

Effet de cycles de chargements sur les propriétés
thermomécaniques des mélanges traités au ciment-bitume

par

Omar BAKLOUTI

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 01 MAI 2022

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

© Tous droits réservés, Omar Baklouti, 2022

© Tous droits réservés

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

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

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

M. Simone Raschia, codirecteur de mémoire
Servizio Tecnologico Sperimentale - STS Mobile Srl

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

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

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

LE 20 AVRIL 2022

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je dois d'abord exprimer ma gratitude envers le professeur Alan Carter pour m'avoir donné une belle opportunité de poursuivre mes études supérieures à l'École de technologie supérieure et pour avoir été un si bon conseiller. J'ai toujours pu compter sur son soutien et son dévouement m'a beaucoup inspiré. Espérons que nous nous croiserons à nouveau !

Je suis profondément reconnaissant à mon codirecteur de recherche, Simone Raschia, pour ses conseils, son soutien et ses encouragements continus.

Je tiens à exprimer ma gratitude à M. Francis Bilodeau et M. Sylvain Bibeau, le personnel de soutien technique du laboratoire sur les Chaussées et Matériaux Bitumineux (LCMB) pour leur aide. Je tiens également à remercier mes collègues, Théo, Pablo, Mounir et Mohamed, pour leur aide sans fin et précieuse pendant le programme d'essais en laboratoire.

Je tiens également à remercier Mitacs et l'École de technologie supérieure de m'avoir donné le soutien financier pour terminer mes études.

Merci à M. Daniel Perraton, M. Michel Vaillancourt d'avoir été membres du jury pour ma maîtrise.

Dernier point, mais non le moindre, je suis toujours redevable à ma famille, qui a été là pour mon soutien comme un mur pendant tous les hauts et les bas de ma vie.

Effet de cycles de chargements sur les propriétés thermomécaniques des mélanges traités au ciment-bitume

Omar BAKLOUTI

RÉSUMÉ

La hausse des coûts du bitume à la suite de la crise énergétique a poussé, ces dernières années, les entreprises spécialisées en construction routière à développer de nouvelles technologies de recyclages des chaussées durable et efficace en enrobé bitumineux. Pas mal de pays, comme le Canada, investissent et encouragent fortement les technologies de recyclage à froid en utilisant les granulats bitumineux recyclés (GBR). En effet, la technique de recyclage avec des matériaux traités au ciment et bitume (CBTM) est très rentable et favorise le développement durable. L'effet lubrifiant dans les enrobés traditionnels à chaud est le bitume chauffé causant une grande consommation d'énergie, alors que dans le CBTM, il est donné par l'eau et l'émulsion de bitume qui donnent, en combinaison avec le ciment, une bonne cohésion.

Bien que le CBTM présente une alternative intéressante dans la construction des chaussées, il reste du travail à réaliser au niveau de ses propriétés thermomécaniques afin d'arriver à sa formulation performante et aussi pour comprendre l'évolution de son comportement dans le temps. En effet, ce matériau, qui est traité par l'émulsion de bitume, semble présenter un comportement évolutif dans le temps à cause de plusieurs facteurs (température, teneur en eau, trafic, ...). Par conséquent, l'objectif principal de cette maîtrise est d'évaluer l'évolution du comportement thermomécanique du CBTM avant et après des cycles de chargement répétés.

Pour mettre en pratique ce travail, le nombre de cycles de chargement a été varié. Les résultats obtenus ont montré que le nombre de cycles de chargement influence sur le module de rigidité du CBTM. L'évaluation du comportement viscoélastique a été validée par des essais de module complexe. Les résultats obtenus contribueront à la meilleure compréhension de ce qui se passe tout au long de la vie de la chaussée et permettront de connaître le bon moment d'intervention le cas de réhabilitation.

Mots clés : Matériaux traités au ciment et bitume, module complexe, fatigue, chargement cyclique.

Effet de cycles de chargements sur les propriétés thermomécaniques des mélanges traités au ciment-bitume

Omar BAKLOUTI

ABSTRACT

The rise in the cost of bitumen following the energy crisis has prompted, in recent years, companies specializing in road construction developed new technologies for recycling pavements that are sustainable and efficient in bituminous mix. Quite a few countries, such as Canada, are investing and strongly encouraging cold recycling technologies using aggregates. Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). Indeed, the recycling technique with cement-bitumen treated materials (CBTM) is very profitable and promotes sustainable development. The lubricating effect in traditional hot mixes is the heated bitumen causing high energy consumption, whereas in CBTM it is given by the water containing in the bitumen emulsion which gives, in combination with the cement, a good cohesion.

Although CBTM presents an interesting alternative in the construction of pavements, several works remain to be carried out in terms of its thermomechanical properties to arrive at its efficient formulation and understand the evolution of its behaviour over time. Indeed, this material, which is treated with bitumen emulsion, seems to exhibit an evolutionary behaviour over time due to several factors (temperature, water content, traffic, etc.). Therefore, the main objective of this mastery is to evaluate the evolution of the thermomechanical behaviour of the CBTM before and after repeated loading cycles.

To put this work into practice, the number of loading cycles has been varied. The results obtained showed that the number of loading cycles influences the stiffness modulus of CBTM. The evaluation of the viscoelastic behaviour has been validated by complex modulus tests. The results obtained will contribute to a better understanding of what is happening throughout the life of the pavement and will make it possible to know the right moment of intervention in the case of rehabilitation.

Keywords: Cement-bitumen treated materials, complex modulus, fatigue, loading cycles.

