012 ; Tapsoba, 2012). Cependant, malgré le peu de résultats, la Figure 5.31 montre que la relation entre D_{IIIc} et l'amplitude de déformation apparait indépendante lorsqu'on regroupe les résultats suivant la teneur en vides de l'enrobé.

Tableau 5.4 Paramètres utilisés pour le calcul du dommage menant à la rupture, corrigé des effets biaisant (D_{IIIc}), pour les essais en fatigue réalisés sur les éprouvettes S (+10°C-10Hz)

Éprouvettes S			ε_{Aax} (µdef)	Valeurs déterminées			Correction					
Vides		No		$\|E^*_0\|$ (MPa)	$\|E^*_{III}\|$ (MPa)	D_{III} (%)	Interv. (i)	$\|E^*_{00i}\|$ (MPa)	E_f (MPa)	D_{IIIc} (%)		
Groupe	%									Valeurs	$\bar{x}$	σ
< 3,5	3,2	4C1	117	11735	6233	46,9	2	8486	9569	27,7	28,6	2,5
	3,1	2B1	128	12993	6900	46,9	2	9517	10676	26,7		
	2,8	2B3	138	13355	7666	42,6	2	9159	10558	31,4		
3,5 à 4,5	4,0	6A3	97	13205	8789	33,4	2	10576	11453	19,9	21,9	2,0
	4,1	1B3	107	12961	8100	37,5	2	9919	10933	23,5		
	4,4	6A2	118	12540	7835	37,5	2	9539	10539	23,9		
	4,1	5D1	129	12898	8547	33,7	1	10256	10917	20,5		
< 3,5	5	1A1	98	11096	7375	33,5	2	9041	9726	18,5	20,0	2,0
	5,1	3A3	128	10759	7548	29,8	0	8457	8918	21,4		
											23,7	4,2

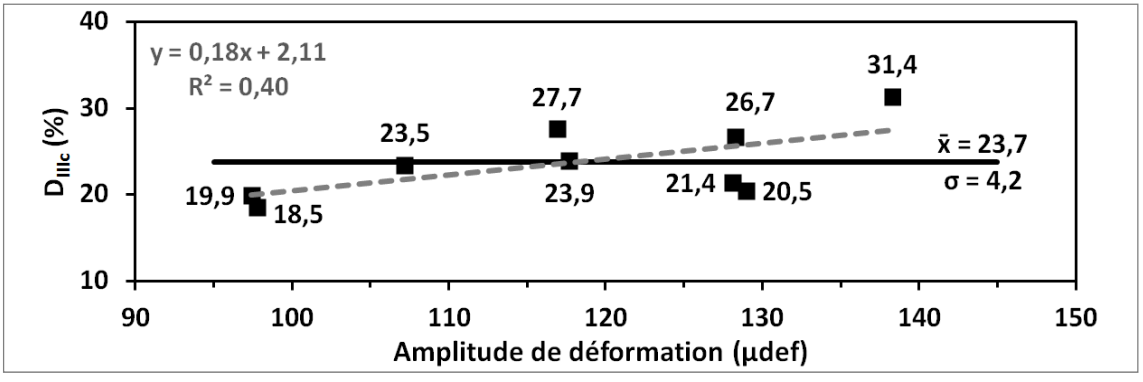


Figure 5.30 Évolution du dommage menant à la rupture, corrigé des effets biaisant, en fonction de l'amplitude de déformation pour les éprouvettes S testées à +10°C et 10Hz

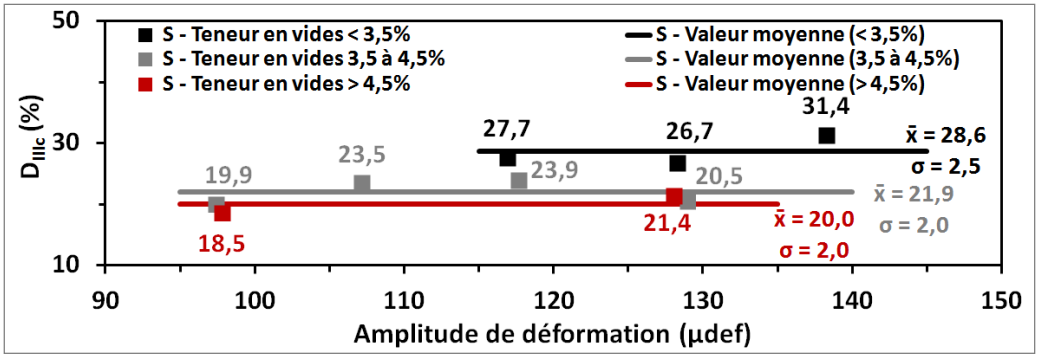


Figure 5.31 Évolution du dommage menant à la rupture, corrigé des effets biaisant, en fonction de l'amplitude de déformation et par groupe de teneur en vides pour les éprouvettes S, testées à +10°C et 10Hz

La Figure 5.32 montre que le dommage critique associé à l'amorce d'une macro-fissuration au sein de l'éprouvette (D_{IIIc}) évolue suivant la teneur en vides dans l'éprouvette. Ce constat est a priori tout à fait rationnel puisque pour une même amplitude de déformation, l'enrobé possédant une teneur en vides plus élevée va résister moins longtemps aux sollicitations et présenter ainsi une durée de vie réduite. Notons que les aspérités au sein du matériau peuvent être considérées comme des dommages déjà générés au matériau. Il est important de souligner que la mise en relation de D_{IIIc} avec la teneur en vides (Figure 5.32) constitue une première ($5^{emè}$ innovation).

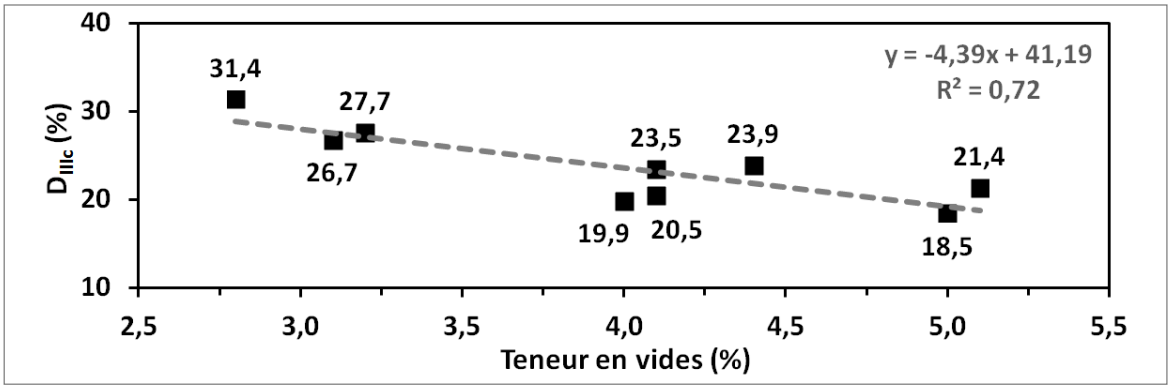


Figure 5.32 Évolution du dommage menant à la rupture, corrigé des effets biaisant, en fonction de la teneur en vides des éprouvettes S testées à +10°C et 10Hz

5.6.5 Évolution du dommage pour les éprouvettes à l'état PSE

La Figure 5.33 illustre l'évolution du dommage de l'enrobé bitumineux testé à l'état partiellement saturé en eau (PSE) et à différentes amplitudes de déformation en fonction du nombre de cycles de sollicitation. Le dommage critique, menant à la rupture, des éprouvettes PSE varie de 0,26 à 0,46 (lignes pointillées grises, Figure 5.33).

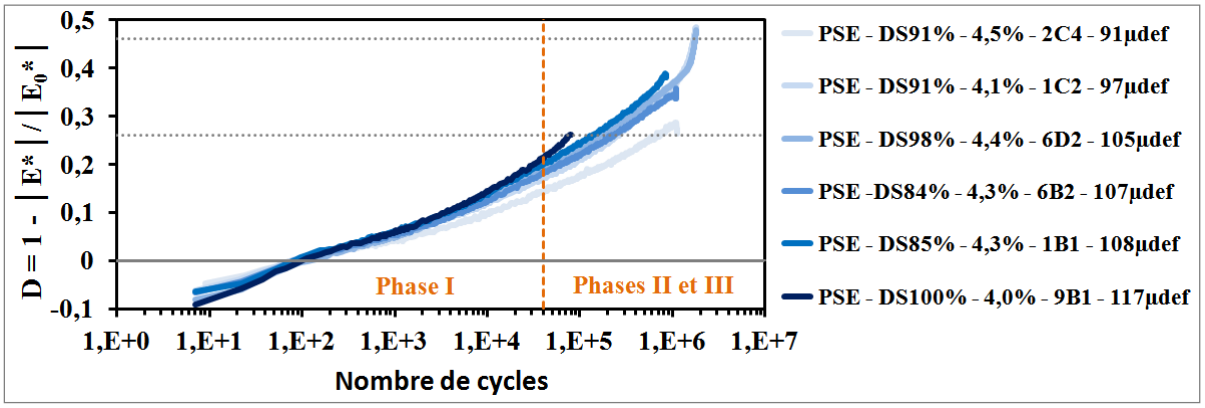


Figure 5.33 Évolution du dommage en fonction du nombre de cycles pour les éprouvettes partiellement saturées en eau (PSE)

5.6.5.1 Évolution du dommage menant à la rupture (D_{III})

Pour les éprouvettes PSE qui possèdent une teneur en vides de 3,5 à 4,5%, le dommage menant à la rupture (D_{III}) diminue avec l'amplitude de déformation (Figure 5.34). Notons que ce résultat est tout à fait inhabituel en raison de la hausse des effets biaisant avec l'amplitude de déformation (Di Benedetto et coll., 2004 ; Touhara, 2012 ; Tapsoba et coll., 2013). Alors, il est nécessaire de poursuivre l'analyse.

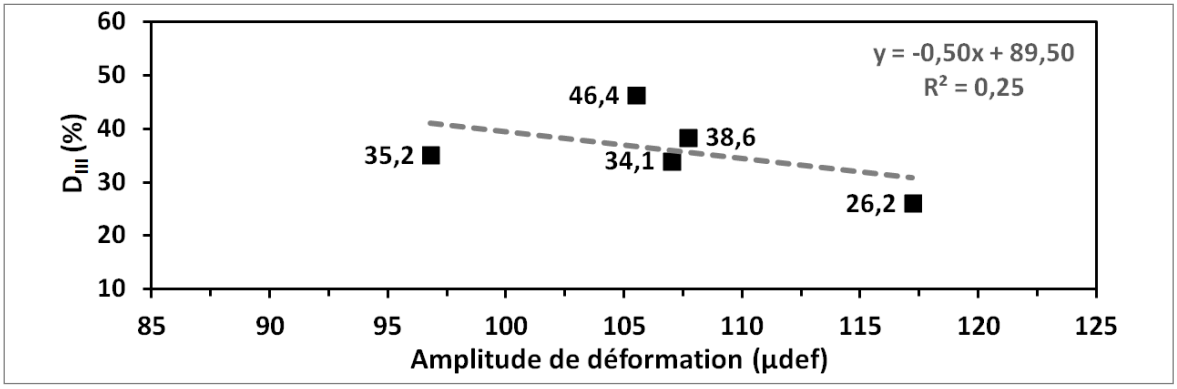


Figure 5.34 Évolution du dommage menant à la rupture en fonction de l'amplitude de déformation pour les éprouvettes à l'état partiellement saturé en eau (PSE)

5.6.5.2 Évolution du dommage corrigé menant à la rupture (D_{IIIc})

Le Tableau 5.5 indique les paramètres utilisés pour le calcul du dommage menant à la rupture qui est corrigé des effets biaisant (D_{IIIc}) pour les essais en fatigue réalisés sur les éprouvettes à l'état partiellement saturé en eau (PSE), à +10°C et 10Hz. L'éprouvette no 2C4 a été exclue des résultats car la détermination de la transition des phases II et III n'a pu être établie avec précision : seulement un critère sur deux a été rencontré ($\Delta_{\varepsilon exti} > 25\%$).

Tableau 5.5 Calcul du dommage menant à la rupture (D_{IIIc}) corrigé des effets biaisant pour les éprouvettes testées à l'état partiellement saturé en eau (PSE), à +10°C et 10Hz

Éprouvettes PSE			DS (%)	Valeurs déterminées				Correction					
Vides		No		ε_{Aax} (µdef)	$\lvert E^*_0 \rvert$ (MPa)	$\lvert E^*_{III} \rvert$ (MPa)	D_{III} (%)	Interv. (i)	$\lvert E^*_{00i} \rvert$ (MPa)	E_f (MPa)	D_{IIIc} (%)		
Groupe	%										Valeurs	$\bar{x}$	σ
3,5 à 4,5	4,1	1C2	91-77	97	11863	7690	35,2	2	9629	10374	18,8	19,9	2,7
	4,4	6D2	98-74	106	11937	6399	46,4	2	9326	10196	21,9		
	4,3	6B2	84-68	107	12218	8053	34,1	2	9705	10543	20,6		
	4,3	1B1	85-59	108	12216	7505	38,6	2	9468	10384	22,5		
	4,0	9B1	100-98	117	13506	9968	26,2	-1	11362	11791	15,9		

La Figure 5.35 illustre les valeurs de D_{IIIc} en fonction de l'amplitude de déformation. Il est possible de considérer un dommage unique de 19,9% qui mène à l'initiation d'une macro-fissuration au sein de la matrice de l'enrobé des éprouvettes PSE (Figure 5.35).

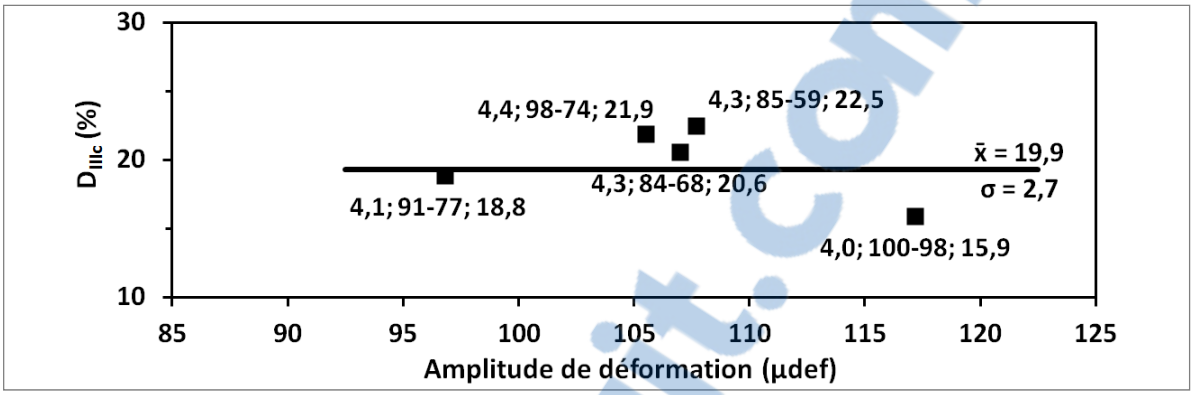


Figure 5.35 Évolution du dommage, corrigé des effets biaisant, en fonction de l'amplitude de déformation pour les éprouvettes PSE (teneur en vides, DS et dommage indiqués)

Cette valeur de 19,9% est, de façon relative, environ 10% plus faible que celle établie pour les éprouvettes testées à l'état sec et dont la teneur en vides est comparable (V_i de 3,5% à 4,5%, D_{IIIC} = 21,9%, Figure 5.31). Afin d'apporter d'autres éléments de réflexion, quant à la valeur de D_{IIIc} pour les éprouvettes testées à l'état PSE, nous avons tracé la relation entre D_{IIIc} et la teneur en vides des éprouvettes, tout en spécifiant l'évolution du DS[49] au cours de l'essai de fatigue (Figure 5.36). La valeur de D_{IIIc} est croissante avec la teneur en vides, ce qui ne devrait pas être le cas habituellement. Dans un premier temps, au début de l'essai de fatigue, le DS de l'ensemble des éprouvettes est élevé, soit de 84 à 100% (Figure 5.36). Toutefois, l'évolution du DS au cours de l'essai de fatigue est très variable d'une éprouvette à une autre, soit de 2 à 26% en valeur absolue (valeurs de couleur bleu entre parenthèses, Figure 5.36). Notamment, si le DS reste élevé (ou que l'évolution du DS est faible) au cours de l'essai, cela se traduit par un niveau de dommage critique corrigé (D_{IIIc}) faible pour le matériau. En d'autres termes, la densité des micros dommages générés par les sollicitations mécaniques sensée critique, c'est-à-dire qui précède la formation d'une macro fissure, est réduite. Une évolution faible du DS au cours de l'essai signifie que l'eau reste emprisonnée au sein du matériau, ce qui accélère l'évolution de la dégradation de l'enrobé bitumineux au cours des sollicitations mécaniques. Notamment, la teneur en vides influe sur les propriétés

[49] La spécification du DS d'une éprouvette partiellement saturée lors d'un essai de fatigue constitue une autre innovation (6ème innovation).

Rapport-Gratuit.com

de perméabilité et de rétention d'eau du matériau. En effet, la diminution de la teneur en vides du matériau permet de réduire sa perméabilité. Toutefois, s'il y a infiltration d'eau au sein du matériau, cette eau s'écoule plus difficilement du matériau en raison de la perméabilité réduite. Il est alors question du phénomène de rétention d'eau au sein du matériau. Si l'eau reste emprisonnée ou retenue au sein du matériau lors des sollicitations imposées, ceci conduit inévitablement à une dégradation accélérée, comparativement au matériau à l'état sec, et se traduit par un dommage corrigé admissible inférieur (D_{IIIc}) et une réduction de la durée de vie (Figure 5.36 et § 5.6.7). Ceci peut expliquer que les résultats de la Figure 5.37 sont à priori surprenants, puisqu'ils montrent une tendance opposée à celle observée pour les éprouvettes testées à l'état sec mise en perspective à la Figure 5.37.

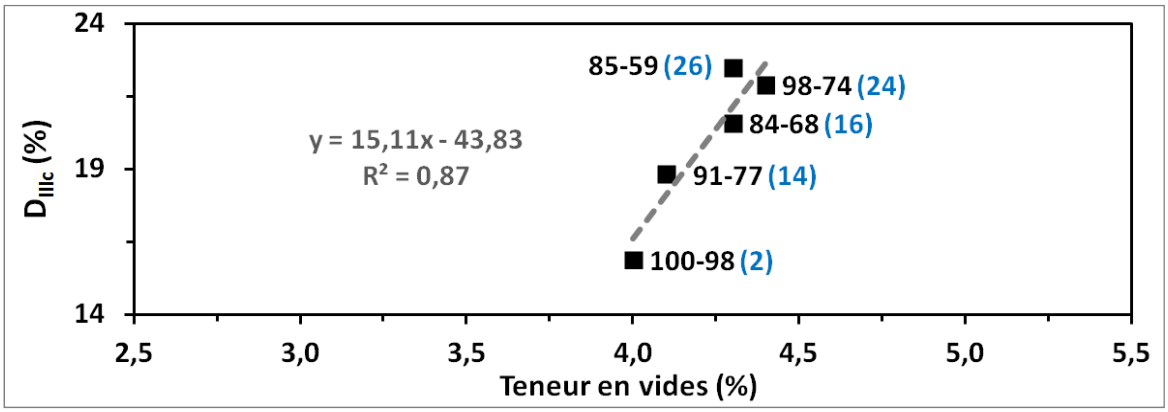


Figure 5.36 Évolution du dommage corrigé en fonction de la teneur en vides des éprouvettes PSE (valeurs et évolution du DS en cours d'essai indiqués)

La Figure 5.37 montre qu'avec une diminution des valeurs du DS du matériau, le comportement de l'enrobé bitumineux partiellement saturé (points de couleur bleu) se rapproche de plus en plus de celui à l'état sec (courbe de tendance linéaire (S), Figure 5.37). En effet, tout porte à croire que si les valeurs de DS descendent rapidement sous les 75% approximativement en cours de sollicitation, le comportement en fatigue de l'enrobé partiellement saturé en eau s'apparente à celui à l'état sec (Figure 5.37). La mise en évidence d'une valeur critique du DS pour les éprouvettes d'enrobé bitumineux partiellement saturées en eau constitue un autre aspect innovateur (7ème innovation).

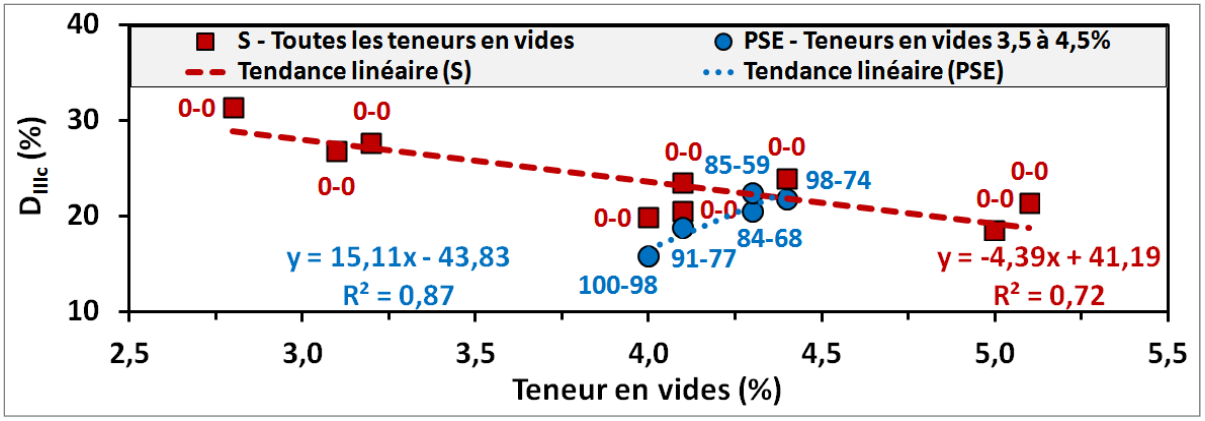


Figure 5.37 Évolution du dommage corrigé en fonction de la teneur en vides des éprouvettes S et PSE (évolution du DS en cours d'essai indiquée)

5.6.6 Durée de vie selon les divers critères de rupture pour les éprouvettes testées à l'état sec (S)

Le Tableau 5.6 présente la durée de vie déterminée pour les éprouvettes testées à l'état sec selon les critères de rupture retenus pour cette étude. Pour ces éprouvettes, la rupture rapide et complète constitue le principal critère de rupture rencontré (Tableau 5.2, 8 fois sur 10).

Tableau 5.6 Durée de vie déterminée selon les critères de rupture pour les éprouvettes testées à l'état sec (S), à +10°C et 10Hz

État	Éprouvettes			Déf. imposée (µdef)	Rupture complète	Critères de rupture			
	Vides		No			$50\% \cdot \lvert E_0^* \rvert$ ($N_{f50\%}$)	$N_{f\Delta\varepsilon ax}$ (> 25%)	$N_{fmax\phi}$	$N_{fII-III}$
	Groupe	%							
S	< 3,5	3,2	4C1	117	OUI	717 153	737 174	737 174	737 174
		3,1	2B1	128	NON	492 509	502 522	492 509	497 516
		2,8	2B3	138	OUI	462 521	457 513	442 490	450 002
	3,5 à 4,5	4,0	6A3	97	OUI	3 301 663	3 301 663	3 216 529	3 259 096
		4,1	1B3	107	OUI	742 185	737 180	742 185	739 683
		4,4	6A2	118	OUI	607 614	607 614	607 614	607 614
		4,1	5D1	129	OUI	194 362	194 362	194 362	194 362
	> 4,5	5,0	1A1	98	NON	1 023 332	1 018 823	502 570	760 447
		5,1	3A3	128	OUI	108 709	108 709	106 203	107 456

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

À partir des résultats du Tableau 5.6, les courbes de Wöhler sont illustrées à la Figure 5.38 pour les éprouvettes S en considérant que les éprouvettes dont la teneur en vides est comprise entre 3,5 et 4,5% (moyenne de 4,2%). La droite de fatigue établie suivant le critère classique de rupture ($N_{f50\%}$) est sensiblement la même que celle établie en considérant le critère $N_{fII\text{-}III}$. L'effet de la teneur en vides sur la droite de fatigue peut être évalué en considérant les résultats des deux autres groupes d'éprouvettes testées (Vi < 3,5% et Vi > 4,5%). Les résultats de fatigue de ces deux groupes d'éprouvettes ont été ajoutés à la droite de fatigue de la Figure 5.38 et reproduite à la Figure 5.39.

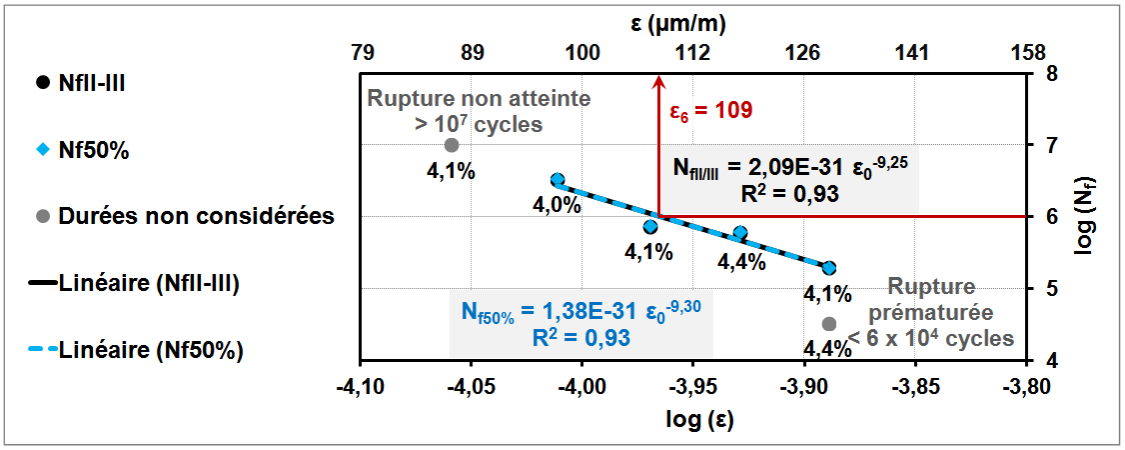


Figure 5.38 Droites de fatigue et résultats pour l'enrobé ayant une teneur en vides entre 3,5 et 4,5%, testé à l'état sec (S), à +10°C et 10Hz

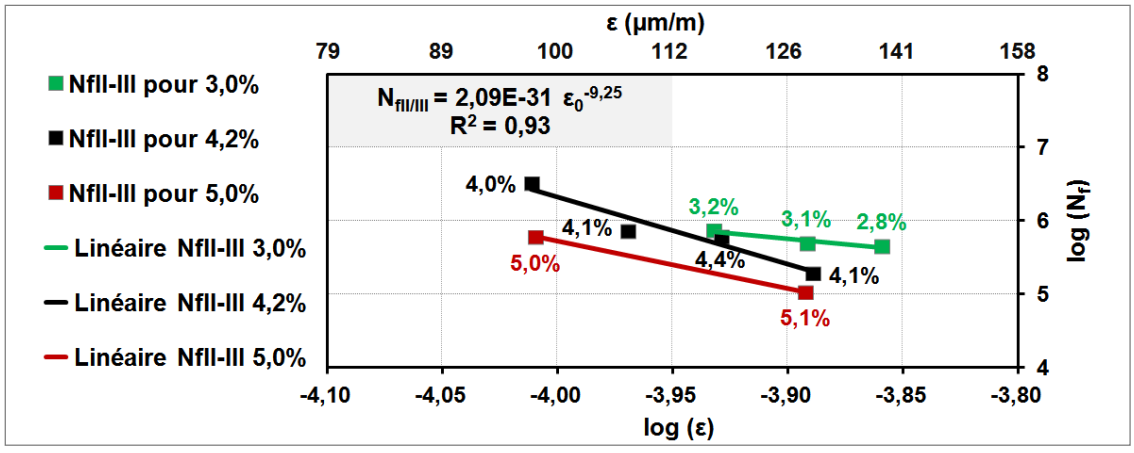


Figure 5.39 Résultats de fatigue valident pour l'enrobé testé à l'état sec (S), à +10°C et 10Hz, et droite de fatigue pour l'enrobé ayant une teneur en vides de 3,5 à 4,5%

Certes, il y a trop peu de résultats pour tirer une conclusion franche. Cependant, il est clair que la teneur en vides a une incidence importante sur la durée de vie en fatigue et sur la définition des paramètres de la droite de Wöhler (Figure 5.39). A cet égard, on retiendra que pour constituer un lot d'éprouvettes pour évaluer la résistance en fatigue d'un enrobé, il est impératif que la teneur en vides ne varie pas plus de 1% (§ 2.4.9.4). Par ailleurs, Moutier (1991) a réalisé une étude statistique sur l'effet de la composition de l'enrobé bitumineux (teneurs en vides et en liant) sur son comportement en fatigue et plus précisément sur la valeur de ε_6 (§ 5.6.8).

5.6.7 Durée de vie selon les divers critères de rupture pour les éprouvettes testées à l'état partiellement saturé en eau (PSE)

Le Tableau 5.7 indique la durée de vie déterminée selon les critères de rupture pour les éprouvettes PSE. Pour ces éprouvettes, tout comme pour celles testées à l'état S, la rupture complète de l'éprouvette a constitué le principal critère de rupture (Tableau 5.2, 5 fois sur 8). Pour les trois autres essais, ils deviennent rapidement non valides en raison d'une instabilité au sein des éprouvettes (critère $\Delta_{\varepsilon ext} > 25\%$ rencontré), comparativement à ce qui a pu être observé pour les essais de fatigue réalisés sur les éprouvettes S.

Tableau 5.7 Durée de vie déterminée selon les critères de rupture pour les éprouvettes testées à l'état partiellement saturé en eau (PSE), à +10°C et 10Hz

État	Éprouvette				DS (%)	Déf. imposée (µdef)	Rupture complète	Critères de rupture			
	Vides		No	Type				$50\% \cdot \lvert E_0^* \rvert$ ($N_{f50\%}$)	$N_{f\Delta\varepsilon ax}$ (> 25%)	$N_{fmax\phi}$	$N_{fII\text{-}III}$
	Groupe	%									
PSE	< 3,5	3,5	2C1	F_{SJ}	59-54	118	NON	---	36 939	---	---
	3,5 à 4,5	4,5	2C4	F_{SJ}	83-70	91	NON	---	582 656	---	---
		4,1	1C2		91-77	97	NON	1 718 318	304 180	1 518 099	911 140
		4,4	6D2		98-74	106	OUI	1 748 783	1 843 904	1 673 689	1 758 797
		4,3	6B2		84-68	107	OUI	1 103 479	1 103 479	1 093 464	1 098 472
		4,3	1B1		85-59	108	OUI	862 322	857 316	782 235	819 776
		4,0	9B1		100-98	117	OUI	81 107	81 107	80 099	80 603
	> 4,5	4,9	9D2	F_{SJ}	98-93	111	OUI	33 019	32 013	32 013	32 013

Notamment, les durées de vie des différents critères sont illustrées à la Figure 5.40 pour les éprouvettes PSE ayant une teneur moyenne en vides d'environ 4,2%. Les résultats des essais de l'enrobé bitumineux testé à l'état partiellement saturé en eau présentent une variabilité nettement plus élevée (valeur de R^2), comparativement à ceux obtenus pour les éprouvettes à l'état sec. Par ailleurs, dans le cas des éprouvettes testées à l'état partiellement saturé, la variation de la teneur en vides à un autre effet important, soit d'affecter la rétention d'eau au sein du matériau (hautes valeurs de DS) et l'évacuation de l'eau du matériau (abaissement du DS) au cours de sa sollicitation, notamment par l'entremise de sa perméabilité (détails § 1.2.4.8).

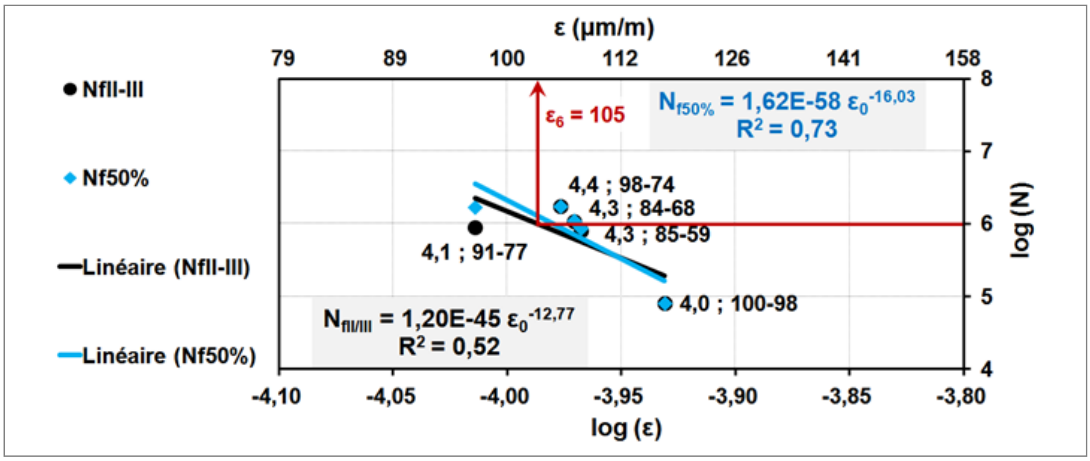


Figure 5.40 Droites de fatigue et résultats pour l'enrobé ayant une teneur en vides de 3,5 à 4,5%, testé à l'état PSE, à +10°C et 10Hz (teneur en vides et DS indiqués)

5.6.8 Comparaison des durées de vie des deux états (S et PSE)

La détermination des caractéristiques des droites de fatigue permet de réaliser une comparaison plus aisée entre les performances en fatigue relatives aux deux états. L'ensemble des caractéristiques relatives à la performance en fatigue de l'enrobé bitumineux pour les deux états considérés (S et PSE) est présenté au Tableau 5.8.

Tableau 5.8 Caractéristiques en fatigue de l'enrobé testé sous les deux états à +10°C et 10Hz

État	Vides (%)	Essais (nombre)	Critère rupture	c_1	c_2	ε_6 [X] (µm/m)	b [Y]	R_2
S	4,1 à 4,4	4	$N_{f50\%}$	1,38E-31	9,30	109,3	-0,108	0,93
			$N_{fII-III}$	2,09E-31	9,25	109,3	-0,108	0,93
PSE	4,1 à 4,5	5	$N_{f50\%}$	1,62E-58	16,03	105,4	-0,062	0,73
			$N_{fII-III}$	1,20E-45	12,77	104,9	-0,078	0,52

[X] Déformation correspondante à une durée de vie de l'ordre de 1 x 10^{+6} cycles ;
[Y] $b = -1 / c_2$.

La Figure 5.41 présente les droites de fatigue de l'enrobé bitumineux testé sous les deux états. La présence d'eau au sein de l'enrobé génère une baisse de la valeur d'ε_6 (105 vs 109) et une hausse de la pente de la droite de fatigue (c_2 = 12,77 au lieu de 9,25) (Tableau 5.8 et Figure 5.41). Ces effets ont également été observés par Moutier et coll. (1988), mais dans des proportions plus importantes pour ε_6. Cela est nécessairement attribuable à la longue durée d'immersion des éprouvettes dans l'eau préconisée dans l'étude de Moutier (trois semaines), comparativement à quelques heures pour cette étude.

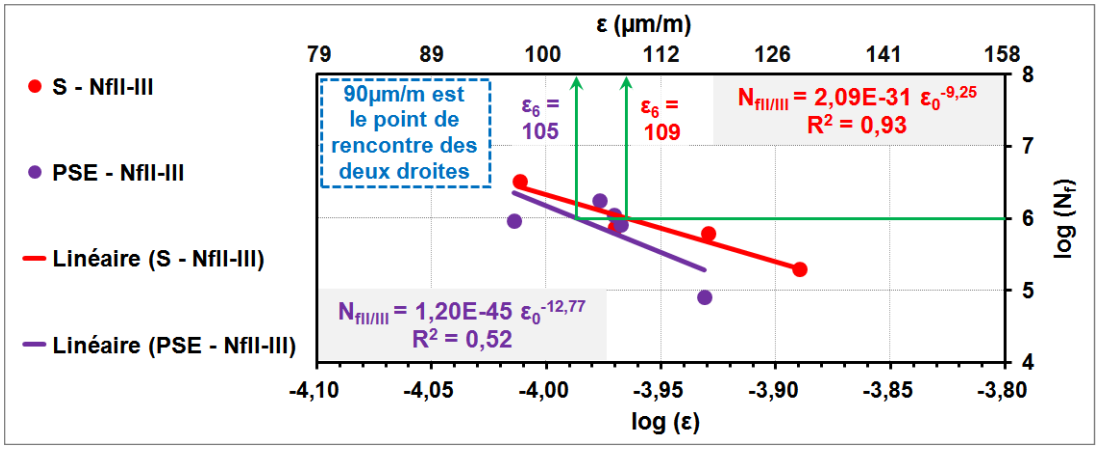


Figure 5.41 Droites de fatigue de l'enrobé bitumineux, ayant une teneur en vides de 3,5 à 4,5%, testés sous les deux états (S et PSE), à +10°C et 10Hz

De plus, pour l'enrobé à l'état PSE, il semble qu'une augmentation de l'amplitude de sollicitation supérieure à 90µm/m se traduit rapidement par une baisse de la résistance à la fatigue du matériau. En effet, cet aspect peut devenir nettement plus critique en période de dégel complet de la chaussée où elle connaît une réduction marquée de sa capacité portante et que l'enrobé bitumineux est alors mis davantage à contribution, c'est-à-dire que l'amplitude des déformations à la base du revêtement est accentuée. Il faut souligner que la présente d'eau au sein de l'enrobé bitumineux affaiblit également sa rigidité, ce qui contribue à sa plus grande déformation lorsque mis sous charge. Dans le cadre de ce chapitre, la diminution de la rigidité en raison de la présence d'eau était uniquement de 3% (§ 5.6.3). Cette faible diminution de la rigidité est sûrement attribuable à la faible période d'immersion dans l'eau (quelques heures seulement), à la faible température de l'eau (≈ +21°C) et de l'essai (+10°C), à la faible teneur en vides des éprouvettes (≤ 5,1%) et au bitume modifié (PG 70-28) qui possède une viscosité élevée et une recouvrance d'élasticité élevée (75% vs le minimum exigé de 60%). En effet, la température a un effet direct sur la viscosité du bitume et donc, sur les pertes d'adhésivité et de cohésion au sein de l'enrobé bitumineux. Ces quatre aspects peuvent également expliquer la faible diminution de la valeur d'ε_6 de 109 à 105 malgré la présence d'eau au sein de l'enrobé bitumineux.

5.7 Conclusions

Primo, l'observation de l'échauffement à la surface des éprouvettes d'enrobé bitumineux à l'état sec et partiellement saturé en eau a permis de cerner la fin de la phase I à 40 000 cycles de sollicitation.

Secundo, malgré la détermination de la norme du module complexe initial en se soustrayant au comportement non linéaire de l'enrobé bitumineux, le dommage menant à la transition des phases II et III (ou à la rupture des éprouvettes, D_{III}) dépend de l'amplitude de déformation imposée. Ceci est inhérent aux deux autres effets biaisant, notamment à l'échauffement au sein des éprouvettes et à la thixotropie du bitume.

Tercio, l'utilisation d'un essai de fatigue dans des conditions homogènes soit, de traction-compression sur éprouvette cylindrique, permet de déterminer assez aisément les effets biaisant. Ceci est possible en assumant une évolution linéaire de la norme du module complexe (|E*|) avec le nombre de cycles pour quelques intervalles donnés dans la phase II. La méthode du DGCB permet alors de se soustraire à ces effets biaisant.

Quarto, à partir de la méthode DGCB, le dommage mesuré peut être corrigé afin d'obtenir le dommage réel du matériau à la transition des phases II et III, soit à la rupture de ce dernier. On obtient alors un dommage à la transition des phases II et III (D_{IIIc}) qui est corrigé des effets biaisant, intrinsèque au matériau. Pour l'enrobé bitumineux, ayant une teneur en vides de 3,5 à 4,5%, testé à l'état sec et partiellement saturé en eau, D_{IIIc} est égal à 21,9% et à 19,9% respectivement.

Quinto, dans le cadre du programme expérimental actuel, il a pu être montré que la valeur de D_{IIIc} varie selon le type d'état, mais plus particulièrement avec la teneur en vides dans le cas de l'enrobé à l'état sec et plus spécifiquement, avec le degré de saturation dans le cas de l'enrobé à l'état partiellement saturé en eau. Ceci est tout à fait logique car pour une même amplitude de déformation, l'enrobé bitumineux à l'état sec et possédant une teneur en vides plus élevée va résister moins longtemps aux sollicitations. Cette durée de vie inférieure témoigne d'un dommage interne critique inférieur, lequel correspond au seuil de la densité de micros dommages répartis de manière homogène dans la matrice de l'enrobé et qui marque le point de rupture associé à la propagation d'une macro-fissuration au sein de l'enrobé. Notamment, les aspérités au sein du matériau peuvent être considérées comme des dommages déjà générés au matériau. Dans le cas de l'enrobé bitumineux à l'état partiellement saturé en eau, la teneur en vides va affecter la perméabilité et la rétention d'eau au sein du matériau qui influent à leur tour sur les valeurs de degré de saturation. Plus les valeurs de degré de saturation sont élevées et restent élevées en cours d'essai de fatigue, plus le matériau est soumis à des pressions hydrostatiques qui le fragilisent (pertes d'adhésivité et de cohésion) et mènent à sa rupture prématurée.

Finalement, l'enrobé bitumineux partiellement saturé en eau et testé dans le cadre de ce programme d'étude a présenté que de très faibles diminution de la rigidité (de l'ordre de 3%) et de la résistance à la fatigue (ε_6 de 105 vs 109), en référence à l'enrobé testé à l'état sec. Ces faibles diminutions sont, en grande partie, attribuables à la faible période d'immersion de l'enrobé bitumineux dans l'eau (quelques heures seulement), à la faible température de l'eau ($\approx$ +21°C) et de l'essai (+10°C), à la faible teneur en vides des éprouvettes ($\leq$ 5,1%), au bitume modifié (PG 70-28) et aux granulats de qualité utilisés.