TABLE DES MATIÈRES

Page	INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE		
1.1	Introduction.....	5
1.2	Mélanges recyclés à froid (CRM).....	6
1.2.1	Granulats bitumineux recyclés : GBR	8
1.2.2	Émulsion de bitume	10
1.2.3	Ciment Portland ordinaire.....	12
1.2.4	Interaction entre l'émulsion de bitume et les granulats	13
1.2.5	Production du CBTM.....	15
1.2.6	Procédés de compactage	17
1.2.7	Protocoles de Murissement.....	18
1.2.8	Murissement en laboratoire pour les mélanges d'émulsion de bitume.....	19
1.3	Modélisation des caractéristiques du CBTM.....	20
1.3.1	Module Complex.....	22
1.3.2	Modélisation rhéologique	26
1.3.3	Le Modèle 2S2P1D.....	29
1.3.4	Principe de superposition Temps-Température (PSTT)	30
1.4	Caractérisation en fatigue des matériaux recyclés à froid	32
1.4.1	Critère basé sur l'évolution du module de rigidité.....	34
1.4.2	Critère de fin de phase II.....	35
1.4.3	Essai de traction/compression sur éprouvette cylindrique.....	35
1.5	Conclusion	36
CHAPITRE 2 ÉNONCÉ DU PROBLÈME ET OBJECTIF.....39		
CHAPITRE 3 CAMPAGNE EXPÉRIMENTALE		
3.1	Introduction.....	43
3.2	Matériaux et formulation	43
3.2.1	GBR	43
3.2.2	Teneur en liant du GBR par ignition.....	46
3.2.3	Émulsion de bitume et filler actif.....	47
3.2.4	Préparation du mélange.....	50
3.2.5	Compactage des plaques	51
3.2.6	Sciage et carottage	52
3.3	Campagne expérimentale.....	54
3.4	Dispositif expérimental	56
3.4.1	Presse hydraulique et système de pilotage et d'acquisition	56
3.4.2	Collage des casques	57
3.4.3	Mise en température.....	59
3.4.4	Acquisition des données et procédures expérimentales.....	59
3.4.5	Procédure de l'essai de module complexe	60
3.4.6	Procédure de l'essai de fatigue	61

CHAPITRE 4 RÉSULTATS DES ESSAIS	63
4.1 Présentation des résultats de l'essai de fatigue	63
4.1.1 Évolution de la température	65
4.2 Choix du nombre de cycles de chargement	66
4.3 Présentation des résultats de l'essai de module complexe	66
4.3.1 Modèles mécaniques utilisés en viscoélastique linéaire	68
4.3.2 Calage et détermination des paramètres 2S2P1D	69
4.4 Répétabilité des résultats de module complexe	72
4.4.1 Courbe dans le plan de Cole-Cole	73
4.4.2 Courbe dans l'espace de Black	75
4.4.3 Courbe normalisée	77
4.4.4 Les courbes maîtresses	79
4.4.5 Comparaison des courbes maîtresse	82
SOMMAIRE	87
RECOMMANDATIONS	89
ANNEXE I INFORMATIONS RELATIVES AUX ESSAIS MÉCANIQUES	91
BIBLIOGRAPHIE	117

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 : Avantages et inconvénients des ajouts bitumineux et cimentaires traduit de Xiao et al. (2018)	15
Tableau 3.1 : Propriété de GBR (essai de laboratoire LCMB)	44
Tableau 3.2 : Teneur en bitume du GBR par méthode d'allumage	47
Tableau 3.3 : propriétés de l'émulsion de bitume (donnée du fournisseur).....	47
Tableau 3.4 : Propriétés de ciment et de filler	49
Tableau 3.5 : Propriétés des éprouvettes cylindriques.....	54
Tableau 4.1 : Constantes du modèle 2S2P1D calibrées pour le CBTM des 3 éprouvettes	73
Tableau 4.2 : Constantes du modèle 2S2P1D calibrées pour les éprouvettes testées (7 constantes de E*).....	75
Tableau 4.3 : Constantes du modèle 2S2P1D calibrées pour l'éprouvette P1A2 et P2A2 avant et après cycles de chargements.	80
Tableau-A I-1 : Caractéristiques physiques des éprouvettes	91
Tableau-A I-2 : Information relative à l'essai de fatigue.....	115

LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 1.1 :	Composition conceptuelle des mélanges de chaussées.....	7
Figure 1.2 :	Types d'émulsion : a) émulsion H/E ; b) émulsion E/H ; c) émulsion E/H/E Tirée de Salomon (2006, p. 2)	10
Figure 1.3 :	Comportement typiquement observé dans les mélanges bitumineux Tirée de Di Benedetto et al. (2001).....	21
Figure 1.4 :	Courbes isothermes pour les mélanges CBTM (6 températures, 6 fréquences) Tirée de Godenzoni, Graziani, et al. (2016).....	24
Figure 1.5 :	Courbes maîtresses pour un mélange CBTM à $Tr = 20^{\circ}C$ (5 fréquences, 7 températures) Tirée de Simone Raschia (2020, p. 41)	25
Figure 1.6 :	Modèle de Huet Sayegh.....	27
Figure 1.7 :	Représentation du modèle 2S2P1D réadapté de Olard et Di Benedetto (2003).....	29
Figure 1.8 :	Représentation unidirectionnelle du modèle DBN pour les mélanges bitumineux appliqué dans le domaine des petites déformations.....	30
Figure 1.9 :	Exemple de courbe maîtresse à $10^{\circ}C$ Tirée de Di Benedetto et De la Roche (1998).....	31
Figure 1.10 :	Courbes maîtresses de : a) La norme du module complexe $ E^* $ et, b) angle de phase φ à $Tr = 20^{\circ}C$, Tirée de Simone Raschia (2020, p. 172)	32
Figure 1.11 :	Chemins de sollicitation possibles et courbes enveloppes des cycles réponses obtenues en déformation imposée (a et b) et contrainte imposée (c et d) Tirée de Nguyen (2010, p. 60)	33
Figure 1.12 :	Distinction de trois phases différentes dans un essai de fatigue	35
Figure 1.13 :	Principe de sollicitation en traction-compression sur éprouvette cylindrique Extrait de Nguyen (2009)	36
Figure 3.1 :	Fournaise à ignition.....	44
Figure 3.2 :	Séparateur d'échantillon GBR	45
Figure 3.3 :	Analyse granulométrique du GBR utilisé	46

Figure 3.4 :	Composition de Mélange CBTM.....	50
Figure 3.5 :	Compacteur de plaque LCPC.....	51
Figure 3.6 :	Première plaque compacte	52
Figure 3.7 :	Échantillon scié pour fin de carottage.....	52
Figure 3.8 :	Carotteuse	53
Figure 3.9 :	Resurfaceuse et éprouvettes obtenues.....	54
Figure 3.10 :	Plan expérimental.....	56
Figure 3.11 :	Schéma de la presse hydraulique utilisée pour l'essai de traction/compression Tirée de Nguyen (2009, p. 101)	57
Figure 3.12 :	Appareil pour le collage des casques	58
Figure 3.13 :	Extensomètres distants de 120°	58
Figure 3.14 :	Montage de l'éprouvette dans l'enceinte thermique.....	59
Figure 4.1 :	Évolution de la raideur en fonction du nombre de cycles pour l'éprouvette P1-A3, testé en mode de déformation (10 °C, 1 Hz, 50µdef).....	64
Figure 4.2 :	Courbe de l'évolution de la température sur la surface de l'éprouvette en fonction du nombre de cycles	66
Figure 4.3 :	Courbes isothermes pour les mélanges CBTM (6 températures, 6 fréquences) éprouvette P1A1	67
Figure 4.4 :	Influence des paramètres du modèle 2S2P1D sur l'évolution du module complexe dans le plan Cole-Cole Tirée de Nguyen (2009, p. 134).....	70
Figure 4.5 :	Courbe maîtresse avant chargement cyclique des éprouvettes selon la répétabilité du module complexe. Simulation avec le modèle 2S2P1D (Tr = -5 °C)	72
Figure 4.6 :	Courbe du $ E^* $ dans le plan de Cole-Cole	74
Figure 4.7 :	Courbes du $ E^* $ dans le plan Cole-Cole (avant et 35 000 cycles de chargement).....	74
Figure 4.8 :	Courbe du $ E^* $ dans l'espace de Black (échantillon P1-A1)	76