CONCLUSION

Bien que l'ensemble de la chaussée soit affecté par les conditions sévères qui prévalent au Québec en période de gel et dégel, quel est l'effet éventuel de ces conditions sur l'endommagement et le comportement mécanique de l'enrobé bitumineux composant le revêtement ? Plus spécifiquement, ces conditions ont été intégrés au programme expérimental de laboratoire et sont : 1) présence de sel déverglaçant (ou de saumure), 2) saturation partielle de l'enrobé bitumineux avec de l'eau ou de la saumure, 3) sollicitations mécaniques de l'enrobé bitumineux, 4) variations de température, et 5) présence de cycles de gel-dégel. Plus spécifiquement, le volet #1 du programme expérimental comprenait la réalisation d'essais thermiques (variations de température et cycles de gel et dégel de -18 à +10°C) sur cinq éprouvettes d'enrobé instrumentées d'une jauge de déformation et de deux thermocouples, qui sont à l'état sec, partiellement saturées en eau ou en saumure à trois différentes concentrations. Ensuite, les éprouvettes étaient soumises à des essais mécaniques de faibles amplitudes de déformation sous chargement sinusoïdal, soit des essais de module complexe, afin d'évaluer l'évolution de la rigidité et de l'endommagement des éprouvettes suivants les essais thermiques et les divers états. Le volet #2 du programme expérimental portait sur l'étude de la résistance à la fatigue de l'enrobé bitumineux à l'état sec et partiellement saturée en eau.

Notamment, la réalisation des essais thermiques a révélé que l'enrobé bitumineux partiellement saturé en eau, comparativement à ceux partiellement saturés en saumures, était soumis à des dilatations et des contractions nettement plus importantes lors de la formation de la glace et lors de sa fonte respectivement. À cet effet, à basse température, soit de -18 à +10°C, le coefficient de dilatation linéique de l'enrobé bitumineux est très peu affecté par la présence de saumures, ce qui n'est pas le cas de l'enrobé partiellement saturé en eau et ce, même pour des essais réalisés à des degrés de saturation aussi faibles que 44%. Pour les enrobés bitumineux partiellement saturés en saumures, à des concentrations en sel de 7,4%, 13,8 et 19,4%, il est nécessaire de descendre sous la température eutectique de -21,1°C pour mesurer des dilatations, générées par la formation de la glace, nettement plus importantes.

Rapport-Gratuit.com

Quoiqu'il en soit, ces dilatations restent tout de même inférieures à celles observées pour l'enrobé bitumineux partiellement saturé avec de l'eau lors de la formation de glace. Par ailleurs, à température intermédiaire, soit de +10 à +23°C, les coefficients de dilatation linéique des enrobés partiellement saturés avec de l'eau et des saumures sont assez similaires, mais supérieurs à celui de l'enrobé à l'état sec. Ceci implique, qu'à température intermédiaire, l'enrobé bitumineux partiellement saturé se contracte et se dilate un peu plus que celui à l'état sec en raison de la pression interne générée par la présence du liquide au sein du matériau. En règle générale, les températures de solidification de l'eau et des saumures au sein de l'enrobé bitumineux sont affectées lorsque le degré de saturation est supérieur à 70%. Par ailleurs, l'évolution du degré de saturation des éprouvettes d'enrobé bitumineux partiellement saturé en eau ou en saumure au fil des essais thermiques, et des cycles de gel et dégel, constitue un indicateur quant au dommage subit par le matériau. Notamment, une évolution importante du degré de saturation au fil des essais signifie qu'il est possible d'y introduire de plus en plus de liquide au sein du matériau. Cela est imputable à des infiltrations de liquide à l'interface bitume-granulat, absorption de liquide par le mastic ou à la formation de microfissures au sein du matériau. Évidemment, ces phénomènes constituent des dégradations du matériau.

La réalisation des essais de module complexe a permis de faire le suivi de l'évolution de la rigidité (et de l'endommagement) de chaque éprouvette d'enrobé bitumineux au fil des cycles de gel et dégel suivant les divers états étudiés. La rationalisation des résultats de module complexe a permis de constater rapidement que l'enrobé bitumineux à l'état sec et ceux à l'état partiellement saturé en saumures, comparativement à celui partiellement saturé en eau, possédaient un comportement similaire et dans ce cas, il était possible de fixer les paramètres h, k, δ et β du modèle rhéologique 2S2P1D. Par ailleurs, le modèle 2S2P1D a permis de bien simuler le comportement viscoélastique linéaire de l'enrobé bitumineux suivants les différents états et ce, sur toute la plage de mesures. Pour les éprouvettes partiellement saturées, le principe d'équivalente temps-température est de moins en moins respecté au fil des cycles de gel et dégel, et il est possible d'observer des comportements distincts en dessous et au dessus de la température de solidification des fluides. A cet effet, une

modélisation aurait pu être réalisée sur chacun des comportements d'un même matériau. Notamment, à basses températures, lorsque les fluides sont solidifiés, les propriétés de l'enrobé bitumineux sont conservées, ce qui n'est pas le cas à plus hautes températures. En effet, le dommage de l'enrobé bitumineux semble avoir nettement plus d'impact à hautes températures qu'à basses températures. Cette observation s'applique également pour l'éprouvette testée à l'état sec. Il a été montré que les cycles de gel et dégel endommagent progressivement le matériau. Cet endommagement génère une baisse de la norme du module complexe et du temps de relaxation (tau) témoignant d'un ramollissement du bitume et d'un changement au sein de la matrice (perte de liens) au fil des cycles de gel et dégel. Également, la méthodologie utilisée pour quantifier le dommage généré par le cycle de gel et dégel, de -35 à +35°C, induit par la réalisation d'un essai de module complexe semble tout à fait valable. De plus, l'endommagement au fil des essais thermiques et des cycles de gel et dégel est nettement supérieur pour l'éprouvette partiellement saturée en eau, comparativement à celles partiellement saturées en saumures ou à l'état sec. De plus, il a été montré l'importance d'avoir une teneur en vides similaire pour l'ensemble des éprouvettes afin de mieux quantifier l'effet d'une variable.

La réalisation d'essais de fatigue dans des conditions homogènes soit, de traction-compression sur éprouvette cylindrique, a permis de se soustraire plus aisément des effets biaisant : thixotropie, échauffement et non linéarité de l'enrobé bitumineux. Ceci est possible en assumant une évolution linéaire de la norme du module complexe (|E*|) avec le nombre de cycles pour quelques intervalles donnés dans la phase II. La méthode du DGCB permet alors de se soustraire à ces effets biaisant. À partir de cette méthode, le dommage critique associé au passage de la phase II à la phase III et lié à l'amorce de la propagation d'une macro fissure menant à la rupture a pu être corrigé afin d'obtenir le dommage critique intrinsèque au matériau. Pour l'enrobé bitumineux partiellement saturé, le dommage intrinsèque (corrigé) est légèrement inférieur à celui de l'enrobé à l'état sec. Par ailleurs, il a été montré que la valeur du dommage intrinsèque diminue avec la hausse de la teneur en vides de l'enrobé bitumineux. En effet, les vides au sein du matériau peuvent être considérés comme des dommages propres au matériau, ce qui se traduit par une baisse du dommage intrinsèque

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

(corrigé) menant à la rupture du matériau bitumineux. Pour l'enrobé bitumineux partiellement saturé en eau, seuls des degrés de saturation supérieurs à 75%, lors des essais de fatigue (ou des sollicitations mécaniques), réduisent sensiblement la durée de vie en comparaison à l'enrobé à l'état sec. Toutefois, pour l'enrobé partiellement saturé en eau et testé, seules des faibles diminutions du module initial (de l'ordre de 3%) et de la résistance à la fatigue (ε_6 de 105 vs 109μdef) ont pu être observées, comparativement à l'enrobé testé à l'état sec. Ces faibles diminutions sont attribuables à la faible période d'immersion de l'enrobé bitumineux dans l'eau (quelques heures seulement), à la faible température de l'eau ($\approx$ +21°C) et de l'essai (+10°C), à la faible teneur en vides des éprouvettes ($\leq$ 5,1%) et au bitume modifié utilisé (PG 70-28), qui possède une viscosité élevée et est doter d'une certaine recouvrance d'élasticité (75%), et aux granulats de qualité utilisés.

RECOMMANDATIONS

Au niveau des essais thermiques, chaque éprouvette de type T devraient être équipées d'au moins deux et même, trois jauges axiales. Ces jauges permettraient de vérifier si les éprouvettes fluent et de déterminer avec plus de précision les dilatations et contractions générées par la formation et la fonte de glace, les déformations thermiques et le coefficient de dilatation linéique de l'enrobé bitumineux suivant les différents états.

Au niveau des essais de module complexe, il est fortement recommandé de les réaliser premièrement sur les éprouvettes à l'état sec. Ensuite, ces résultats pourront être comparés à ceux obtenus pour ces mêmes éprouvettes partiellement saturées en eau ou en saumure afin de connaître précisément l'effet de ses fluides et de la présence de glace sur le comportement et l'endommagement de l'enrobé. Par ailleurs, pour les éprouvettes partiellement saturées, le positionnement des extensomètres sur les éprouvettes au lieu des casques permet de simplifier grandement le traitement des données et des résultats d'essai. Également, il serait intéressant d'effectuer une analyse plus poussée concernant le niveau de dommage mesuré lors de la réalisation des séquences de cyclage de sollicitations afin de trouver la cause d'origine et de trouver, dans quelle mesure, il est réversible. De plus, à la suite des cycles de gel et dégel, il serait intéressant de déterminer un dommage intrinsèque du matériau c'est-à-dire que le niveau de dommage n'évolue pas avec la fréquence et la température. Aussi, ce dommage intrinsèque pourra être soustrait de celui déterminé lors des essais de fatigue.

Au niveau de la résistance à la fatigue des enrobés bitumineux, l'incidence d'une immersion prolongée des éprouvettes dans l'eau, de la variation de la teneur en vides des éprouvettes partiellement saturées en eau, du recours à divers bitumes, du remplacement de l'eau par de la saumure et de la réalisation de cycles de gel et dégel pourrait être examinée.

Pour terminer, pour l'ensemble des essais, thermiques et mécaniques, la température à la surface de chacune des éprouvettes devrait être mesurée à l'aide d'une sonde conçue pour cet

usage, soit revêtue de caoutchouc, et non avec un simple thermocouple ou une sonde de température de type PT-100.

ANNEXE I

DURÉE ET DÉROULEMENT DES ÉTAPES NÉCESSAIRES AVANT LA RÉALISATION D'ESSAI

Le Tableau-A I–1 spécifie la durée et le déroulement des étapes nécessaires avant de réaliser un essai thermique ou mécanique.

Tableau-A I–1 Durée et déroulement des étapes nécessaires avant la réalisation d'un essai thermique ou mécanique

Étapes	Durée prévue	Durée cum.
1) Réception des matériaux - Enregistrement des échantillons dans le registre ; - Vérification du certificat de conformité du bitume et de la formule de l'enrobé bitumineux ; - Coordination pour le compactage de la plaque le lendemain.	1d	1d
2) Compactage de la plaque d'enrobé - Chauffage à l'étuve des échantillons d'enrobé (boîtes) ; - Calcul de la masse requise pour taux de compaction ciblé pour la plaque. La teneur en vides des carottes est généralement de 1,5 à 2,5 % plus faible que la teneur en vides de la plaque ; - Séparation des échantillons (LC 26-010 : MTQ, 2013) et atteinte de la température de compactage (LC 25-007 : MTQ, 2013) ; - Compacteur de plaques MLPC (LC 26-400 : MTQ, 2013 ; NF EN 12697-33 : AFNOR, 2004b).	3h --- 2h 1h	2d
3) Mûrissement (LC 26-400)	1d	3d
4) Démoulage et pesée de la plaque pour déterminer le % de vides	0,5h	3d
5) Mûrissement de 14 jours après compactage	13d	16d
6) Sciage et carottage à l'eau de la plaque (12 éprouvettes, Figure 2.3)	2h	17d
7) Identification, mesurage, resurfaçage, vérifications et pesages pour vérifier conformité et déterminer % vides des éprouvettes - La pesée dans l'air à sec est à effectuer après quelques jours.	2h	17d
8) Entreposage des éprouvettes sur lit de sable - Durée après le sciage et avant de réaliser des essais mécaniques (NF P98-260-2 et NF P 98-261-1).	15d à 2 mois	32d
9) Pesage de l'éprouvette à l'état sec, collage d'un casque et attente pour le durcissement de l'époxy	6,5h / épr.	33d
10) Saturation partielle d'une éprouvette (s'il y a lieu) - Pesage de l'éprouvette avant et après saturation ; - Réalisation de l'ensemble des étapes pour la saturation partielle ; - Mise en place de la membrane en latex et des colliers métalliques.	0,25d / épr.	34d
11) Collage d'un casque avec la presse et réalisation d'un essai - **ET** : conditionnement de 36h + 24h / cycle de gel et dégel - **EE*** : pilotage avec 3 extensomètres de 50mm, -35 à +35°C, incréments de 10°C, 10, 0.03, 0.1, 0.3, 1, 3 et 10Hz, ε de 50µdef. - **EF** : pilotage avec 3 extensomètres de 50mm, +10°C, 10Hz.	min. 2,5d 3d / épr. 1 à 7d / épr.	36,5d 37d 35 à 42d

ANNEXE II

INFORMATIONS RELATIVES AUX PLAQUES D'ENROBÉ BITUMINEUX

Le Tableau-A II–1 indique la teneur en vides respective pour chaque plaque d'enrobé bitumineux confectionnée. Quant à lui, le Tableau-A II–2 montre le temps écoulé entre le compactage et le carottage des plaques d'enrobé bitumineux.

Tableau-A II–1 Teneur en vides des plaques d'enrobé

Plaque #	Teneur en vides (%)
1	6,6
2	5,6
3	6,7
4	6,9
5	6,2
6	6,5
7	5,1
8	7,0
9	6,8

Tableau-A II–2 Temps écoulé entre le compactage et le carottage des plaques d'enrobé

Plaque #	Date de compactage	Date de carottage	Temps écoulé
1	12 fév. 2008	17 fév. 2010	≈ 2 ans et 1 sem.
2	13 fév. 2008	22 fév. 2010	≈ 2 ans et 2 sem.
3	14 fév. 2008	29 avril et 2 mai 2011	≈ 3 ans et 11 sem.
4	19 fév. 2008	26 et 27 avril 2011	≈ 3 ans et 10 sem.
5	20 fév. 2008	25 nov. 2011	≈ 3 ans et 39 sem.
6	21 fév. 2008	23 nov. 2011	≈ 3 ans et 39 sem.
7	25 fév. 2008	11 avril 2008	≈ 6 sem.
8	27 fév. 2008	21 avril 2008	≈ 8 sem.
9	28 fév. 2008	3 et 4 mai 2011	≈ 3 ans et 9 sem.

ANNEXE III

INFORMATIONS RELATIVES AUX ÉPROUVETTES D'ENROBÉ BITUMINEUX

Dans un premier temps, les caractéristiques physiques des éprouvettes servant à la détermination de la teneur en vides selon les deux méthodes (volumétrique et hydrostatique) sont présentées. Il faut souligner qu'étant donné que la teneur en vides des éprouvettes est inférieure à 10%, c'est la méthode hydrostatique qui est privilégiée. Plus précisément, chacun des Tableau-A III–1 à Tableau-A III–9 présente les caractéristiques physiques des éprouvettes d'une même plaque.

Notamment, certaines éprouvettes n'ont pas été utilisées en raison de leur importante divergence au niveau de la teneur en vides comparativement aux autres ou à des caractéristiques physiques qui ne respectaient pas les exigences fixées pour les essais mécaniques. Ainsi, les Tableau-A III–10 à Tableau-A III–13 spécifient les éprouvettes utilisées pour chaque type d'essai, soit pour les essais thermiques, de module complexe et de fatigue. Toutefois, certains de ces essais se sont avérés non conformes aux exigences ou inutilisables en raison de problèmes mécaniques.

Rapport-Gratuit.com

Tableau-A III–1 Caractéristiques physiques des éprouvettes de la plaque #1

Caractéristiques physiques des éprouvettes de la plaque #1 servant à la détermination de la teneur en vides																		
Éprouv. (no)	Méthode volumétrique											Méthode hydrostatique						Écart de teneur en vides (ΔVi, %)
	Longueur (L, mm)				Diamètre (D, mm)				Masse à l'état sec (A)	Masse volum. (MV)	Teneur en vides (Vi, %)	Masse sèche (A)	Masse ds l'eau (C)	Masse SSS (B)	Tempér. eau (°C)	Densité brute (dmb)	Teneur en vides (Vi, %)	
	Mesures			Moy.	Mesures			Moy.										
1A1	114,98	115,25	115,54	115,26	78,84	78,81	78,79	78,82	1374,4	2,444	5,22	1374,4	814,6	1374,6	22,8	2,456	5,04	-0,18
					78,87	78,83	78,79											
1A2	119,41	119,54	118,81	119,25	78,77	78,59	78,78	78,73	1415,8	2,439	5,40	1415,8	839,9	1416,2	22,8	2,458	4,95	-0,46
					78,74	78,68	78,79											
1A3	121,65	121,87	121,72	121,75	78,74	78,71	78,82	78,79	1455,6	2,452	4,89	1455,6	865,0	1455,8	23,1	2,465	4,68	-0,21
					78,77	78,75	78,95											
1B1	119,16	119,30	118,91	119,12	78,82	78,87	78,79	78,82	1423,3	2,449	5,02	1423,3	845,4	1423,7	23,1	2,462	4,78	-0,24
					78,87	78,80	78,76											
1B2	115,54	115,99	115,99	115,84	78,73	78,87	78,85	78,80	1388,4	2,458	4,69	1388,4	827,1	1388,7	22,8	2,474	4,35	-0,34
					78,65	78,82	78,89											
1B3	116,20	116,66	116,94	116,60	78,73	78,87	78,91	78,84	1404,7	2,468	4,30	1404,7	837,9	1404,9	22,7	2,479	4,14	-0,15
					78,77	78,86	78,92											
1C1	119,20	118,88	119,08	119,05	78,77	78,85	78,86	78,81	1431,4	2,465	4,40	1431,4	853,0	1431,8	23,0	2,474	4,32	-0,08
					78,65	78,86	78,85											
1C2	118,88	118,90	119,44	119,07	78,65	78,78	78,82	78,79	1432,8	2,468	4,28	1432,8	855,1	1433,2	22,7	2,480	4,10	-0,17
					78,76	78,88	78,84											
1C3	118,47	118,31	117,93	118,24	78,90	78,86	78,76	78,85	1431,7	2,480	3,82	1431,7	856,7	1432,1	22,6	2,490	3,73	-0,09
					78,88	78,89	78,80											
1D1	120,05	120,52	120,12	120,23	78,86	78,88	78,93	78,90	1443,2	2,455	4,77	1443,2	858,4	1443,6	22,8	2,468	4,58	-0,19
					78,86	78,94	78,91											
1D2	120,55	120,49	120,59	120,54	78,79	78,91	78,92	78,89	1450,2	2,461	4,53	1450,2	864,2	1450,7	22,9	2,474	4,33	-0,20
					78,86	78,90	78,94											
1D3	120,99	121,30	120,94	121,08	78,89	78,85	78,88	78,88	1469,8	2,484	3,64	1469,8	880,5	1470,2	22,9	2,494	3,57	-0,07
					78,84	78,89	78,90											
La densité maximale du mélange (dmm) est de 2,586.																		

Tableau-A III–2 Caractéristiques physiques des éprouvettes de la plaque #2

Caractéristiques physiques des éprouvettes de la plaque #2 servant à la détermination de la teneur en vides																			
Éprouv. (no)	Méthode volumétrique											Méthode hydrostatique						Écart de teneur en vides (ΔVi, %)
	Longueur (L, mm)				Diamètre (D, mm)				Masse à l'état sec (A)	Masse volum. (MV)	Teneur en vides (Vi, %)	Masse sèche (A)	Masse ds l'eau (C)	Masse SSS (B)	Tempér. eau (°C)	Densité brute (dmb)	Teneur en vides (Vi, %)	
	Mesures			Moy.	Mesures			Moy.										
2A1	123,75	122,78	123,44	123,32	78,93	78,86	78,71	78,83	1499,0	2,491	3,40	1499,0	900,0	1499,8	25,2	2,499	3,36	-0,04
					78,82	78,87	78,78											
2A2	124,22	124,44	123,48	124,05	78,88	78,84	78,86	78,86	1508,3	2,490	3,44	1508,3	906,3	1509,3	25,1	2,501	3,28	-0,16
					78,79	78,89	78,87											
2A3	124,77	124,41	123,97	124,38	78,84	78,89	78,77	78,82	1511,5	2,490	3,42	1511,5	907,9	1512,4	25,1	2,500	3,31	-0,10
					78,80	78,84	78,80											
2B1	125,51	125,69	126,07	125,76	78,80	78,85	78,95	78,88	1532,2	2,494	3,29	1532,2	921,2	1532,9	25,1	2,505	3,14	-0,15
					78,84	78,90	78,91											
2B2	126,54	126,54	126,94	126,67	78,75	78,87	78,89	78,87	1546,5	2,499	3,09	1546,5	931,1	1546,5	25,0	2,513	2,82	-0,26
					78,88	78,93	78,91											
2B3	128,07	127,31	127,55	127,64	78,84	78,83	78,88	78,87	1561,2	2,504	2,89	1561,2	940,0	1561,3	25,0	2,513	2,83	-0,06
					78,86	78,86	78,92											
2C1	116,73	116,72	116,59	116,68	78,97	78,96	78,95	78,96	1422,5	2,490	3,44	1422,5	852,5	1423,0	20,8	2,496	3,48	0,05
2C2	122,25	122,16	122,15	122,19	78,94	79,01	79,01	78,99	1492,8	2,493	3,30	1492,8	895,7	1493,3	21,8	2,500	3,33	0,03
2C3	119,80	119,99	119,86	119,88	79,02	78,97	79,00	79,00	1465,1	2,493	3,29	1465,1	879,3	1465,6	21,8	2,501	3,29	0,00
2D1																		
2D2																		
2D3																		
La densité maximale du mélange (dmm) est de 2,586.																		

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Tableau-A III–3 Caractéristiques physiques des éprouvettes de la plaque #3

Caractéristiques physiques des éprouvettes de la plaque #3 servant à la détermination de la teneur en vides																		
Éprouv. (no)	Méthode volumétrique											Méthode hydrostatique						Écart de teneur en vides (ΔVi, %)
	Longueur (L, mm)				Diamètre (D, mm)				Masse à l'état sec (A)	Masse volum. (MV)	Teneur en vides (Vi, %)	Masse sèche (A)	Masse ds l'eau (C)	Masse SSS (B)	Tempér. eau (°C)	Densité brute (dmb)	Teneur en vides (Vi, %)	
	Mesures			Moy.	Mesures			Moy.										
3A1																		
3A2	118,13	118,39	118,22	118,25	79,03	79,02	79,00	79,02	1412,4	2,435	5,54	1412,4	835,5	1412,3	25,3	2,448	5,32	-0,23
					79,03	78,99	79,07											
3A3	118,15	118,14	117,99	118,09	79,06	79,04	79,04	79,04	1415,7	2,443	5,24	1415,7	839,5	1416,3	25,2	2,454	5,09	-0,14
					79,05	79,01	79,03											
3B1	119,87	120,02	119,86	119,92	79,02	79,02	79,03	79,03	1448,1	2,462	4,52	1448,1	863,2	1448,3	25,2	2,475	4,30	-0,22
					79,05	78,99	79,06											
3B2	119,34	119,60	119,48	119,47	79,02	79,06	79,00	79,04	1433,0	2,445	5,18	1433,0	850,8	1433,5	25,2	2,459	4,91	-0,27
					79,03	79,05	79,05											
3B3	119,57	119,41	119,58	119,52	79,00	79,05	79,03	79,04	1445,2	2,465	4,41	1445,2	861,3	1445,6	25,0	2,473	4,35	-0,05
					79,02	79,08	79,03											
3C1	121,85	121,41	121,86	121,71	79,03	79,05	79,02	79,03	1473,7	2,469	4,25	1473,7	879,8	1474,5	25,1	2,478	4,18	-0,07
					79,01	79,05	78,99											
3C2	122,47	122,41	122,13	122,34	78,96	79,04	79,03	79,00	1469,2	2,450	4,96	1469,2	872,9	1471,0	25,1	2,456	5,01	0,05
					78,98	79,03	78,93											
3C3	122,19	122,17	122,31	122,22	79,01	78,99	78,99	79,03	1470,8	2,453	4,85	1470,8	875,8	1472,5	25,0	2,465	4,68	-0,17
					79,05	79,06	79,07											
3D1	122,27	122,09	122,26	122,21	79,03	79,09	79,03	79,06	1463,5	2,440	5,38	1463,5	868,6	1464,5	25,1	2,456	5,03	-0,35
					79,07	79,08	79,05											
3D2	120,69	120,34	120,26	120,43	78,93	79,01	79,05	79,02	1442,4	2,442	5,28	1442,4	856,9	1443,5	25,0	2,459	4,91	-0,36
					79,05	79,04	79,03											
3D3	121,66	121,71	121,83	121,73	79,02	79,03	79,06	79,05	1459,2	2,442	5,28	1459,2	866,2	1460,0	25,0	2,457	4,97	-0,30
					79,06	79,07	79,07											
La densité maximale du mélange (dmm) est de 2,586.																		

Tableau-A III–4 Caractéristiques physiques des éprouvettes de la plaque #4

Caractéristiques physiques des éprouvettes de la plaque #4 servant à la détermination de la teneur en vides																			
Éprouv. (no)	Méthode volumétrique											Méthode hydrostatique						Écart de teneur en vides (ΔVi, %)
	Longueur (L, mm)				Diamètre (D, mm)				Masse à l'état sec (A)	Masse volum. (MV)	Teneur en vides (Vi, %)	Masse sèche (A)	Masse ds l'eau (C)	Masse SSS (B)	Tempér. eau (°C)	Densité brute (dmb)	Teneur en vides (Vi, %)	
	Mesures			Moy.	Mesures			Moy.										
4A1	118,24	118,65	118,78	118,56	78,99	78,99	79,02	79,00	1429,5	2,460	4,59	1429,5	851,3	1429,9	20,8	2,473	4,37	-0,23
4A2	120,98	121,36	121,77	121,37	78,98	79,01	78,98	78,99	1472,2	2,475	4,00	1472,2	880,0	1472,9	21,8	2,485	3,91	-0,09
4A3																		
4B1	118,59	119,20	119,23	119,01	79,07	79,06	79,05	79,04	1438,5	2,463	4,46	1438,5	858,3	1438,8	25,0	2,478	4,17	-0,29
					78,94	79,08	79,06											
4B2	122,24	121,62	121,55	121,80	79,09	79,00	79,05	79,01	1477,6	2,474	4,04	1477,6	879,9	1478,1	24,9	2,470	4,48	0,44
					78,96	79,01	78,96											
4B3	120,48	120,71	120,86	120,68	79,05	78,94	79,09	79,03	1469,3	2,482	3,74	1469,3	876,8	1469,8	24,9	2,478	4,18	0,44
					79,03	79,02	79,06											
4C1	122,39	122,20	122,63	122,41	79,05	79,04	78,94	79,00	1498,0	2,497	3,17	1498,0	897,1	1499,0	24,8	2,489	3,75	0,59
					78,95	79,03	78,99											
4C2	122,02	121,49	120,87	121,46	78,98	78,96	79,12	79,05	1469,6	2,466	4,38	1469,6	874,3	1470,7	24,8	2,464	4,71	0,33
					79,04	79,08	79,10											
4C3	120,98	121,19	121,62	121,26	78,95	78,92	79,01	78,98	1476,0	2,485	3,63	1476,0	881,5	1476,4	24,7	2,481	4,05	0,42
					79,00	78,95	79,03											
4D1	121,14	120,77	121,00	120,97	78,58	79,02	79,00	78,95	1481,4	2,501	2,98	1481,4	888,3	1481,8	24,7	2,496	3,47	0,49
					78,95	79,08	79,08											
4D2	121,40	121,19	121,26	121,28	78,73	78,95	78,97	78,93	1463,6	2,466	4,34	1463,6	873,0	1464,6	24,7	2,474	4,32	-0,02
					78,80	79,04	79,08											
4D3	122,48	122,34	122,44	122,42	78,98	79,02	78,95	79,00	1473,8	2,456	4,73	1473,8	878,0	1474,9	24,7	2,469	4,51	-0,22
					78,93	79,05	79,04											
La densité maximale du mélange (dmm) est de 2,586.																		

Tableau-A III–5 Caractéristiques physiques des éprouvettes de la plaque #5

Caractéristiques physiques des éprouvettes de la plaque #5 servant à la détermination de la teneur en vides																			
Éprouv. (no)	Méthode volumétrique											Méthode hydrostatique						Écart de teneur en vides (ΔVi, %)
	Longueur (L, mm)				Diamètre (D, mm)				Masse à l'état sec (A)	Masse volum. (MV)	Teneur en vides (Vi, %)	Masse sèche (A)	Masse ds l'eau (C)	Masse SSS (B)	Tempér. eau (°C)	Densité brute (dmb)	Teneur en vides (Vi, %)	
	Mesures			Moy.	Mesures			Moy.										
5A1	119,34	119,35	119,96	119,55	79,06	79,00	78,97	79,01	1434,0	2,447	5,11	1434,0	850,9	1434,7	20,7	2,459	4,92	-0,20
5A2	121,34	120,95	121,03	121,11	78,95	79,00	78,97	78,97	1455,7	2,454	4,83	1455,7	865,1	1456,7	20,7	2,463	4,75	-0,08
5A3	122,55	123,09	123,10	122,91	79,04	78,98	79,00	79,01	1483,0	2,461	4,55	1483,0	883,6	1484,1	20,7	2,472	4,40	-0,14
5B1	118,44	118,95	118,47	118,62	79,01	79,00	79,00	79,00	1445,7	2,486	3,57	1445,7	867,1	1446,3	20,7	2,499	3,38	-0,19
5B2	121,54	121,20	121,35	121,36	79,02	79,00	79,00	79,00	1475,4	2,480	3,81	1475,4	882,5	1475,8	20,7	2,489	3,74	-0,07
5B3	122,71	122,75	122,13	122,53	79,00	78,98	79,00	78,99	1494,8	2,489	3,46	1494,8	896,5	1495,1	20,7	2,500	3,34	-0,12
5C1	120,56	120,53	121,24	120,78	78,95	78,94	78,98	78,96	1475,7	2,495	3,22	1475,7	885,5	1476,2	20,7	2,501	3,30	0,08
5C2	119,37	119,53	120,35	119,75	78,98	78,95	78,98	78,97	1453,6	2,478	3,88	1453,6	868,6	1454,3	20,7	2,484	3,93	0,05
5C3	119,58	119,76	120,59	119,98	78,97	79,00	78,99	78,99	1465,5	2,493	3,32	1465,5	878,9	1466,1	20,7	2,498	3,39	0,07
5D1	117,96	118,13	118,21	118,10	78,98	78,95	78,97	78,97	1430,4	2,473	4,08	1430,4	853,4	1430,8	20,7	2,480	4,11	0,02
5D2	118,61	118,93	119,26	118,93	79,01	78,96	79,04	79,00	1428,0	2,449	5,00	1428,0	847,5	1428,6	20,7	2,460	4,88	-0,13
5D3	120,90	120,06	120,28	120,41	79,00	79,00	79,00	79,00	1456,2	2,467	4,31	1456,2	868,1	1456,8	20,7	2,476	4,25	-0,06
La densité maximale du mélange (dmm) est de 2,586.																		

Tableau-A III–6 Caractéristiques physiques des éprouvettes de la plaque #6

Caractéristiques physiques des éprouvettes de la plaque #6 servant à la détermination de la teneur en vides																			
Éprouv. (no)	Méthode volumétrique											Méthode hydrostatique						Écart de teneur en vides (ΔVi, %)
	Longueur (L, mm)				Diamètre (D, mm)				Masse à l'état sec (A)	Masse volum. (MV)	Teneur en vides (Vi, %)	Masse sèche (A)	Masse ds l'eau (C)	Masse SSS (B)	Tempér. eau (°C)	Densité brute (dmb)	Teneur en vides (Vi, %)	
	Mesures			Moy.	Mesures			Moy.										
6A1	120,24	120,22	120,61	120,36	79,09	78,87	79,04	79,00	1463,5	2,481	3,79	1463,5	876,3	1464,0	22,6	2,492	3,65	-0,14
6A2	119,27	119,91	119,99	119,72	79,04	79,06	79,02	79,04	1444,9	2,460	4,60	1444,9	860,6	1445,4	22,6	2,472	4,40	-0,20
6A3	118,31	118,19	118,01	118,17	78,99	78,98	79,01	78,99	1434,7	2,477	3,92	1434,7	857,2	1435,2	22,6	2,484	3,96	0,04
6B1	119,94	119,92	119,27	119,71	79,01	79,00	78,95	78,99	1456,1	2,482	3,72	1456,1	871,6	1456,4	22,6	2,491	3,66	-0,06
6B2	119,64	119,91	120,53	120,03	79,02	78,94	79,02	78,99	1451,8	2,468	4,28	1451,8	865,4	1452,4	22,6	2,475	4,30	0,03
6B3	119,93	120,43	120,46	120,27	78,90	78,92	78,99	78,94	1463,8	2,487	3,55	1463,8	875,9	1464,0	22,6	2,490	3,69	0,15
6C1	119,19	119,30	119,58	119,36	79,02	79,00	79,01	79,01	1452,7	2,482	3,72	1452,7	869,6	1453,0	22,6	2,492	3,65	-0,07
6C2	120,14	119,91	120,29	120,11	79,03	79,04	78,93	79,00	1458,2	2,477	3,94	1458,2	870,9	1458,6	22,6	2,483	4,00	0,06
6C3	119,65	119,59	119,37	119,54	79,03	78,99	79,03	79,02	1453,5	2,480	3,83	1453,5	869,5	1454,1	22,6	2,488	3,80	-0,03
6D1	119,94	120,66	120,82	120,47	79,02	78,97	79,06	79,02	1457,7	2,467	4,30	1457,7	869,4	1457,6	22,6	2,480	4,11	-0,19
6D2	121,77	121,65	121,79	121,74	78,98	78,96	79,00	78,98	1472,0	2,468	4,28	1472,0	877,1	1472,6	22,6	2,473	4,36	0,08
6D3	121,46	120,88	121,03	121,12	78,96	79,06	78,94	78,99	1472,3	2,481	3,79	1472,3	880,4	1472,7	22,6	2,487	3,82	0,03
La densité maximale du mélange (dmm) est de 2,586.																		

Tableau-A III–7 Caractéristiques physiques des éprouvettes de la plaque #7

Caractéristiques physiques des éprouvettes de la plaque #7 servant à la détermination de la teneur en vides																		
Éprouv. (no)	Méthode volumétrique										Méthode hydrostatique						Écart de teneur en vides (ΔVi, %)
	Longueur (L, mm)				Diamètre (D, mm)				Masse à l'état sec (A)	Masse volum. (MV)	Teneur en vides (Vi, %)	Masse sèche (A)	Masse ds l'eau (C)	Masse SSS (B)	Tempér. eau (°C)	Densité brute (dmb)	Teneur en vides (Vi, %)	
	Mesures			Moy.	Mesures			Moy.										
7A1	123,27	123,66	122,97	123,30	78,88			78,88	1506,6	2,500	3,02	1506,6	904,5	1506,0	21,7	2,507	3,07	0,04
7A2												1506,0	903,4	1506,4	24,5	2,498	3,41	
7A3												1529,1	920,2	1529,4	24,1	2,511	2,92	
7B1												1458,6	880,9	1459,0	24,1	2,524	2,41	
7B2												1462,6	882,6	1462,8	24,0	2,521	2,49	
7B3												1462,0	881,5	1462,3	23,8	2,518	2,63	
7C1												1422,1	859,4	1422,4	23,7	2,527	2,29	
7C2												1420,5	855,4	1420,8	23,6	2,513	2,81	
7C3												1449,1	874,8	1449,4	23,5	2,523	2,44	
7D1												1455,1	872,1	1455,5	23,5	2,495	3,51	
7D2												1456,8	876,5	1457,0	23,4	2,511	2,92	
7D3												1462,1	876,1	1462,5	23,3	2,494	3,54	
La densité maximale du mélange (dmm) est de 2,586.																		

Tableau-A III–8 Caractéristiques physiques des éprouvettes de la plaque #8

Caractéristiques physiques des éprouvettes de la plaque #8 servant à la détermination de la teneur en vides																			
Éprouv. (no)	Méthode volumétrique											Méthode hydrostatique						Écart de teneur en vides (ΔVi, %)
	Longueur (L, mm)				Diamètre (D, mm)				Masse à l'état sec (A)	Masse volum. (MV)	Teneur en vides (Vi, %)	Masse sèche (A)	Masse ds l'eau (C)	Masse SSS (B)	Tempér. eau (°C)	Densité brute (dmb)	Teneur en vides (Vi, %)	
	Mesures			Moy.	Mesures			Moy.										
8A1	119,59	120,04	119,93	119,85	78,88	78,93	78,83	78,88	1446,6	2,470	4,21	1446,6	862,7	1446,9	21,7	2,478	4,17	-0,04
8A2	118,98	118,89	119,62	119,16	78,92	78,89	78,78	78,86	1436,5	2,468	4,29	1436,5	856,6	1437,1	21,7	2,477	4,23	-0,05
8A3	120,92	120,92	120,50	120,78	78,90	78,90	78,89	78,90	1451,4	2,458	4,67	1451,4	863,8	1452,0	21,7	2,469	4,51	-0,16
8B1	118,81	118,80	118,30	118,64	78,84	78,85	78,86	78,85	1429,2	2,467	4,32	1429,2	853,3	1431,1	21,7	2,475	4,27	-0,04
8B2	118,30	118,18	117,76	118,08	78,88	78,88	78,91	78,89	1419,4	2,459	4,62	1419,4	845,2	1419,9	21,7	2,472	4,42	-0,20
8B3	117,83	117,62	117,69	117,71	78,92	78,90	78,95	78,92	1415,0	2,457	4,70	1415,0	842,6	1416,0	21,7	2,470	4,50	-0,20
8C1	116,51	116,16	116,63	116,43	78,93	78,89	78,97	78,93	1399,5	2,457	4,73	1399,5	833,8	1401,2	21,7	2,468	4,54	-0,18
8C2	119,63	119,47	119,42	119,51	78,77	78,92	78,81	78,83	1440,2	2,469	4,24	1440,2	859,0	1441,2	21,7	2,476	4,27	0,02
8C3												1431,7	850,3	1432,6	21,7	2,461	4,85	
8D1	120,69	121,08	121,21	120,99	78,71	78,90	78,93	78,85	1454,7	2,462	4,50	1454,7	866,6	1455,1	21,7	2,474	4,34	-0,16
8D2	118,37	118,72	118,58	118,56	78,88	78,93	78,83	78,88	1426,9	2,463	4,48	1426,9	851,6	1427,4	21,7	2,480	4,10	-0,38
8D3	119,06	119,44	119,47	119,32	78,88			78,88	1430,2	2,453	4,87	1430,2	849,5	1430,9	21,7	2,462	4,80	-0,07
La densité maximale du mélange (dmm) est de 2,586.																		

Tableau-A III–9 Caractéristiques physiques des éprouvettes de la plaque #9

Caractéristiques physiques des éprouvettes de la plaque #9 servant à la détermination de la teneur en vides																			
Éprouv. (no)	Méthode volumétrique											Méthode hydrostatique						Écart de teneur en vides (ΔVi, %)
	Longueur (L, mm)				Diamètre (D, mm)				Masse à l'état sec (A)	Masse volum. (MV)	Teneur en vides (Vi, %)	Masse sèche (A)	Masse ds l'eau (C)	Masse SSS (B)	Tempér. eau (°C)	Densité brute (dmb)	Teneur en vides (Vi, %)	
	Mesures			Moy.	Mesures			Moy.										
9A1	121,44	120,87	120,56	120,96	78,79	78,82	78,81	78,81	1447,9	2,454	4,82	1447,9	859,6	1449,1	24,6	2,456	5,01	0,19
					78,71	78,85	78,86											
9A2	122,07	121,81	122,27	122,05	78,77	78,84	78,85	78,83	1464,5	2,459	4,65	1464,5	869,3	1465,6	25,1	2,456	5,03	0,38
					78,80	78,84	78,88											
9A3	122,08	122,43	122,25	122,25	78,84	78,78	78,81	78,83	1452,0	2,433	5,63	1452,0	859,3	1455,0	25,1	2,437	5,75	0,12
					78,83	78,86	78,88											
9B1	121,72	121,50	121,90	121,71	78,82	78,75	78,80	78,83	1477,7	2,488	3,52	1477,7	883,2	1478,2	25,0	2,484	3,96	0,44
					78,83	78,89	78,90											
9B2	121,44	121,75	121,85	121,68	78,86	78,85	78,86	78,84	1472,5	2,479	3,87	1472,5	878,3	1472,9	25,0	2,476	4,24	0,37
					78,86	78,83	78,80											
9B3	121,42	121,31	120,93	121,22	78,81	78,89	78,82	78,84	1463,5	2,473	4,08	1463,5	871,9	1463,6	24,9	2,473	4,35	0,27
					78,80	78,87	78,85											
9C1	120,41	119,66	119,62	119,90	78,77	78,87	78,80	78,81	1452,3	2,483	3,70	1452,3	866,0	1452,0	24,9	2,478	4,16	0,46
					78,79	78,84	78,80											
9C2	121,50	121,59	121,71	121,60	78,67	78,86	78,86	78,81	1472,2	2,482	3,75	1472,2	879,0	1472,6	24,9	2,480	4,09	0,34
					78,85	78,92	78,72											
9C3	122,12	121,77	122,09	121,99	78,77	78,75	78,83	78,74	1471,9	2,478	3,91	1471,9	876,0	1472,2	24,8	2,469	4,53	0,62
					78,57	78,79	78,75											
9D1	120,89	120,84	120,64	120,79	78,86	78,84	78,77	78,83	1447,6	2,456	4,76	1447,6	858,7	1447,9	25,4	2,457	5,00	0,25
					78,77	78,90	78,82											
9D2	121,48	120,81	121,03	121,11	78,81	78,78	78,85	78,84	1449,5	2,452	4,90	1449,5	858,3	1449,6	25,4	2,451	5,22	0,32
					78,89	78,91	78,77											
9D3	118,86	118,82	118,78	118,82	78,75	78,82	78,84	78,78	1414,5	2,442	5,27	1414,5	836,5	1415,7	25,4	2,442	5,57	0,30
					78,53	78,85	78,87											
La densité maximale du mélange (dmm) est de 2,586.																		