Figure 4.9 :	Courbes de $ E^* $ dans l'espace black (avant et après 35 000 cycles de chargement).....	77
Figure 4.10 :	Courbes de module complexe normalisées dans le diagramme de Cole-Cole de l'éprouvette P2-A2 testé avant et après 35 000 cycles de chargements.....	78
Figure 4.11 :	Courbe maîtresse pour un mélange CBTM à $Tr = -3,9$ °C (5 fréquences, 8 températures).....	79
Figure 4.12 :	Courbe maîtresse du module complexe avant et après chargement cyclique de l'éprouvette P1A2 et P2A2. Simulation avec le modèle 2S2P1D ($Tr = -5$ °C)	80
Figure 4.13 :	Courbe maîtresse de l'angle de phase avant et après chargement cyclique de l'éprouvette P1A2 et P2A2. Simulation avec le modèle 2S2P1D ($Tr = -5$ °C)	81
Figure 4.14 :	$ C^*E $ en fonction de la fréquence équivalente (P1A2). $Tr = -5$ °C	84
Figure 4.15 :	$ C^*_E $ en fonction de la fréquence équivalente (P2A2). $Tr = -5$ °.....	84
Figure 4.16 :	φ_E en fonction de la fréquence équivalente (P2A2). $Tr = -5$ °.....	86
Figure-A I-0.1 :	Présentation de courbe de module complexe de l'éprouvette P1A1 après 0 cycle.....	93
Figure-A I-0.2 :	Présentation de courbe de module complexe de l'éprouvette P1A2 après 0 cycle.....	95
Figure-A I-0.3 :	Présentation de courbe de module complexe de l'éprouvette P1A2 après 5000 cycles	98
Figure-A I-0.4 :	Présentation de courbe de module complexe de l'éprouvette P1A2 après 25 000 cycles	101
Figure-A I-0.5 :	Présentation de courbe de module complexe de l'éprouvette P1A2 après 35 000 cycles	104
Figure-A I-0.6 :	Présentation de courbe de module complexe de l'éprouvette P2A2 après 0 cycle.....	107
Figure-A I-0.7 :	Présentation de courbe de module complexe de l'éprouvette P2A2 après 5000 cycles	109
Figure-A I-0.8 :	Présentation de courbe de module complexe de l'éprouvette P2A2 après 25 000 cycles	111

Figure-A I-0.9 : Présentation de courbe de module complexe de l'éprouvette P2A2
après 35 000 cycles 114

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

2S2P1D	2 Springs, 2 Parabolic elements, 1 Dashpot
ASTM	American Society for Testing and Materials
BSM	Bitumen-Stabilized Material
CBTM	Cement-Bitumen Treated Material
CRM	Cold Recycled Material
CSS	Cationic Slow-Setting
CTM	Cement-Treated Material
CPO	Ciment Portlant Ordinaire
DBN	Di Benedetto & Neifar
EP	Elasto-Plastic
GBR	Granulat bitumineux recycle
GKV	Generalized Kelvin-Voigt
HMA	Hot Mix Asphalt
LCMB	Laboratoire sur les Chaussées et Matériaux Bitumineux
LC	Laboratoire des Chaussées du MTQ
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
VEL	Viscoélastique linéaire
PSTT	Principe de superposition temps-température

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

%	Pourcentage
Σ	Sommation d'élément
\circledcirc	<i>Copyright</i>
$^{\circ}\text{C}$	Degré Celsius
at	Facteur de translation dans l'essai de module complexe
cm	Centimètre
D	Diamètre
DGCB	Département de génie civil et bâtiment
d_{mb}	Densité du mélange brut
d_{mm}	Densité maximale du mélange
E	Module élastique dû au chargement
E^*	Module complexe
E_0	Module initial
e	Épaisseur
F	Force horizontale
Fr	Fréquence
G	Gramme
H	Hauteur
Hz	Hertz
IQ	Indice de qualité
kg	Kilogramme
kN	Kilo Newton
L	Longueur
L	Largeur
MLPC	Matériaux du Laboratoire des Ponts et Chaussées
Moy	Moyenne
MPa	Méga Pascal
MR	Matériaux recyclés
MTQ	ministère des Transports du Québec
MTS	<i>Materials Testing System</i>
m	Mètre
mm	Millimètre
N	Nombre de cycles
N_f	Nombre de cycle à la rupture
$N_{f50\%}$	Nombre de cycle à la moitié du module initial
$N_{\text{II/III}}$	Nombre de cycle au point de transition entre les phases II et III
n/d	Non déterminé
Pa	Pascal
PETT	Principe d'Équivalent Temps-Température
p	Pression moyenne
S	Seconde
T°	Température
U	Déplacement du piston de la presse

W_d	Énergie dissipée par cycle de chargement sinusoïdal
ε	Déformation
ε_0	Déformation initiale
ε_A	Amplitude du signal de déformation
ε_{i0}	Valeur moyenne de la déformation
ε_{iA}	Amplitude des signaux de déformation pour les trois extensomètres
σ	Contrainte
σ_0	Contrainte initiale
σ_A	Amplitude du signal de contrainte
ν	Coefficient de poisson
ϕ_E	Angle de déphasage
ϕ_ε	Angle de phase du signal de la déformation
ϕ_{ei}	Angle de phase du signal de la déformation pour les trois extensomètres
ϕ_σ	Angle de phase du signal de contrainte
μ_{def}	microdéformation
μm	micromètre