Tableau-A III–10 Éprouvettes soumises aux essais thermiques (ET)

Éprouvette		État de saturation	Date		Temps écoulé (approximatif)	Remarque
(#)	(% vides)*		carottage	essai		
8D1	4,3	S	21 avril 2008	7 oct. 2009 au 25 juin 2012	1 an et 26 sem. à 4 ans et 4 sem.	RAS
8B2	4,4	PSE				RAS
8B3	4,5	PSS7				RAS
8C1	4,5	PSS14				RAS
8A3	4,5	PSS19				RAS
*	Teneur en vides de l'éprouvette déterminée selon la méthode hydrostatique ;					
sem.	Semaine ;					
RAS	Rien à signaler.					

Rapport-Gratuit.com

Tableau-A III–11 Éprouvettes soumises aux essais de module complexe (EE*)

Éprouvette		État de saturation	Date		Temps écoulé (approximatif)	Remarque
(#)	(% vides)*		carottage	essai		
8D2	4,1	S	21 avril 2008	8 août 2009	1 an et 16 sem.	ÉR 8D3
8D3	4,8		21 avril 2008	27 sept. 2009 au 12 juin 2012	1 an et 22 sem. à 4 ans et 7 sem.	RAS
8A1	4,2	PSE	21 avril 2008	11 août 2009 au 12 oct. 2009	1 an et 16 sem. à 1 an et 24 sem.	ÉR 7A2
7A2	3,4		11 avril 2008	23 fév. 2010 au 4 août 2012	1 an et 46 sem. à 4 ans et 20 sem.	RAS
8A2	4,2	PSS7	21 avril 2008	16 août 2009 au 22 oct. 2012	1 an et 17 sem. à 4 ans et 26 sem.	7ème EE* ENC
8B1	4,2	PSS14	21 avril 2008	19 août 2009	1 an et 18 sem.	ÉR 8D3
7A1	3,1		11 avril 2008	30 sept. 2009 au 30 juil. 2012	1 an et 22 sem. à 4 ans et 16 sem.	6ème et 7ème EE* ENC
8C2	4,3	PSS19	21 avril 2008	24 août 2009 au 12 nov. 2012	1 an et 18 sem. à 4 ans et 29 sem.	RAS

*	Teneur en vides de l'éprouvette déterminée selon la méthode hydrostatique ;
sem.	Semaine ;
RAS	Rien à signaler ;
ENC	Essai non conforme aux exigences ;
ÉR	Éprouvette remplacé par une autre en raison de son endommagement.

Tableau-A III–12 Éprouvettes à l'état sec (S) soumises aux essais de fatigue (EF)

Éprouvette		État de saturation	Date		Temps écoulé (approximatif)	Remarque
(#)	(% vides)*		carottage	essai		
1A1	5,0	S	17 fév. 2010	18 nov. 2011	21 mois	EC
1A3	4,7		17 fév. 2010	18 nov. 2011	21 mois	ENC
1B3	4,1		17 fév. 2010	7 nov. 2011	20,5 mois	EC
1C1	4,3		17 fév. 2010	27 août 2011	18,5 mois	EC
2B1	3,1		22 fév. 2010	15 janv. 2012	23,75 mois	EC
2B3	2,8		22 fév. 2010	30 janv. 2012	23,25 mois	EC
3A3	5,1		2 mai 2011	9 nov. 2011	6,25 mois	EC
4A1	4,4		n. s.	19 janv. 2012	---	ENC
4A2	3,9		n. s.	15 janv. 2012	---	ENC
4C1	3,2		27 avril 2011	25 août 2011	4 mois	EC
4C3	4,1		27 avril 2011	2 janv. 2012	8,25 mois	RNA
5A2	4,4		25 nov. 2011	8 janv. 2013	13,5 mois	DVF
5A3	4,4		25 nov. 2011	29 janv. 2012	2,25 mois	ENC
5C2	3,9		25 nov. 2011	20 janv. 2012	1,75 mois	ENC
5D1	4,1		25 nov. 2011	15 janv. 2012	1,75 mois	EC
6A2	4,4		23 nov. 2010	6 fév. 2012	14,5 mois	EC
6A3	4,0		23 nov. 2010	18 fév. 2012	15 mois	EC
6C2	4,0		23 nov. 2010	8 fév. 2012	14,5 mois	ENC
6D1	4,1		23 nov. 2010	14 janv. 2012	13,75 mois	ENC
9C2	4,1		4 mai 2011	26 août 2011	3,75 mois	ENC

* Teneur en vides de l'éprouvette déterminée selon la méthode hydrostatique ;
DVF Durée de vie faible et inférieure à 60 000 cycles de sollicitation ;
EC Essai conforme ;
ENC Essai non conforme aux exigences ;
n. s. Non spécifié ;
RNA Rupture non atteinte, malgré l'application de 10 millions de cycles de sollicitation.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Tableau-A III–13 Éprouvettes à l'état partiellement saturé en eau (PSE) soumises aux essais de fatigue (EF)

Éprouvette		État de saturation	Date		Temps écoulé (approximatif)	Remarque
(#)	(% vides)*		carottage	essai		
1B1	4,8	PSE	17 fév. 2010	15 nov. 2011	21 mois	EC
1B2	4,4		17 fév. 2010	11 nov. 2011	20,75 mois	ENC
1C2	4,1		17 fév. 2010	12 nov. 2011	20,75 mois	EC
1D2	4,3		17 fév. 2010	21 nov. 2011	21,25 mois	ENC
2C1	3,5		22 fév. 2010	10 mai 2012	26,5 mois	DVF
2C4	4,5		22 fév. 2010	2 fév. 2012	23,25 mois	EC
4C2	4,7		27 avril 2011	9 juil. 2012	14,25 mois	ENC
6B2	4,3		23 nov. 2010	1er fév. 2012	14,25 mois	EC
6D2	4,4		23 nov. 2010	2 fév. 2012	14,25 mois	EC
9B1	4,0		4 mai 2011	10 nov. 2011	6,25 mois	EC
9D2	5,2		4 mai 2011	17 nov. 2011	6,5 mois	DVF

* Teneur en vides de l'éprouvette déterminée selon la méthode hydrostatique ;
DVF Durée de vie faible et inférieure à 60 000 cycles de sollicitation ;
EC Essai conforme ;
ENC Essai non conforme aux exigences ;
n. s. Non spécifié.

ANNEXE IV

CORRECTION DE LA DÉFORMATION APPARENTE DES JAUGES ÉTABLIE EXPÉRIMENTALEMENT

Afin d'établir une correction adéquate de la déformation apparente des jauges de façon expérimentale, il est nécessaire de respecter les conditions suivantes :

1) utilisation d'un matériau possédant un coefficient de dilatation-contraction connu, qui est idéalement très près de zéro car il reste stable, comme le silicate de titane (Corning Glass Company, ULE™ Titanium Silicate Code 7972) ;
2) collage de deux jauges du même lot sur des faces opposées du matériau : élimine le flambement possible du matériau d'un côté par le renforcement structural généré par la présence d'époxy, le revêtement protecteur et la jauge ;
3) mise en place d'un produit (feuille de téflon, poudre de talc ou petites billes de verre lubrifiées avec un pulvérisateur silicone) afin d'éliminer le frottement entre le matériau et la surface d'appui ;
4) utilisation de la même configuration que celle utilisée lors des essais : longueur de câble, revêtement de protection, système d'acquisition, etc. ;
5) recours à des plateaux de température d'au moins 45 minutes afin d'atteindre l'équilibre thermique (stabilisation en déformation) du matériau ;
6) recours à au moins cinq et même huit plateaux de température afin d'établir l'équation polynomiale de degré 4 ou plus ;
7) mise à zéro des jauges à une température près de +24°C ;
8) réalisation de plusieurs cycles de température pour vérifier s'il y a présence d'hystérésis, problèmes d'installation, électrique ou échauffement empêchant le retour à zéro des jauges à la température initiale.

ANNEXE V

MÉTHODE DES MOINDRES CARRÉS

À partir des données de contraintes et de déformations sous forme discrète en fonction du temps, il s'agit de transformer ce système discret en un système continu. La variable à transposer est désignée par un X (X peut désigner soit la contrainte ou la déformation). Après avoir retiré la constante du signal à X (pour une moyenne de deux cycles), l'amplitude du signal s'écrit :

$$\Delta X(t) = X(t) - \bar{X}$$

$$\Delta X(t) = a_x \sin(\omega t) + b_x \cos(\omega t)$$

Il faut maintenant déterminer les inconnus ax et bx. Afin d'alléger l'écriture, sin(ωt) est annoté par sin et cos(ωt) par cos. En décomposant les deux termes du numérateur et en remplaçant ΔX(t) par son équivalent, on obtient :

$$\sum \Delta X(t) \sin \sum \cos^2 = a_x \sum \sin^2 \sum \cos^2 + b_x \sum \sin \cos \sum \cos$$

$$\sum \Delta X(t) \cos \sum sin\, cos = a_x \left(\sum \sin cos\right)^2 + b_x \sum \cos^2 \sum \sin \cos$$

d'où :

$$a_x = \frac{\sum \Delta X(t) \sin(\omega t) \sum \cos^2(\omega t) - \sum \Delta X(t) \cos(\omega t) \sum \sin(\omega t) \cos(\omega t)}{\sum \sin^2(\omega t) \sum \cos^2(\omega t) - (\sum \sin(\omega t) \sum \cos(\omega t))^2}$$

$$b_x = \frac{\sum \Delta X(t) \cos(\omega t) \sum \sin^2(\omega t) - \sum \Delta X(t) \sin(\omega t) \sum \sin(\omega t) \cos(\omega t)}{\sum \sin^2(\omega t) \sum \cos^2(\omega t) - (\sum \sin(\omega t) \sum \cos(\omega t))^2}$$

Alors, connaissant les amplitudes a_x et b_x du signal, il est possible de se ramener à une expression sinusoïdale de la forme $X(t) = X_0 \sin(\omega t+\varphi)$ à l'aide de :

$$X_0 = \sqrt{{a_x}^2 + {b_x}^2}$$

$$\phi = \mp \arccos\left(\frac{a_x}{X_0}\right)$$

ANNEXE VI

CALCULS THÉORIQUES DE L'ÉCART DE L'ANGLE DE PHASE ENTRE LES EXTENSOMÈTRES PLACÉS SUR LES CASQUES ET LES JAUGES PLACÉES SUR L'ÉPROUVETTE

Le déplacement total mesuré par les extensomètres (Δl^*_{mes}) est la somme du déplacement de l'éprouvette (Δl^*_e) ainsi que ceux des casques (Δl^*_c).

$$\Delta l^*_{mes} = \Delta l^*_e + \Delta l^*_c$$

$$\Delta l^*_{mes} = \varepsilon^*_e h_e + \varepsilon^*_c l_c$$

où :

ε^*_e Déformation de l'enrobé bitumineux ;

h_e Hauteur de l'éprouvette d'enrobé bitumineux ;

ε^*_c Déformation des casques en aluminium ;

l_c Longueur des casques en aluminium incorporée dans la mesure réalisée par les extensomètres de 165mm.

En utilisant les relations de viscoélasticité linéaire (ou d'élasticité pour les casques), il est possible d'introduire le module complexe de l'éprouvette noté E^*_e, le module complexe mesuré noté E^*_{mes} et le module de Young de l'aluminium E_{Al} :

$$\Delta l^*_{mes} = \frac{\sigma^*}{E^*_e} h_e + \frac{\sigma^*}{E_{Al}} l_c$$

$$\frac{\sigma^*}{E_e^*} h_e = \Delta l_{mes}^* - \frac{\sigma^*}{E_{Al}} l_c$$

$$\frac{1}{E_e^*} = \frac{1}{h_e}\left(\frac{\Delta l_{mes}^*}{\sigma^*} - \frac{1}{E_{Al}} l_c \right) = \frac{1}{E_{mes}^*} - \frac{l_c}{h_e E_{Al}}$$

$$E_e^* = \left(\frac{1}{E_{mes}^*} - \frac{l_c}{h_e E_{Al}} \right)^{-1} = \frac{E_{mes}^*}{1 - \frac{l_c E_{mes}^*}{h_e E_{Al}}}$$

En passant par l'argument pour la relation ci-dessus, on obtient :

$$\arg(E_e^*) = \arg(E_{mes}^*) - \arg\left(1 - \frac{l_c E_{mes}^*}{h_e E_{Al}}\right)$$

Avec :

$$\arg(E_{mes}^*) = \phi_{E_{mes}^*}$$

$$\arg\left(1 - \frac{l_c}{h_e E_{Al}}\right) = \arctan\left(\frac{-\frac{l_c \left| E_{mes}^* \right|}{h_e E_{Al}} * \sin(\phi_{E_{mes}^*})}{1 - \frac{l_c \left| E_{mes}^* \right|}{h_e E_{Al}} * \cos(\phi_{E_{mes}^*})} \right)$$

En considérant les propriétés suivantes :

Module de Young de l'aluminium : $E_{Al} = 70GPa$

Longueur des casques : $l_c = 4cm$

Hauteur de l'éprouvette d'enrobé bitumineux : $h_e = 12cm$

et les résultats mesurés à +25°C et 10Hz par les extensomètres sont :

Angle de phase : $\phi_{E^*_{mes}} = 22{,}0°$

Module complexe : $\left|E^*_{mes}\right| = 5430\,\text{MPa}$

Le résultat obtenu est :

$$\arg\left(1 - \frac{l_e}{h_e E_{Al}}\right) = -0{,}5686$$

Alors, l'angle de phase de l'enrobé bitumineux mesuré par les jauges devrait être de :

$$\arg(E^*_e) = 22{,}0 - 0{,}5686 = 21{,}4$$

Rapport-Gratuit.com

ANNEXE VII

EFFET DES LIQUIDES, ANALYSE À L'AIDE DES VALEURS DE |E*| À +15°C ET 10HZ

A VII.1 Effet des liquides avant de réaliser les cycles de gel et dégel

Les valeurs de |E*| à +15°C et 10Hz, avant de soumettre les éprouvettes aux cycles de gel et dégel, sont analysées. La normalisation de ces valeurs est réalisée à la Figure-A VII–1. Pour les éprouvettes partiellement saturées (PSE, PSS7, PSS14 et PSS19), les valeurs |E*| à +15°C et 10Hz diminuent avec le degré de saturation (Figure-A VII–1). Toutefois, il devient difficile de tirer une conclusion valable sur l'effet réel des fluides sur la diminution de la rigidité de l'enrobé bitumineux en raison de la variabilité de la teneur en vides des éprouvettes. On peut penser qu'à une teneur en vides similaire à l'éprouvette à l'état sec (S), soit de 4,8%, l'effet du fluide sur la diminution de la rigidité de l'enrobé bitumineux serait la plus marquée pour (en ordre croissant) : PSS19, PSS14, PSE et PSS7. Cette corrélation est effectuée en considérant une diminution de |E*| de l'ordre de 6% pour chaque 1% de teneur en vides.

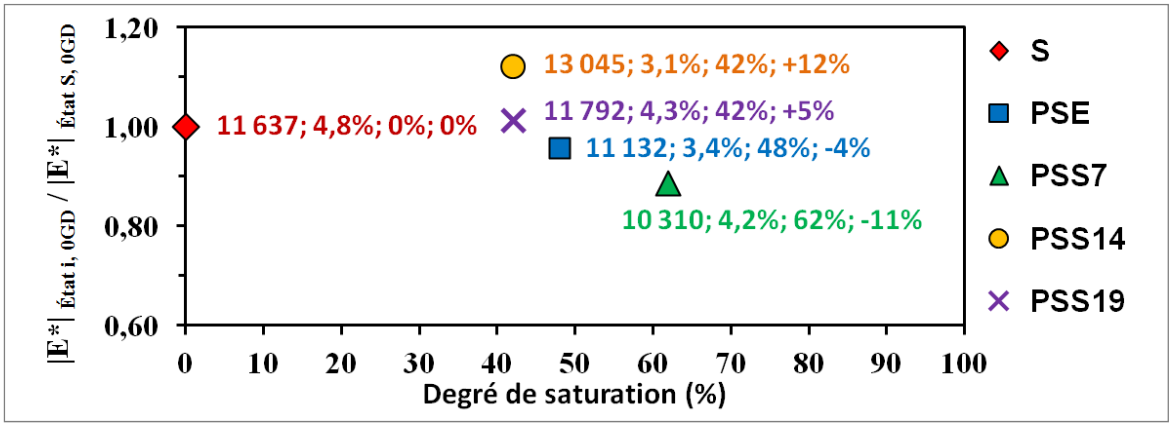


Figure-A VII–1 Normalisation de la valeur de |E*| à +15°C AVANT-10Hz de l'enrobé à l'état i et à 0 GD par rapport à celle de l'enrobé à l'état sec et à 0 GD (mesures des extensomètres) en fonction du degré de saturation (valeurs de |E*|, teneur en vides, degré de saturation et écart en % de |E*| par rapport à l'état sec indiquées)

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Plus spécifiquement, il faut souligner que les éprouvettes S, PSE et PSS14 ont été à l'origine remplacées, ce qui explique les écarts au niveau de la teneur en vides. Pourtant, il est possible d'obtenir les mesures non corrigées et effectuées par les jauges sur les trois premières éprouvettes dont la teneur en vides était très similaire : 4,1 à 4,3%. Pour les éprouvettes PSS7 et PSS19, ce sont les mêmes que celles auparavant présentées, mais en tenant compte de la mesure des jauges au lieu de celles des extensomètres. La Figure-A VII–2 illustre la normalisation des valeurs de |E*| à +15°C et 10Hz mesurées par les jauges sur l'ensemble des premières éprouvettes. Les saumures à 19 et 14% ont très peu d'influence sur la rigidité de l'enrobé bitumineux à +15°C et 10Hz. Toutefois, la perte de rigidité s'accentue pour les solutions à plus faible teneur en sel ou sans sel (eau). A une même concentration en sel, il est très probable que l'augmentation du DS va accentuer la baisse de rigidité de l'enrobé bitumineux. Le classement précédemment effectué est validé par les résultats de la Figure-A VII–2, soit que l'effet des fluides est le plus important pour (en ordre croissant) : PSS19, PSS14, PSE et PSS7.

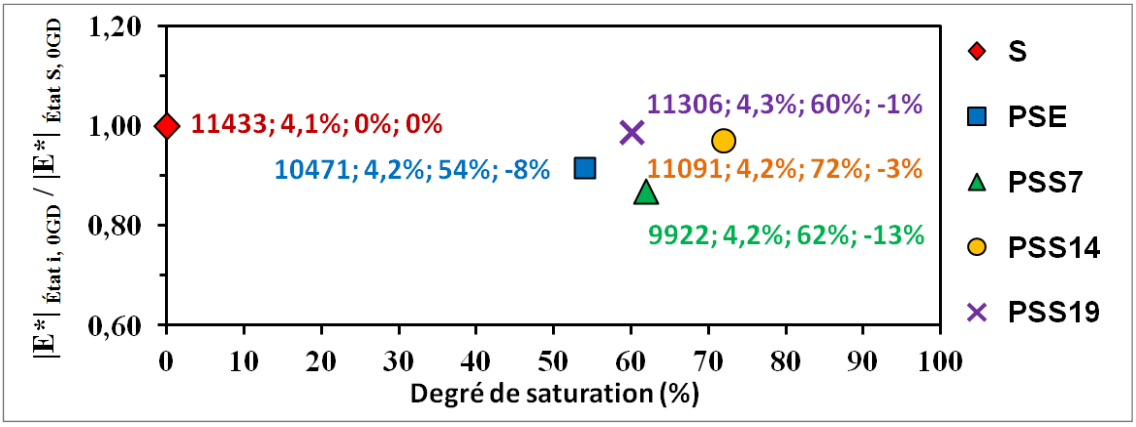


Figure-A VII–2 Normalisation de la valeur de |E*| à +15°C AVANT-10Hz de l'enrobé à l'état i et à 0 GD par rapport à celle de l'enrobé à l'état sec et à 0 GD (mesures des jauges) en fonction du degré de saturation (valeurs de |E*|, teneur en vides, degré de saturation et écart en % de |E*| par rapport à l'état sec indiquées)

En titre informatif, dans le cadre des essais de fatigue, une perte de rigidité (à +10°C et 10Hz) de l'ordre de 3% a été observée entre les éprouvettes à l'état sec et celles partiellement saturées en eau (§ 5.6.3).

A VII.2 Effet des liquides au fil des cycles de gel et dégel

Afin de quantifier l'effet des fluides au fil des cycles de GD, il est également possible de se référer à la rigidité de l'enrobé bitumineux (|E*|) mesurée à +15°C APRÈS et 10HZ. L'effet des fluides est mis en corrélation avec le degré de saturation du matériau. La normalisation des valeurs de |E*| mesurée à +15°C APRÈS et 10HZ pour chaque état est présentée à la Figure-A VII–3. La teneur en vides de chaque éprouvette est indiquée dans la légende entre parenthèses.

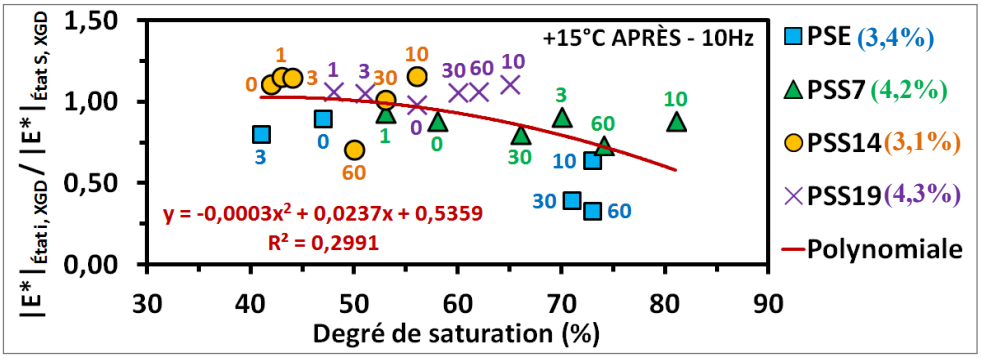


Figure-A VII–3 Normalisation de la valeur de |E*| à +15°C APRÈS et 10Hz à l'état i et à X GD par rapport à celle obtenue pour l'enrobé à l'état sec et à X GD (mesures des extensomètres)

La corrélation trouvée n'est pas très bonne et l'équation polynomiale est seulement valide pour les points expérimentaux : projection incorrecte à l'ordonnée (Figure-A VII–3). Pour chaque liquide, à l'exception de l'eau, l'effet du DS sur la rigidité de l'enrobé bitumineux reste majoritairement stable au fil des cycles de GD et ce, pour la plage de 40 à 80% obtenue lors des EE* (Figure-A VII–3).

A VII.3 Effet des liquides et des cycles de gel et dégel

La normalisation des valeurs de |E*| mesurée à +15°C APRÈS et 10Hz à un nombre donné de cycles de GD pour chaque état par rapport à celle mesurée à 0 GD de l'état sec (Figure-A

VII–4) permet d'arriver au même constat que la normalisation réalisée pour les valeurs de tau (Figure 4.44).

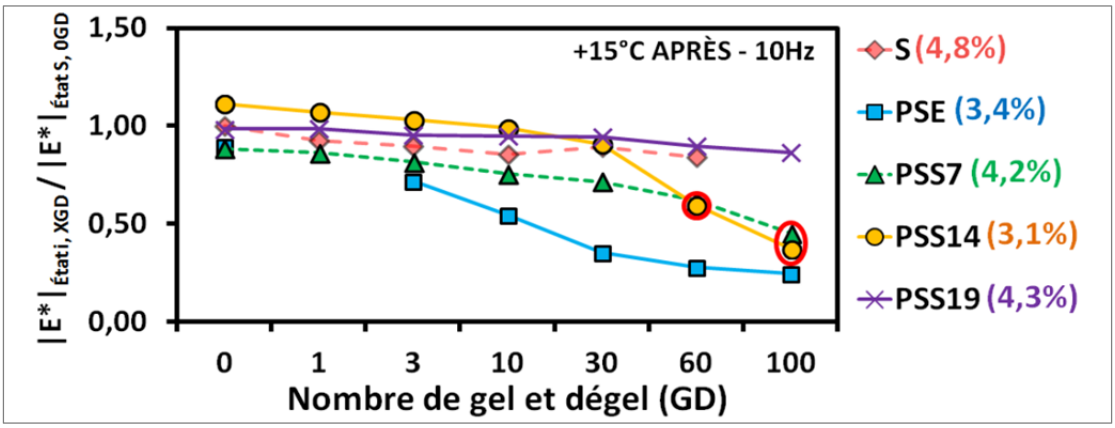


Figure-A VII–4 Normalisation de la norme du module complexe (|E*|) à +15°C APRÈS et 10Hz à l'état i et à X GD par rapport à celle obtenue pour l'enrobé à l'état sec (S) et à 0 GD (mesures des extensomètres)

L'effet des fluides en combinaison avec les cycles de gel et dégel, qui engendre la plus grande perte de rigidité, est supérieur pour (en ordre décroissant) : l'eau et les saumures à une concentration en sel de 14, 7 et 19% (Figure-A VII–4). Toutefois, malgré un écart au niveau de la teneur en vides, les éprouvettes PSS7 et PSS14 connaissent une diminution du ratio, à toute fin pratique identique, si on se permet de soustraire les EE* de mauvaise qualité (points entourés de cercles de couleur rouge). Pour détailler davantage, les valeurs du DS et de V_i de chaque éprouvette sont indiquées au haut et à la droite de la Figure-A VII–4 respectivement. Pour l'éprouvette PSS19, la valeur du ratio est visiblement à l'inverse de celle du DS. Par ailleurs, nous pensons fortement que la perte de rigidité devrait être supérieure pour la saumure à une concentration en sel de 7% au lieu de la saumure à 14%. Notamment, des dilatations et des contractions plus importantes ont été mesurées lors de la formation et de la fonte de la glace pour l'éprouvette PSS7, comparativement à celle PSS14, lors de la réalisation des cycles de GD sur les éprouvettes de type T (§ 3.4.5.4). Il faut souligner qu'une seule éprouvette est testée par état et donc, cela peut être liées à des conditions spécifiques de dégradation pour l'éprouvette PSS14 ou à la qualité inférieure des EE* pour l'éprouvette PSS7 dès le début qui l'avantage expliquant le classement obtenu avec les EE*.

ANNEXE VIII

RÉSULTATS DES ESSAIS DE FATIGUE (EF)

Dans le cadre de cette annexe, pour chacun des essais de fatigue, les résultats sont présentés sur deux pages. Aussi, l'ordre établi pour leur présentation est exposé au Tableau-A VIII–1.

Tableau-A VIII-1 Essais de fatigue réalisés sur l'enrobé EB-14

Ordre	État	Vides		Éprouvette		Collage des casques		Déformation (µdef)	
		Groupe	%	No *	Type **	Banc	Banc + presse	Ciblée	Mesurée
1	S	< 3,5	3,2	4C1	F_{SJ}	X		120	117
2			3,1	2B1		X		130	128
3			2,8	2B3			X	140	138
4		3,5 à 4,5	4,1	4C3 (RNA)	F_{SJ}	X		90	87
6			4,0	6A3		X		100	97
7			4,1	1B3		X		110	107
8			4,4	6A2			X	120	118
9			4,1	5D1		X		130	129
10			4,4	5A2 (RP)	F_{SJ}		X	135	131
12		> 4,5	5,0	1A1	F_{SJ}	X		100	98
13			5,1	3A3		X		130	128
14	PSE	< 3,5	3,5	2C1 (RP)	F_{SJ}		X	120	118
15		3,5 à 4,5	4,5	2C4	F_{SJ}		X	100	91
16			4,1	1C2		X		100	97
17			4,4	6D2			X	110	106
18			4,3	6B2			X	110	107
19			4,3	1B1		X		110	108
20			4,0	9B1		X		120	117
21		> 4,5	4,9	9D2 (RP)	F_{SJ}	X		115	111

* Les éprouvettes surlignées en gris présentent certaines particularités au niveau de leur résultat et de leur validité. Pour les éprouvettes nos 5A2, 2C1 et 9D2, la durée de vie en fatigue est inférieure à 60 000 cycles, ce qui représente une rupture prématurée (RP). Pour l'éprouvette no 4C3, la rupture n'a pas été atteinte (RNA), malgré l'application de 10 millions de cycles de sollicitation. Ce résultat est parfois présenté avec l'ensemble des résultats dans les figures subséquentes, toutefois il n'est pas considéré dans la détermination de la courbe de Wöhler (§ 5.6.6 et 5.6.7). En effet, ce résultat permet de montrer la validité de la pente de la droite de fatigue établie pour les éprouvettes S.

** Éprouvettes soumises aux essais de fatigue qui sont sans jauges (F_{SJ}).

S – 3,2% – 4C1 – 117µdef

INFORMATIONS GÉNÉRALES

Presse de sollicitation	MTS 858
Date - Heure	2012-01-17 - 13h06
Opérateur	SL
Données	
Type d'enrobé, bitume	EB-14, PG70-28
Éprouvette (n°)	2B1
Diamètre (mm)	78,9
Hauteur (mm)	125,8
Vi (%)	3,1
Fréquence ciblée (Hz)	10
T° ciblée (°C)	10
ε ciblée (µdef)	130

Valeurs mesurées	
Fréquence (Hz)	---
T° essai (°C)	10,1
ε réelle (µdef)	128,3

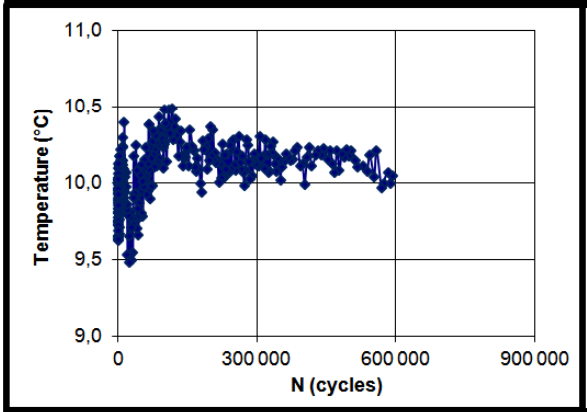
Observations

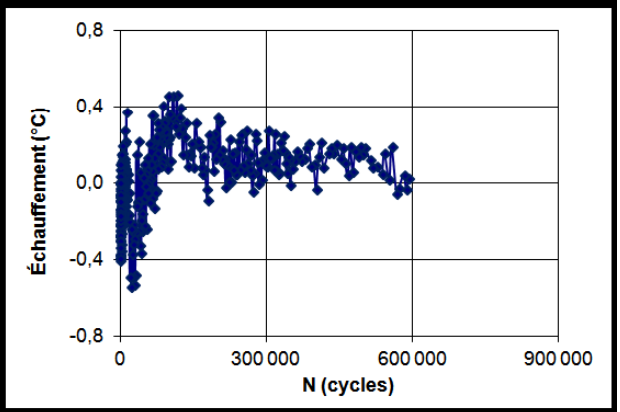
- Sec.
- Échantillon sans jauges et membrane.
- Pilotage avec 3 extensomètres (50mm).
- Au début de l'essai, la thermopompe refroidissant la pièce n'était pas fonctionnelle. Mise en marche après 150 000 cycles environ.
- Arrêt de l'essai car Δεax > 25%.
- Rupture non atteinte.

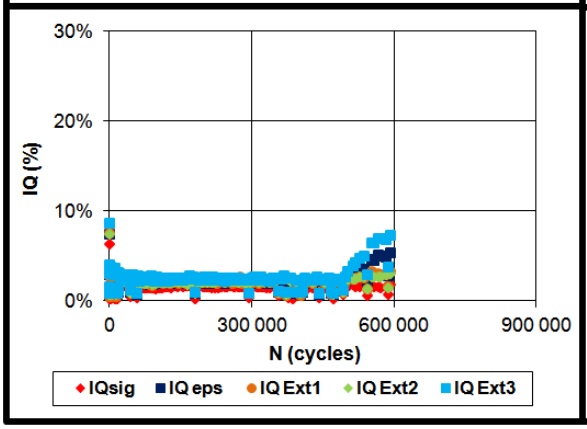
DURÉES DE VIE SELON LES CRITÈRES DE RUPTURE

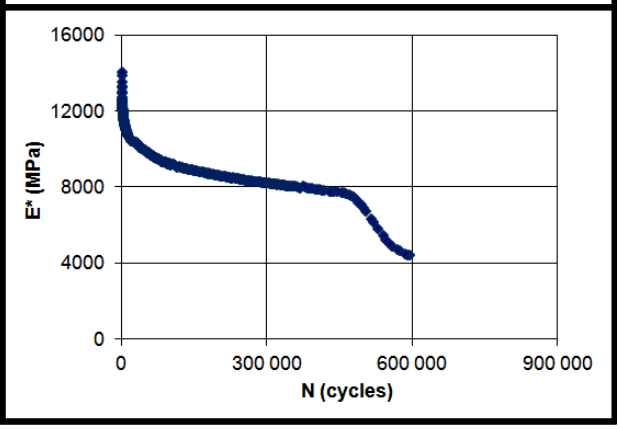
$\|E\|_{\text{Début de l'essai}}$ (MPa)	14 060	$N_{f\ max\phi}$ (cycles)	502 522
50% x $\|E\|_{\text{Début de l'essai}}$ (MPa)	7 030	$N_{f\ \Delta\varepsilon ax}$ (cycles)	492 509
$N_{f\ 50\%}$ (cycles)	492 509	$Nf_{\ II/III}$ (cycles)	497 516

GRAPHIQUES

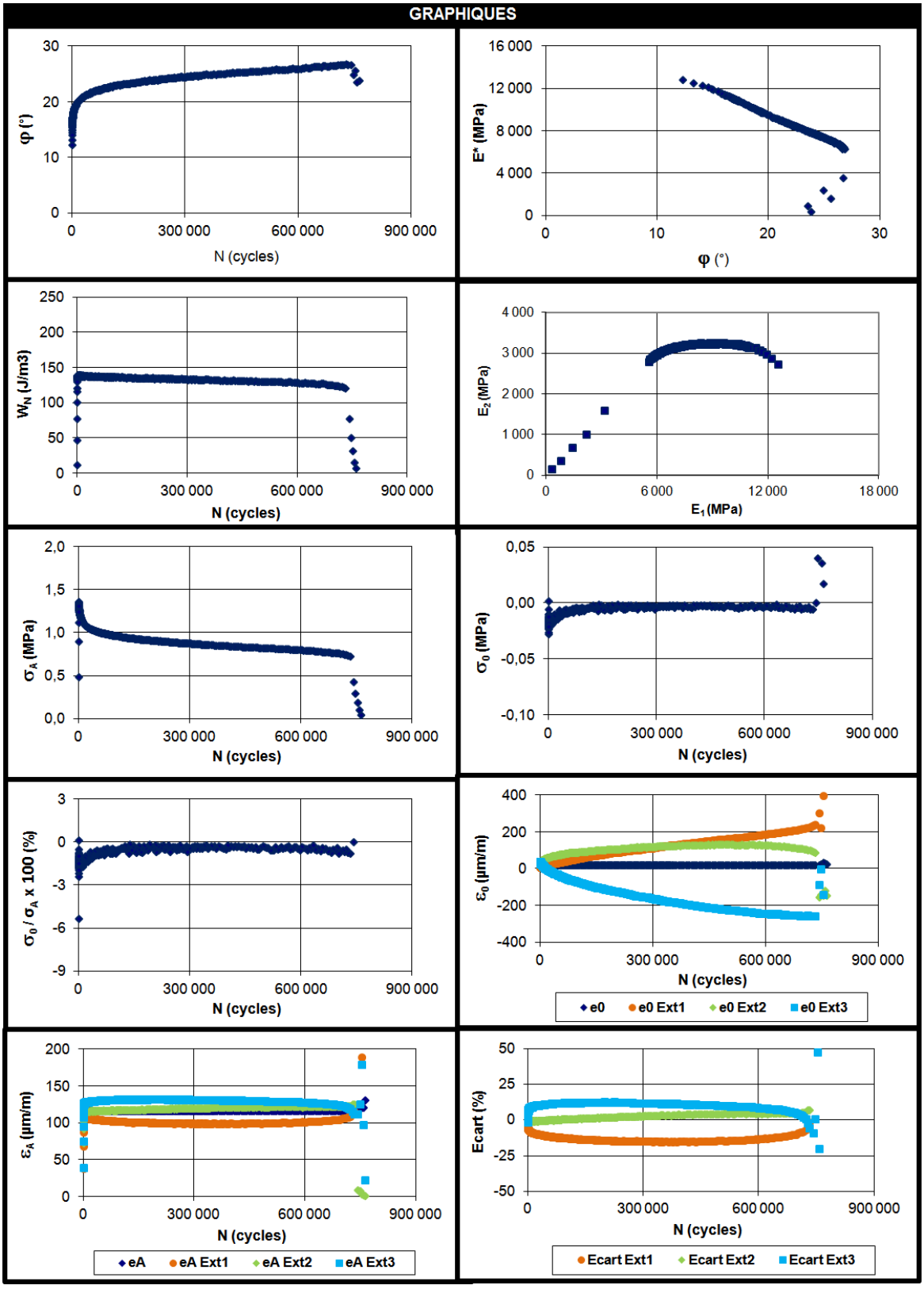








S – 3,2% – 4C1 – 117µdef (suite)



S – 3,1% – 2B1 – 128µdef

INFORMATIONS GÉNÉRALES

Presse de sollicitation	MTS 858
Date - Heure	2011-12-17 - 13h06
Opérateur	SL
Données	
Type d'enrobé, bitume	EB-14, PG70-28
Éprouvette (nº)	2B1
Diamètre (mm)	78,9
Hauteur (mm)	125,8
Vi (%)	3,1
Fréquence ciblée (Hz)	10
Tº ciblée (ºC)	10
ε ciblée (µdef)	130

Valeurs mesurées	
Fréquence (Hz)	---
Tº essai (ºC)	10,1
ε réelle (µdef)	128,3

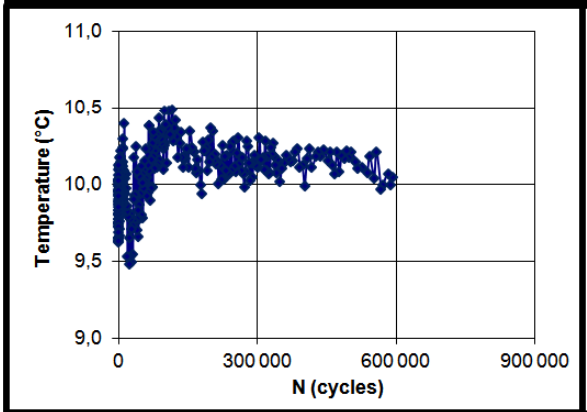
Observations

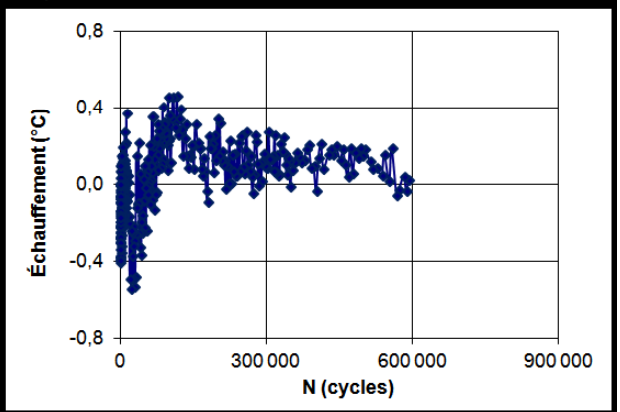
- Sec.
- Échantillon sans jauges et membrane.
- Pilotage avec 3 extensomètres (50mm).
- Au début de l'essai, la thermopompe refroidissant la pièce n'était pas fonctionnelle. Mise en marche après 150 000 cycles environ.
- Arrêt de l'essai car Δεax > 25%.
- Rupture non atteinte.

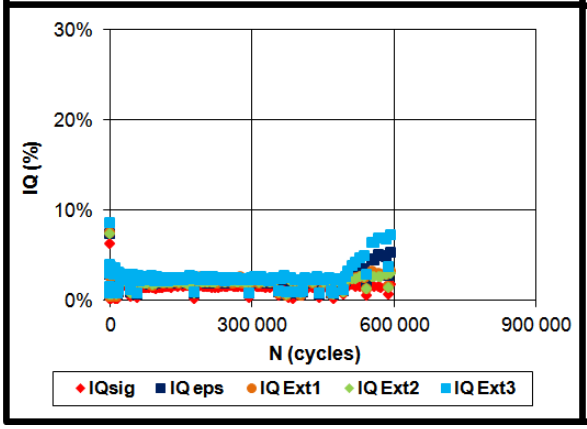
DURÉES DE VIE SELON LES CRITÈRES DE RUPTURE

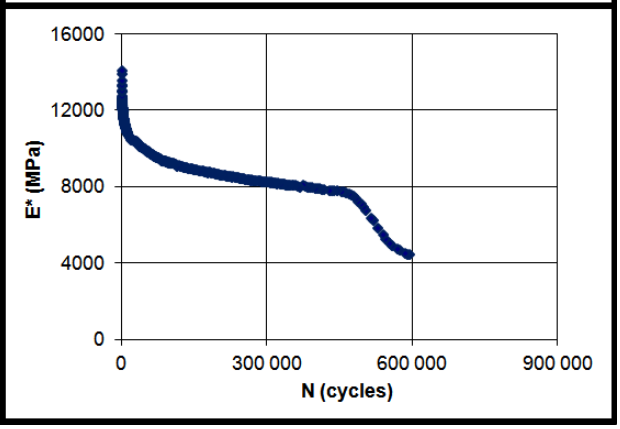
$\|E\|_{Début\ de\ l'essai}$ (MPa)	14 060	$N_{f\ max\phi}$ (cycles)	502 522
50% x $\|E\|_{Début\ de\ l'essai}$ (MPa)	7 030	$N_{f\ \Delta\varepsilon ax}$ (cycles)	492 509
$N_{f\ 50\%}$ (cycles)	492 509	$Nf_{II/III}$ (cycles)	497 516

GRAPHIQUES

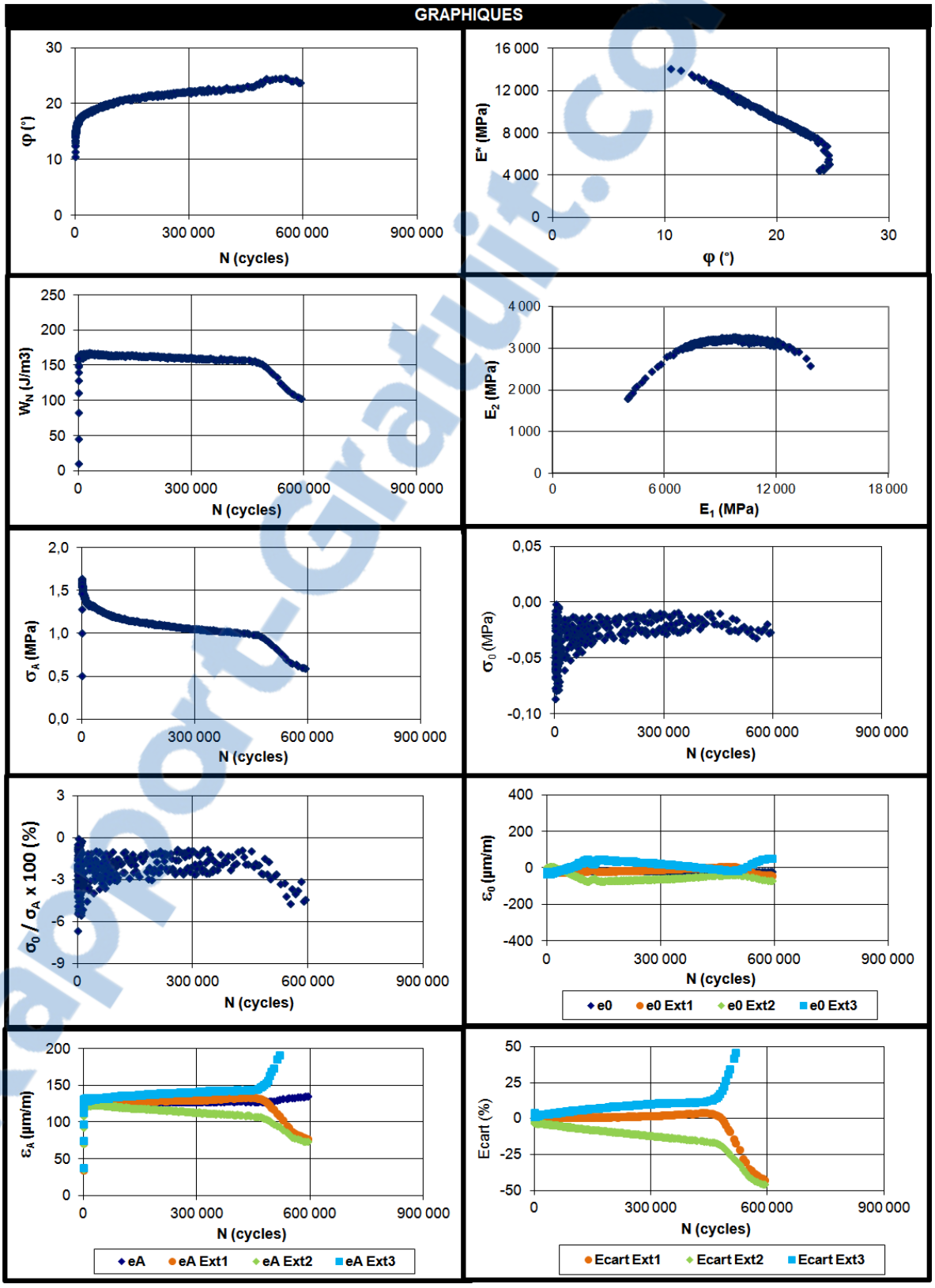








S – 3,1% – 2B1 – 128µdef (suite)



RapportGratuit.com

S – 2,8% – 2B3 – 138µdef

INFORMATIONS GÉNÉRALES

Presse de sollicitation	MTS 858
Date - Heure	2012-01-30 - 18h16
Opérateur	SL et FB
Données	
Type d'enrobé, bitume	EB-14, PG70-28
Éprouvette (n°)	2B3
Diamètre (mm)	78,9
Hauteur (mm)	127,6
Vi (%)	2,8
Fréquence ciblée (Hz)	10
T° ciblée (°C)	10
ε ciblée (µdef)	140

Valeurs mesurées	
Fréquence (Hz)	---
T° essai (°C)	10,3
ε réelle (µdef)	138,3

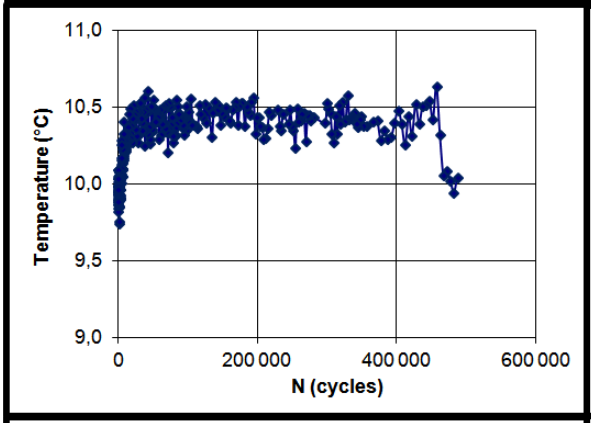
Observations

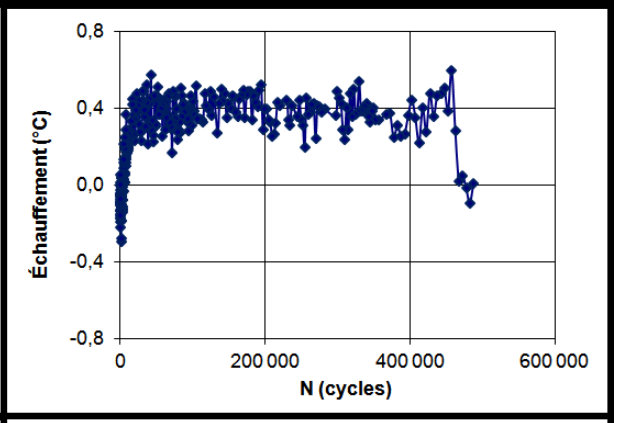
- Sec.
- Échantillon sans jauges et membrane.
- Premiers collages avec la presse.
- Pilotage avec 3 extensomètres (50mm).
- Rupture de l'échantillon.

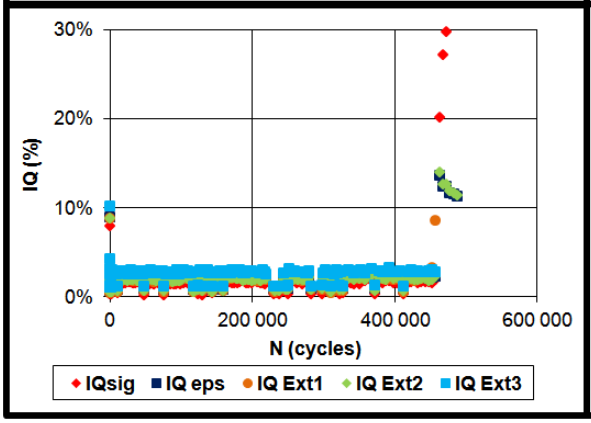
DURÉES DE VIE SELON LES CRITÈRES DE RUPTURE

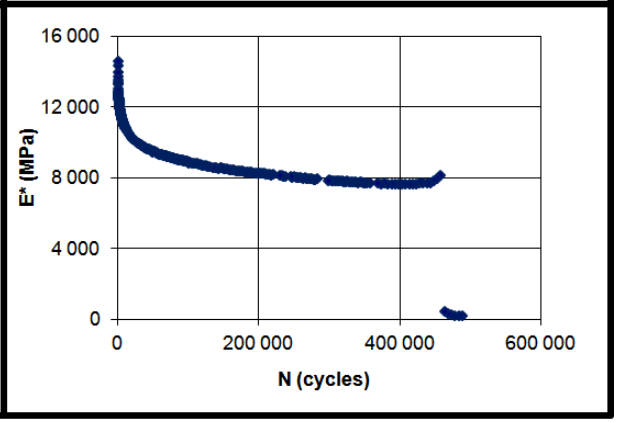
$\|E\|_{\text{Début de l'essai}}$ (MPa)	14 607	$N_{f\ max\phi}$ (cycles)	457 513
50% x $\|E\|_{\text{Début de l'essai}}$ (MPa)	7 304	$N_{f\ \Delta\varepsilon ax}$ (cycles)	442 490
$N_{f\ 50\%}$ (cycles)	462 521	$Nf_{\ II/III}$ (cycles)	450 002

GRAPHIQUES

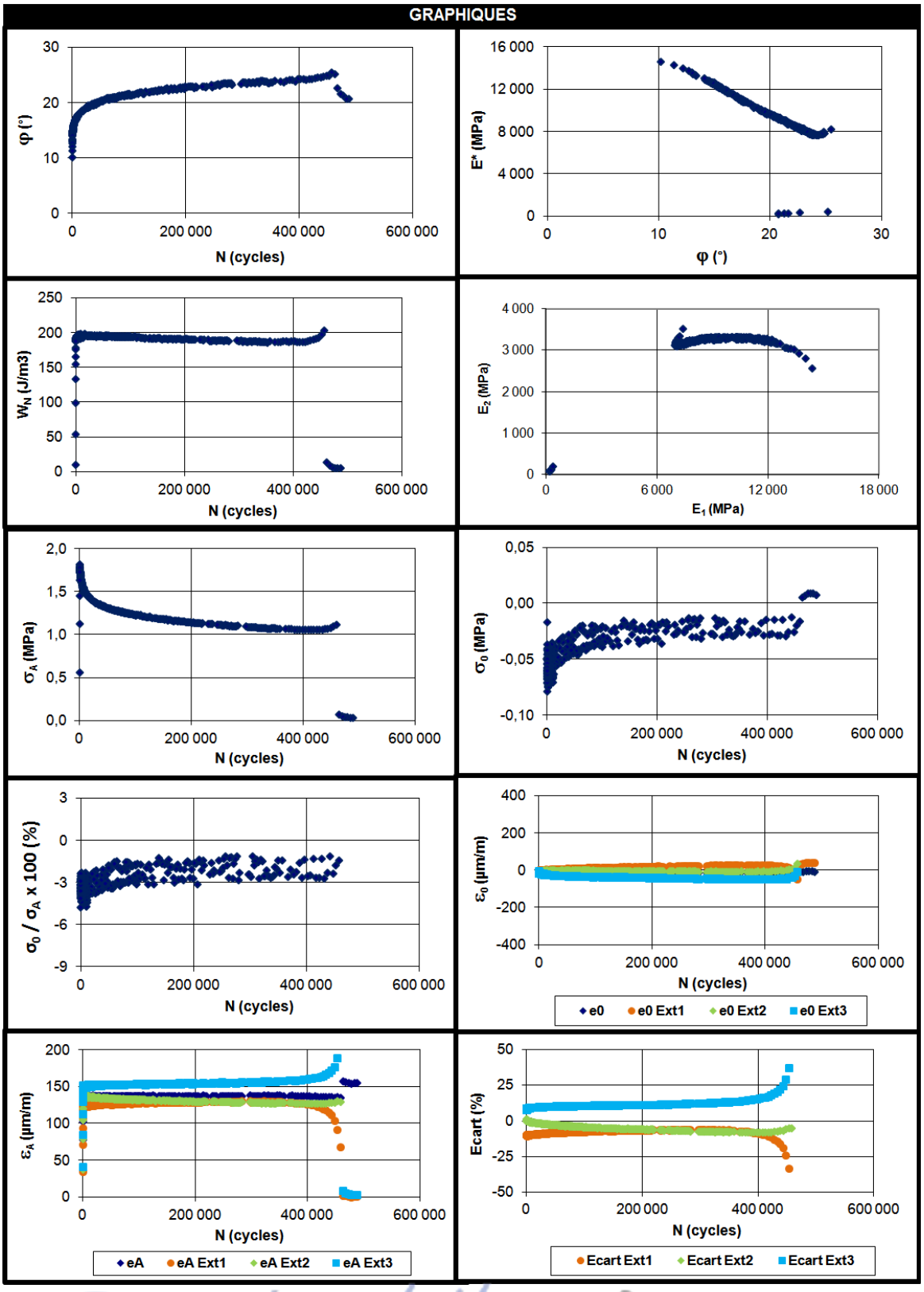








S – 2,8% – 2B3 – 138µdef (suite)



Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

S – 4,1% – 4C3 – 87µdef

INFORMATIONS GÉNÉRALES

Presse de sollicitation	MTS 858
Date - Heure	2012-01-02 - 13h05
Opérateur	SL
Données	
Type d'enrobé	EB-14, PG70-28
Éprouvette nº	4C3
Diamètre (mm)	79,0
Hauteur (mm)	121,3
Vi (%)	4,05
Fréquence (Hz)	10
Tº ciblée (ºC)	10
ε ciblée (µdef)	90

Valeurs mesurées	
Fréquence (Hz)	---
Tº essai (ºC)	10,0
ε réelle (µdef)	87,3

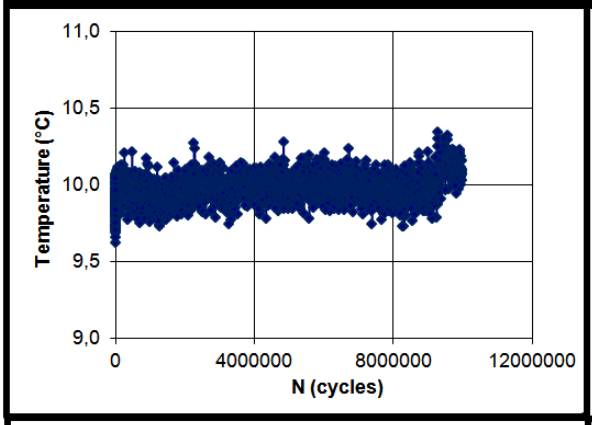
Observations

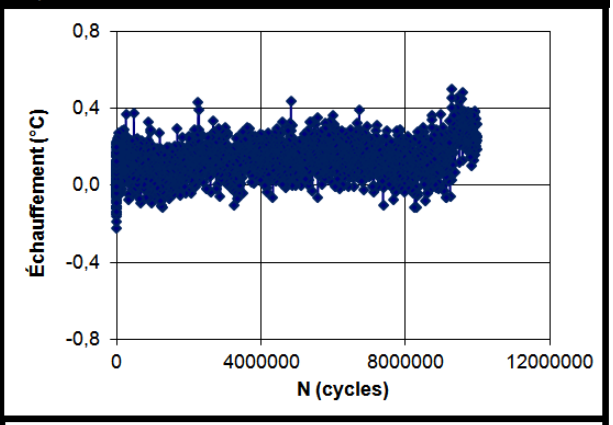
- Sec.
- Échantillon sans jauges et membrane.
- Pilotage avec 3 extensomètres (50mm).
- Rupture non atteinte.

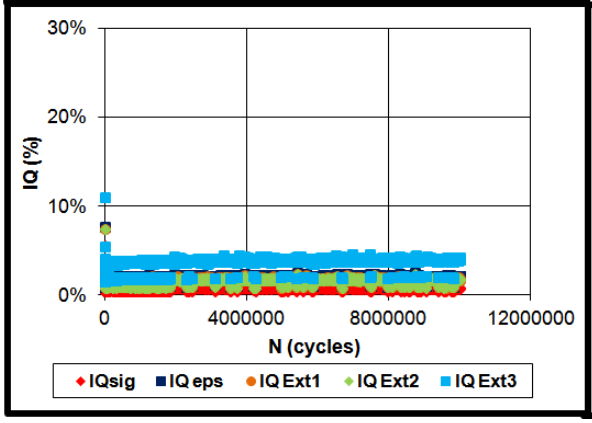
DURÉES DE VIE SELON LES CRITÈRES DE RUPTURE

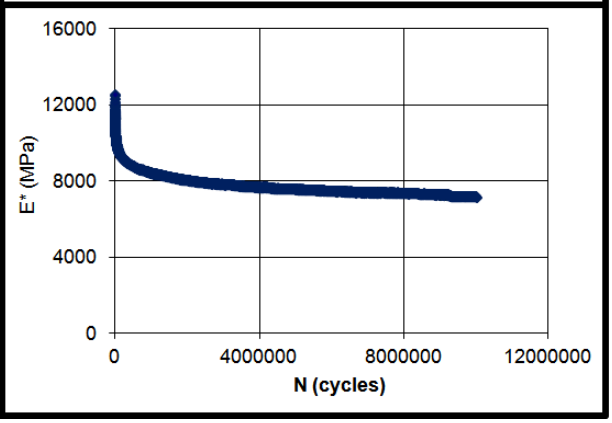
$\|E\|_{\text{Début de l'essai}}$ (MPa)	12 568	$N_{f\ max\phi}$ (cycles)	> 10 000 000
50% x $\|E\|_{\text{Début de l'essai}}$ (MPa)	6 284	$N_{f\ \Delta\varepsilon ax}$ (cycles)	> 10 000 000
$N_{f\ 50\%}$ (cycles)	> 10 000 000	$Nf_{\ II/III}$ (cycles)	> 10 000 000

GRAPHIQUES

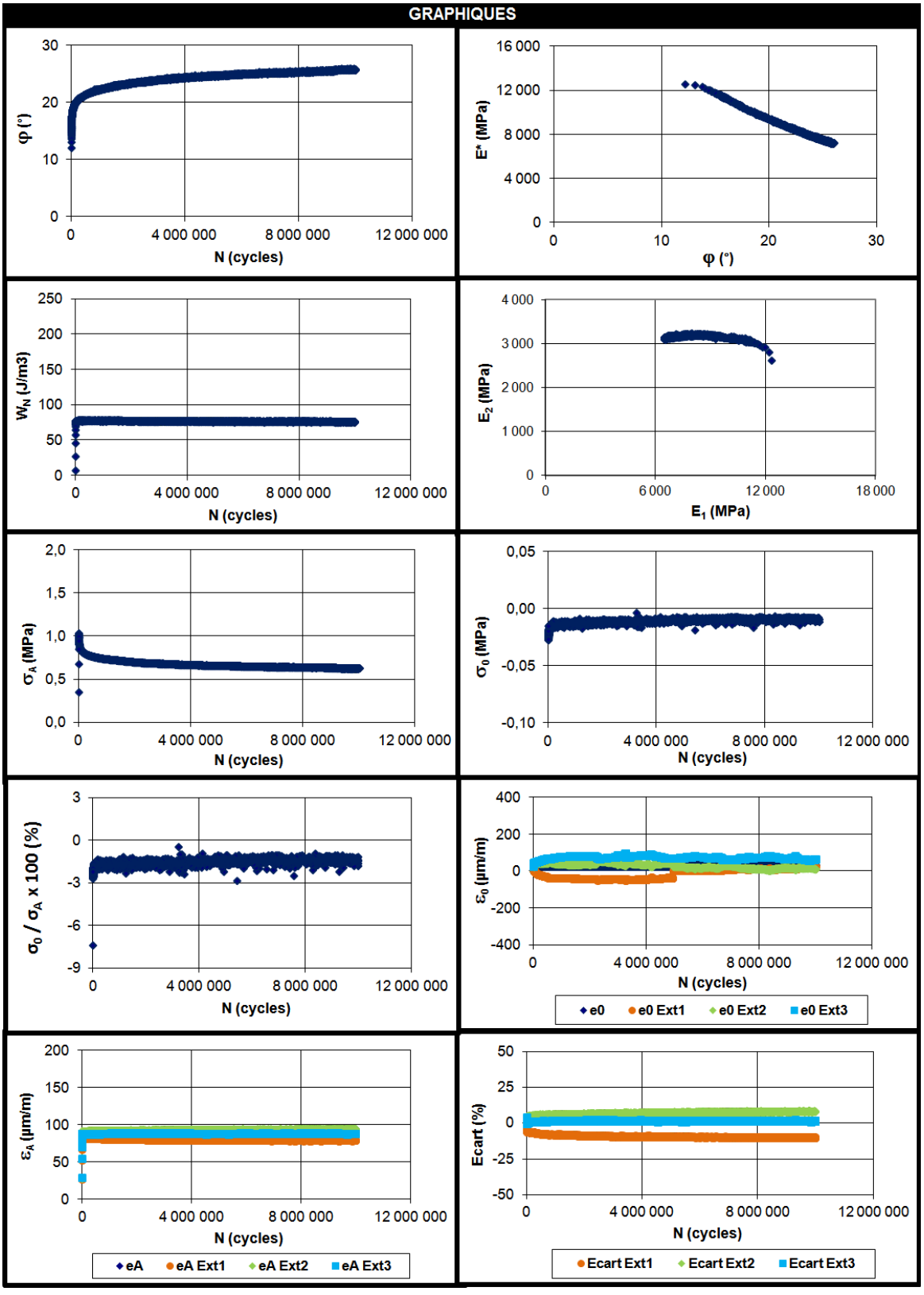








S – 4,1% – 4C3 – 87µdef (suite)



S – 4,0% – 6A3 – 97µdef

INFORMATIONS GÉNÉRALES

Presse de sollicitation	MTS 858
Date - Heure	2012-02-18 - 16h05
Opérateur	SL
Données	
Type d'enrobé, bitume	EB-14, PG70-28
Éprouvette (nº)	6A3
Diamètre (mm)	79,0
Hauteur (mm)	118,2
Vi (%)	4,0
Fréquence ciblée (Hz)	10
Tº ciblée (ºC)	10
ε ciblée (µdef)	100

Valeurs mesurées	
Fréquence (Hz)	---
Tº essai (ºC)	9,8
ε réelle (µdef)	97,4

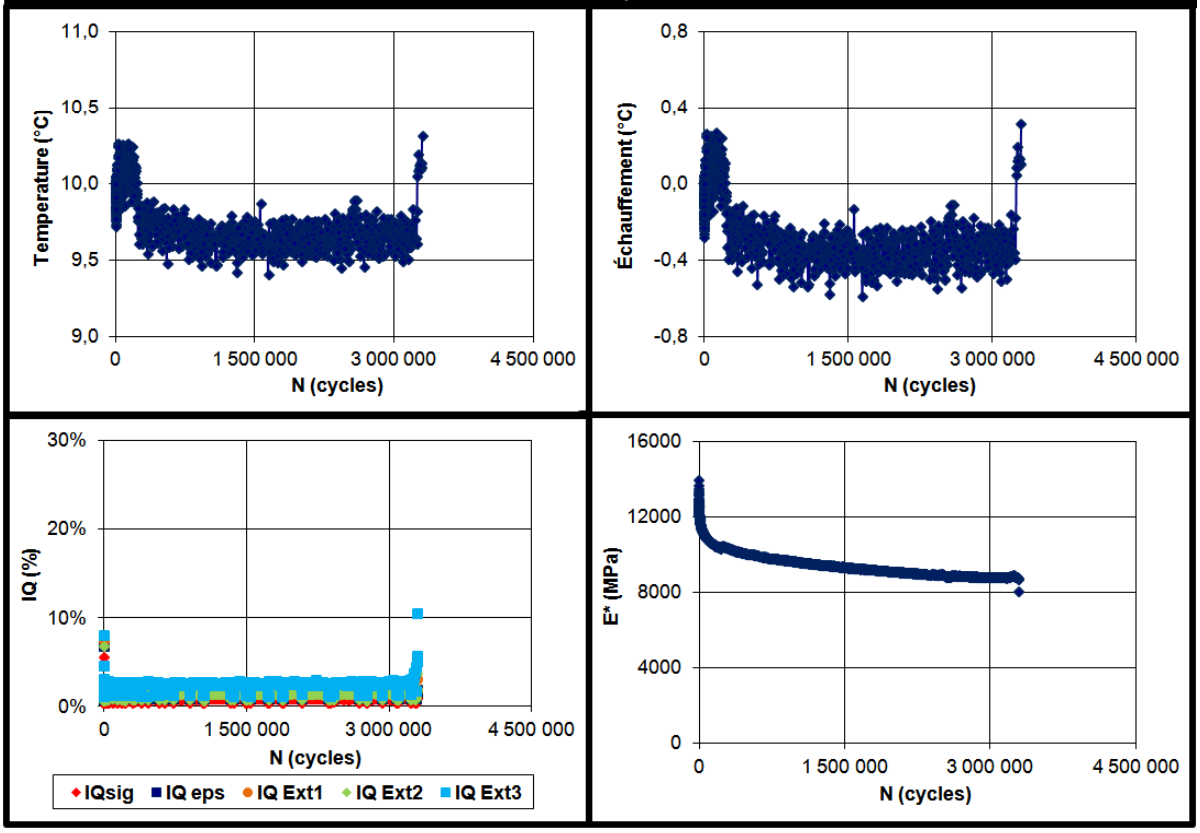
Observations

- Sec.
- Échantillon sans jauges et membrane.
- Collage effectué avant la presse.
- Pilotage avec 3 extensomètres (50mm).
- Arrêt de l'essai à 3 301 663 cycles car rupture près du casque supérieur.

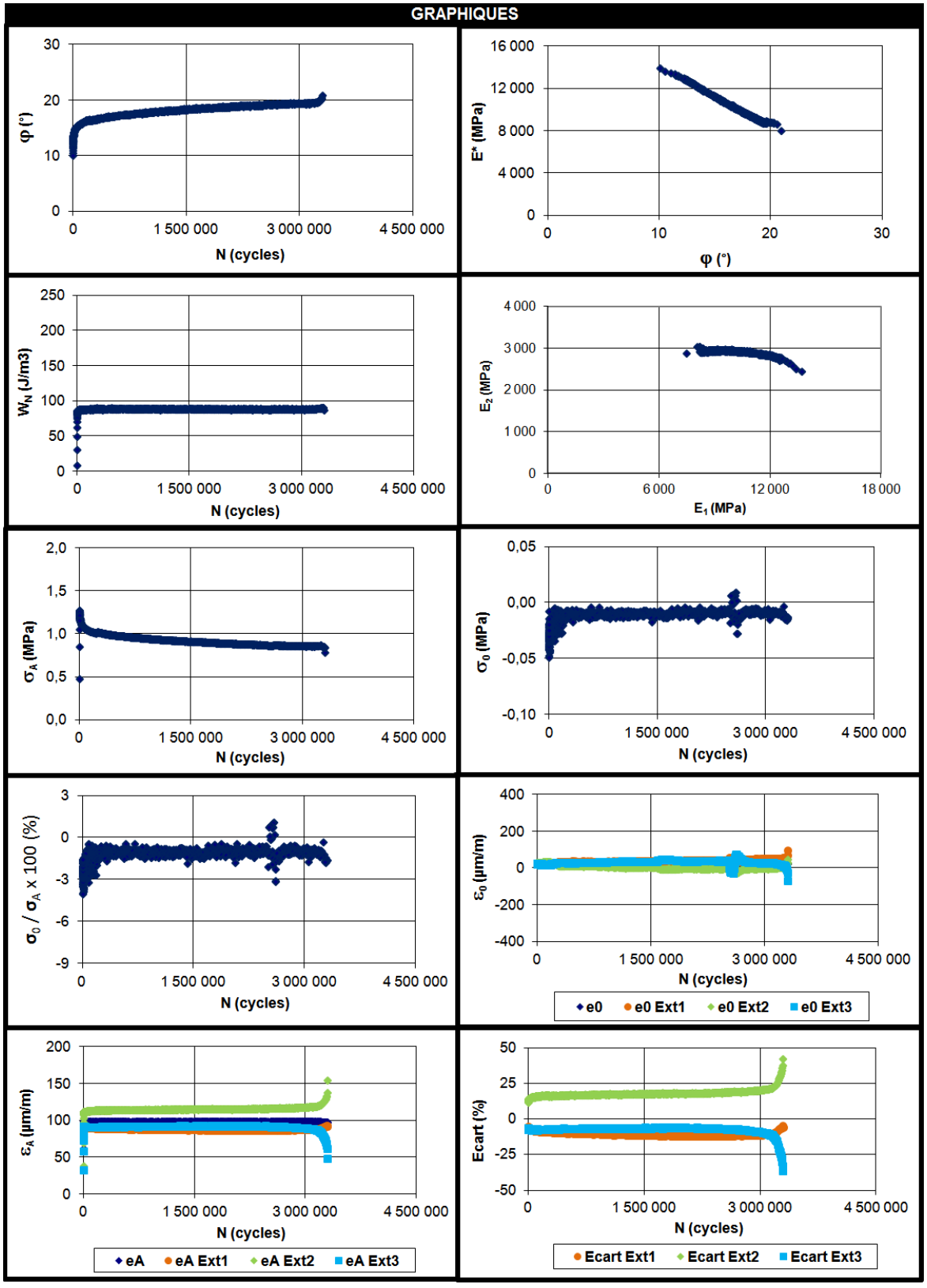
DURÉES DE VIE SELON LES CRITÈRES DE RUPTURE

$\|E\|_{\text{Début de l'essai}}$ (MPa)	13 935	$N_{f\ max\phi}$ (cycles)	3 301 663
50% x $\|E\|_{\text{Début de l'essai}}$ (MPa)	6 967	$N_{f\ \Delta\varepsilon ax}$ (cycles)	3 216 529
$N_{f\ 50\%}$ (cycles)	3 301 663	$Nf_{\ II/III}$ (cycles)	3 259 096

GRAPHIQUES



S – 4,0% – 6A3 – 97µdef (suite)



S – 4,1% – 1B3 – 107µdef

INFORMATIONS GÉNÉRALES

Presse de sollicitation	MTS 858
Date - Heure	2011-11-07 - 15h13
Opérateur	FB
Données	
Type d'enrobé, bitume	EB-14, PG70-28
Éprouvette (nº)	1B3
Diamètre (mm)	78,8
Hauteur (mm)	116,6
Vi (%)	4,1
Fréquence ciblée (Hz)	10
Tº ciblée (ºC)	10
ε ciblée (µdef)	110

Valeurs mesurées	
Fréquence (Hz)	---
Tº essai (ºC)	9,8
ε réelle (µdef)	107,2

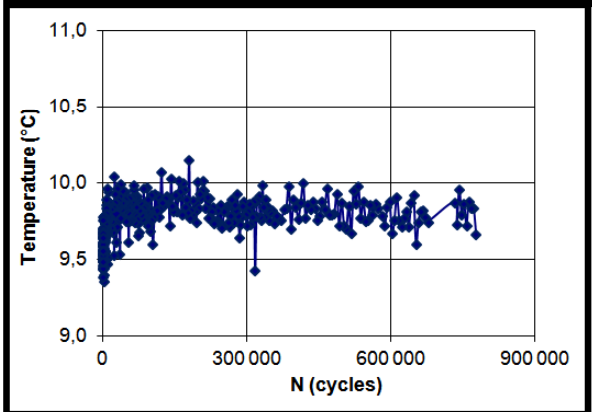
Observations

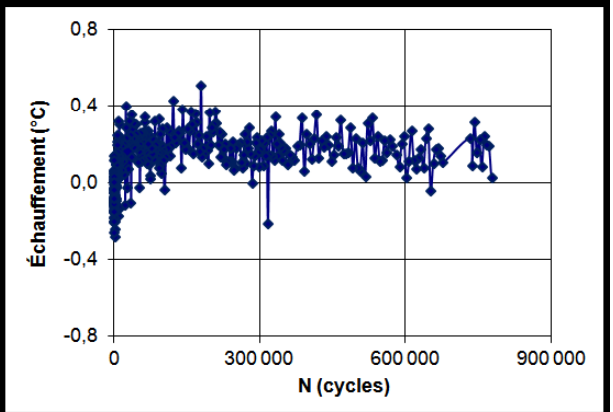
- Sec.
- Échantillon sans jauges et membrane.
- Pilotage avec 3 extensomètres (50mm).
- Rupture de l'échantillon près du casque inférieur après 745 000 cycles.

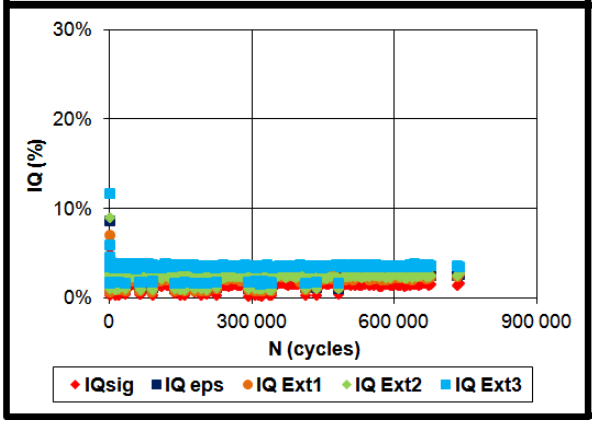
DURÉES DE VIE SELON LES CRITÈRES DE RUPTURE

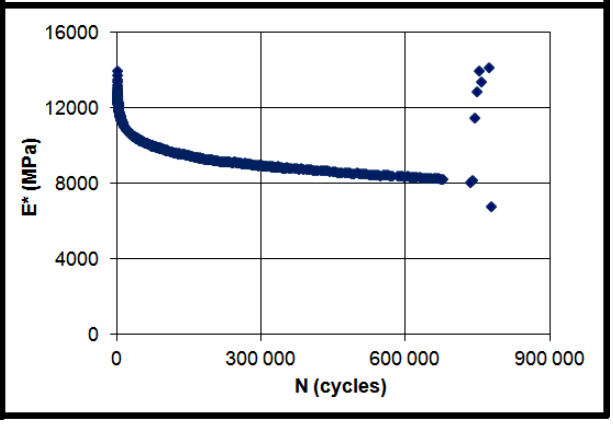
$IEI_{\text{Début de l'essai}}$ (MPa)	13 996	$N_{f\ max\phi}$ (cycles)	737 180
50% x $IEI_{\text{Début de l'essai}}$ (MPa)	6 998	$N_{f\ \Delta\varepsilon ax}$ (cycles)	742 185
$N_{f\ 50\%}$ (cycles)	742 185	$Nf_{\ II/III}$ (cycles)	739 683

GRAPHIQUES

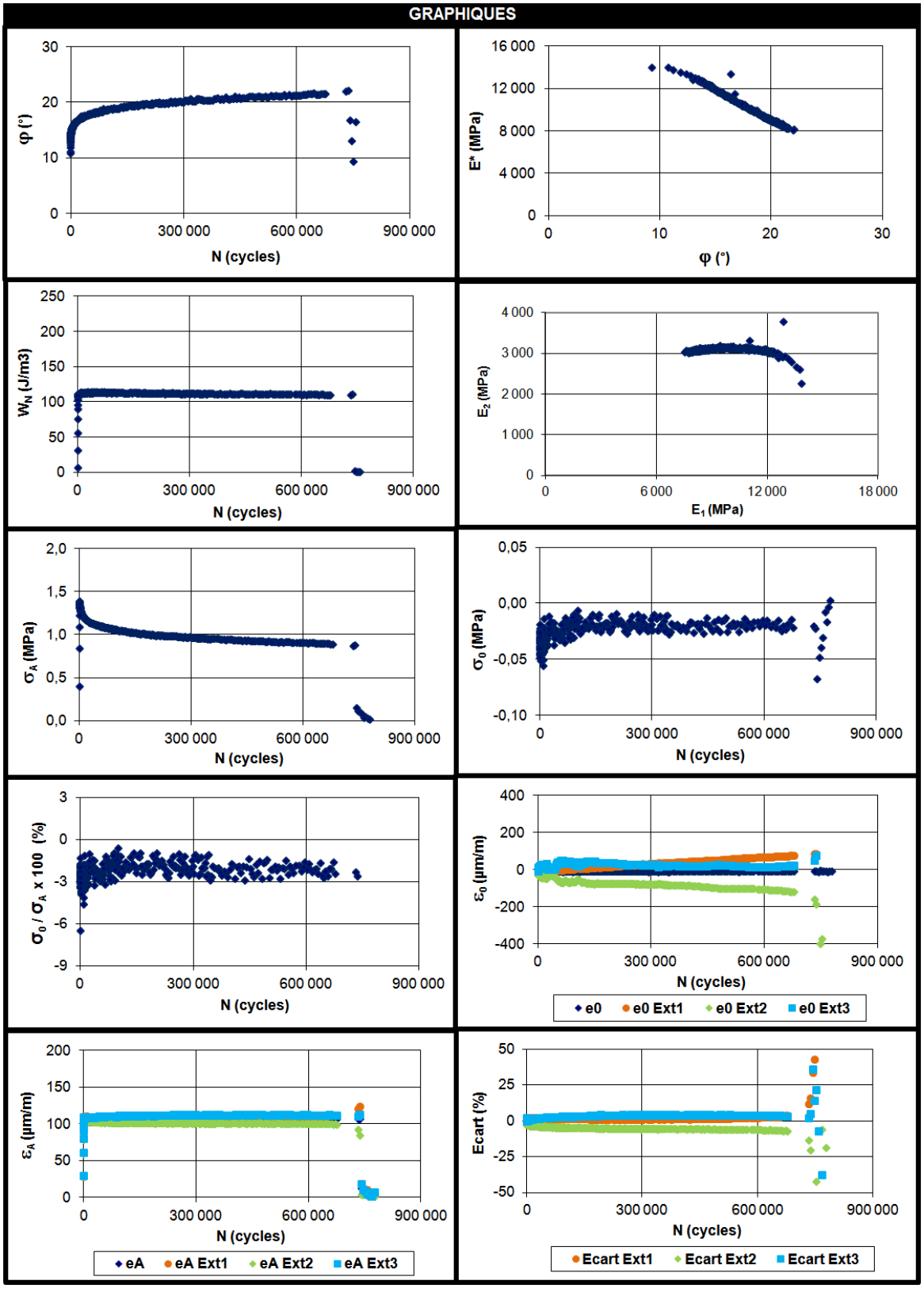








S – 4,1% – 1B3 – 107µdef (suite)



S – 4,4% – 6A2 – 118µdef

INFORMATIONS GÉNÉRALES

Presse de sollicitation	MTS 858
Date - Heure	2012-02-06 - 12h45
Opérateur	SL
Données	
Type d'enrobé, bitume	EB-14, PG70-28
Éprouvette (n°)	6A2
Diamètre (mm)	79,0
Hauteur (mm)	119,7
Vi (%)	4,4
Fréquence ciblée (Hz)	10
T° ciblée (°C)	10
ε ciblée (µdef)	120

Valeurs mesurées	
Fréquence (Hz)	---
T° essai (°C)	10,0
ε réelle (µdef)	117,7

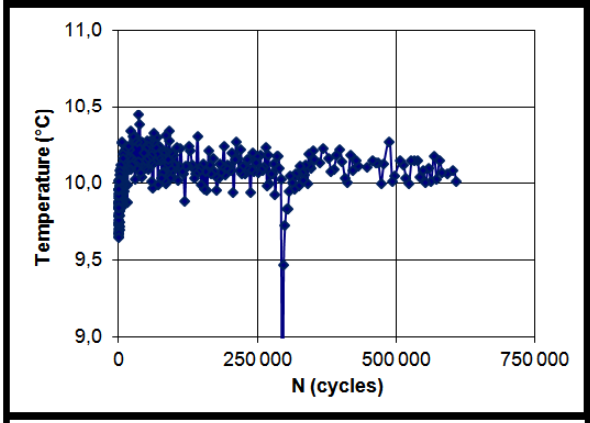
Observations

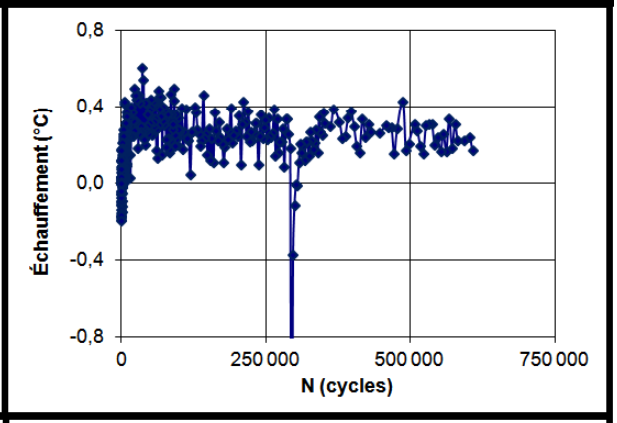
- Sec.
- Échantillon sans jauges et membrane.
- Pilotage avec 3 extensomètres (50mm).
- Collage effectué avant la presse.
- Rupture près du casque supérieur.