INTRODUCTION

La technique du recyclage à froid est une technologie innovante introduite dans le cadre des matériaux de construction pour faire face à la crise économique et environnementale liée à l'industrie des chaussées routières (Timm, Diefenderfer, et Bowers 2018). La production des matériaux recyclés à froid (CRM) à température atmosphérique présente des avantages significatifs en termes de consommation d'énergie (Xiao et al. 2018). Ceci est possible grâce à l'utilisation de bitume sous forme d'émulsion ou de mousse. L'émulsion de bitume est un composant très sensible à la température. Elle est généralement stockée à des températures comprises entre 20 °C et 40 °C afin de maintenir un niveau acceptable de stabilité des gouttelettes de bitume en suspension (Needham 1996). De plus, la majeure partie de la phase granulat est constituée de chaussées recyclées, de granulats bitumineux recyclés (GBR), disponibles en grande quantité et adaptés pour obtenir de bonnes performances (Gandi, Carter, et Singh 2017) (Godenzoni, Graziani, et Bocci 2015). Les matériaux traités au ciment et au bitume (CBTM) sont un type particulier de CRM dans lequel les propriétés mécaniques à court et à long terme sont améliorées par l'ajout d'un co-liant, en particulier du ciment Portland (Shaowen 2018) (Mignini, Cardone, et Graziani 2018). Les matériaux utilisés dans les mélanges CBTM, tels que le GBR, le filler, le ciment et l'eau, sont généralement stockés à la température atmosphérique. Dans le cas où le CBTM est produit à basse température (moins de 10 °C), l'émulsion de bitume peut subir un choc thermique au contact des autres composants froids, notamment les granulats. Les propriétés des CBTM sont caractérisées par un comportement évolutif (Graziani et al. 2017).

La performance des chaussées en CBTM en service se détériore progressivement en raison de la répétition des charges des véhicules et des facteurs environnementaux. Lorsque l'état de la chaussée atteint un certain niveau inacceptable, il faut utiliser des méthodes de réhabilitation raisonnables pour rétablir ses performances. En plus de leurs avantages environnementaux, les technologies de recyclage de la chaussée offrent une alternative moins coûteuse, plus rapide et qui perturbe moins le trafic que les stratégies de reconstruction conventionnelles (Cross et al. 2011).

Au fil des années, les chaussées peuvent être confrontées à différents facteurs qui affectent la durée de vie restante par rapport à celle de la chaussée. En particulier, la grande incertitude liée aux propriétés à long terme des mélanges CBTM a limité l'utilisation de ce matériau aux chaussées de faible volume (Chesner et al. 2011). Cependant, il a été démontré qu'avec une bonne sensibilisation, une chaussée réhabilitée au CBTM peut avoir une durée de vie accrue jusqu'à 12 ans. Ces dernières années, les mélanges CRM et CBTM ont également été appliqués sur des routes à fort trafic. Plusieurs sections d'essai n'ont pas montré de criticités spécifiques tout au long de la durée de vie (Gu et al. 2019) (Guatimosim et al. 2019) (Sangiorgi et al. 2017).

Une étape fondamentale pour avoir une couche CBTM performante se situe au moment de la production, en particulier le temps de mûrissement autorisé avant la pose et le compactage de la couche supérieure. Si le mélange CBTM contient encore de l'eau et que le processus de cure n'a pas été achevé avant d'être recouvert d'un enrobé à chaud (HMA), il est possible que la combinaison du trafic et des facteurs environnementaux compromette de façon permanente ses propriétés. En fait, lorsqu'un mélange produit avec une émulsion de bitume est immergé dans l'eau pour simuler une condition de pluie, les propriétés mécaniques diminuent de manière significative (Kim, Im, et Lee 2011). Sur le terrain, le processus de mûrissement dépend principalement de la construction (épaisseur de la couche de CBTM et condition de drainage de la couche sous-jacente) et des facteurs environnementaux qui sont variables en fonction du site. La résistance au cisaillement dans un enrobé est fournie par la présence des granulats, alors que la cohésion est assurée par le bitume. Le comportement des enrobés varie selon le chargement effectué au niveau de la chaussée.

La réponse du matériau, envers un temps de sollicitation très court, est élastique. Cette réponse s'approche du comportement visqueux envers une sollicitation très longue.

La description du comportement viscoélastique linéaire est possible par le fait de tracer l'évolution du module complexe en variant la fréquence et la température. Le module complexe est une propriété utilisée pour caractériser les enrobés bitumineux. On l'utilise surtout pour calculer les contraintes ainsi que les déformations dans les chaussées soumises à des efforts de flexion lors du passage des véhicules et pour mesurer la performance des mélanges bitumineux.

La littérature ne contient que peu de commentaires sur la caractérisation des mélanges CBTM dans le domaine des petites déformations (Chomicz-Kowalska et Maciejewski 2020) (Gandi, Carter, et Singh 2017). La méthode habituelle pour modéliser les résultats obtenus, au lieu de modèles rhéologiques composés d'éléments spécifiques (ressorts et/ou amortisseurs), consiste à utiliser des fonctions sigmoïdales avec des paramètres expérimentaux (Graziani et al. 2020). En particulier, l'étude des propriétés rhéologiques (module complexe et angle de phase) permet une compréhension plus profonde du comportement du matériau seulement par l'application d'un modèle rhéologique valide. Dans le cas des mélanges bitumineux, le modèle de Huet-Sayegh était couramment utilisé dans le passé ; même s'il ne représente pas bien le comportement du matériau à très basse fréquence (ou à très haute température) (Olard et Di Benedetto 2003) (Pronk 2006). En conséquence, l'approche à 2 ressorts, 2 éléments paraboliques et 1 amortisseur a été développée pour assurer une description rhéologique plus précise des matériaux bitumineux et des liants dans le domaine viscoélastique linéaire (Olard et Di Benedetto 2003). L'application de tels modèles n'est possible que lorsque les conditions d'essai (nombre de cycles, amplitude de déformation et température) maintiennent le matériau dans le domaine linéaire.

Un modèle plus versatile peut être utilisé dans le cas de phénomènes viscoplastiques, comme le modèle Di Benedetto-Neifar (DBN) (Hervé Di Benedetto et al. 2007). En fait, le modèle DBN peut être appliqué en fonction du niveau de déformation, et sa formulation peut être simple (dans le cas de la viscoélasticité linéaire) ou plus complexe (fatigue ou déformation permanente).

Une meilleure compréhension de l'évolution des propriétés thermomécaniques permet une formulation des enrobés suffisamment performants pour résister de manière prenne aux contraintes appliquées.