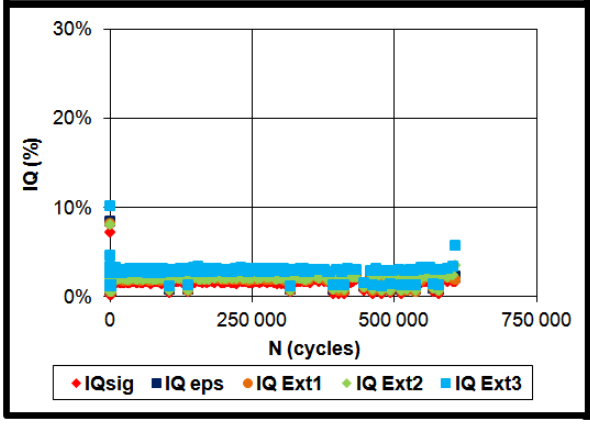
DURÉES DE VIE SELON LES CRITÈRES DE RUPTURE

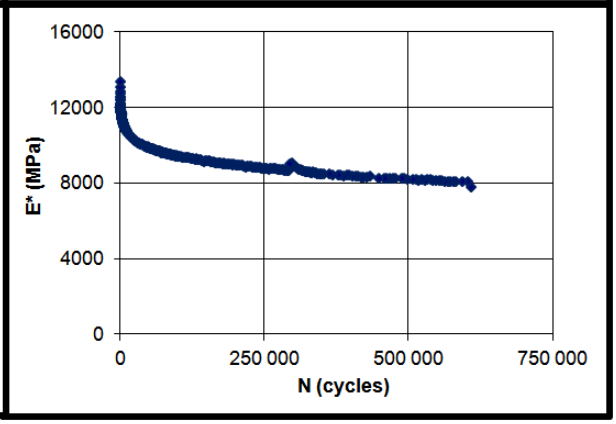
$IEI_{\text{Début de l'essai}}$ (MPa)	13 389	$N_{f\ max\phi}$ (cycles)	607 614
50% x $IEI_{\text{Début de l'essai}}$ (MPa)	6 695	$N_{f\ \Delta\varepsilon ax}$ (cycles)	607 614
$N_{f\ 50\%}$ (cycles)	607 614	$Nf_{\ II/III}$ (cycles)	607 614

GRAPHIQUES



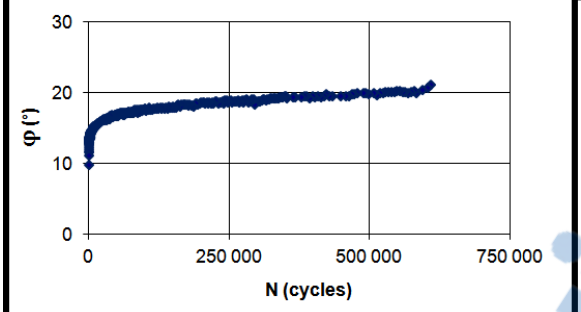


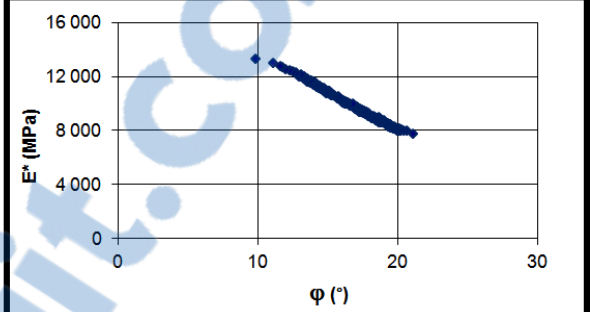


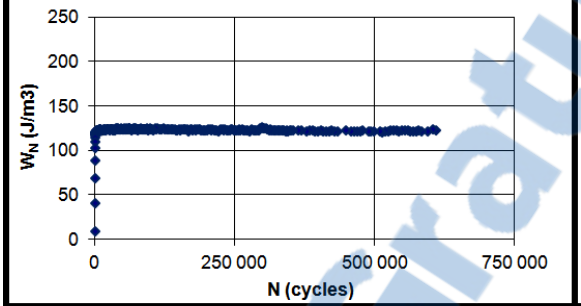


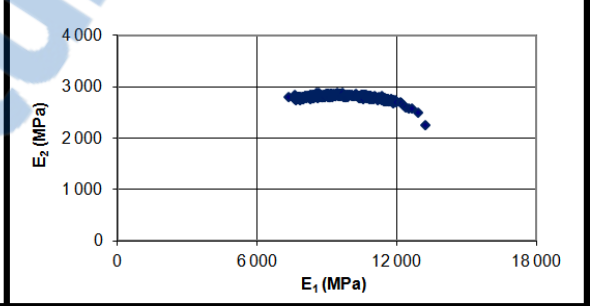
S – 4,4% – 6A2 – 118µdef (suite)

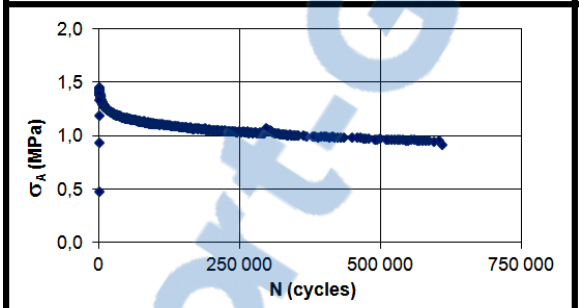
GRAPHIQUES

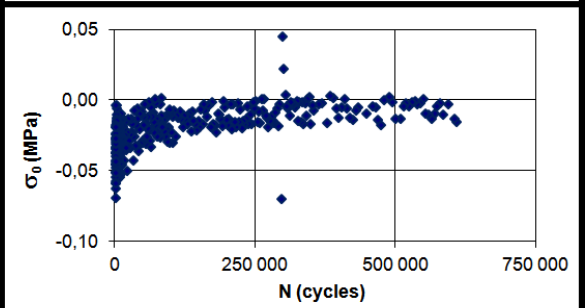


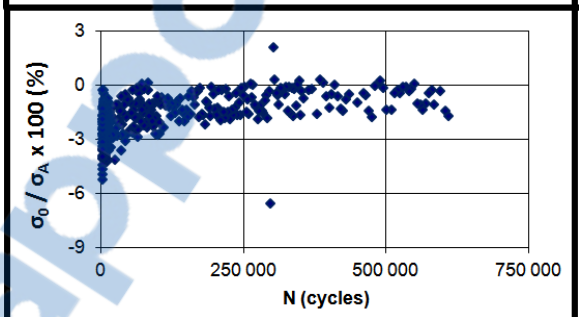


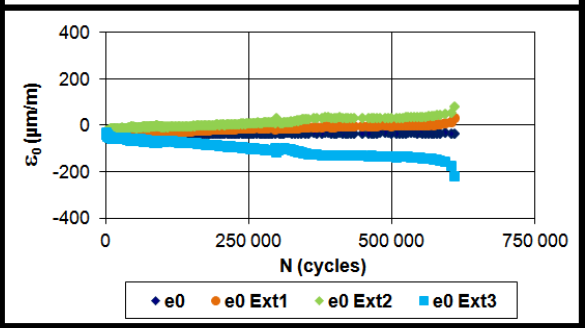


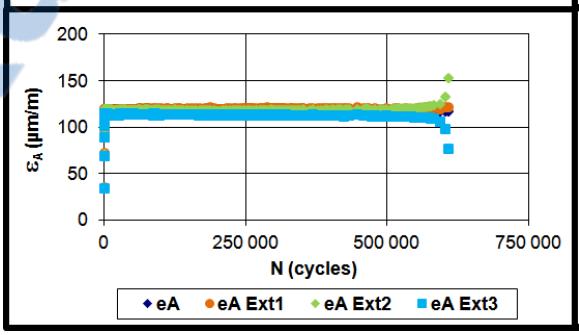


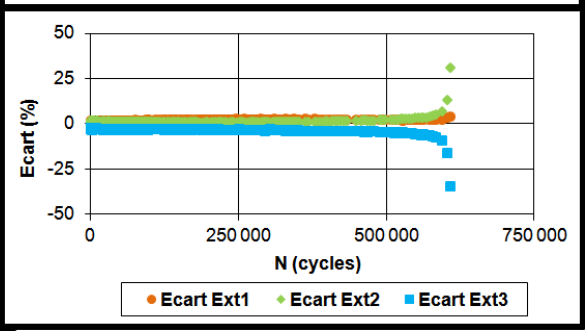












RapportGratuit.com

S – 4,1% – 5D1 – 129µdef

INFORMATIONS GÉNÉRALES

Presse de sollicitation	MTS 858
Date - Heure	2012-01-15 - 15h39
Opérateur	SL
Données	
Type d'enrobé, bitume	EB-14, PG70-28
Éprouvette (nº)	5D1
Diamètre (mm)	79,0
Hauteur (mm)	118,1
Vi (%)	4,1
Fréquence ciblée (Hz)	10
Tº ciblée (ºC)	10
ε ciblée (µdef)	130

Valeurs mesurées	
Fréquence (Hz)	---
Tº essai (ºC)	10,2
ε réelle (µdef)	129,0

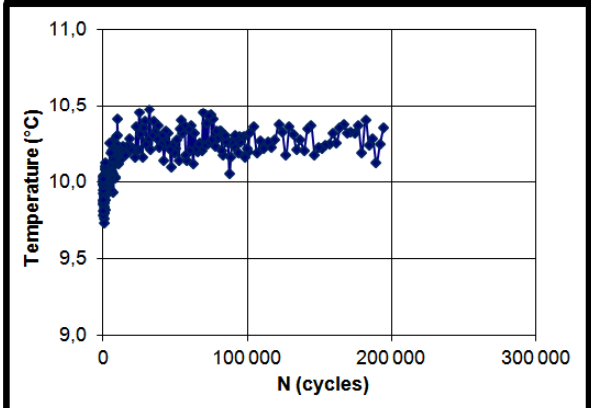
Observations

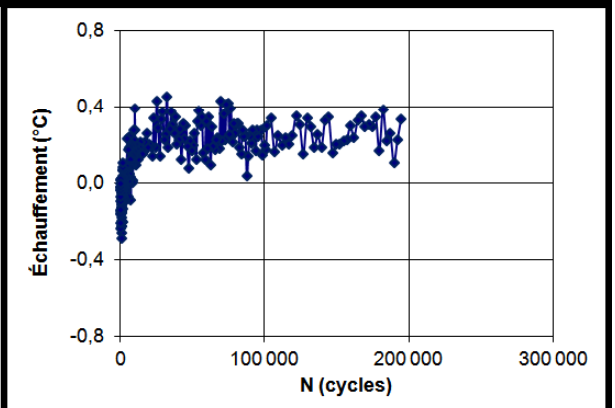
- Sec.
- Échantillon sans jauges et membrane.
- Pilotage avec 3 extensomètres (50mm).
- Rupture dans le 1/3 inférieur.

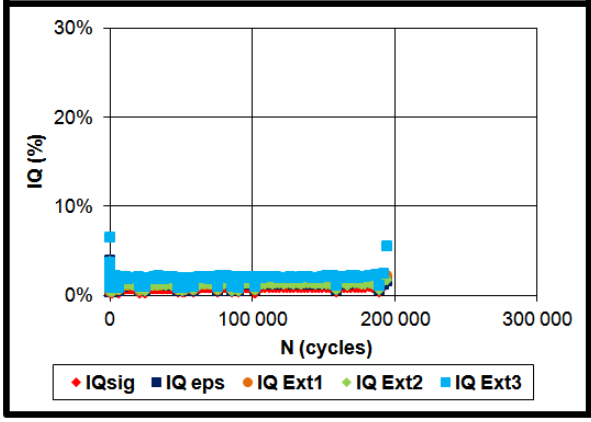
DURÉES DE VIE SELON LES CRITÈRES DE RUPTURE

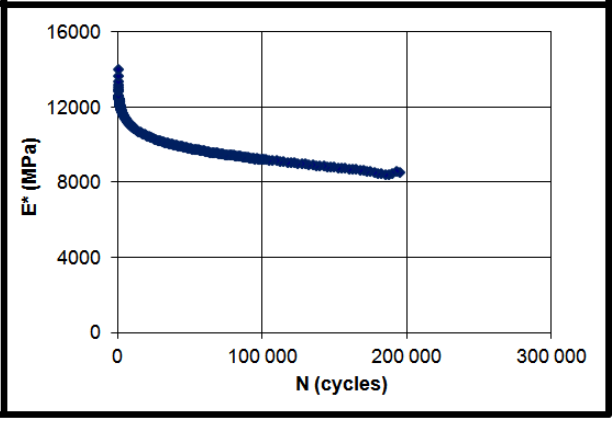
$\|E\|_{\text{Début de l'essai}}$ (MPa)	14 023	$N_{f\ max\phi}$ (cycles)	194 362
50% x $\|E\|_{\text{Début de l'essai}}$ (MPa)	7 011	$N_{f\ \Delta\varepsilon ax}$ (cycles)	194 362
$N_{f\ 50\%}$ (cycles)	194 362	$Nf_{\ II/III}$ (cycles)	194 362

GRAPHIQUES

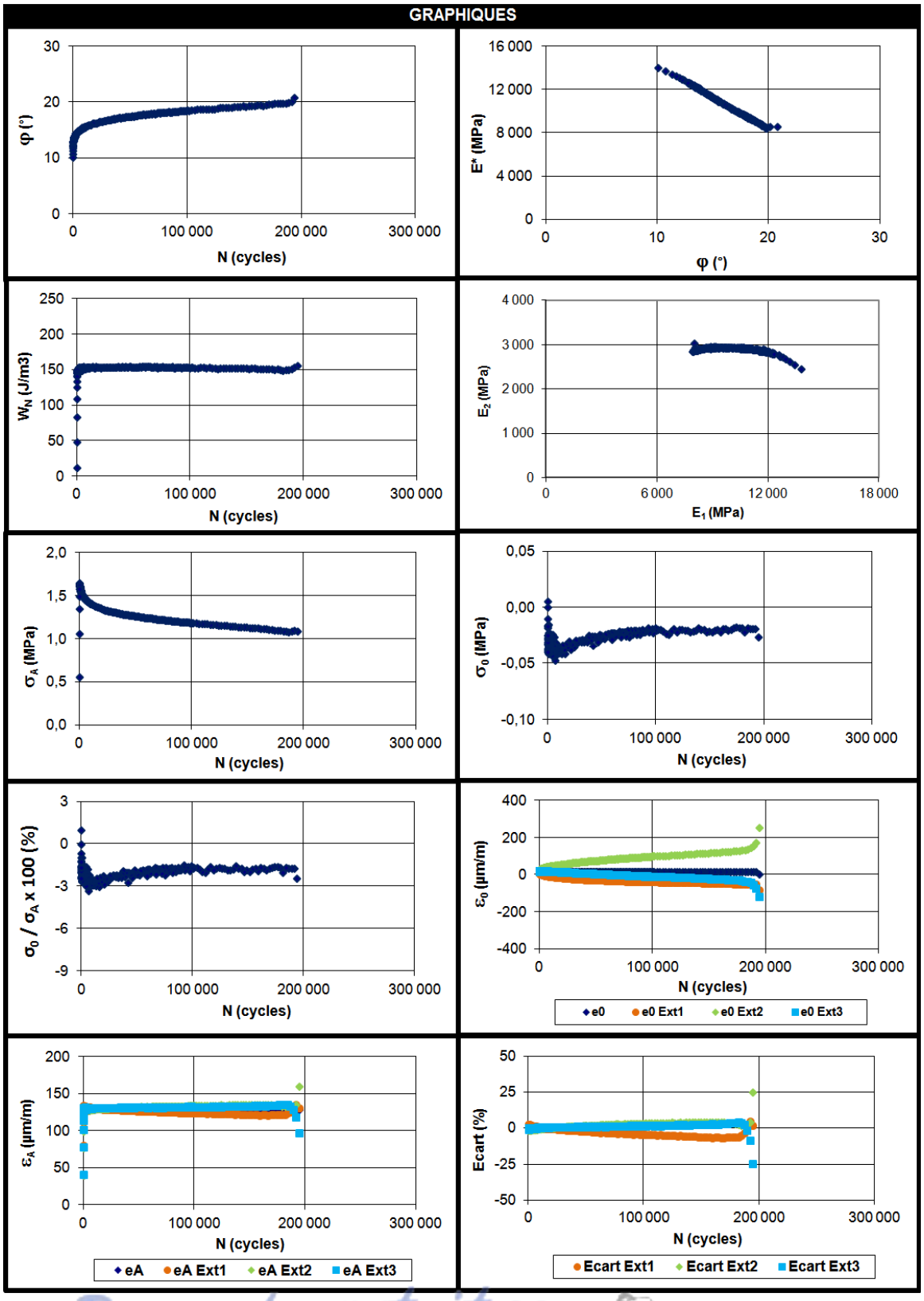








S – 4,1% – 5D1 – 129µdef (suite)



Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

S – 4,4% – 5A2 – 131µdef

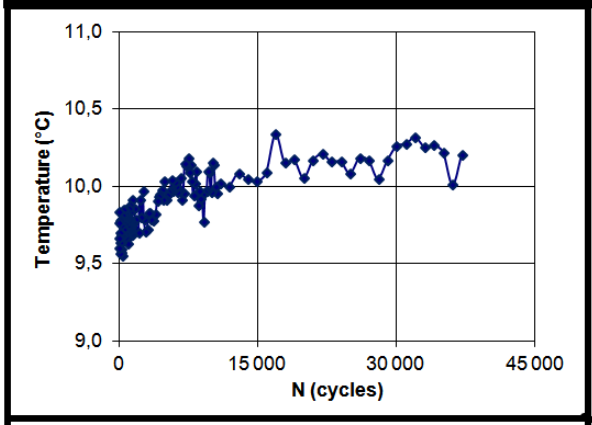
INFORMATIONS GÉNÉRALES

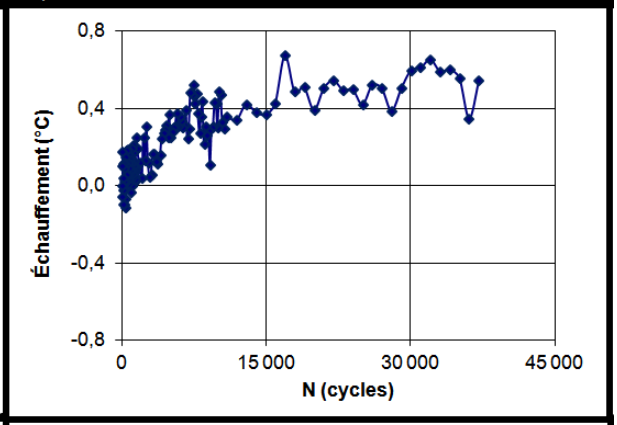
Presse de sollicitation	MTS 858	**Valeurs mesurées**	
Date - Heure	2013-01-08 - 14h51	Fréquence (Hz)	---
Opérateur	SL	T° essai (°C)	9,9
		ε réelle (µdef)	131,2
Données			
Type d'enrobé, bitume	EB-14, PG70-28	**Observations**	
Éprouvette (n°)	5A2	- Sec.	
Diamètre (mm)	79,0	- Échantillon sans jauges et membrane.	
Hauteur (mm)	121,1	- Collage effectué avec la presse.	
Vi (%)	4,4	- Pilotage avec 3 extensomètres (50mm).	
Fréquence ciblée (Hz)	10	- Rupture près du casque inférieur.	
T° ciblée (°C)	10		
ε ciblée (µdef)	135		

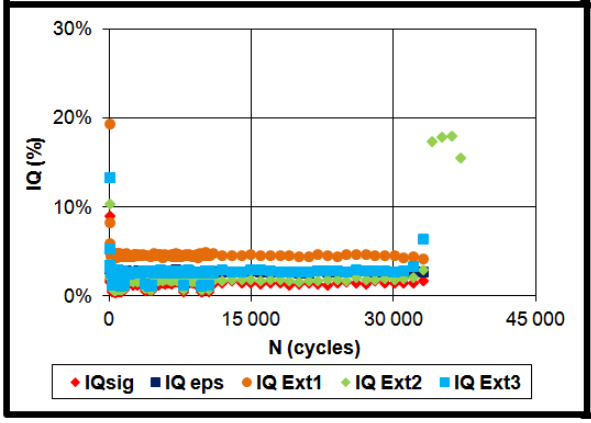
DURÉES DE VIE SELON LES CRITÈRES DE RUPTURE

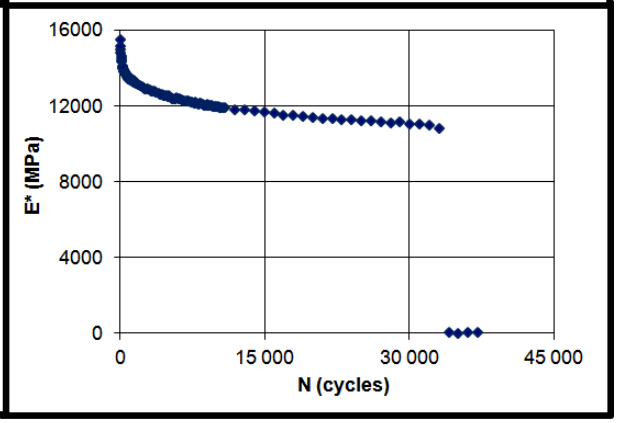
$IEI_{\text{Début de l'essai}}$ (MPa)	15 494	$N_{f\ max\phi}$ (cycles)	33 030
50% x $IEI_{\text{Début de l'essai}}$ (MPa)	7 747	$N_{f\ \Delta\varepsilon ax}$ (cycles)	33 030
$N_{f\ 50\%}$ (cycles)	34 037	$Nf_{\text{II/III}}$ (cycles)	33 030

GRAPHIQUES

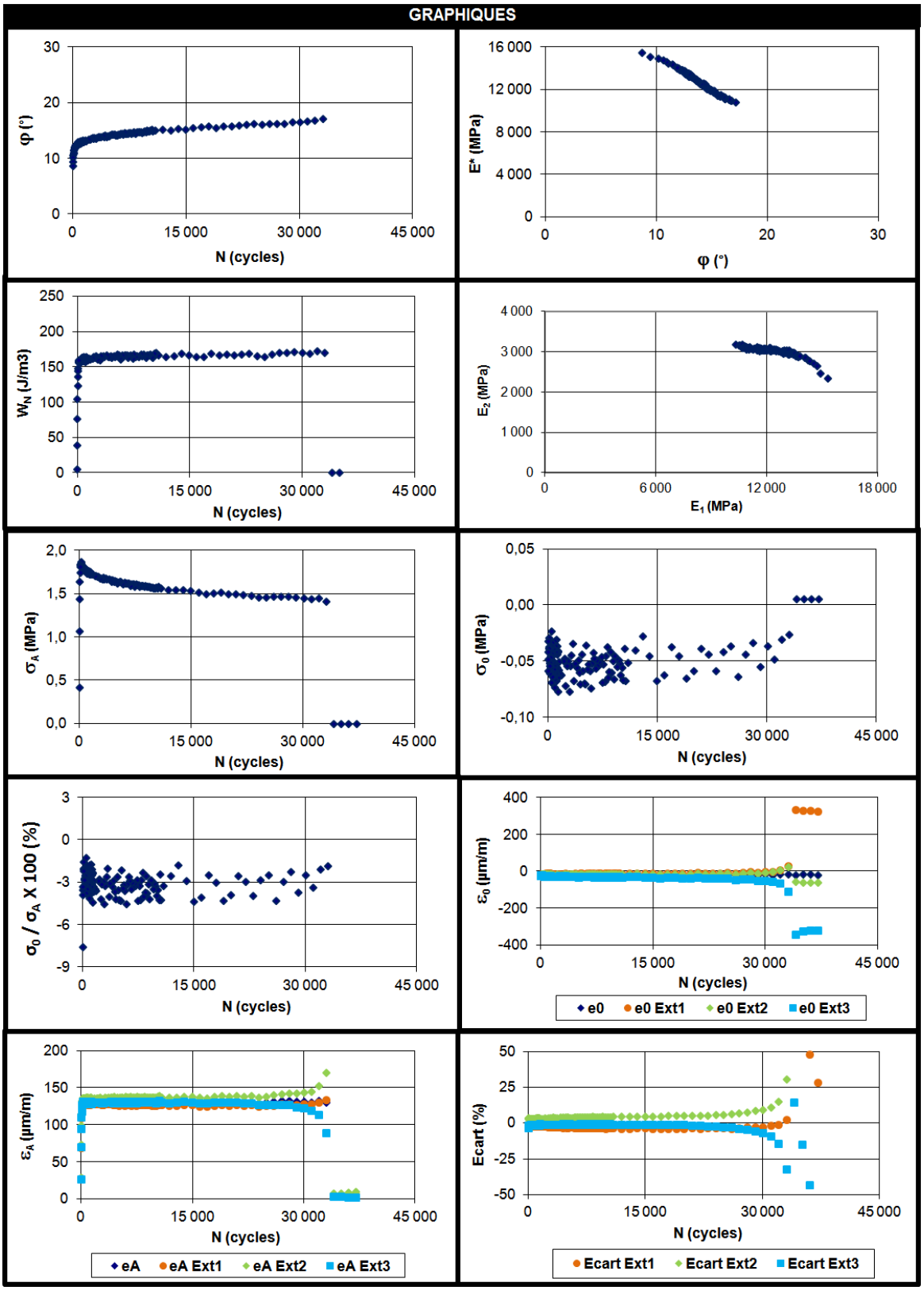








S – 4,4% – 5A2 – 131µdef (suite)



S – 5,0% – 1A1 – 98µdef

INFORMATIONS GÉNÉRALES

Presse de sollicitation	MTS 858
Date - Heure	2011-11-18 - 23h20
Opérateur	SL
Données	
Type d'enrobé, bitume	EB-14, PG70-28
Éprouvette (nº)	1A1
Diamètre (mm)	78,8
Hauteur (mm)	115,3
Vi (%)	5,0
Fréquence ciblée (Hz)	10
Tº ciblée (ºC)	10
ε ciblée (µdef)	100

Valeurs mesurées	
Fréquence (Hz)	---
Tº essai (ºC)	10,2
ε réelle (µdef)	97,8

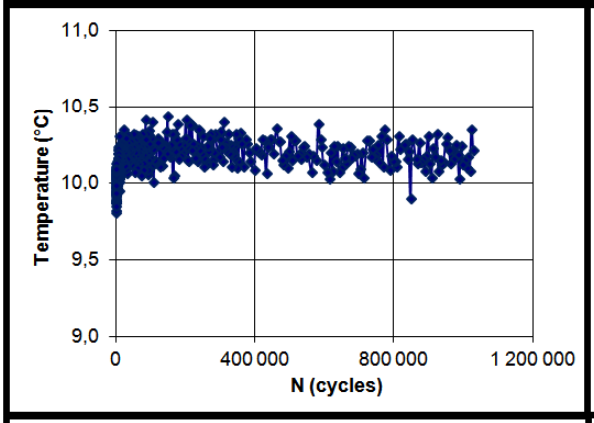
Observations

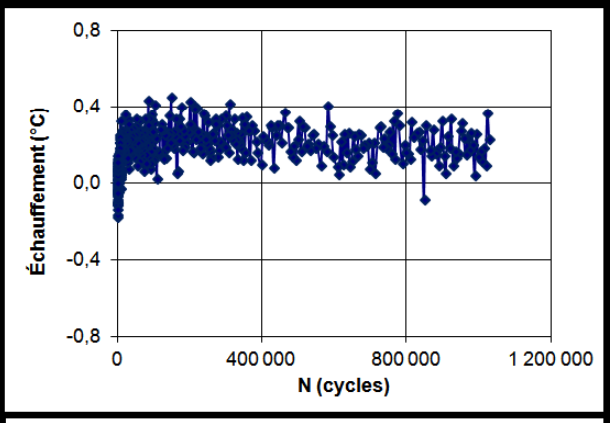
- Sec.
- Échantillon sans jauges et membrane.
- Pilotage avec 3 extensomètres (50mm).
- Arrêt de l'essai car Δεax > 25%.
- Rupture non atteinte.

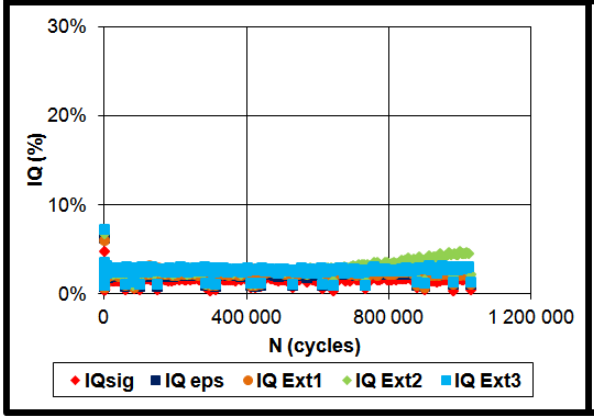
DURÉES DE VIE SELON LES CRITÈRES DE RUPTURE

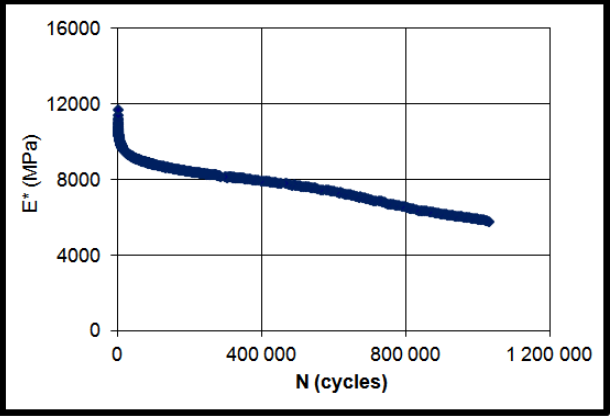
$\|E\|_{\text{Début de l'essai}}$ (MPa)	11 752	$N_{f\ max\phi}$ (cycles)	702 858
50% x $\|E\|_{\text{Début de l'essai}}$ (MPa)	5 876	$N_{f\ \Delta\varepsilon ax}$ (cycles)	502 570
$N_{f\ 50\%}$ (cycles)	1 023 332	$Nf_{\ II/III}$ (cycles)	602 714

GRAPHIQUES

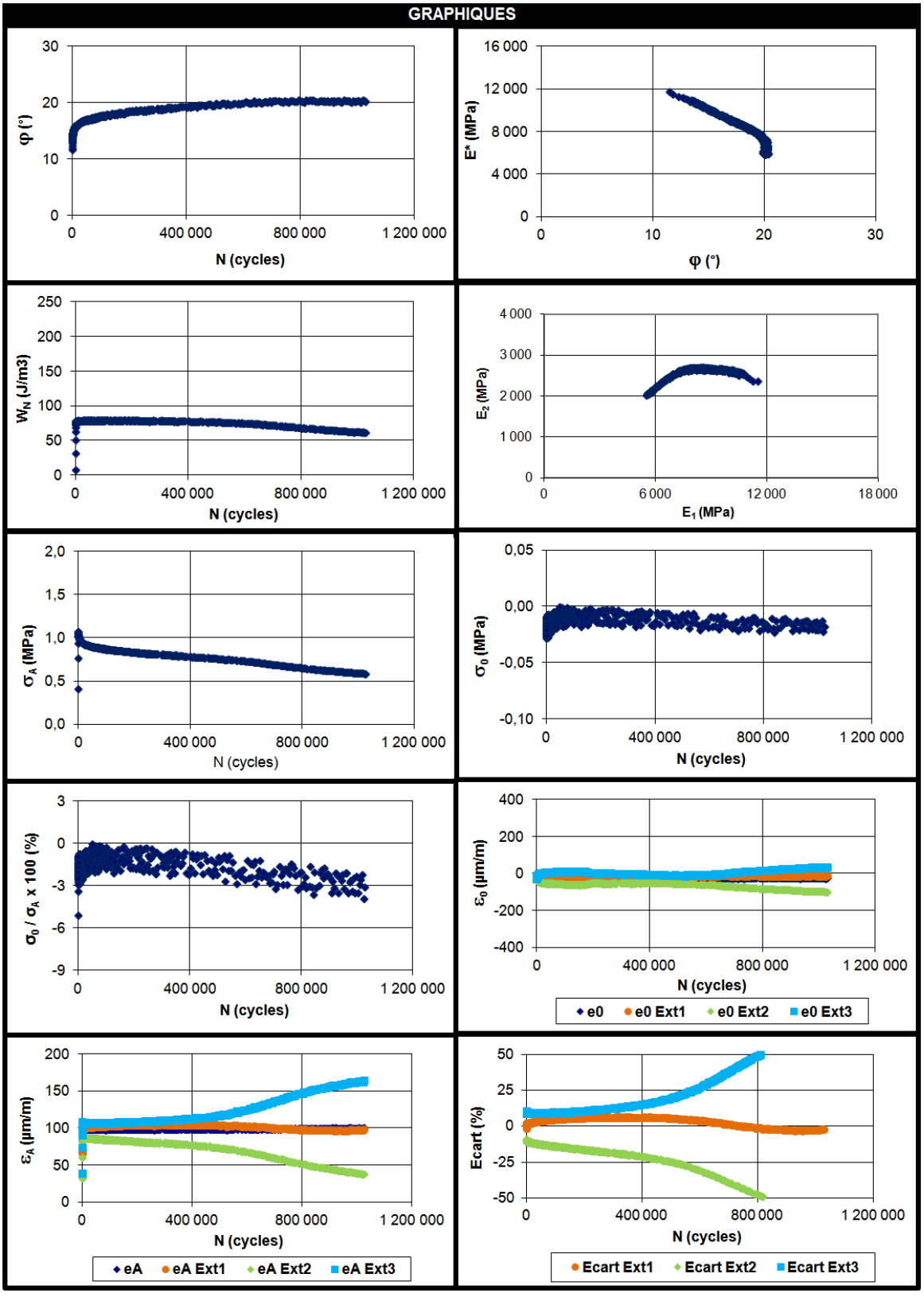








S – 5,0% – 1A1 – 98µdef (suite)



S – 5,1% – 3A3 – 128µdef

INFORMATIONS GÉNÉRALES

Presse de sollicitation	MTS 858
Date - Heure	2011-11-09 - 11h23
Opérateur	FB
Données	
Type d'enrobé, bitume	EB-14, PG70-28
Éprouvette (n°)	3A3
Diamètre (mm)	79,0
Hauteur (mm)	118,1
Vi (%)	5,1
Fréquence ciblée (Hz)	10
T° ciblée (°C)	10
ε ciblée (µdef)	130

Valeurs mesurées	
Fréquence (Hz)	---
T° essai (°C)	9,8
ε réelle (µdef)	128,1

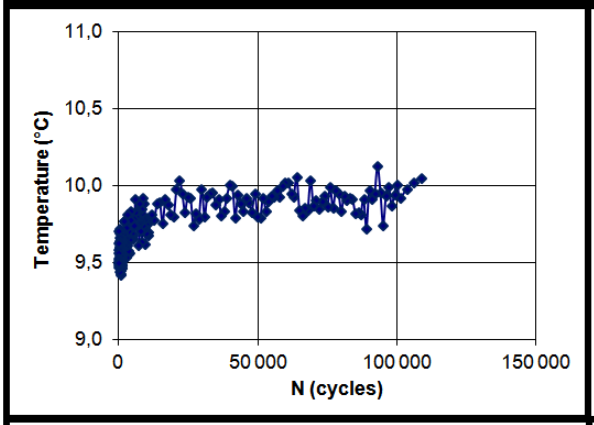
Observations

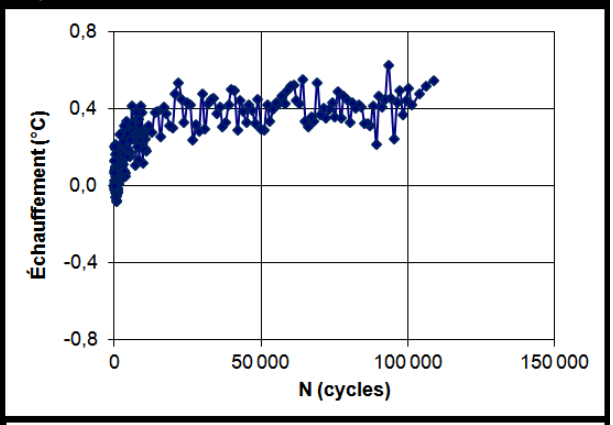
- Sec.
- Échantillon sans jauges et membrane.
- Pilotage avec 3 extensomètres (50mm).
- Rupture dans le 1/3 supérieur.

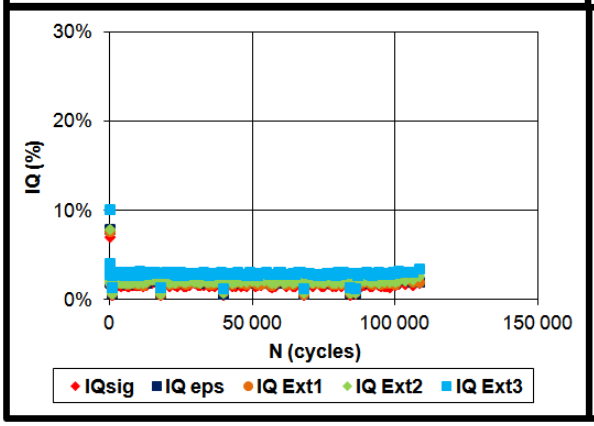
DURÉES DE VIE SELON LES CRITÈRES DE RUPTURE

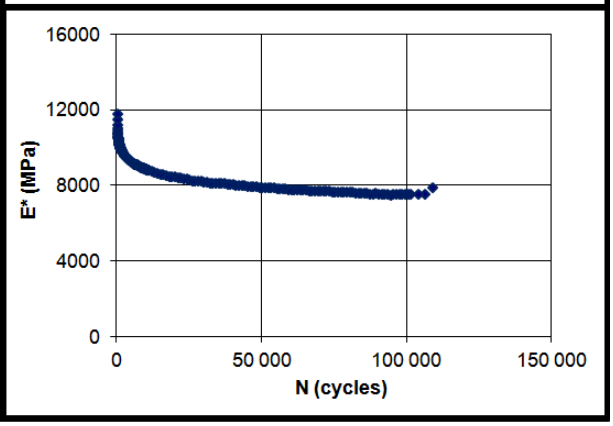
$\|E\|_{\text{Début de l'essai}}$ (MPa)	11 818	$N_{f\ max\phi}$ (cycles)	108 709
50% x $\|E\|_{\text{Début de l'essai}}$ (MPa)	5 909	$N_{f\ \Delta\varepsilon ax}$ (cycles)	106 203
$N_{f\ 50\%}$ (cycles)	108 709	$Nf_{\ II/III}$ (cycles)	107 456

GRAPHIQUES

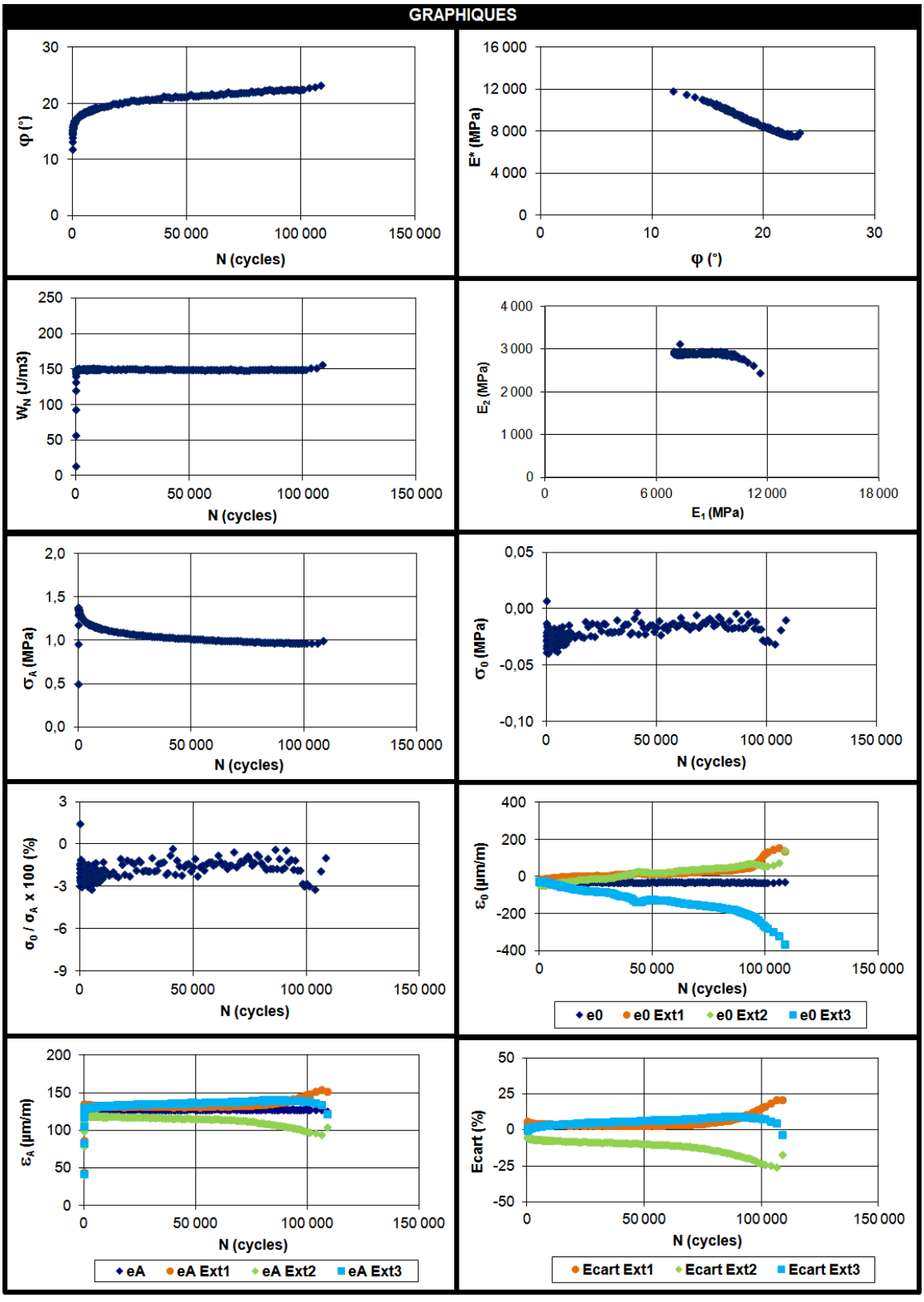








S – 5,1% – 3A3 – 128µdef (suite)



PSE – 3,5% – 2C1 – 118µdef

INFORMATIONS GÉNÉRALES

Presse de sollicitation	MTS 858
Date - Heure	2012-05-25 - 12h26
Opérateur	FB
Données	
Type d'enrobé, bitume	EB-14, PG70-28
Éprouvette (nº)	2C1
Diamètre (mm)	79,0
Hauteur (mm)	116,7
Vi (%)	3,5
Fréquence ciblée (Hz)	10
Tº ciblée (ºC)	10
ε ciblée (µdef)	120

Valeurs mesurées	
Fréquence (Hz)	---
Tº essai (ºC)	10,1
ε réelle (µdef)	117,6

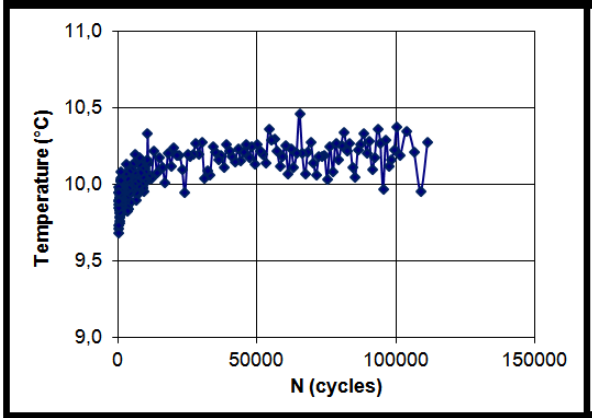
Observations

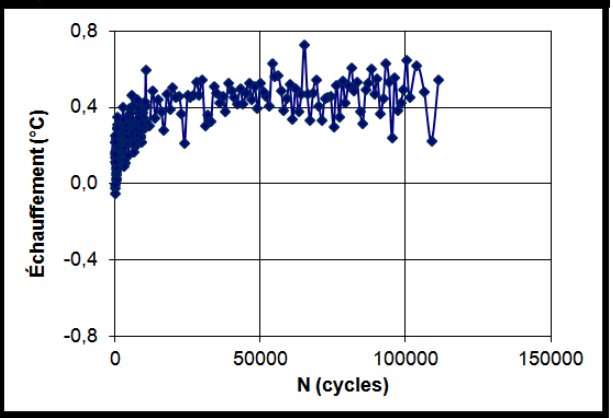
- Eau : saturation le 2012-05-24 à 10h45.
- Échantillon sans jauges, avec membrane et paraffine.
- Collage du casque supérieur effectué avec la presse.
- Pilotage avec 3 extensomètres (50mm).
- Arrêt de l'essai car $\Delta\varepsilon ax \geq 25\%$.
- Rupture non atteinte.
- Degré de saturation : 59-54% (5%).