CHAPITRE 1

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Introduction

L'utilisation croissante du recyclage des enrobés bitumineux au cours des dernières années est principalement due à l'amélioration exponentielle des techniques adoptées, ainsi qu'aux avancées dans le domaine scientifique. En effet, le recyclage des chaussées dans les enrobés présente des avantages techniques, économiques et environnementaux.

Les matériaux traités au ciment et au bitume (CBTM) sont un type particulier de CRM dans lequel les propriétés mécaniques à court et à long terme sont améliorées par l'ajout d'un co-liant (ciment) Portland (Shaowen 2018) (Mignini, Cardone, et Graziani 2018). Les propriétés des CBTM sont caractérisées par un comportement évolutif (Graziani et al. 2017)

La possibilité de produire des CBTM à température atmosphérique signifie des avantages significatifs en termes de consommation d'énergie (Xiao et al. 2018). Ceci est possible grâce à l'utilisation de bitume sous forme d'émulsion ou de mousse.

Il a été démontré qu'avec une bonne sensibilisation, une chaussée réhabilitée au CBTM peut avoir une durée de vie accrue jusqu'à 12 ans (Chesner et al. 2011). Ces dernières années, les mélanges CRM et CBTM ont également été appliqués sur des routes à fort trafic. Plusieurs sections d'essai n'ont pas montré de criticités spécifiques tout au long de la durée de vie (Gu et al. 2019) (Guatimosim et al. 2019), (Sangiorgi et al. 2017).

La littérature ne contient que peu de commentaires sur l'évolution du comportement dans le temps et sous trafic des mélanges CBTM ainsi que sa caractérisation dans le domaine des petites déformations (Chomicz-Kowalska et Maciejewski 2020) (Gandi, Carter, et Singh 2017).

Ce chapitre donne un aperçu sur les connaissances acquises sur les mélanges CBTM ainsi que ses propriétés mécaniques afin d'établir le cadre général de cette recherche.

1.2 Mélanges recyclés à froid (CRM)

Il a été observé que les propriétés des enrobés recyclés à froid (*Cold Recycled Materials* : CRM en anglais) au début de sa vie (premiers jours) et à long terme (après quelques années) peuvent être améliorées par l'introduction dans le mélange d'additions minérales. Par ajout minéral, on entend un matériau granulaire de la taille d'une charge qui peut avoir ou non la capacité de se lier chimiquement ou physiquement à l'eau. Dans la littérature, des termes tels que charges actives ou co-liants peuvent être trouvés pour exprimer le même composant dans le mélange CRM, comme le ciment, la chaux hydratée, la poussière de four, les cendres volantes, etc. Avec cette terminologie, l'identification de l'addition minérale utilisée peut être mal comprise. Par exemple, la chaux éteinte ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) réagit avec le dioxyde de carbone (CO_2) de l'air pour donner du calcaire, même si elle doit être mélangée à de l'eau pour démarrer la réaction. Il peut donc être considéré comme une charge active uniquement de ce point de vue. D'autre part, le ciment Portland ordinaire a la capacité de créer des liaisons lorsqu'il est combiné avec de l'eau, en gardant piégée une certaine quantité requise par la réaction d'hydratation. Dans cette étude, le ciment est utilisé comme addition minérale (ou co-liant), le terme de charge active étant considéré comme trop générique.

Selon la présence contemporaine du bitume et du ciment, les matériaux CRM peuvent être nommés différemment et divisés en plusieurs catégories (Figure 1), soit :

- Matériaux traités au ciment (*Cement Treated Materials* : CTM) : aucun bitume n'est utilisé et la cohésion structurelle est conférée uniquement par l'hydratation du ciment, qui est utilisé entre 1 et 6 % en général ;
- Matériaux traités au ciment et au bitume (*Cement Bitumen Treated Materials* : CBTM) : ces mélanges sont une version améliorée des CTM ; puisque l'on utilise un liant bitumineux vierge (de 1 à 3 %) afin de conférer à l'enrobé un comportement plus proche des enrobés (moins fragile et plus souple). La teneur en ciment diminue entre 1 et 3 %. Cette catégorie est considérée dans cette thèse ;

- Les matériaux stabilisés au bitume (Bitumen Stabilized Materials: BSM) : ils sont caractérisés par des granulats non liés (majoritairement recyclés) stabilisés par l'utilisation de faibles pourcentages de bitume (1 à 3 %) et sans ciment.

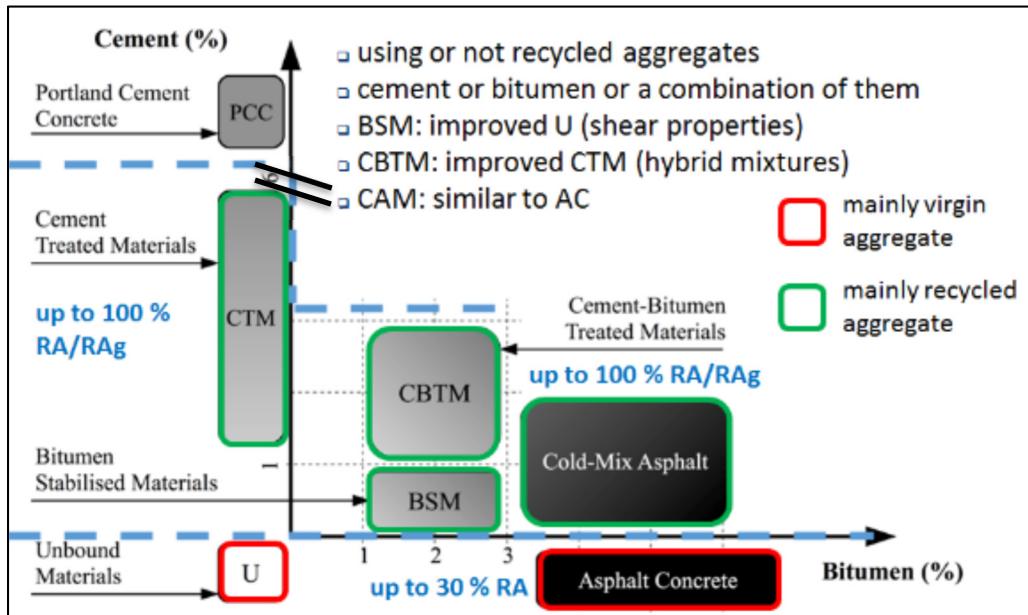


Figure 1.1 : Composition conceptuelle des mélanges de chaussées
Tirée de Grilli, Graziani & Bocci (2012)