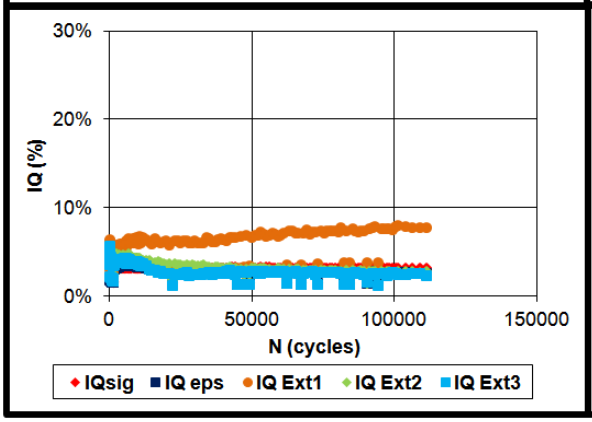
DURÉES DE VIE SELON LES CRITÈRES DE RUPTURE

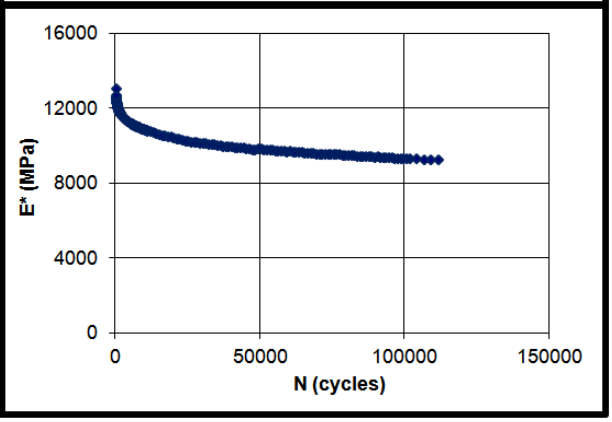
$IEI_{\text{Début de l'essai}}$ (MPa)	13 057	$N_{f\ max\phi}$ (cycles)	---
50% x $IEI_{\text{Début de l'essai}}$ (MPa)	6 528	$N_{f\ \Delta\varepsilon ax}$ (cycles)	36 939
$N_{f\ 50\%}$ (cycles)	---	$Nf_{\ II/III}$ (cycles)	---

GRAPHIQUES

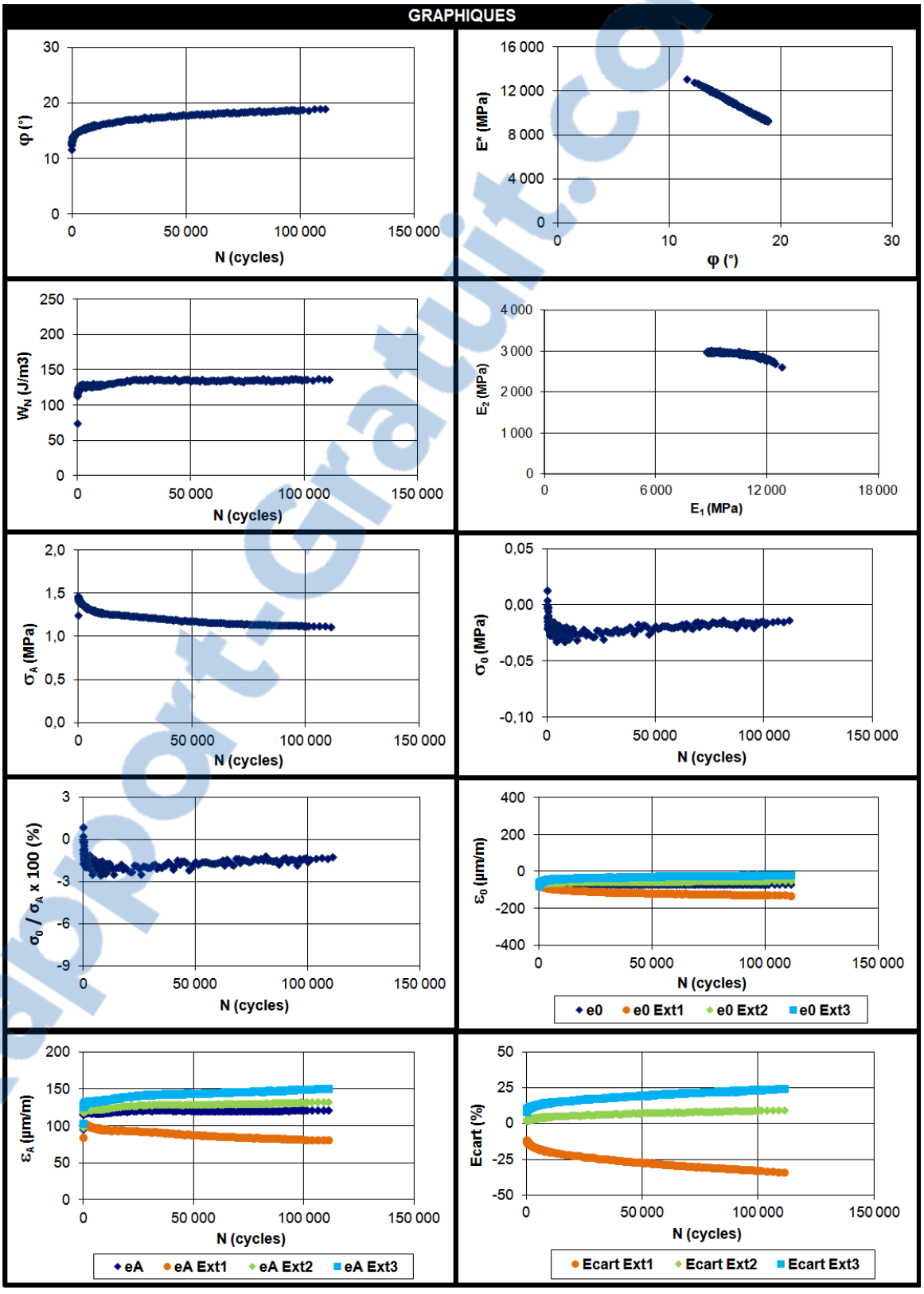








PSE – 3,5% – 2C1 – 118µdef (suite)



Rapport-Gratuit.com

PSE – 4,5% – 2C4 – 91µdef

INFORMATIONS GÉNÉRALES

Presse de sollicitation	MTS 858
Date - Heure	2012-02-04 - 20h30
Opérateur	SL
Données	
Type d'enrobé, bitume	EB-14, PG70-28
Éprouvette (nº)	2C4
Diamètre (mm)	79,0
Hauteur (mm)	121,5
Vi (%)	4,5
Fréquence ciblée (Hz)	10
Tº ciblée (ºC)	10
ε ciblée (µdef)	100

Valeurs mesurées	
Fréquence (Hz)	---
Tº essai (ºC)	10,0
ε réelle (µdef)	91,0

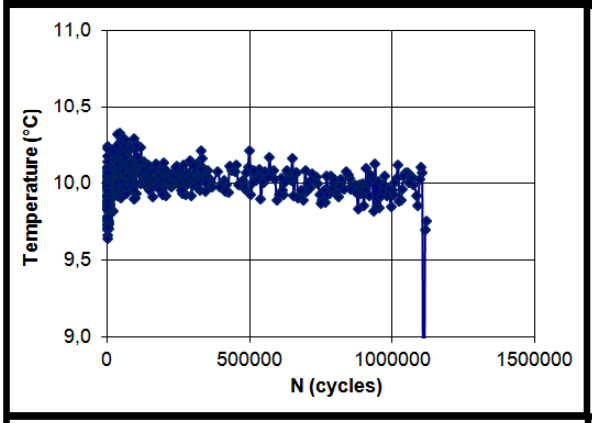
Observations

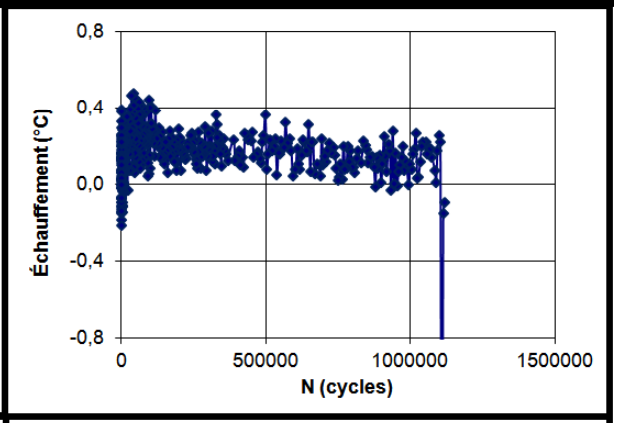
- Eau : saturation le 2012-02-03 à 12h50.
- Échantillon sans jauges, avec membrane et paraffine.
- Collage effectué avec la presse.
- Pilotage avec 3 extensomètres (50mm).
- Arrêt de l'essai car Δεax > 25%.
- Rupture non atteinte.
- Degré de saturation : 83-70% (13%).

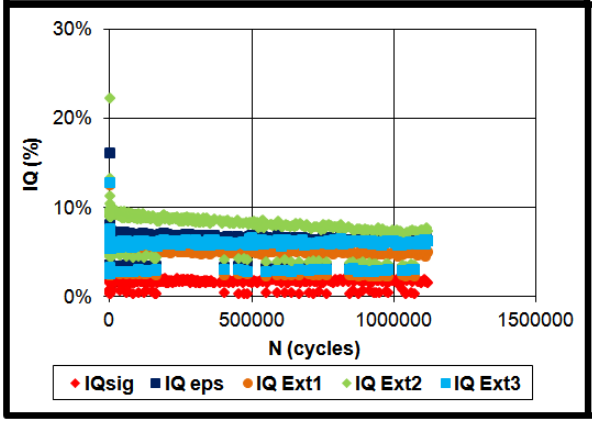
DURÉES DE VIE SELON LES CRITÈRES DE RUPTURE

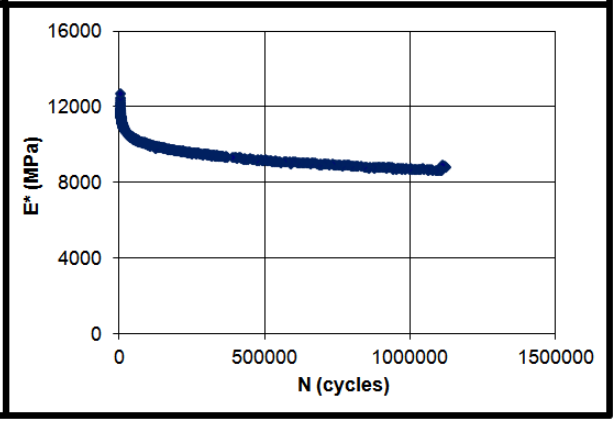
$\|E\|_{\text{Début de l'essai}}$ (MPa)	12 698	$N_{f\ max\phi}$ (cycles)	---
50% x $\|E\|_{\text{Début de l'essai}}$ (MPa)	6 349	$N_{f\ \Delta\varepsilon ax}$ (cycles)	582 656
$N_{f\ 50\%}$ (cycles)	---	$Nf_{\ II/III}$ (cycles)	---

GRAPHIQUES

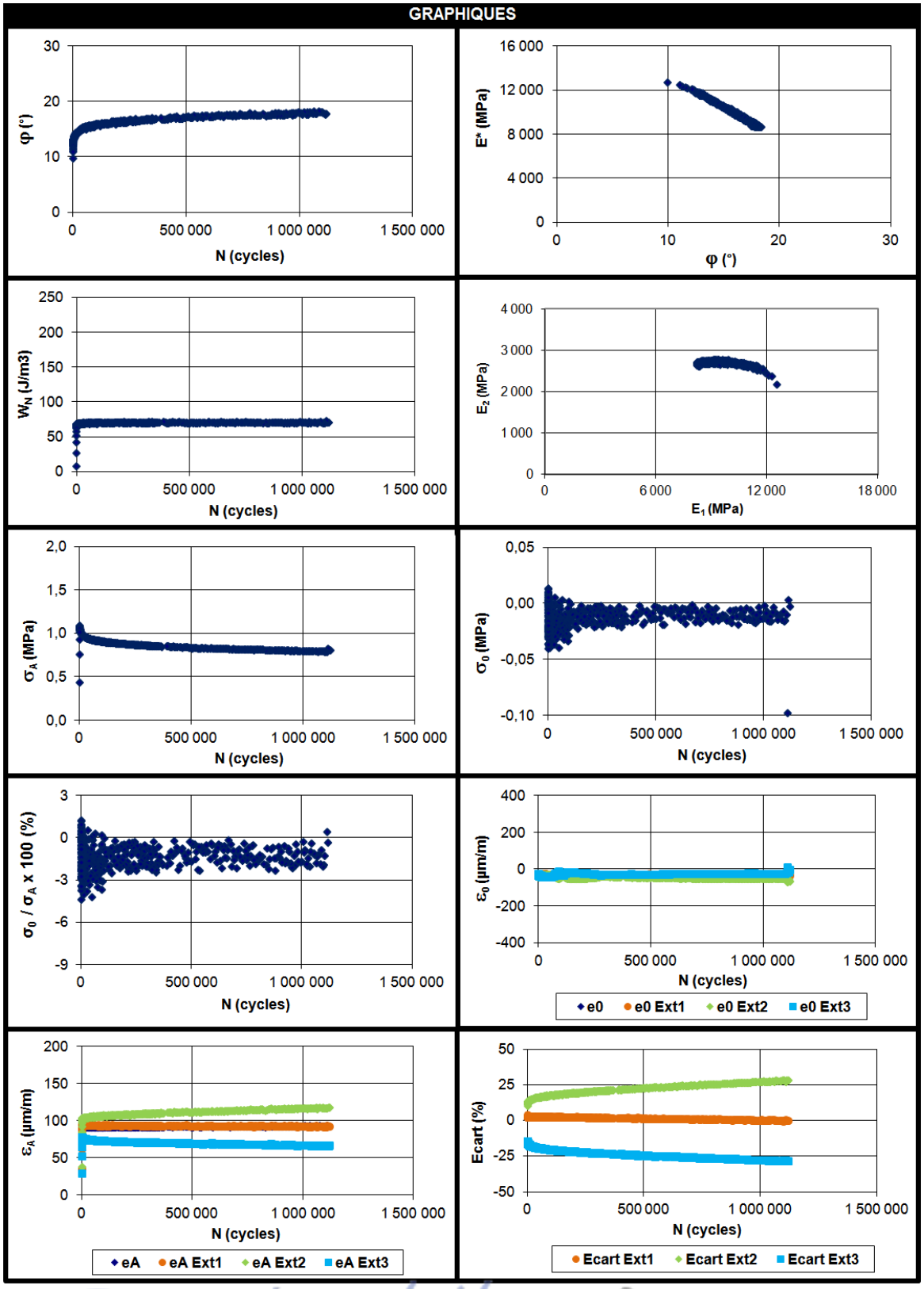








PSE – 4,5% – 2C4 – 91µdef (suite)



Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

PSE – 4,1% – 1C2 – 97µdef

INFORMATIONS GÉNÉRALES

Presse de sollicitation	MTS 858
Date - Heure	2011-11-12 - 19h07
Opérateur	SL
Données	
Type d'enrobé, bitume	EB-14, PG70-28
Éprouvette (nº)	1C2
Diamètre (mm)	78,8
Hauteur (mm)	119,1
Vi (%)	4,1
Fréquence ciblée (Hz)	10
Tº ciblée (ºC)	10
ε ciblée (µdef)	100

Valeurs mesurées	
Fréquence (Hz)	---
Tº essai (ºC)	10,2
ε réelle (µdef)	96,8

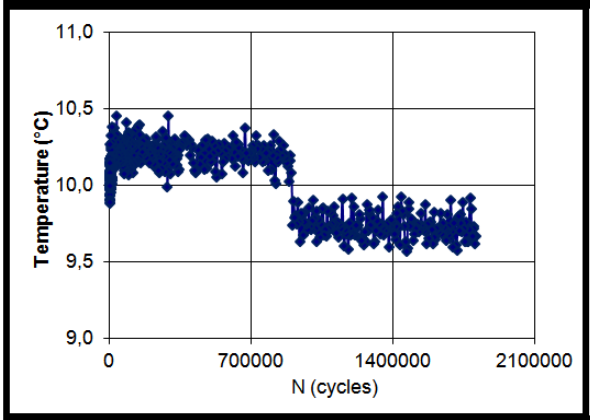
Observations

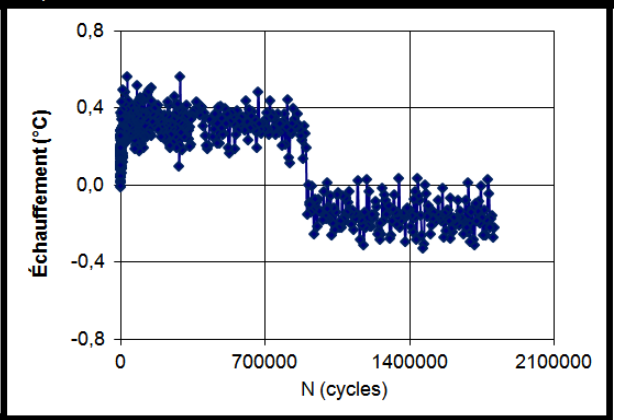
- Eau : saturation le 2011-11-12 à 16h10.
- Échantillon sans jauges, avec membrane et paraffine.
- Pilotage avec 3 extensomètres (50mm).
- Arrêt de l'essai car Δεax > 25%.
- Rupture non atteinte.
- Degré de saturation : 91-77% (14%).

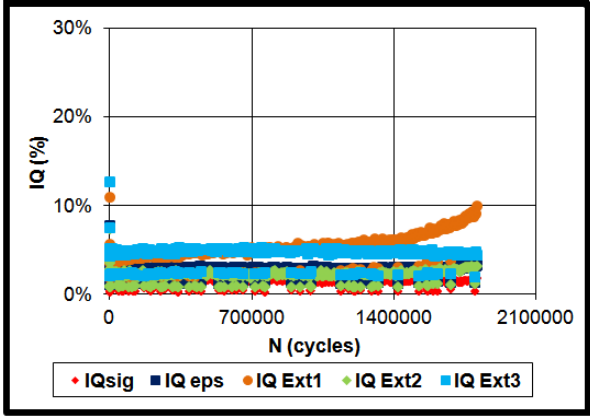
DURÉES DE VIE SELON LES CRITÈRES DE RUPTURE

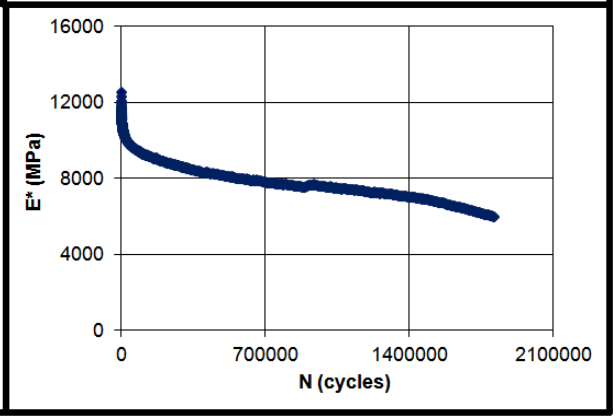
$\|E\|_{\text{Début de l'essai}}$ (MPa)	12 587	$N_{f\ max\phi}$ (cycles)	1 518 099
50% x $\|E\|_{\text{Début de l'essai}}$ (MPa)	6 293	$N_{f\ \Delta\varepsilon ax}$ (cycles)	304 180
$N_{f\ 50\%}$ (cycles)	1 718 318	$Nf_{\ II/III}$ (cycles)	911 140

GRAPHIQUES

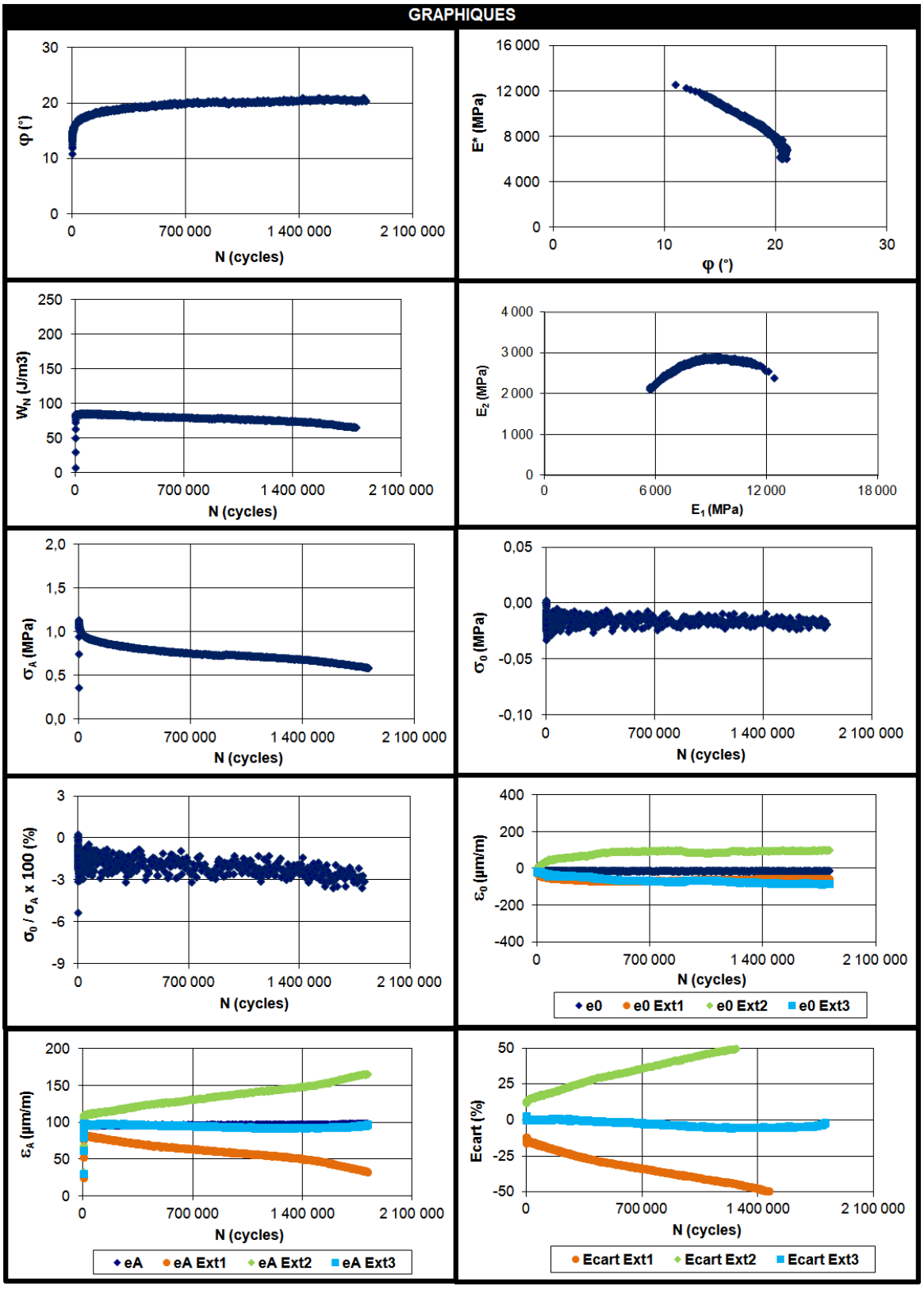








PSE – 4,1% – 1C2 – 97µdef (suite)



PSE – 4,4% – 6D2 – 106µdef

INFORMATIONS GÉNÉRALES

Presse de sollicitation	MTS 858	**Valeurs mesurées**	
Date - Heure	2012-02-24 - 14h40	Fréquence (Hz)	---
Opérateur	SL	T° essai (°C)	10,1
		ε réelle (µdef)	105,5
Données			
Type d'enrobé, bitume	EB-14, PG70-28		
Éprouvette (n°)	6D2		
Diamètre (mm)	79,0		
Hauteur (mm)	121,7		
Vi (%)	4,4		
Fréquence ciblée (Hz)	10		
T° ciblée (°C)	10		
ε ciblée (µdef)	110		

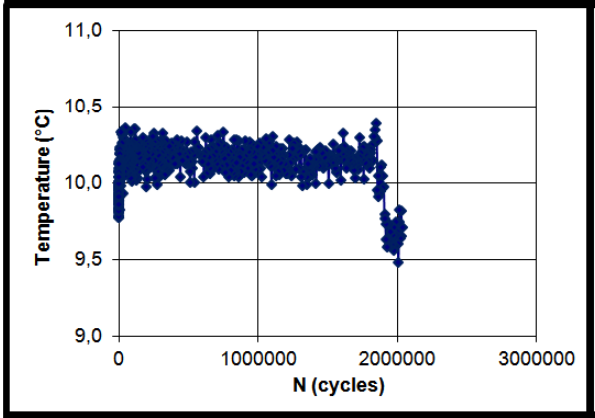
Observations

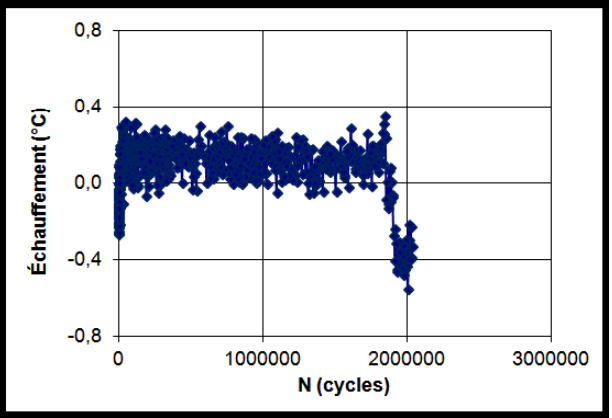
- Eau : saturation le 2012-02-24 à 11h02.
- Échantillon sans jauges, avec membrane et paraffine.
- Collage du casque supérieur effectué avec la presse.
- Pilotage avec 3 extensomètres (50mm).
- Rupture près du casque supérieur.
- Degré de saturation : 98-74% (24%).

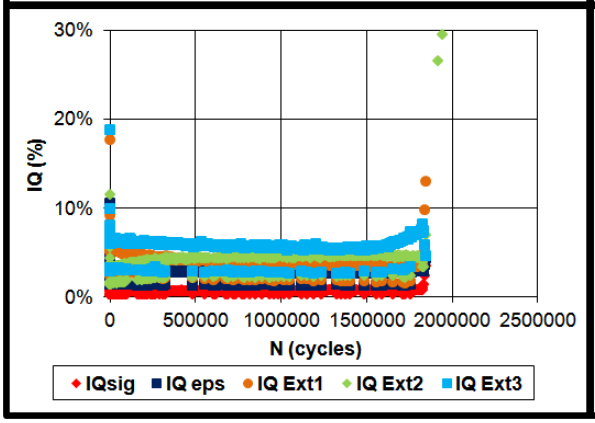
DURÉES DE VIE SELON LES CRITÈRES DE RUPTURE

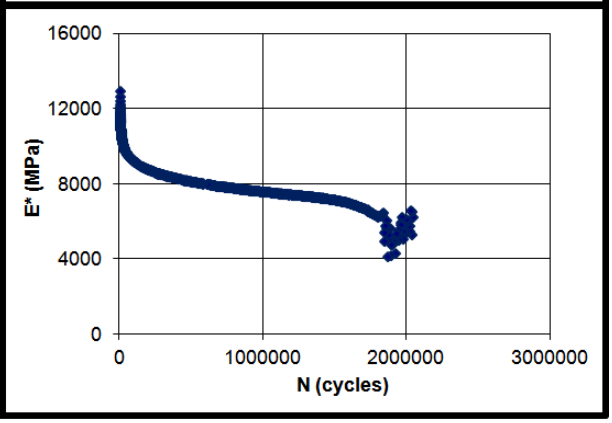
$IEI_{\text{Début de l'essai}}$ (MPa)	12 911	$N_{f\ max\phi}$ (cycles)	1 843 904
50% x $IEI_{\text{Début de l'essai}}$ (MPa)	6 455	$N_{f\ \Delta\varepsilon ax}$ (cycles)	1 673 689
$N_{f\ 50\%}$ (cycles)	1 748 783	$Nf_{\ II/III}$ (cycles)	1 758 797

GRAPHIQUES

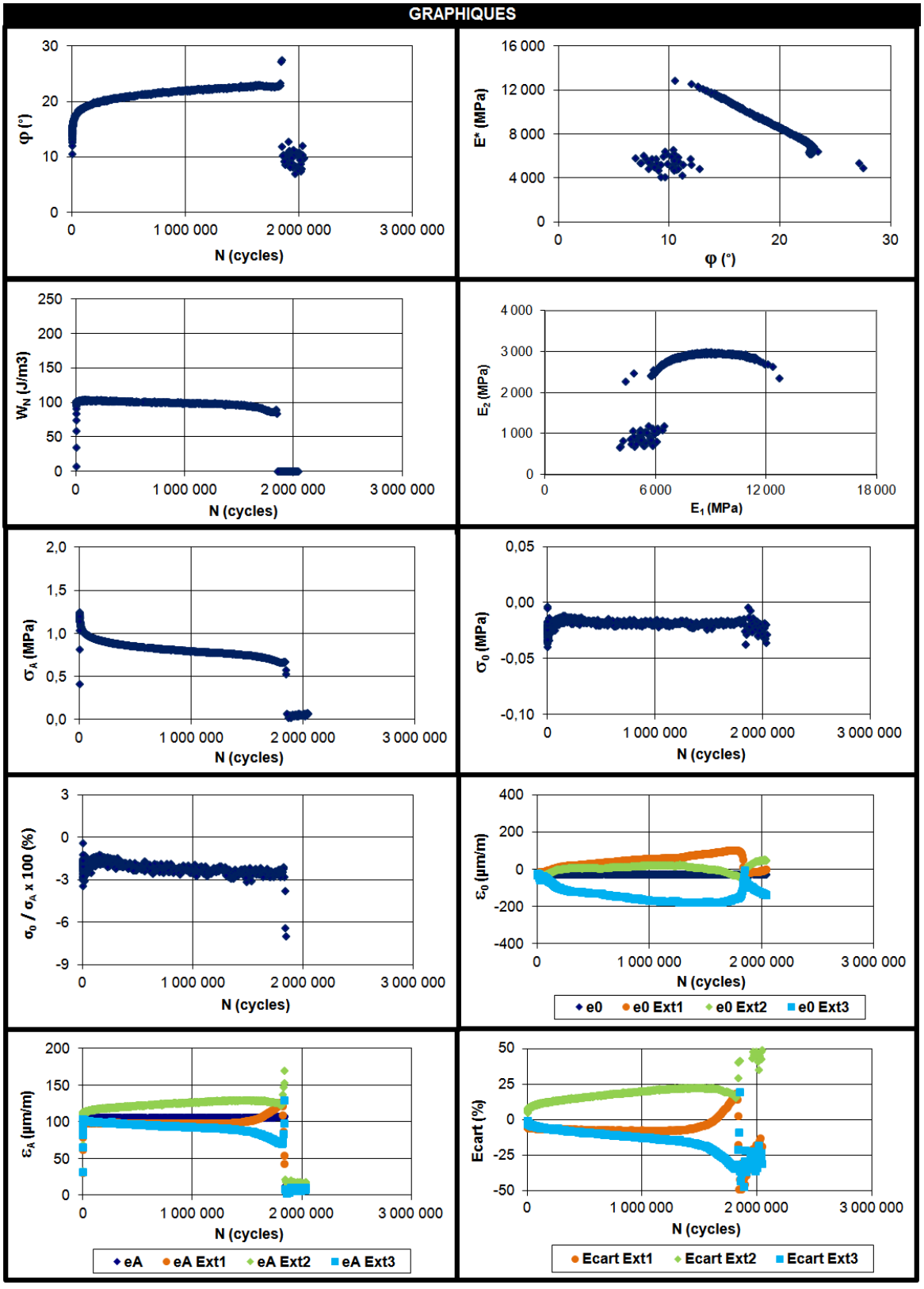








PSE – 4,4% – 6D2 – 106µdef (suite)



PSE – 4,3% – 6B2 – 107µdef

INFORMATIONS GÉNÉRALES

Presse de sollicitation	MTS 858
Date - Heure	2012-02-02 - 19h03
Opérateur	SL
Données	
Type d'enrobé, bitume	EB-14, PG70-28
Éprouvette (nº)	6B2
Diamètre (mm)	79,0
Hauteur (mm)	120,0
Vi (%)	4,3
Fréquence ciblée (Hz)	10
Tº ciblée (ºC)	10
ε ciblée (µdef)	110

Valeurs mesurées	
Fréquence (Hz)	---
Tº essai (ºC)	10,0
ε réelle (µdef)	107,0

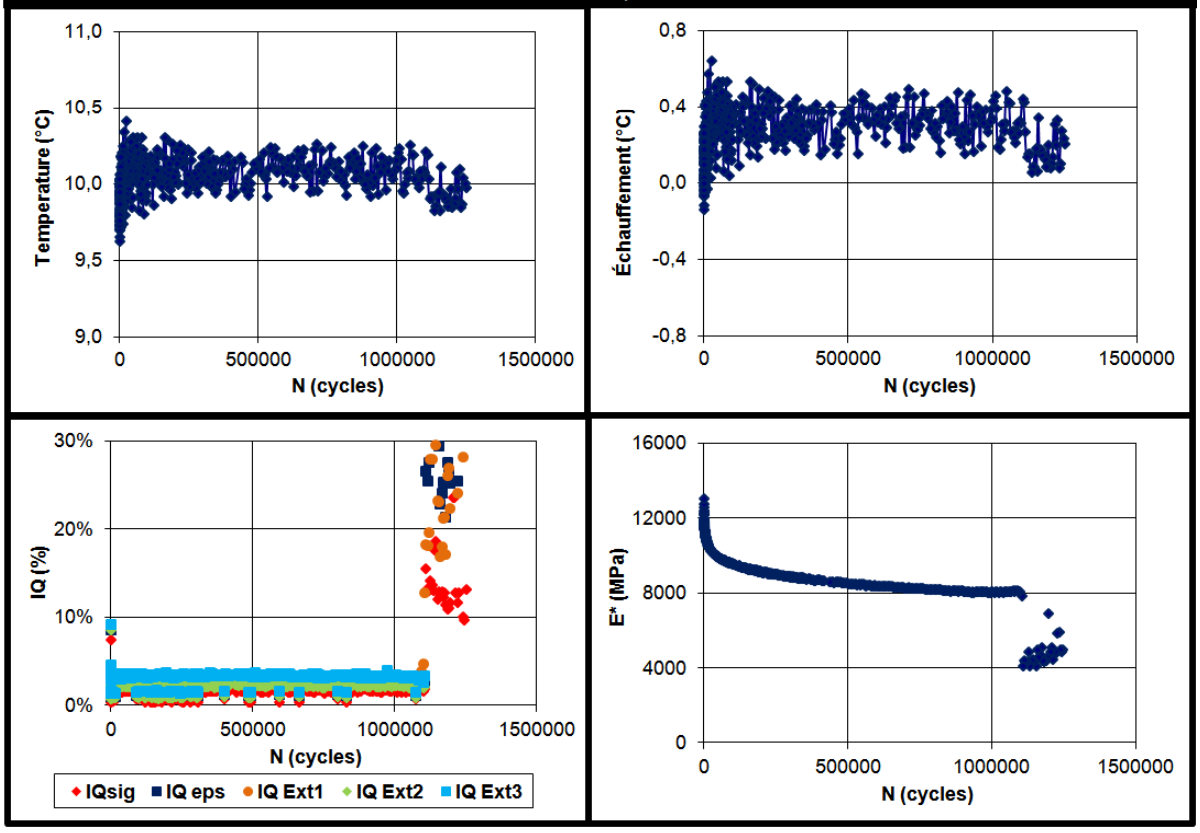
Observations

- Eau : saturation le 2012-02-02 à 13h37
- Échantillon sans jauges, avec membrane et paraffine.
- Collage effectué avec la presse.
- Pilotage avec 3 extensomètres (50mm).
- Rupture près du casque inférieur.
- Degré de saturation : 84-68% (16%).

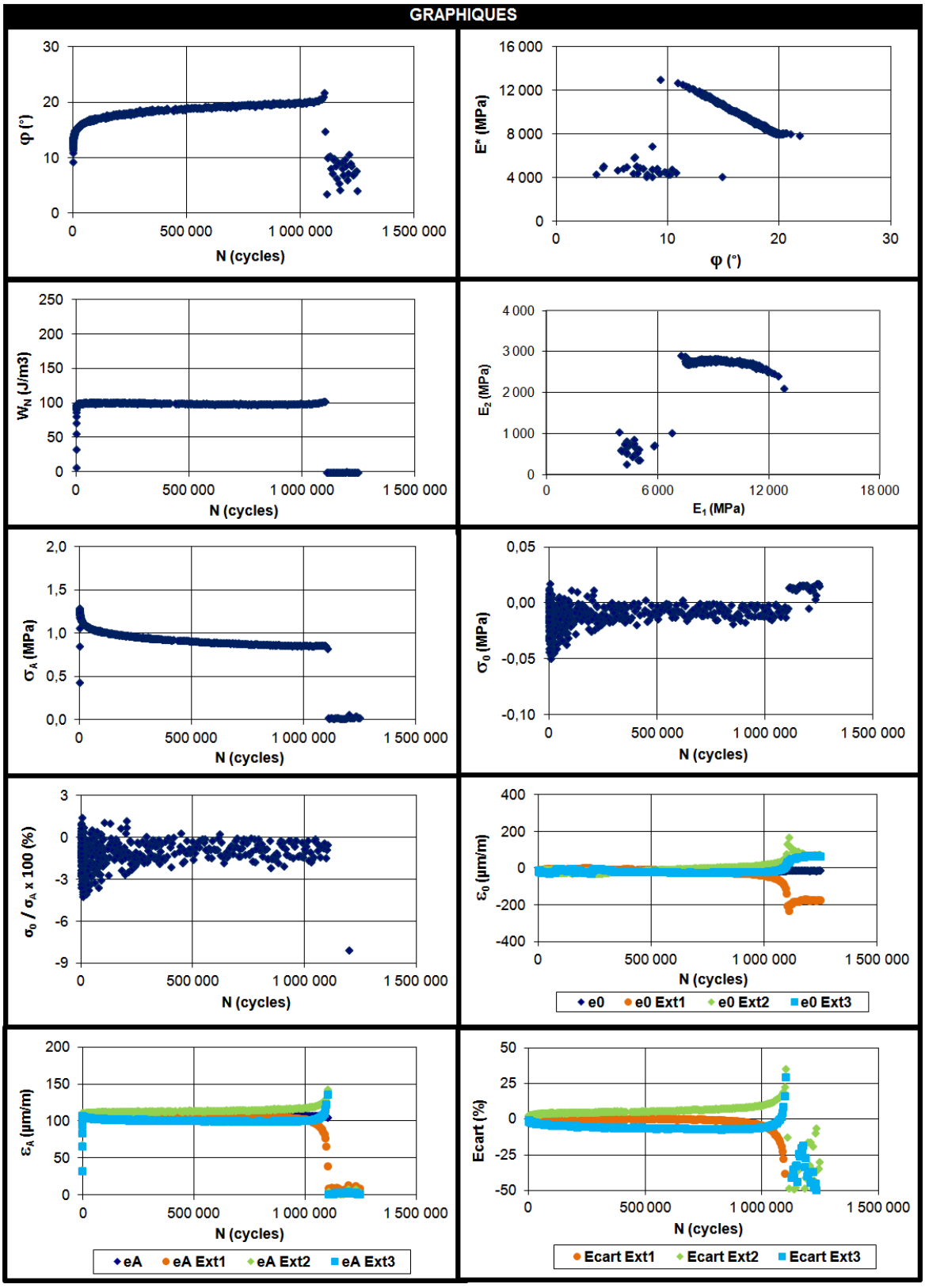
DURÉES DE VIE SELON LES CRITÈRES DE RUPTURE

$\|E\|_{\text{Début de l'essai}}$ (MPa)	13 021	$N_{f\ max\phi}$ (cycles)	1 103 479
50% x $\|E\|_{\text{Début de l'essai}}$ (MPa)	6 510	$N_{f\ \Delta\varepsilon ax}$ (cycles)	1 093 464
$N_{f\ 50\%}$ (cycles)	1 103 479	$Nf_{\ II/III}$ (cycles)	1 098 472

GRAPHIQUES



PSE – 4,3% – 6B2 – 107µdef (suite)



PSE – 4,3% – 1B1 – 108µdef

INFORMATIONS GÉNÉRALES

Presse de sollicitation	MTS 858
Date - Heure	2011-11-15 - 16h57
Opérateur	FB
Données	
Type d'enrobé, bitume	EB-14, PG70-28
Éprouvette (n°)	1B1
Diamètre (mm)	78,8
Hauteur (mm)	119,1
Vi (%)	4,3
Fréquence ciblée (Hz)	10
T° ciblée (°C)	10
ε ciblée (µdef)	110

Valeurs mesurées	
Fréquence (Hz)	---
T° essai (°C)	9,7
ε réelle (µdef)	107,7

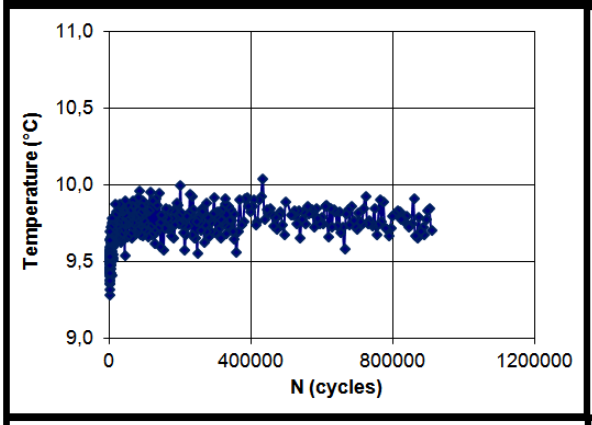
Observations

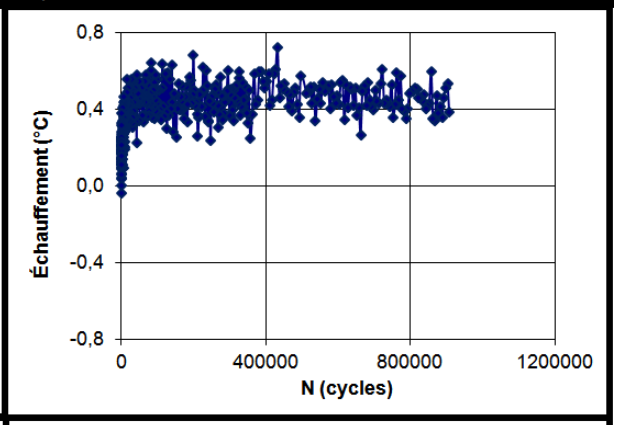
- Eau : saturation le 2011-11-15 à 12h53.
- Échantillon sans jauges, avec membrane et paraffine.
- Pilotage avec 3 extensomètres (50mm).
- Oubli du bouchon pour bloquer l'ouverture servant au passage des extensomètres.
- Rupture près du casque supérieur.
- Degré de saturation : 85-59% (26%).