En plus de ces trois catégories de matériaux recyclés à froid (CRM), il y a sur la figure 1.1, les granulats, les bétons, les enrobés et les matériaux bitumineux à froid. Les CRM sont des produits de techniques de recyclage modernes qui sont utilisés dans la réhabilitation des structures de chaussée avec des avantages économiques et environnementaux significatifs (Gandi, Carter, et Singh 2017). Un avantage majeur par rapport aux techniques de recyclage à chaud des enrobés est la possibilité de réutiliser des pourcentages plus élevés de granulats bitumineux recyclés (GBR). Il s'agit d'une alternative écologique, car elle réduit le besoin de matériaux vierges. Les CRM sont produits à température ambiante en utilisant l'émulsion de bitume ou la mousse de bitume comme liant pour améliorer l'ouvrabilité (Asphalt Academy, 2009).

La phase granulat est composée principalement de granulats bitumineux recyclés (GBR). Étant donné que les GBR représentent la quasi-totalité de la structure solide, il est important de caractériser complètement les matériaux traités au ciment-bitume (CBTM).

1.2.1 **Granulats bitumineux recyclés : GBR**

Le recyclage des enrobés a été développé en 1915, et a commencé à gagner en popularité depuis 1975 puisqu'il offre des coûts réduits ; préservation géométrique ; et la conservation des granulats, des liants et de l'énergie (Epps 1990).

Sullivan (Murphy et Emery 1996) a fourni un résumé exécutif de l'état de la pratique de l'HMA recyclé. Le rapport révèle qu'environ 45 millions de tonnes de granulats bitumineux recyclés (GBR) sont générées chaque année et 80 % du GBR est réutilisé dans des applications routières. Cela fait du GBR le produit le plus recyclé aux États-Unis, tant en tonnage (73 millions de tonnes) qu'en pourcentage de produit recyclé (80 % du GBR est recyclé). Les projets de réhabilitation produisent environ 100 millions de tonnes de GBR par an à partir des broyages, présentant un problème majeur de déchets solides (Alam, Abdelrahman, et Schram 2010). Il existe deux sources courantes de matériaux bitumineux recyclés : les enrobés recyclés (GBR) et les bardeaux d'asphalte recyclés (RAS). Le GBR se présente sous forme de grumeaux et de broyats. Le RAS peut être obtenu sous forme de déchets de construction ou de produits finis. N'importe lequel de ces matériaux peut être écrasé et mélangé, avec ou sans ajout d'agrégat vierge, pour créer des mélanges. L'enrobé récupéré est utilisé comme source de deux matériaux : le granulat et le bitume (Widger, Skilnick, et Zabolotnii 2012). Les GBR peuvent être recyclés en utilisant des méthodes de production à froid, ou à chaud, par l'ajout de nouveau liant, eau ou granulat dans l'ancien enrobé. Il peut être utilisé pour les couches de roulement, ou de base. Les méthodes des mélanges froides et chaudes sont principalement destinées aux routes à faible ou moyen trafic, tandis que le recyclage à chaud convient également aux routes à fort trafic (Jacobson 2002).

Le recyclage réutilise les granulats du GBR existants, réduisant ainsi le besoin de nouveaux matériaux et l'énergie nécessaire pour les produire. De plus, le recyclage peut réduire les coûts

de transport et les dépenses associées à la mise en décharge ou le stockage de la matière broyée. Il y a d'autres avantages environnementaux et sociaux à réutiliser des ressources existantes difficiles à quantifier (McDaniel, Kowalski, et Shah 2012).

Le GBR est un matériau hétérogène et n'est pas toujours composé de granulats recouverts de vieux bitume. En même temps, il est possible de trouver des conglomérats de petits granulats collés ensemble par un mastic. Lors de la mise en place d'un nouveau mélange, ces aspects pourraient provoquer un changement de la granulométrie. Pour cette raison, il est important de garder la granulométrie du GBR sous contrôle (Perraton et al. 2016). Dans le cadre du RILEM TC 237-SIB TG6, un protocole a été proposé par Perraton à l'École de technologie supérieure, pour effectuer un Round Robin Test (RRT) afin de caractériser les sources de GBR par un test de fragmentation. Des études supplémentaires ont été nécessaires pour évaluer la relation entre la classification du test de fragmentation et les propriétés du mélange CBTM produit (Perraton et al. 2016) (Tebaldi et al. 2019).

De nombreuses études indiquent que la performance des chaussées avec des GBR en termes de fatigue, d'ornièrage, de résistance à la fissuration thermique et de durabilité s'est avérée satisfaisante (Al-Qadi, Elseifi, et Carpenter 2007). Certains chercheurs ont découvert que les mélanges recyclés ont une bonne résistance aux dommages causés par l'humidité à de faibles pourcentages de GBR. Alors qu'il n'y a pas augmentation significative de la résistance aux dommages causés par l'humidité avec augmentation du pourcentage de GBR dans le mélange (Huang, Shu, et Vukosavljevic 2011). Certains chercheurs ont constaté que la présence de GBR augmente la rigidité du mélange (Aravind et Das 2007) et diminue dans certaines études. De même, la durée de vie en fatigue augmente (Aravind et Das 2007) et diminue (Rebbechi et Green 2005) en fonction de la température.

Des travaux d'essais en laboratoire effectués sur des mélanges vierges et des mélanges à 20 % de GBR, montrent que l'ajout de GBR améliore toutes les propriétés des enrobés bitumineux. Cela indique que les mélanges avec 20 % de GBR donneraient de meilleurs résultats que les mélanges vierges sous conditions similaires (Pradyumna, Mittal, et Jain 2013).

1.2.2 Émulsion de bitume

Une émulsion est une dispersion de petites gouttelettes d'un liquide dans un autre liquide. Les émulsions peuvent être formées par deux liquides non miscibles, mais dans la plupart des émulsions, l'une des phases est l'eau. Les émulsions huile dans eau (H/E) sont celles dans lesquelles la phase continue est de l'eau et la phase dispersée (gouttelettes) est un liquide « huileux ». Les émulsions « inversées » eau-dans-huile (E/H) sont celles dans lesquelles la phase continue est une huile et la phase dispersée est de l'eau (Salomon 2006). De plus, les émulsions peuvent avoir des structures plus complexes, telles que E/H/E, où la phase dispersée contient une autre phase qui peut ne pas avoir la même composition que la phase continue (Figure 1.2).