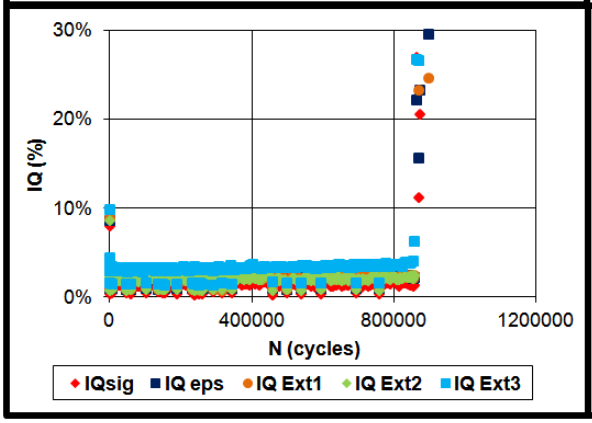
DURÉES DE VIE SELON LES CRITÈRES DE RUPTURE

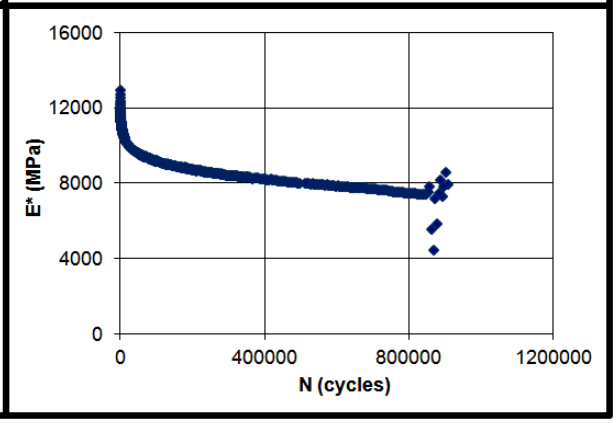
$\|E\|_{\text{Début de l'essai}}$ (MPa)	13 001	$N_{f\ max\phi}$ (cycles)	857 316
50% x $\|E\|_{\text{Début de l'essai}}$ (MPa)	6 500	$N_{f\ \Delta\varepsilon ax}$ (cycles)	782 235
$N_{f\ 50\%}$ (cycles)	862 322	$Nf_{\ II/III}$ (cycles)	819 776

GRAPHIQUES

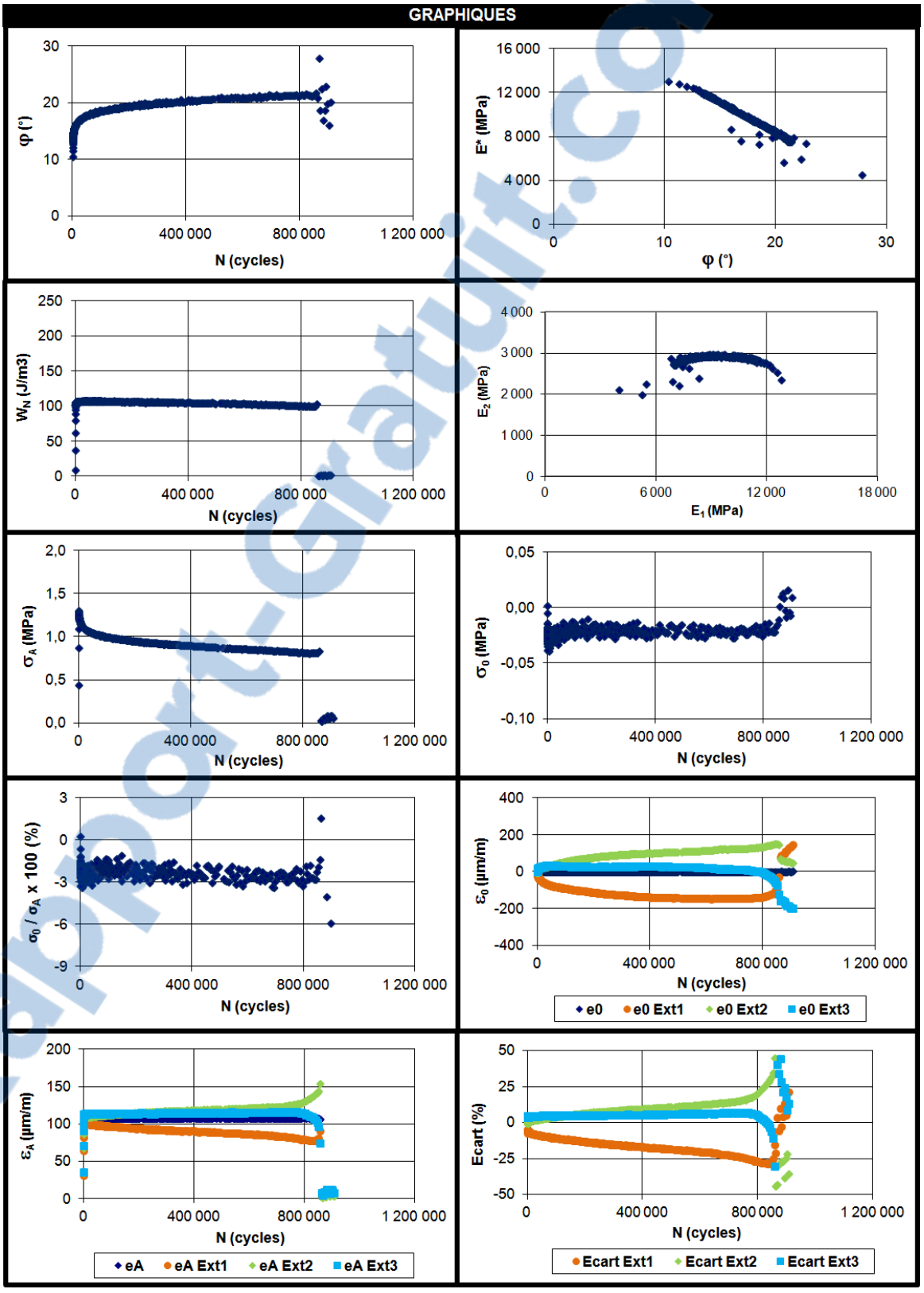








PSE – 4,3% – 1B1 – 108µdef (suite)



Rapport-Gratuit.com

PSE – 4,0% – 9B1 – 117µdef

INFORMATIONS GÉNÉRALES

Presse de sollicitation	MTS 858
Date - Heure	2011-11-07 - 15h09
Opérateur	FB
Données	
Type d'enrobé, bitume	EB-14, PG70-28
Éprouvette (nº)	9B1
Diamètre (mm)	78,8
Hauteur (mm)	121,7
Vi (%)	4,0
Fréquence ciblée (Hz)	10
Tº ciblée (ºC)	10
ε ciblée (µdef)	120

Valeurs mesurées	
Fréquence (Hz)	---
Tº essai (ºC)	10,1
ε réelle (µdef)	117,2

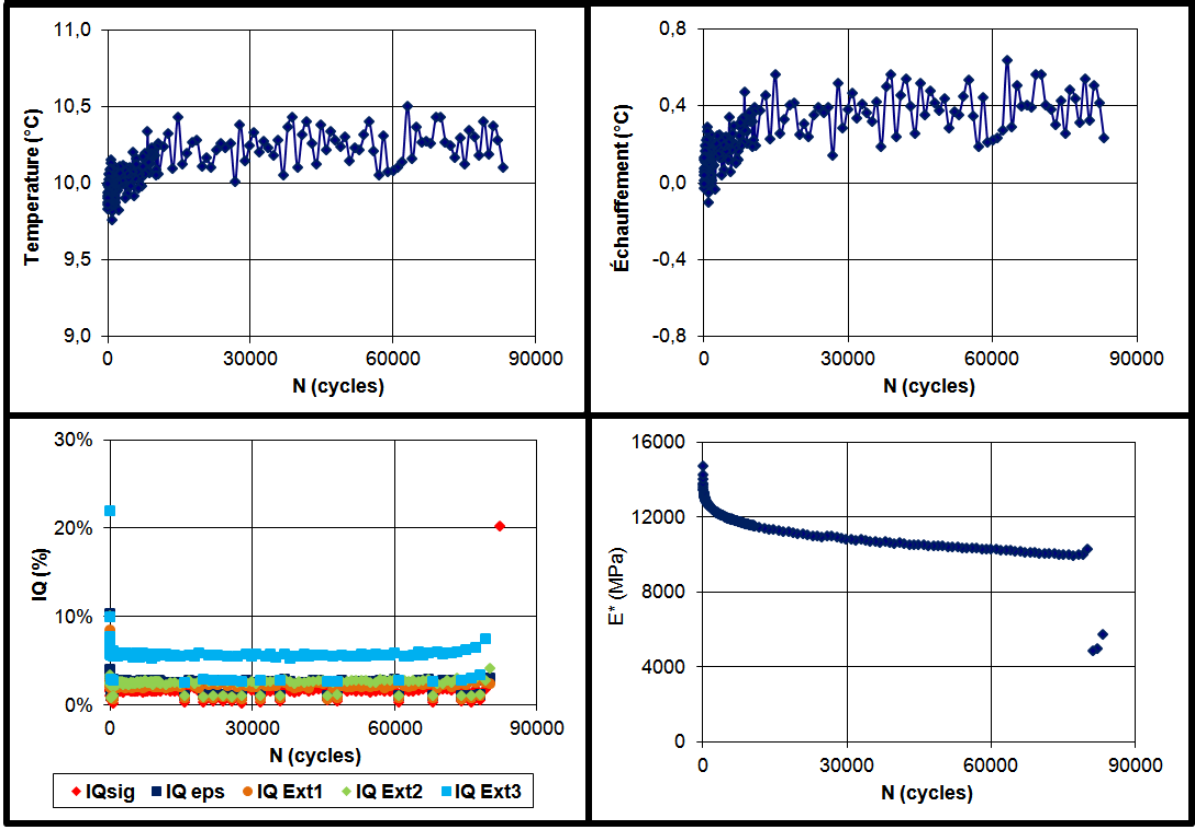
Observations

- Eau : saturation le 2011-11-10 à 12h14.
- Échantillon sans jauges, avec membrane et paraffine.
- Pilotage avec 3 extensomètres (50mm).
- Oubli du bouchon pour bloquer l'ouverture servant au passage des extensomètres.
- Rupture de l'échantillon près du casque supérieur.
- Degré de saturation : 100-98% (2%).
- Teneur en air : volumétrique : 3,52%; hydrostat. : 3,96%; considérée: 3,52% (moins de vides).

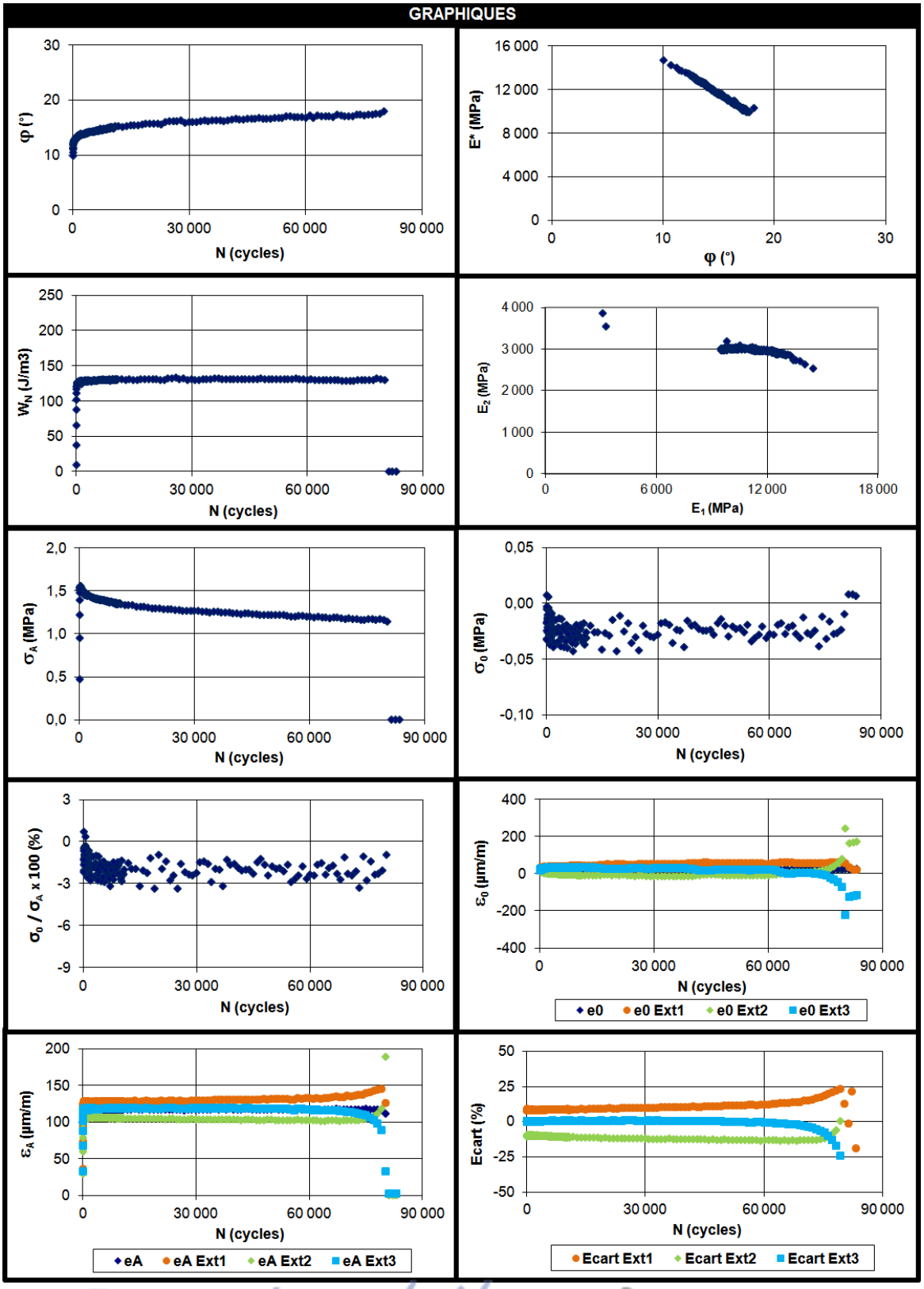
DURÉES DE VIE SELON LES CRITÈRES DE RUPTURE

$IEI_{\text{Début de l'essai}}$ (MPa)	14 725	$N_{f\ max\phi}$ (cycles)	81 107
50% x $IEI_{\text{Début de l'essai}}$ (MPa)	7 362	$N_{f\ \Delta\varepsilon ax}$ (cycles)	80 099
$N_{f\ 50\%}$ (cycles)	81 107	$Nf_{\ II/III}$ (cycles)	80 603

GRAPHIQUES



PSE – 4,0% – 9B1 – 117µdef (suite)



Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

PSE – 4,9% – 9D2 – 111µdef

INFORMATIONS GÉNÉRALES

Presse de sollicitation	MTS 858
Date - Heure	2011-11-17 - 18h18
Opérateur	SL
Données	
Type d'enrobé, bitume	EB-14, PG70-28
Éprouvette (n°)	9D2
Diamètre (mm)	78,8
Hauteur (mm)	121,1
Vi (%)	4,9
Fréquence ciblée (Hz)	10
T° ciblée (°C)	10
ε ciblée (µdef)	115

Valeurs mesurées	
Fréquence (Hz)	---
T° essai (°C)	10,0
ε réelle (µdef)	110,7

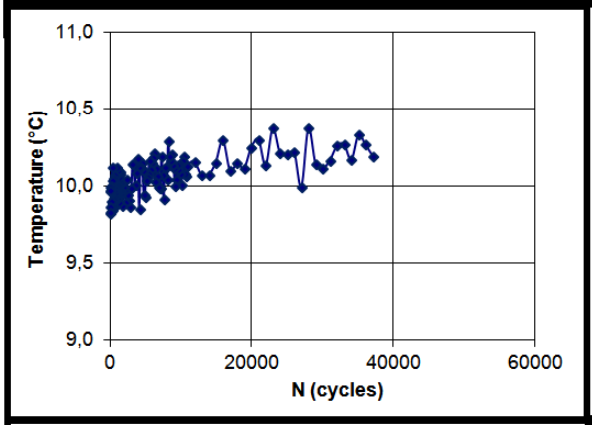
Observations

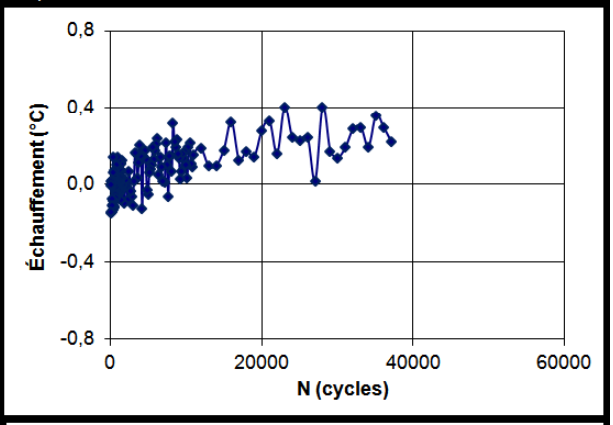
- Eau : saturation le 2011-11-17 à 13h00.
- Échantillon sans jauges, avec membrane et paraffine.
- Pilotage avec 3 extensomètres (50mm).
- Rupture dans le 1/3 supérieur.
- Degré de saturation : 98-93% (5%).
- Teneur en air : volumétrique : 4,90%; hydrostat. : 5,22%; considérée : 4,90% (moins de vides).

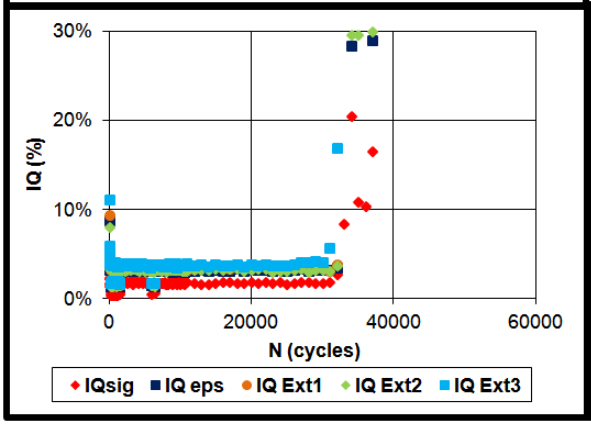
DURÉES DE VIE SELON LES CRITÈRES DE RUPTURE

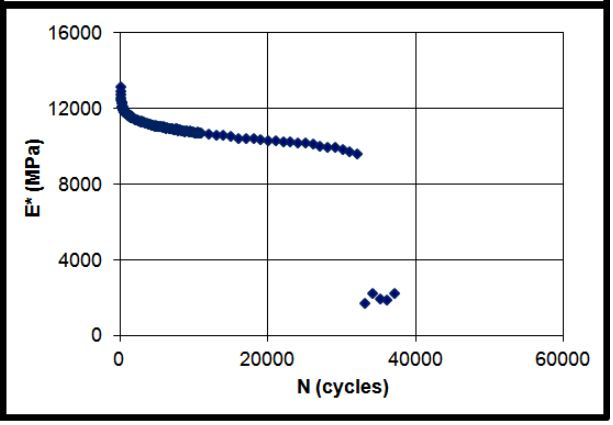
$\|E\|_{\text{Début de l'essai}}$ (MPa)	13 183	$N_{f\ max\phi}$ (cycles)	32 013
50% x $\|E\|_{\text{Début de l'essai}}$ (MPa)	6 591	$N_{f\ \Delta\varepsilon ax}$ (cycles)	32 013
$N_{f\ 50\%}$ (cycles)	33 019	$Nf_{\ II/III}$ (cycles)	32 013

GRAPHIQUES

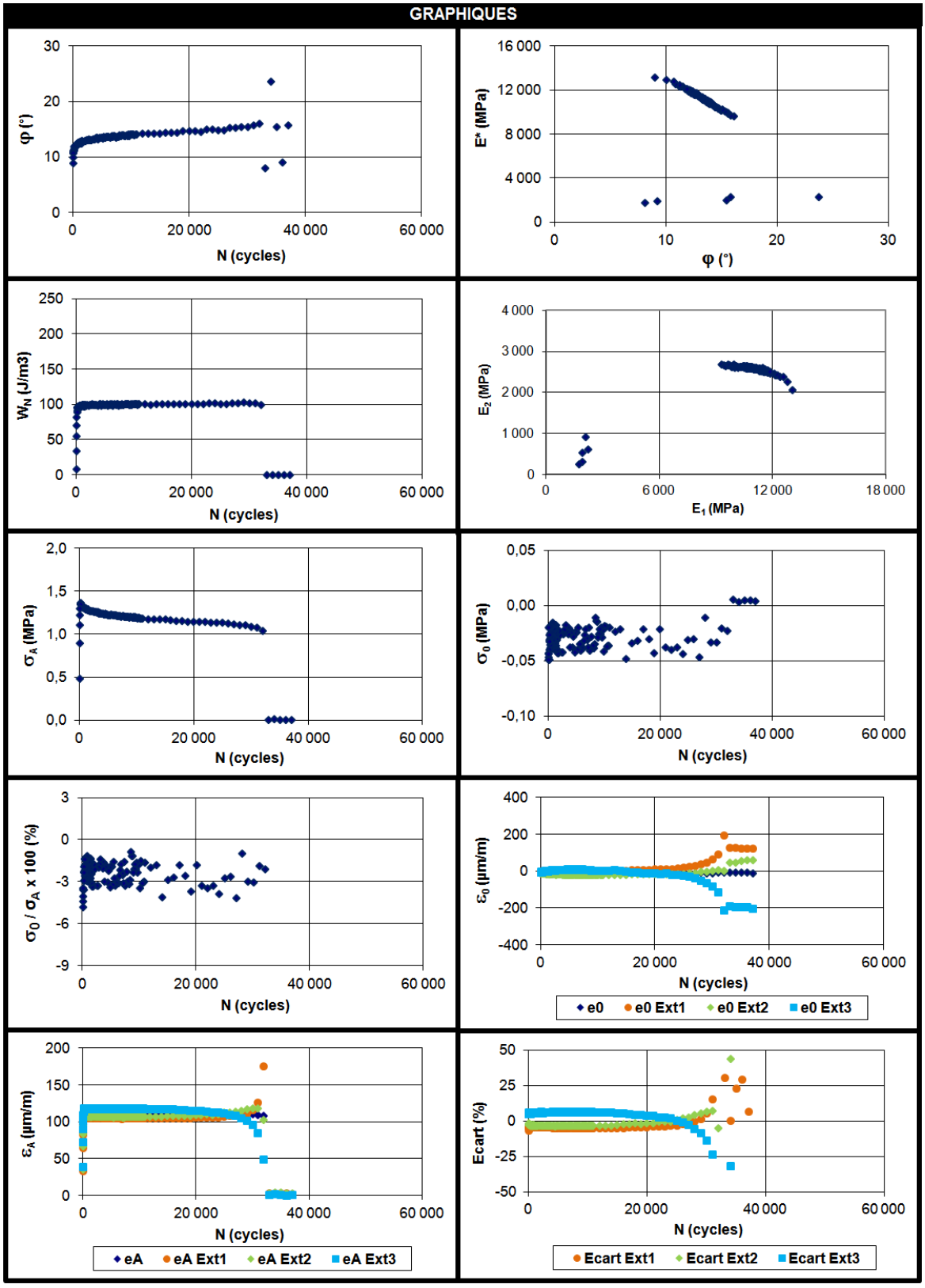








PSE – 4,9% – 9D2 – 111µdef (suite)



LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AASHTO. 1993. *Guide for Design of Pavement Structures*, Washington (DC) : American Association of State Highway and Transportation Officials.

AASHTO. 2004. *Standard Method of Test for Viscosity Determination of Asphalt Binder Using Rotational Viscometer*, AASHTO T 316-04. Washington (DC) : American Association of State Highway and Transportation Officials, 5 p.

AASHTO. 2008. *Standard Method of Test for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR)*, AASHTO T 313-08. Washington (DC) : American Association of State Highway and Transportation Officials, 21 p.

AASHTO. 2009a. *Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)*, AASHTO T 315-09. Washington (DC) : American Association of State Highway and Transportation Officials, 32 p.

AASHTO. 2009b. *Standard Method of Test for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)*, AASHTO T 240-09. Washington (DC) : American Association of State Highway and Transportation Officials, 11 p.

AASHTO. 2010a. *Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)*, AASHTO TP 70-10. Washington (DC) : American Association of State Highway and Transportation Officials, 9 p.

AASHTO. 2010b. *Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt (HMA)*, AASHTO R 30-02 (2010). Washington (DC) : American Association of State Highway and Transportation Officials, 5 p.

AASHTO. 2011a. *Standard Method of Test for Determining the Fatigue Life of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending*, AASHTO T 321-07 (2011). Washington (DC) : American Association of State Highway and Transportation Officials, 11 p.

AASHTO. 2011b. *Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)*, AASHTO T 342-11. Washington (DC) : American Association of State Highway and Transportation Officials, 19 p.

AASHTO. 2012. *Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)*, AASHTO R 28-12. Washington (DC) : American Association of State Highway and Transportation Officials, 10 p.

AFNOR. 1992a. *Essais relatifs aux chaussées - Préparation des mélanges hydrocarbonés, Partie 3 : Confection d'éprouvettes dans un bloc de mélange hydrocarboné*, La Plaine Saint-Denis Cedex, France : Association Française de Normalisation, 7 p.

AFNOR. 1992b. *Essais relatifs aux chaussées - Mesures des caractéristiques rhéologiques des mélanges hydrocarbonés, Partie 2 : Détermination du module complexe par flexion sinusoïdale*, NF P 98-260-2. La Plaine Saint-Denis Cedex, France : Association Française de Normalisation, 12 p.

AFNOR. 2000. *Essais relatifs aux chaussées - Mesures des caractéristiques rhéologiques des mélanges hydrocarbonés, Partie 1 : Détermination du module et de la perte de linéarité en traction indirecte*, NF P 98-260-1. La Plaine Saint-Denis Cedex, France : Association Française de Normalisation, 16 p.

AFNOR. 2001. *Essais relatifs aux chaussées - Détermination de la résistance en fatigue des mélanges hydrocarbonés, Partie 1 : Essai par flexion deux points à amplitude de flèche constante sur éprouvettes trapézoïdales isocèles*, NF P 98-261-1. La Plaine Saint-Denis Cedex, France : Association Française de Normalisation, 17 p.

AFNOR. 2003. *Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 29 : Détermination des dimensions des éprouvettes d'enrobés hydrocarbonés*, NF EN 12697-29. La Plaine Saint-Denis Cedex, France : Association Française de Normalisation, 9 p.

AFNOR. 2004a. *Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 26 : Module de rigidité*, NF EN 12697-26. La Plaine Saint-Denis Cedex, France : Association Française de Normalisation, 41 p.

AFNOR. 2004b. Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 33 : Confection d'éprouvettes au compacteur de plaque, NF EN 12697-33. La Plaine Saint-Denis Cedex, France : Association Française de Normalisation, 23 p.

AFNOR. 2005. *Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 24 : Résistance à la fatigue*, NF EN 12697-24. La Plaine Saint-Denis Cedex, France : Association Française de Normalisation, 54 p.

Agal, Tarek. 2005. « Développement d'un catalogue de dimensionnement structural des chaussées pour la Ville de Montréal ». Mémoire, août 2005, École de technologie supérieure, Montréal, 210 p.

AIPCR. 1995. « Enrobés bitumineux à haute résistance à l'orniérage par fluage ». In *XX^{ème} Congrès mondial de la Route*. Association internationale permanente des Congrès de la route, Comité technique C8 de l'AIPCR. (Montréal, 4-8 septembre 1995), 89 p.

Aïtcin, C., G. Jolicoeur et M. Mercier. 1992. *Technologie des granulats*, 2ème édition. Les éditions « Le Griffon d'argile ». 386 p.

Akyurt, M., G. Zaki et B. Habeebullah, « Freezing phenomena in ice-water systems ». *Energy Conversion and Management*, vol. 43, n° 14, p. 1773-1789.

Alvarez, A. E., N. Macias et L. G. Fuentes. 2012. « Analysis of connected air voids in warm mix asphalt ». *Dyna*, n° 172, p. 29-37.

Ambassa, Zoa, Fatima Allou, Christophe Petit, Robert Medjo Eko. 2012. « Analyse de la sensibilité du modèle de fatigue multilinéaire pour la prédiction de la durée de vie des chaussées bitumineuses sous chargement multi-essieux ». In *XXXe Rencontres AUGC-IBPSA*. (Chambéry, Savoie, 6 au 8 juin 2012), 10 p.

Anderson, K., T. Christison et C. Johnston. 1999. *Low temperature pavement performance, An evaluation using C-SHRP test road data*. Coll. « TAC », Project no 95-27. Ottawa (Ont.) : Transportation Association of Canada, 211 p.

Andullah, Waddah S., Mohammed Taleb Obaidat et Nazem M. Abu-Sa'da. 1998. « Influence of aggregate type and gradation on voids of asphalt concrete pavements ». *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 10, n° 2, p. 76-85.

Asphalt Institute. 2007. *Moisture Sensitivity, Manual MS-24*. Coll. « Asphalt Institute». 42 p.

ASTM. 1992. *Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing*, ASTM C666-92. West Conshohocken (PA) : American Society for Testing and Materials, 6 p.

ASTM. 1997. *Standard Test Method for Specific Gravity and Density of Semi-Solid Bituminous Materials (Pycnometer Method)*, ASTM D70-97. West Conshohocken (PA) : American Society for Testing and Materials, 3 p.

ASTM. 2003a. *Standard Test Method for Performance characteristics of metallic bonded resistance strain gages*, ASTM E 251-92 (Reapproved 2003),. West Conshohocken (PA) : American Society for Testing and Materials, 20 p.

ASTM. 2003b. *Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals*, ASTM C 672/C 672M-03,. West Conshohocken (PA) : American Society for Testing and Materials, 3 p.

ASTM. 2009. *Standard Specification for Mineral Filler For Bituminous Paving Mixtures*, ASTM D242/D242M-09. West Conshohocken (PA) : American Society for Testing and Materials, 2 p.

ASTM. 2010a. *Standard Test Method for Determining Fatigue Failure of Compacted Asphalt Concrete Subjected to Repeated Flexural Bending*, ASTM D7460-10. West Conshohocken (PA) : American Society for Testing and Materials, 14 p.

ASTM. 2010b. *Standard Practices for Force Verification of Testing Machines*, ASTM E4-10. West Conshohocken (PA) : American Society for Testing and Materials, 10 p.

ASTM. 2010c. *Standard Practice for Verification and Classification of Extensometer Systems*, ASTM E83-10a. West Conshohocken (PA) : American Society for Testing and Materials, 14 p.

ASTM. 2012. *Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester*, ASTM D92-12b. West Conshohocken (PA) : American Society for Testing and Materials, 11 p.

ASTM. 2013. *Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials*, ASTM D5/D5M-13. West Conshohocken (PA) : American Society for Testing and Materials, 4 p.

Baaj, H. 2002. « Comportement des matériaux granulaires traité aux liants hydrocarbonés ». Thèse de doctorat en mécanique, énergétique, acoustique et génie Civil, ENTPE-INSA Lyon, France, 248 p.

Baaj, Hassan, Hervé Di Benedetto et Pierre Chaverot. 2005. « Effect of binder characteristics on fatigue asphalt pavement using an intrinsic damage approach ». *Journal of Road Materials and Pavement Design*, vol. 6, n° 2, p. 147-174.

Bagampadde, Umaru, Ulf Isacsson et Badru M. Kiggundu. 2004. « Classical and Contemporary Aspects of Stripping in Bituminous Mixes: State oh the art ». *Journal of Road Materials and Pavement Design*, vol. 5, n° 1, p. 7-43.

Bager, D. H. et E. J. Sellevold. 1986a. « Ice formation in hardened cement paste, Part I – Room temperature cured with variable moisture content ». *Cement and concrete research*, vol. 16, p. 709-720.

Bager, D. H. et E. J. Sellevold. 1986b. « Ice formation in hardened cement paste, Part II – Drying and resaturation on room temperature cured pastes ». *Cement and concrete research*, vol. 16, p. 835-844.

Bager, D. H. et E. J. Sellevold. 1987. « Ice formation in hardened cement paste, Part III – Slow resaturation of room temperature cured pastes ». *Cement and concrete research*, vol. 17, p. 1-11.

Bahia, Hussain U. et David A. Anderson. 1995. « Strategic highway research program, Binder rheological parameters: Background and comparison with conventional properties ». *Transportation Research Record*, n° 1488, p. 32-39.

Bazant, Z. P., J. C. Chern, A. M. Rosenberg et J. M. Gaidis. 1988. « Mathematical model for freeze-thaw durability of concrete ». *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 71, n° 9, p. 776-783.

Bikerman, J. J. 1960. « The Rheology of Adhesion ». *Rheology, Theory and Application*, vol. 3, 17 p.

Bing, Hui et Wei Ma. 2011. « Laboratory investigation of the freezing point of saline soil ». *Cold Regions Science and Technology*, n° 67, p. 79-88.

BNQ. 1987. *Sols : Analyse granulométrique des sols inorganiques*, NQ 2501-025. Québec (QC) : Bureau de normalisation du Québec, 25 p.

BNQ. 2002. *Travaux de génie civil : Granulats*, NQ 2560-114/2002. Québec (QC) : Bureau de normalisation du Québec, 70 p.

Bouey, Didier et Denis Gelin. 1991. « Verglas, mode d'emploi ! ». Note d'information chaussées-dépendances. En ligne. n° 56. <catalogue.setra.fr/documents/Cataloguesetra/0000/Dtrf-0000650/DT650.pdf>. Consulté le 6 janv. 2013.

Brown, E. R., Prithvi S. Kandhal, Freddy L. Roberts, Y. Richard Kim et Dah-Yinn Lee. 2009. *Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction*, 3e éd. Éditeur « Lanham, Md. : NAPA Research and Education Foundation ». 720 p.

Burgess, R. A., O. Kopvillem et F. D. Young. 1971. « Ste-Anne test road - Relationship between predicted fracture temperatures and low temperature field performance ». In *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, vol. 40, p. 148-193.

Caro, S., E. Masad, A. Bhasin et D. N. Little. 2008. « Moisture susceptibility of asphalt mixtures, Part 1: mechanisms ». *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 9, n° 2, p. 81-98.

Carter, Alan. 2002. « Rhéologie en petite déformation des enrobés bitumineux et mesure de leur résistance à basse température à partir de l'essai TSRSTS ». Mémoire de maîtrise en génie de la construction, Montréal, École de technologie supérieure, 235 p.

Carter, Alan et Daniel Perraton. 2002. « La mesure du module complexe des enrobés bitumineux ». In *2e Conférence spécialisée en génie des matériaux de la Société canadienne de génie civil*. (Montréal, Canada, 5 au 8 juin 2002), 10 p.

RapportGratuit.com

Carter, Alan et Daniel Perraton. 2010a. *MGC-922 : Les matériaux bitumineux, Formulation, Fabrication et mise en place*. Programme de maîtrise en génie de la construction. Montréal : École de technologie supérieure.

Carter, Alan et Michel Paradis. 2010b. « Laboratory Characterisation of the Evolution of the Thermal Cracking Resistance with Freeze-thaw Cycles ». In *11th International Conference on Asphalt Pavements 2010*. (Nagoya, Japan, 1-6 August 2010), 10 p.

Castañeda Pinzon, E. A. 2007. *Contribution de méthodes non destructives à l'évaluation de l'effet de l'eau sur les enrobés bitumeux*. Coll. « Laboratoire Central des Ponts et Chausées (LCPC) ». Paris, France, 154 p.

CEI. 2007. *Essais d'environnement – Partie 3-11 : Documentation d'accompagnement et guide – Calcul de l'incertitude des conditions en chambres d'essais climatiques*, CEI 60068-3-11. Worcester (MA) : Commission Electrotechnique Internationale, 36 p.

Chabot, Armelle, Olivier Chupin, Lydie Deloffre et Denis Duhamel. 2010. « ViscoRoute 2.0 A ». *Journal of Road Materials and Pavement Design*, vol. 11, n° 2, p. 227-250.

Charpentier, S. 1992. « Mesure cryoscopique du potentiel de l'eau dans un sol ». *Science du sol*, vol. 30, n° 1, p. 49-56.

Charvet, Benoît. 2003. « Dimensionnement de chaussées flexibles à Montréal vis-à-vis de la fissuration par retrait thermique ». Mémoire de maîtrise en génie de la construction, Montréal, École de technologie supérieure, 140 p.

Chatterji, S. 1999. « Aspects of freezing process in porous material-water system. Part 2. Freezing and properties of frozen porous materials ». *Cement and concrete research*, vol. 29, n° 5, p. 781-784.

Chauvin, J. J. 1990. « L'essai de module complexe utilisé pour la formulation des enrobés ». In *Mechanical Tests for Bituminous Mixes : Characterization, Design and Quality : Proceedings of the Fourth International RILEM Symposium*, p. 356-370. Taylor & Francis.

Chen, Jian-Shiuh, Kuei-Yi Lin et Sian-Yun Young. 2004. « Effects of Crack Width and Permeability on Moisture-Induced Damage of Pavements ». *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 16, n° 3, p. 276-282.

Chevassu, G. 1969. « Influence des caractéristiques pétrographiques de quelques roches sur leur résistance à l'attrition ». *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, n° 39, p. 65-72.

CNRC. 1978. « CBD-191-F. Produits chimiques pour la fonte de la neige et de la glace autour des bâtiments ». In *Conseil national de recherches Canada.* En ligne. < http://archive.nrc-cnrc.gc.ca/fra/idp/irc/dcc/digest-construction-191.html>. Consulté le 31 janv. 2010.

Cooley, L. Allen, E. Ray Brown et Saeed Maghsoodloo. 2001. *Development of critical field premeability and pavement density values for coarse-graded superpave pavements*. Coll. « NCAT Report », NCAT Report 01-03. Auburn (AL) : Auburn University, National Center for Asphalt Technology, 18 p.

Corté, Jean-François et Hervé Di Benedetto. 2004. *Matériaux routiers bitumineux 1 : Description et propriétés des constituants*. Publication « Hermes-Science, Lavoisier ». 234 p.

Cox, Gordon F. N. 1983. « Thermal expansion of saline ice ». *Journal of Glaciology*, vol. 29, n° 103, p. 425-432.

Crawford, R. J. 1998. *Plastics Engineering*, 3e éd. Publisher « Elsevier Butterworth-Heinemann ». 505 p.

CSA. 2004. *Béton : Constituants et exécution des travaux/Méthodes d'essai et pratiques normalisées pour le béton*, A23.1-04/A23.2-04. Mississauga (ON) : Canadian Standards Association, 506 p.

Curtis, Christine W., Keith Ensley et Jon Epps. 1993. *Fundamental Properties of Asphalt-Aggregate Interactions Including Adhesion and Absorption*. Coll. « SHRP », Report no SHRP-A-341. Washington (DC) : Strategic Highway Research Program, 614 p.

Deacon, J. A., A. A. Tayebali, G. M. Rowe et C.L. Monismith. 1995. « Validation of SHRP A-003A Flexural Beam Fatigue Test ». In *ASTM STP 1265, Engineering Properties of Asphalt Mixtures and the Relationship to their Performance*, sous la dir. de Gerald A. Huber et Dale S. Decker, p. 21-36. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.

Delaporte, Brice, Hervé Di Benedetto, Pierre Chaverot et Gilles Gauthier. 2007. « Linear Viscoelastic Properties of Bituminous Materials: from Binders to Mastics ». In *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*. (San Antonio, 11-14 marsh 2007), vol. 76, p. 455-494.

Di Benedetto, Hervé. 1990. « Nouvelle approche du comportement des enrobés bitumineux: résultats expérimentaux et formulation rhéologique ». Mechanical Tests for Bituminous Mixes, Characterization, Design and Quality Control. In *Proceedings of the Fourth Rilem Symposium*. (Budapest, 23-25 Oct. 1990), p. 387-401.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Di Benedetto, H., A. A. Soltani et P. Chaverot. 1996. « Fatigue damage for bituminous mixtures, A pertinent approach ». In *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings*. (Baltimore, 18-20 marsh 1996), vol. 65, p. 142-158.

Di Benedetto, H., C. de La Roche et L. Francken. 1997a. « Fatigue of bituminous mixtures : different approaches and rilem interlaboratory tests ». *In 5th RILEM Symposium on Mechanical Tests for Bituminous Materials*. (Lyon, may 14-16, 1997), p. 15-26.

Di Benedetto, H. et M. Neifar. 1997b. « Coefficients de dilatation et de contraction thermiques d'un enrobé bitumineux avec et sans chargement mécanique ». In *Proceedings of the 5th International RILEM Symposium on Mechanical Tests for Bituminous Materials*. (Lyon, may 14-16, 1997), p. 421-428.

Di Benedetto, Hervé, Chantal de La Roche, Hassan Baaj et A. Pronk. 2003. « Fatigue of bituminous mixtures: different approaches and RILEM group contribution». In *Sixth International RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials*. p. 15-38.

Di Benedetto, H., C. de La Roche, H. Baaj, A. Pronk et R. Lundström. 2004. « Fatigue of bituminous mixtures ». *Materials and Structures*, vol. 37, n° 3, p. 202-216.

Di Benedetto, Hervé et Jean-François Corté. 2005. *Matériaux routiers bitumineux 2 : Constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges*. Publication « Hermes-Science, Lavoisier ». 288 p.

Di Benedetto, Hervé, Quang Tuan Nguyen et Cédric Sauzéat. 2011. « Nonlinearity, Heating, Fatigue and Thixotropy during cyclic loading of Asphalt Mixtures ». *Journal of Road Materials and Pavement Design*, vol. 12, n° 1, p. 129-158.

Doan, T. H. 1977. « Les études de fatigue des enrobés bitumineux au LCPC ». *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, spécial V, p. 215-228.

Doerler, Rémi. 2008. *Formation concernant les jauges de déformation*. Vaulx-en-Velin (France) : Doerler mesures. Fin de l'année 2008.

Domaschuk, L. P. S. Skarsgard et R. H. Christianson. 1964. « Cracking of asphalt pavements due to thermal contraction ». In *Canadian Good Roads Association Proc*. (Montréal, 19-22 oct. 1964), p. 395-407.

Doré, Guy, Jean-Marie Konrad et Marius Roy. 1997. « Role of Deicing Salt in Pavement Deterioration by Frost Action ». *Transportation Research Record*, n° 1596, p. 70-75.

Doré, Guy et Hannele K. Zubeck. 2009. *Cold Regions Pavement Engineering*. Publication « ASCE Press ». The McGraw-Hill Companies, 432 p.

Doubbaneh, E. 1995. « Comportement mécanique des enrobés bitumineux des petites aux grandes déformations ». Thèse de doctorat, INSA Lyon, France, 218 p.

Environnement Canada. 2004. « Meilleures pratiques de gestion des sels de voirie dans l'entretien des routes privées, des stationnements et trottoirs ». En ligne. 21 p. Actuellement indisponible. Consulté le 29 avril 2011.

Fabbri, Antonin. 2006. « Physico-mécanique des matériaux cimentaires soumis au gel-dégel ». Thèse de doctorat en génie Civil, Université de Marne-La-Vallée, France, 261 p.

Fagerlund, G. 1971. « Degré critique de saturation. Un outil pour l'estimation de la résistance au gel des matériaux de construction ». *Matériaux et constructions*, vol. 4, n° 23, p. 271-285.

Fagerlund, G. 1995. *Freeze-thaw resistance of concrete: Destruction mechanisms, concrete technology, test methods, quality controls*. Report TVBM-3060. Lund (Sweden) : Div. of Building Materials LTH - Lund University, 73 p.

Fagerlund, G. 1997. *Effect of self-desiccation on the internal frost resistance of concrete*. Report TVBM-3075. Lund (Sweden) : Div. of Building Materials LTH - Lund University, p. 227-238.

Feistel, R. et W. Wagner. 2006. « A new equation of state for H2O ice Ih ». *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, vol. 35, n° 2, p. 1021-1047.

Feng, Decheng, Junyan Yi, Dongsheng Wang et Liangliang Chen. 2010. « Impact of salt and freeze–thaw cycles on performance of asphalt mixtures in coastal frozen region of China ». *Cold Regions Science and Technology*, n° 52, p. 34-41.

Finke, T. E. et T. G. Heberling. 1978. « Determination of Thermal-expansion Characteristics of Metals Using Strain Gages ». *Experimental Mechanics*, vol. 18, n° 4, p. 155-158.

Fortin, Guillaume. 2010. « Variabilité et fréquence des cycles de gel-dégel dans la région de Québec, 1977-2006 ». *Le Géographe canadien*, vol. 54, n° 2, p. 196-208.

Fraser, J. Keith. 1959. « Freeze-Thaw Frequencies and Mechanical Weathering in Canada ». *Arctic Institute of North America*, vol. 12, n° 1, p. 40-53.

Fromm, H. J. 1974. « The mechanisms of asphalt stripping from aggregate surfaces ». In *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings*, vol. 43, p. 191-223.

Fukusako, S. 1990. « Thermophysical properties of ice, snow,and sea ice ». *International Journal of Thermophysics*, vol. 11, n° 2, p. 353-372.

Gagné, R., G. Hénault et J. Marchand. 1998. « In-situ and laboratory evaluation of chloride penetration and freeze-thaw durability of high-performance concrete slabs ». In *Concrete under severe conditions 2*, sous la dir. de O. E. Gjorv, K. Sakai et N. Banthia, p. 205-213. Trmso, Norway.

Gagnon, R. et S. J. Jones. 2001. « Elastic properties of ice ». In *Handbook of Elastic Properties of Solids, Liquids and Gases (Chapter 9)*, p. 229-257. Levy, Bass and Stern.

Gelin. D. 1989. « Je sale moins, je sale mieux, le pense-bête du parfait saleur ». Note d'information chaussées-dépendances. En ligne. n° 53. Publication : Service d'Études Techniques des Routes de Autoroutes (SETRA). <https://www.google.ca/#q=Je+sale+moins%2C+je+sale+mieux%2C+le+pense-b%C3%AAte+du+parfait+saleur>. Consulté le 6 janv. 2013.

Ghuzlan, Khalid A. et Samuel H. Carpenter. 2003. « Traditional Fatigue Analysis of Asphalt ConcreteMixtures ». In *Transportation Research Board :* 82th Annual Meeting. (Washington, D.C., Jan. 12-16, 2003), 25 p.

Ghuzlan, Khalid A. et Samuel H. Carpenter. 2006. « Fatigue damage analysis in asphalt concrete mixtures using the dissipated energy approach ». *Can. J. Civ. Eng.*, n° 33, p. 890-901.

Gilmore, Dennis W., James B. Darland, Larry M. Girdler, Lewelle W. Wilson et James A. Scherocman. 1985. « Changes in asphalt concrete durability resulting from exposure to multiple cycles of freezing and thawing ». *ASTM special technical publication*, n° 899, p. 73-88.

Goodrich, J. L. 1991. « Asphaltic binder rheology, asphalt concrete rheology and asphalt concrete mix properties ». In *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings*. (Seattle, 4-6 mars 1991), vol. 60, p. 80-120.

Gouvernement du Canada. 2008a. « Données des stations pour le calcul des normales climatiques au Canada de 1971 à 2000, Montréal/Pierre Elliot Trudeau Intl A ». In *Le site du Gourvenement du Canada.* En ligne. <http://climate.weather.gc.ca/climate_normals/results_e.html?stnID=5415&prov=&lang=e&dCode=1&dispBack=1&StationName=pierre_ell&SearchType=Contains&province=ALL&provBut=&month1=0&month2=12>. Consulté le 20 mars 2008.

Gouvernement du Canada. 2008b. « Données des stations pour le calcul des normales climatiques au Canada de 1971 à 2000, Scott ». In *Le site du Gourvenement du Canada.* En ligne. <http://climate.weather.gc.ca/climate_normals/results_f.html?stnID=5527&lang=f&dCode=1&StationName=SCOTT&SearchType=Contains&province=ALL&provBut=&month1=0&month2=12>. Consulté le 20 mars 2008.

Grellet, Damien. 2009. « Évaluation de l'impact de la pression et des types de pneus sur la résistance en fatigue des chaussées souples ». In *Infra*. (Mont-Tremblant, 16-18 nov. 2009), 14 p.

Harvey, John T. et Bor-Wen Tsai. 1996. « Effects of asphalt content and air void content on mix fatigue and stiffness ». *Transportation Research Record*, n° 1543, p. 38-45.

Hénault, G. 1995. « Étude de la durabilité in-situ et en laboratoire des bétons à haute performance avec et sans air entraîné face aux cycles de gel-dégel en présence de sels fondants ». Mémoire de maîtrise en génie civil, Sherbrooke, Université de Sherbrooke, 193 p.

Hicks, R. G. 1991. « Moisture damage in asphalt concrete ». Coll. « Transportation Research Board », National Cooperative Highway Research Program, Synthesis of Highway Practice, n° 175, 96 p.

Hivon, E.G., and Sego, D.C. 1990. « Determination of unfrozen water content in saline permafrost using Time-Domain-Reflectometry (TDR) ». In *5th Canadian Permafrost Conference*. (Quebec City, June 6-8, 1990), Nordicana, n° 54, pp. 257-262.

Hooks, C. C. et W. H. Goetz. 1964. *Laboratory thermal expansion measuring techniques applied to bituminous concrete : Informational Report*. Report FHWA/IN/JHRP-64/20, Joint Highway Research Project. Lafayette : Purdue University, 538 p.

Huang, Shin-Che, Raymond E. Robertson, Jan F. Branthaver et J. Claine Petersen. 2005. « Impact of Lime Modification of Asphalt and Freeze–Thaw Cycling on the Asphalt–Aggregate Interaction and Moisture Resistance to Moisture Damage ». *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 17, n° 6, p. 711-718.

Huet, C. 1963. « Etude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés ». Thèse de doctorat, Paris, Faculté des Sciences de l'Université de Paris, 69 p.

Huhtala, M., R. Alkio, J. Pihljamaki, M. Pienmaki et P. Halonan. 1990. « Behavior of bituminous materials under moving wheel loads ». In *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings*. (Albuquerque, Feb. 19-21 1990), p. 213-243.

Ishai, I. et J. Craus. 1977. « Effect of the filler on aggregate-bitumen adhesion properties in bituminous mixtures ». In *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings*, vol. 46, p. 228-258.

Janoo, V., J. Bayer et M. Walsh. 1993. *Thermal stress measurements in asphalt concrete*. Report CRREL 93-10. Hanover (NH) : Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 35 p.

Johannesson, B. 2010. « Dimensional and ice content changes of hardened concrete at different freezing and thawing temperatures ». *Cement and Concrete Composites*, vol. 32, n° 1, p. 73-83.

Jones, G. M., M. I. Darter et G. Littlefield G. 1968. « Thermal expansion-contraction of asphaltic concrete ». In *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, vol. 36, p. 673-702.

Kandhal, Prithvi S. et Ian J. Rickards. 2001. *Premature failure of asphalt overlays from stripping: Case histories*. Coll. « NCAT Report », NCAT Report 01-01. Auburn (AL) : Auburn University, National Center for Asphalt Technology, 40 p.

Kanitpong, Kunnawee et Hussain U. Bahia. 2003. *Evaluation of the extent of HMA moisture damage in Wisconsin as it relates to pavement performance*. Coll. « WisDOT », WisDOT Highway Research Study 0092-01-03. 83 p.

Kanitpong, Kunnawee, Craig H. Benson et Hussain U. Bahia. 2001. « Hydraulic Conductivity (Permeability) of Laboratory-Compacted Asphalt Mixtures ». *Transportation Research Record*, n° 1767, p. 25-32.

Kanitpong, Kunnawee. 2005. « Evaluation of the roles of adhesion and cohesion properties of asphalt binders in moisture damage of HMA ». Thèse de doctorat en en génie civil et environnement, Madison, University of Wisconsin, 215 p.

Kassem, Emad Abdel-Rahman. 2008. « Compaction effects on uniformity, moisture diffusion, and mechanical properties of asphalt pavements ». Thèse de doctorat, College Station, Texas A&M University, 289 p.

Kaufmann, J. P. 2004. « Experimental identification of ice formation in small concrete pores ». *Cement and Concrete Research*, vol. 34, n° 8, p. 1421-1427.

Kennedy, Thomas W., Freddy L. Roberts et Kang W. Lee. 1983. « Evaluation of moisture effects on asphalt concrete mixtures ». *Transportation Research Record*, n° 911, p. 134-143.

Kiggundu, Badru M. et Freddy L. Roberts. 1988. *Stripping in HMA mixtures, state-of-the-art and critical review of test methods*. Coll. « NCAT Report », NCAT Report 88-02. Auburn (AL) : Auburn University, National Center for Asphalt Technology, 49 p.

Konrad, J.-M. 1999. « Frost susceptibility related to soil index properties ». *Can. Geotech. J.*, vol. 36, p. 403-417.

Kozlowski, T. 2003. « A comprehensive method of determining the soil unfrozen water curves, 2. Stages of the phase change process in frozen soil-water system ». *Cold Regions Science and Technology*, vol. 36, p. 81-92.

Kozlowski, T. 2004. « Soil freezing point as obtained on melting ». *Cold Regions Science and Technology*, vol. 38, p. 93-101.

Kozlowski, T. 2007. « A semi-empirical model for phase composition of water in clay-water systems ». *Cold Regions Science and Technology*, vol. 49, p. 226-236.

Kozlowski, T. 2009. « Some factors affecting supercooling and the equilibrium freezing point in soil-water systems ». *Cold Regions Science and Technology*, vol. 59, n° 1, p. 25-33.

Kucharek, Tony. 2012. *Affinité bitume-granulat, additifs et techniques d'amélioration*. Montréal (QC) : Bitume Québec. Présentation PowerPoint, 37 diapositives.

Lamothe, Sébastien. 2004. « Enrobé grenu : Influence du dosage en filler et de l'ajout d'un sable roulé sur le couple ouvrabilité-orniérage ». Mémoire de maîtrise en génie de la construction, Montréal, École de technologie supérieure, 185 p.

Langlois, Pierre. 2001. *Enrobés*. [Notes du cours GCI-718]. Longueuil : Université de Sherbrooke.

Langlois, Pierre. 2006. *Formulation des enrobés : Méthode LC*. Montréal (QC) : Bitume Québec. Présentation PowerPoint, 76 diapositives.

Lee, Kang Won. 1982. « Prediction and evaluation of moisture effects on asphalt concrete mixtures in pavement systems ». Thèse de doctorat, Austin, University of Texas, 130 p.

Lefebvre, Marie. 2005. « Étude de la remontée des fissures dans un système de recouvrement : Étude métrologique du montage et essai avec un sytème à interface SMA ». Projet de fin d'étude (PFE), Génie civil, INSA Strasbourg, France, 134 p.

Lelièvre, André. 1994. *Les enrobés bitumineux*. Éditions « Le Griffon d'argile ». Sainte-Foy, Québec, 410 p.

Lesueur, Didier. 2002. « La Rhéologie des Bitumes : Principes et Modification ». *Rhéologie*, vol. 2, p. 1-30.

Lesueur, Didier. 2005. *Propriétés superficielles et interfaciales des liants*. Montréal (QC) : Bitume Québec. Présentation PowerPoint, 58 diapositives.

Letavernier, Gilles et J. C. Ozouf. 1987. « La gélifraction des roches et des parois calcaires ». *Bulletin de l'Association française pour l'étude du quaternaire*, vol. 24, n° 3, p. 139-145.

Lide, David R. 2000. *CRC Handbook of Chemistry and Physics,* 81st éd. Publication « CRC Press inc ». Boca Raton (Florida), 2556 p.

Littlefield, G. 1967. « Thermal expansion and contraction characteristics of Utah asphalt concretes ». In *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, vol. 36, p. 673-701.

Livet, Jean. 1998. « Fondants utilisés pour traiter les chaussées : Matériaux et techniques d'utilisation ». *Revue RGRA*, n°758, p. 28-31.

Lottman, R. P. 1982. « Predicting moisture-induced damage to asphaltic concrete, Field evaluation ». Coll. « Transportation Research Board », National Cooperative Highway Research Program, Synthesis of Highway Practice, n° 246, 55 p.

Lu, Quing et John T. Harvey. 2005. *Investigation of conditions for moisture damage in asphalt concrete and appropriate laboratory test methods*. Coll. « UCPRC », Research Report: UCPRC-RR-2005-15. Berkeley (CA) : University of California, Pavement Research Center, 333 p.

Mallick, R. B., L. A. Cooley, M. R. Teto, R. L. Bradbury et D. Peabody. 2001. « An evaluation of factors affecting permeability of Superpave designed pavements ». In *Transportation Research Board :* 80th Annual Meeting. (Washington, D.C., Jan. 7-11 2001), 25 p.

Mamlouk, Michael S., Matthew W. Witczak, Kamil E. Kaloush et Nasreen Hasan. 2005. « Determination of thermal properties of asphalt mixtures ». *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 33, n° 2, p. 1-9.

Marchand, J. 1993. « Contribution à l'étude de la détérioration par écaillage du béton en présence de sels fondants ». Thèse, Paris, École nationale des ponts et chaussées, 316 p.

Marchand, J., R. Gagné, S. Jacobsen, M. Pigeon et E. J. Sellevold. 1996. « La résistance au gel des bétons à haute performance ». *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 23, p. 1070-1080.

Martin, Amy Epps, Dale Rand, Dean Weitzel, Darren Tedford, Peter Sebaaly, Lerose Lane, Terrie Bressette, G. W. Maupin jr. 2003. « Field Experiences ». In *Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements, a National Seminar*. (San Diego, California, feb. 4-6, 2003), p. 229-258. Transportation Research Board.

Masad, E., V. Jandhyala, N. Dasgupta, N. Somadevan et N. Shashidhar. 2002. « Characterization of Air Void Distribution in Asphalt Mixes using X-ray Computed Tomography ». *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 14, n° 2, p. 122-129.

Masad, Eyad, Adhara Castelblanco et Bjorn Birgisson. 2006. « Effects of air void size distribution, pore pressure, and bond energy on moisture damage ». *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 34, n° 1, p. 1-9.

Mauduit, V., C. Mauduit, Nelly Vulcano-Greulleut et N. Coulon. 2007. « Dégradations précoces des couches de roulement bitumineuses à la sortie des hivers ». *Revue RGRA*, n°859, p. 99-104.

Mauduit, C., F. Hammoum, J. Piau, V. Mauduit, S. Ludwig et D. Hamon. 2010. « Quantifying Expansion Effects Induced by Freeze-Thaw Cycles in Partially Water Saturated Bituminous Mix Laboratory Experiments ». *Journal of Road Materials and Pavement Design*, vol. 11, n° SI, p. 443-457.

Maupin, G. W. Jr. 2009. « Field Evaluation of Moisture Damage in Asphalt Concrete ». In *Modeling of Asphalt Concrete*, sous la dir. de Y. Kim, p. 391-401. ASCE Press, The McGraw-Hill Companies.

Mehta, Y. A., S. A. Stoffels et D. W. Christensen. 1999. « Determination of coefficient of thermal contraction of asphalt concrete using indirect tensile test hardware ». In *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*. (Chicago, 8-10 marsh 1999), vol. 68, p. 349-368.

Mercado E. A. 2007. « Influence of fundamental material properties and air void structure on moisture damage of asphalt mixes ». Thèse de doctorat, College Station, Texas A&M University, 204 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, École de technologie supérieure, 349 p.

Mohamed, Afechkar. 2010. « Effet de la submersion prolongée sur la durée de vie des enrobés bitumineux ». In *Huitième congrès national de la route*. (Ifrane, 3-4 juin 2010), 16 p.

Mondher, Neifar. 1997. « Comportement thermomécanique enrobés, Expérimentation et modélisation ». Thèse de doctorat en mécanique, énergétique, acoustique et génie Civil, ENTPE-INSA Lyon, France, 306 p.

Monismith, C. L., G. A. Secor et K. E. Secor. 1965. « Temperature induced stresses and deformations in asphalt concrete ». In *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, vol. 34, p. 248-285.

Moughabghab, Z. 1994. « Étude de l'orniérage, de la fissuration thermique et du désenrobage dans les enrobes bitumineux ». Mémoire de maîtrise, Québec, Université Laval.

Rapport-Gratuit.com

Moutier, F. 1991. « Étude statistique de l'effet de composition sur comportement fatigue et module ». *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, n° 172, p. 33-41.

Moutier, F., T. H. Duan et J. J. Chauvin. 1988. « The effects of the formulation parameters on the mechanical behavior of mixes ». In *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings*, p. 213-243.

MTQ. 2005. *Enrobés : Formulations selon la méthode LC*. Coll. « Direction du laboratoire des chaussées ». Québec : Bibliothèque nationale du Québec, 101 p.

MTQ. 2007a. *Enrobés à chaud formulés selon la méthode de formulation du Laboratoire des chaussées*, Norme 4202, éd. 2007-12-15, Québec (QC) : Ministère des Transports du Québec, 13 p.

MTQ. 2007b. *Enrobés à chaud formulés selon le principe de la méthode Marshall*, Norme 4201, éd. 2007-12-15, Québec (QC) : Ministère des Transports du Québec, 12 p.

MTQ. 2012a. *Bitumes*, Norme 4101, éd. 2012-12-15, Québec (QC) : Ministère des Transports du Québec, 8 p.

MTQ. 2012b. *Cahier des charges et devis généraux : Construction et réparation : Infrastructures routières*, éd. 2012, Québec (QC) : Ministère des Transports du Québec, 287 p.

MTQ. 2013. *Recueil des méthodes d'essai LC*, éd. 2013-12-15, Québec (QC) : Ministère des Transports du Québec.

Nakaya, Ukichiro. 1958. « Visco-elastic properties of snow and ice in Greenland ice cap ». In *Dynamics of Snow and Ice Masses*, sous la dir. de Samuel C. Colbeck, p. 199-212. Academic Press, New York (NY).

Nam, Kitae et Hussain U. Bahia. 2004. « Effect of binder and mixture variables on glass transition behavior of asphalt mixtures ». In *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*. (Baton Rouge, 8-10 marsh 2004), vol. 73, p. 89-120.

Nam, Kitae et Hussain U. Bahia. 2004. « Effect of binder and mixture variables on glass transition behavior of asphalt mixtures ». In *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*. (Baton Rouge, 8-10 marsh 2004), vol. 73, p. 89-120.

Netterberg, F. et R.A. Bennet. 2004. « Blistering and cracking of airport runway surfacing due to salt crystallization ». In *Proceedings of the 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa*. (Sun City, 12-16 Sept. 2004), 19 p.

Nguyen, Mai Lan. 2009. « Étude de la fissuration et de la fatigue des enrobés bitumineux ». Thèse de doctorat, Lyon, ENTPE-INSA de Lyon, 312 p.

Nguyen, Quang Tuan, Hervé Di Benedetto et Cédric Sauzéat. 2012. « Determination of Thermal Properties of Asphalt Mixtures as Another Output from Cyclic Tension-Compression Test ». *Journal of Road Materials and Pavement Design*, vol. 13, n° 1, p. 85-103.

Nguyen, Tinh, Eric Byrd, Dale Bentz et Jim Seiler. 1996. *Development of a method for measuring water-stripping resistance of asphalt/siliceous aggregate mixtures*. Coll. « National Institute of Standards and Technology », Report NISTIR 5865. Gaithersburg (MD) : U. S. Department of Commerce, 50 p.

Obika, B. et R. J. Freer-Hewish. 1990. « Soluble salt damage to thin bituminous surfacings of roads and runways ». *Australian Road Research*, vol. 20, n° 4, p. 24-41.

Ojo, J. O., D. Fratta, H. U. Bahia et C. Daranga. 2008. « Thermo-volumetric properties of asphalt binders and mixtures ». In *Pavement Cracking : Mechanisms, Modeling, Detection, Testing and Case Histories*, sous la dir. de Andreas Loizos, Tom Scarpas et Imad L. Al-Qadi. (Chigago, 16-18 june 2008), p. 469-479. New York : CRC Press.

Olard, François et Hervé Di Benedetto. 2003. « General “2S2P1D” model and relation between the linear viscoelastic behaviors of bituminous binders and mixes ». *Journal of Road Materials and Pavement Design*, vol. 4, n° 2, p. 1-40.

Olard, François. 2003. « Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à basses températures ». Thèse de doctorat en mécanique, énergétique, acoustique et génie Civil, ENTPE-INSA Lyon, France, 221 p.

Osterkamp, T. E., G. C. Baker, B. T. Hamer, J. P. Gosink, J. K. Peterson et V. Gruo1. 1986. *Low temperature transverse crack in asphalt pavements in interior Alaska*. Report No AK-RD-86-26. Juneau (Alaska) : Alaska Department of Transportation and Public Facilities, 104 p.

Paradis, Michel. 2000. « L'étude des enrobés bitumineux en laboratoire, l'approche du ministère des Transports du Québec ». *Routes et transports*, vol. 29, n° 4, p. 21-25.

Paradis, Michel. 2002. *Les enrobés avec chaux hydratée : solution au désenrobage ?* Trois-Rivières (QC) : Bitume Québec. Présentation PowerPoint, 52 diapositives.

Paradis, Michel. 2006. *Les constituants des enrobés au Québec*. Montréal (QC) : Bitume Québec. Présentation PowerPoint, 85 diapositives.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

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 ». *Rev. Can. Genie civ.*, vol. 38, p. 1287-1299.

Peyronne, C., G. Caroff et C. Gilbert. 1991. *Dimensionnement des chaussées*, 2ème édition révisée et corrigée. Coll. « Cours de routes ». Paris : Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 244 p.

Picard, Jean-François. 2001. « L'influence de la propreté des gros granulats sur la performance des enrobés ». *Géoscope*. En ligne. Vol 3, n° 2. <www.ggl.ulaval.ca/fileadmin/ggl/documents/Geoscope/v3n2.pdf>. Consulté le 20 mars 2013.

Pigeon, M. et R. Pleau. 1995. *Durability of concrete in cold climates*, London : E & FN Spon, 244 p.

Pigeon, M., J. Marchand et R. Pleau. 1996. « Frost resistant concrete ». *Constructions and Building Materials*, vol. 10, n° 5, p. 339-348.

Porter, Byron W. et Thomas W. Kennedy. 1975. *Comparison of Fatigue Test Methods for Asphalt Materials*. Research Report 183-4. Austin (Texas) : Center for Highway Research, University of Texas at Austin, 132 p.

Ramond, G. 1977. « L'adhésivité aspects statique et dynamique ». *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, Spécial V, p. 13-21.

Rioux, Nelson. 1999. « Routes et structures : Impacts du gel sur les chaussées au Québec ». *Innovation Transports, Bulletin scientifique et technologique*. En ligne. n° 4. <http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/1399787CD51B4565E04400144F0104BD>. Consulté le 2 janvier 2013.

Rivière, N. et J. J. Chauvin. 1997. « Amélioration de l'interprétation de l'essai de fatigue sur les matériaux bitumineux ». In *Fifth RILEM Symposium on Mechanical Test Methods for Bituminous Materials*. (Lyon, may 14-16, 1997), p. 283-290.

Robert, Claude. 2010. *Les exigences du MTQ sur les granulats et le comportement des matériaux*. Montréal (QC) : Bitume Québec. Présentation PowerPoint, 28 diapositives.

Rock. 2010. « Fonctionnement des fondants ». En ligne. 32 diapositives. http://www.rock.fr/fileadmin/rock/Documents_divers/fonctionnement_des_fondants_723_ko.ppt. Consulté le 2 janvier 2013.

Sayegh, G. 1965. « Variation des modules de quelques bitumes purs et enrobés bitumineux ». Thèse de doctorat, Paris, Faculté des Sciences de l'Université de Paris.

Schmidt, R. J. et L. E. Santucci. 1971. « A practical method for determining the glass transition temperature of asphalt and calculation of their low temperature viscosities ». In *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, vol. 35, p. 61-90.

Schmidt, R. J. et P. E. Graf. 1972. « Effect of water on the resilient modulus of asphalt-treated mixes ». In *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings*, p. 118-162.

Seddik, Hoda et John Emery. 1997. « Moisture damage of asphalt pavements ». In *1997 XIIIth IRF World Meeting*. (Toronto, Ont.), 14 p.

SETRA-LCPC. 1994. *Conception et dimensionnement des structures de chaussée - guide technique*. Document édité par le Service d'études techniques des routes et autoroutes (SETRA) et le Laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC), Lyon.

Shell Bitumen. 1995. *The shell bitumen industrial handbook*. Éditeur Chertsey, Angleterre, 411 p.

Smith, Richard D. 1979. *Pavement wear and studded tire use in Iowa*. Coll. « Iowa Highway Research Board », Project HR-l48. Ames (Iowa) : Iowa Department of Transportation, 36 p.

Soliman, S. et T. H. Doan. 1977. « Influence des paramètres de formulation sur le module et la résistance à la fatigue des graves-bitume ». *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, spécial V, p. 229-245.

Soltani, Mohammad Ali Ashayer. 1998. « Comportement en fatigue des enrobés bitumineux ». Thèse de doctorat, MEGA, ENTPE-INSA de Lyon, France, 264 p.

SOM. 2013. *Évaluation de la campagne de sensibilisation à la sécurité routière en conditions hivernales 2012 – Volets pneus d'hiver et terminologie des conditions routières de Québec 511*. Rapport final présenté au ministère des Transports du Québec. 68 p.

Somé, Sâannibè Ciryle. 2012. « Comportement thermomécanique des enrobés tièdes et de l'interface bitume-granulat ». Thèse de doctorat, École doctorale sciences pour l'ingénieur géosciences et architecture, Nantes, France, 255 p.

St-Laurent, D. 2012. « Routine Mechanistic Pavement Design against Frost Heave ». In *Cold Regions Engineering 2012 : Sustainable Infrastructure Development in a Changing Cold Environment*. (Quebec City, Canada, Aug. 19-22, 2012), p. 144-154. Virginia : American Society of Civil Engineers.

Stoffels, S. M. et D. F. Kwanda. 1996. « Determination of coefficients of thermal contraction of asphalt concrete using strain gage technique ». In *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, vol. 65, p. 73-93.

Stuart, K. D. 1990. *Moisture Damage in Asphat Mixtures, A state-of-the-art report*. Coll. « FHWA », Report no FHWA-RD-90-019. McLean (VA) : Federal Highway Administration, 132 p.

Tapsoba, Nouffou, Cédric Sauzéat et Hervé Di Benedetto. 2013. « Analysis of Fatigue Test for Bituminous Mixtures ». *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 25, n° 6, p. 701-710.

Tapsoba, Nouffou. 2012. « Comportement des enrobés bitumineux à base de matériaux recyclés et/ou fabriqués à température réduite ». Thèse de doctorat, MEGA, ENTPE-INSA de Lyon, France, 268 p.

Tarrer, A. R. et Vinay Wagh. 1991. *The effect of the physical and chemical characteristics of the aggregate on bonding*. Coll. « SHRP », Report no SHRP-A/UIR-91-507. Washington (DC) : Strategic Highway Research Program, 31 p.

Taylor, Mark A. et N. Paul Khosla. 1983. « Stripping of asphalt pavements: State of the art ». *Transportation Research Record*, n° 911, p. 150-158.

Terrel, Ronald L. et Saleh AI-Swailmi. 1994. *Water Sensitivity of Asphalt-Aggregate Mixes : Test Selection*. Coll. « SHRP », Report no SHRP-A-403. Washington (DC) : Strategic Highway Research Program, 194 p.

Terrel, Ronald L. et Saleh Al-Swailmi. 1993. « Role of pessimum voids concept in understanding moisture damage to asphalt concrete mixtures ». *Transportation Research Record*, n° 1386, p. 31-37.

Tiouajni, Samir. 2009. *Calculs théoriques de l'écart de l'angle de phase entre les extensomètres placés sur les casques et les jauges placées sur l'éprouvette*. Vaulx-en-Velin (France). Calculs réalisés le 23 juillet 2009.

Torres, A. C. 2004. « Probabilistic analysis of air void structure and its relationship to permeability and moisture damage of hot mix asphalt ». Mémoire de maîtrise en science, College Station, Texas A&M University, 119 p.

Tourangeau, Guy. 2005. « L'approche qualité et les essais sur les bitumes au ministère des Transports du Québec ». En ligne. 41 diapositives. http://www.bitumequebec.ca/_evenements/formation-technique/formation-technique-2005. Consulté le 27 août 2014.

Touhara, Radouen. 2012. « Étude de la résistance en fatigue des matériaux bitumineux ». Mémoire de maîtrise en génie de la construction, Montréal, École de technologie supérieure, 213 p.

Touhara Radouen et Daniel Perraton. 2013. « Détermination de la durée de vie en fatigue d'une éprouvette d'enrobés bitumineux ». *Via Bitume*, vol. 8, n° 1, p. 36-39.

Transports Québec. 1997. « Méthode de formulation LC pour les enrobés ». Info DLC. En ligne. Vol. 2, n° 12. <http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/entreprises/zone_fournisseurs/reseau_routier/chaussee/info_dlc#1997>. Consulté le 12 avril 2012.

Transports Québec. 2001. « Choix des composants d'enrobés selon l'usage ». Info DLC. En ligne. Vol. 6, n° 12. <http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/entreprises/zone_fournisseurs/reseau_routier/chaussee/info_dlc#2001>. Consulté le 12 avril 2012.

Transports Québec. 2003a. « Impact des restrictions de charges en période de dégel ». Info DLC. En ligne. Vol. 8, n° 11. <http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/entreprises/zone_fournisseurs/reseau_routier/chaussee/info_dlc#2003>. Consulté le 18 avril 2012.

Transports Québec. 2003b. « Pose d'enrobés par temps froid ». Info DLC. En ligne. Vol. 8, n° 9. <http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/entreprises/zone_fournisseurs/reseau_routier/chaussee/info_dlc#2003>. Consulté le 24 avril 2013.

Transports Québec. 2010. « Les chaussées au Québec, La conception d'une chaussée ». En ligne. 2 p. http://www.mobilitedurable.gouv.qc.ca/portal/page/portal/139C0D172D630859E04400144F0104BD. Consulté le 20 septembre 2010.

Transports Québec. 2011a. « Entretien des routes ». En ligne. <https://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/grand_public/vehicules_promenade/securite_routiere/securite_conditions_hivernales/entretien_routes_hiver>. Consulté le 29 avril 2011.

Transports Québec. 2011b. « Détermination du module complexe des enrobés ». Info DLC. En ligne. Vol. 16, n° 4. <http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/entreprises/zone_fournisseurs/reseau_routier/chaussee/info_dlc#2011>. Consulté le 29 août 2014.

Transports Québec. 2012a. « Nouvelles versions des tableaux de choix des composants et critères de sélection des enrobés ». Info DLC. En ligne. Vol. 17, n° 3. <http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/entreprises/zone_fournisseurs/reseau_routier/chaussee/info_dlc#2012>. Consulté le 24 avril 2013.

Transports Québec. 2012b. « Les chaussées et le climat québécois ». In *Le site de Transports Québec*. En ligne. <http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/grand_public/vehicules_promenade/reseau_routier/chaussees/les_chaussees_et_le_climat_quebecois>. Consulté le 31 déc. 2012.

Tremblay. 2006. « Étude de la fréquence des événements météorologiques précurseurs des nids-de-poule : le Québec un cas particulier ? ». In *Le site du ptaff*. En ligne. <http://ptaff.ca/routes_du_quebec/>. Consulté le 8 déc. 2010.

Trudeau, Stéphane. 2013. « Processus de vieillissement du bitume et bonnes pratiques ». *Via Bitume*, vol. 8, n° 1, p. 26-27.

USIRF. 2001. *Les enrobés bitumineux – Tome 1*. Coll. « l'Union des syndicats de l'industrie routière française ». Édité par RGRA, 234 p.

Vautrin, Sandrine et Jean Livet. 1996. « Choc thermique produit par un traitement curatif du verglas ou de la neige - synthèse des connaissances - simulation numérique à "aide du modèle GEL 1 D ». En ligne. http://www.viabilite-hivernale.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/Physique_de_l_interface_atmo_-_chaussee.pdf. Consulté le 4 janvier 2013.

Velenza, J. et G. W. Scherer. 2006. « Mechanism for salt scaling ». *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 89, n° 4, p. 1161-1179.

Verstraeten, J. 1974. « Loi de fatigue en flexion répétée des mélanges bitumineux ». *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, n° 70, p. 141-156.

Verstraeten, J. 1976. *Aspects divers de la fatigue des mélanges bitumineux*. Coll. « Centre de recherches routières », Rapport de recherche n° 170/JV/1976. 41 p.

VH. 2005a. « Les fondants routiers ». En ligne. <http://www.viabilite-hivernale.equipement.gouv.fr/spip.php?page=article_print&id_article=4128>. Consulté le 5 janv. 2013.

VH. 2005b. « Les propriétés physiques des divers produits ». En ligne. <http://www.viabilite-hivernale.equipement.gouv.fr/spip.php?page=article_print&id_article=4286>. Consulté le 5 janv. 2013.

VH. 2005c. « Action des fondants routiers sur les revêtements ». En ligne. <http://www.viabilite-hivernale.developpement-durable.gouv.fr/action-des-fondants-routiers-sur-a4687.html>. Consulté le 5 janv. 2013.

VH. 2005d. « Effets des chlorures sur les revêtements et ponts routiers ». En ligne. <http://www.viabilite-hivernale.equipement.gouv.fr/effets-des-chlorures-sur-les-a4659.html >. Consulté le 5 janv. 2013.

Vinson, Ted S., Vincent C. Janoo et Ralph C. G. Haas. 1989. *Low Temperature and Thermal Fatigue Cracking*. Summary Report, SR-OSU-A-003A-89-1. 93 p.

Vishay. 2007. *Measurement of thermal expansion coefficient using strain gages (TN-513)*, Vishay Micro-Measurements, 12 p.

Vishay. 2008a. *Théorie des jauges électriques d'extensométrie (NT-56C)*, Vishay micromesures, Malakoff (France), 24 p.

Vishay. 2008b. *Variation de la déformation apparente et du facteur de jauge avec la température (NT-504)*, Vishay micromesures, Malakoff (France), 12 p.

Vishay. 2010. « 20CBW, General Purpose Strain Gages – Linear Pattern ». En ligne. 2 p. http://www.vishaypg.com/doc?11291. Consulté le 25 avril 2014.

Vivar, E. d. et J. E. Haddock. 2006. *HMA Pavement Performance and Durability*. Coll. « JTRP Technical Reports », Publication FHWA/IN/JTRP-2005/14. West Lafayette (Indiana) : Indiana Department of Transportation and Purdue University, Joint Transportation Research Program, 193 p.

Voitkovskii, K. F. 1960. *The mechanical properties of ice*. Report AD 284 777. American Meteorological Society, Boston (MA), 99 p.

Walubita, L. F., B. Jamison, A. E. Alvarez, X. Hu et C. Mushota. 2012. « Air void characterization of HMA gyratory laboratory - moulded samples and field cores using X-ray computed tomography (X-ray CT) ». *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, vol. 54, n° 1, p. 22-31.

Weast, Robert C. et Melvin J. Astle. 1982. *CRC Handbook of Chemistry and Physics,* 63rd éd. Publication « CRC Press inc ». Boca Raton (Florida), 2381 p.

Weeks, W. et A. Assur. 1967. *The mechanical properties of sea ice*. DA Project 1VO25001A130. Cold Regions Research and Engineering Lab, Hanover (NH), 96 p.

Williams, P. J. 1964. « Unfrozen water content of frozen soils and soil moisture suction ». *Géotechnique*, vol. 14, n° 3, p. 231-246.

Woodbridge, M E, B. Obika, R. Freer-Hewish et D. Newill. 1994. « Salt damage to bituminous surfacings: results from road trials in Botswana ». In *Proceedings of the Sixth Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa*. (Cape Town, South Africa), 16 p.

Xu, Qinwu et Mansour Solaimanian. 2008. « Measurement and Evaluation of Asphalt Concrete Thermal Expansion and Contraction ». *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 36, n° 2, p. 1-10.

Yi, Junyan, Decheng Feng et Dongsheng Wang. 2009. « Impact of freeze-thaw cycles on the performance of asphalt mixture based permeability ». In *Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials*, sous la dir. de Andreas Loizos, Manfred N. Partl, Tom Scarpas et Imad L. Al-Qadi, p. 205-213. CRC Press.

Young, J.F., S. Mindness, R. J. Gray et A. Bentur. 1998. *The science and technology of civil engineering materials*, 1st éd. Publisher : Prentice Hall, 384 p.

Zeng, M. et D. H. Shields. 1999. « Nonlinear Thermal expansion and contraction of asphalt concrete ». *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 26, p. 26-34.

Zhong, Yang et Jian-Hua Yin. 2007. « Stresses and Excess Pore Fluid Pressure Induced in a Saturated Asphalt Pavement Subjected to Moving Wheel Pressure ». In *Transportation Research Board :* 86th Annual Meeting. (Washington, D.C., Jan. 21-25 2007), 18 p.

Rapport-Gratuit.com