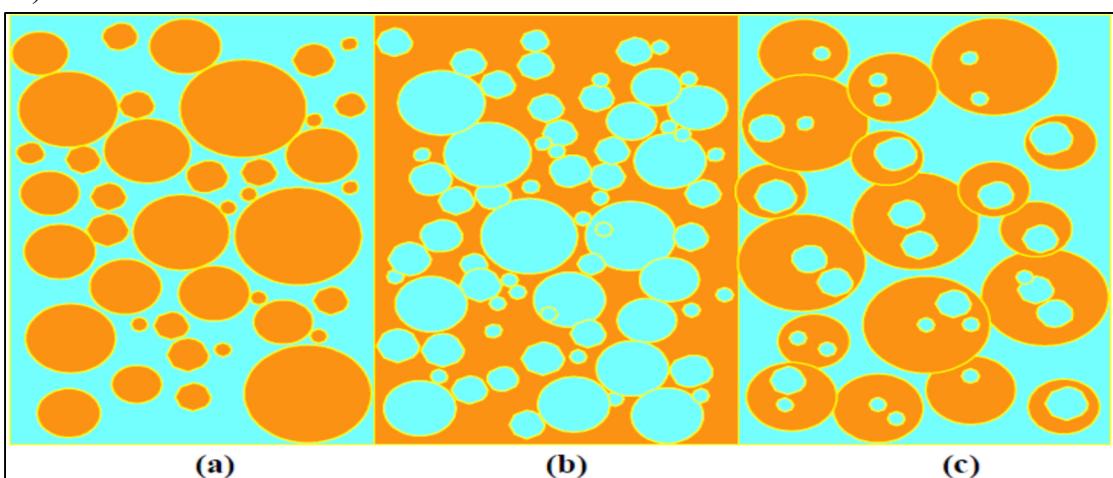


Figure 1.2 : Types d'émulsion : a) émulsion H/E ; b) émulsion E/H ; c) émulsion E/H/E
Tirée de Salomon (2006, p. 2)

Les émulsions de bitume standard sont normalement considérées comme étant de type H/E. Elles contiennent habituellement de 40 % à 75 % de bitume, 0,1 % à 2,5 % d'émulsifiant, 25 % à 60 % d'eau plus quelques composants mineurs (Salomon 2006). Les gouttelettes de bitume dans l'émulsion sont caractérisées par une distribution influencée par la recette de l'émulsion ainsi que par la mécanique et les conditions de fonctionnement de l'usine de fabrication de l'émulsion.

La taille des particules (généralement entre 1 et 30 μm de diamètre) et la distribution granulométrique des gouttelettes de l'émulsion influencent fortement les propriétés physiques

de l'émulsion, telles que la viscosité et la stabilité au stockage. Une taille moyenne de particules plus importante entraîne une viscosité plus faible de l'émulsion, tout comme une distribution granulométrique large ou bimodale (Salomon 2006).

Les gouttelettes de bitume dans l'émulsion ont une petite charge. La source de la charge est l'émulsifiant, ainsi que les composants ionisables dans le bitume lui-même. Les facteurs qui forcent les gouttelettes à s'assembler comme le tassement par gravité, l'évaporation de l'eau, le cisaillement ou le gel vont accélérer la flocculation et processus de coalescence, comme tout ce qui réduit la charge sur les gouttelettes.

Les émulsions de bitume sont classées selon le signe de la charge sur les gouttelettes et selon leur réactivité. Les émulsions cationiques ont des gouttelettes qui portent une charge positive. Les émulsions anioniques ont des gouttelettes chargées négativement.

Les émulsions de bitumes se divisent selon sa rapidité de rupture en trois classes :

- Les émulsions à prise rapide (*Rapid Setting* : RS) prennent rapidement au contact de granulats propres de faible surface, tels que les gravillons utilisés dans les scellements de copeaux (enduits superficiels).
- Les émulsions à prise moyenne (*Medium Setting* : MS) prennent suffisamment moins rapidement pour pouvoir être mélangées avec des granulats de faible surface, tels que ceux utilisés dans les mélanges à grade ouvert.
- Les émulsions à prise lente (*Slow Setting* : SS) se mélangeront avec des granulats réactifs de grande surface.

Les émulsions RS sont réactives et sont utilisées avec des granulats non réactifs ; Les émulsions SS ne sont pas réactives et sont utilisées avec des granulats réactifs. Le temps réel de prise et de mûrissement sur le terrain dépendra de la technique et des matériaux utilisés ainsi que des conditions environnementales (Salomon 2006).

La rupture de l'émulsion correspond à l'ensemble des phénomènes qui conduisent de la situation où les fines gouttelettes de bitume sont isolées de celle où elles sont, pour la très grande majorité d'entre elles, engagées dans un processus irréversible qui conduit à la formation d'une phase bitumineuse continue, macroscopique. La rupture s'observe en chantier

lorsque l'émulsion passe de la couleur brune à la couleur noire. Dans des conditions favorables aux travaux d'asphaltage, la rupture de l'émulsion se produit en quelques minutes seulement.

Needham (1996) a mené une large étude sur les propriétés de coalescence des émulsions pendant le compactage, et notamment son comportement en fonction de plusieurs paramètres. Les facteurs qui ont montré un effet important sur la coalescence des particules de bitume pendant le compactage sont le degré de pénétration du bitume, la charge de compactage, la teneur en ciment et l'ajout de polymère combiné au ciment. Les gouttelettes de bitume plus souples se déforment plus facilement pendant le compactage, surtout lorsque la pression à laquelle elles sont soumises est plus élevée. De plus, il semble exister une frontière électrostatique ou stérique entre les gouttelettes qu'il faut surmonter pour les assembler.

Plus la teneur en ciment, employé seul ou avec des polymères, est élevée ; plus la coalescence augmente, en raison de la réaction chimique qui désactive l'émulsifiant, bien que les ciments à prise rapide ne conduisent pas à une coalescence plus rapide. Néanmoins, les émulsions qui présentent une résistance élevée aux ions de réaction d'hydratation OH- et Ca_2^+ montrent une bien meilleure stabilité de mélange (Ouyang et al. 2018). Dans le même temps, le type d'émulsifiant utilisé est également important, car différents types d'émulsifiants semblent avoir un effet retardateur sur l'hydratation du ciment (Tan et al. 2013).

Globalement, le processus de compactage semble être fondamental pour démarrer le processus de coalescence et le développement de la cohésion, puisque les mélanges non compactés n'ont pas montré de comportement cohésif dans les premières 24 h. D'autre part, la température de compactage n'est pas cruciale, puisque les résultats ont montré qu'une augmentation de 3 °C à 45 °C conduisait à une faible augmentation de la coalescence de 37 % à 53 % (Needham 1996).

1.2.3 Ciment Portland ordinaire

Le ciment est un liant hydraulique qui est généralement utilisé pour fabriquer du béton. Lorsqu'il est combiné sous sa forme non hydratée avec l'eau, il forme la pâte de ciment qui

maintient la structure d'agrégat ensemble. Un type particulier de ciments sont les ciments au silicate de calcium, également connus sous le nom de ciments Portland.

À l'heure actuelle, il existe cinq types de ciments Portland (type I-V), dont les principales différences sont dues au processus de production, notamment en termes de minéraux cimentaires utilisés et de la finesse à laquelle le ciment est broyé. Ces cinq types sont définis comme des ciments Portland ordinaires (CPO) et ils sont les plus couramment utilisés pour une application typique du béton (Thomas et Jennings 2009).

La réaction entre le CPO et l'eau forme un nouveau matériau solide appelé gel d'hydrate de silicate de calcium (C-S-H), qui se développe entre les particules donnant de la résistance à la pâte de ciment. La composition volumétrique de la pâte de ciment est fortement liée au degré de la réaction d'hydratation α , qui varie de 0 (ciment non hydraté) à 1 (ciment complètement hydraté). La formulation de l'évolution des propriétés volumiques avec α est possible grâce au modèle de Powers (Powers 1958).

L'hydratation du ciment a lieu grâce à la phase aqueuse qui est introduite dans le mélange à partir de l'émulsion de bitume ou de l'eau elle-même utilisée pour améliorer la compactibilité (Brown et Needham 2000 ; Montepara et Giuliani 2001). La présence de bitume avec le ciment n'empêche pas la formation de composés hydratés du ciment. Néanmoins, différents types d'émulsifiants ont un effet différent sur le taux d'hydratation du ciment (Li et al. 2015 ; Tan et al. 2013). Dans d'autres cas, par exemple lorsque la teneur en émulsifiant est faible, l'eau retenue dans le mélange s'évapore rapidement et l'hydratation du ciment est arrêtée ou empêchée (Miljković et al. 2017). Les anciennes expériences montrent que lorsque le ciment est ajouté, les particules de bitume émulsifié se divisent progressivement. La membrane bitumineuse adhère à la surface du ciment, ce qui peut bloquer l'hydratation des particules de ciment (Wang, Wang, et Ai 2014).

1.2.4 Interaction entre l'émulsion de bitume et les granulats

Comme mentionné dans le paragraphe précédent, l'émulsion de bitume peut montrer différentes manières de floculer et éventuellement de se briser sur la surface du granulat, en

fonction notamment de l'attraction chimique entre les gouttelettes de bitume et le granulat. Dans des situations plus pratiques et en l'absence d'équipement de laboratoire spécifique, il est difficile d'évaluer précisément la composition des granulats et de l'émulsion de bitume. En ce qui concerne les granulats, l'identification devient plus difficile lorsqu'il s'agit de matériau recyclé stocké, car sa nature aléatoire le rend composé de nombreuses variables. Il en va de même pour les émulsions de bitume fournies par des producteurs industriels qui ne sont souvent pas disposés à partager tous les détails concernant la composition. Ainsi, certains aspects importants de la chimie de l'émulsion sont totalement inconnus.

Bien entendu, ces deux problèmes entraînent des incertitudes au moment de la conception du mélange, car les propriétés mécaniques des mélanges CBTM peuvent changer radicalement selon les différentes combinaisons granulat-émulsion.

Lorsqu'une émulsion de bitume est combinée à un matériau d'apport, comme dans les mélanges CBTM, il est raisonnable de supposer que le liant vieilli du matériau d'apport ne se réactive pas pour agir comme un co-liant. En fait, le matériau recyclé est généralement considéré comme une « roche noire », c'est-à-dire une phase de granulats composée d'un granulat récupéré partiellement recouvert d'un liant vieilli rigide. Il est peu probable que le liant vieilli se réactive aux températures de production habituelles du CBTM (Yan et al. 2014) ont évalué l'effet de la présence de GBR dans les propriétés mécaniques des mélanges CBTM et par une analyse par éléments finis (FEM). Les deux protocoles ont confirmé que la présence de GBR améliorait la résistance à la traction indirecte (*Indirect Tension Strength* : ITS), la stabilité à haute température, la résistance à l'humidité et les performances en fatigue. Selon l'analyse, le liant vieilli contenu dans le GBR pourrait agir comme un coussin entre la phase agrégée et le liant vierge, réduisant les champs de contrainte et de déformation.

Dans d'autres recherches, la résistance à l'adhérence à l'interface entre l'émulsion de bitume et la surface des granulats a été évaluée au moyen de l'essai *Binder Bond Strength* (BBS) (Cardone, Virgili, et Graziani 2018 ; Miller et al. 2010). L'essai consiste à coller un moignon sur une surface plane minérale au moyen du liant vierge (dans ce cas l'émulsion de bitume). Après une certaine période de cure et/ou de conditionnement, le moignon est retiré hydrauliquement et la force d'adhésion nécessaire pour le retirer est mesurée. Les résultats de

l'essai BBS ont montré une assez bonne répétabilité, même si l'essai n'a pas été conçu pour tester les émulsions de bitume (Miller et al. 2010). De plus, il a été observé que lorsque l'émulsion de bitume est combinée à une surface calcaire, cela pénalise la sensibilité à l'humidité par rapport à une surface basaltique (Graziani, Virgili, et Cardone 2018). Une tentative a été faite pour évaluer la force d'adhésion GBR/émulsion de bitume ; en recouvrant la surface minérale d'un liant vierge et en simulant un vieillissement en laboratoire pour reproduire la caractéristique du GBR (Cardone, Virgili, et Graziani 2018). Le principal type de défaillance était cohésif (plutôt qu'adhésif), ce qui signifie une bonne liaison entre le bitume résiduel et la surface artificielle du GBR. Lorsque le mastic composé d'émulsion de bitume et de charge a été testé à la place du simple liant résiduel, le principal type de défaillance était adhésif. L'essai du mastic est plus réaliste, puisque dans le mélange CBTM, c'est le mastic (émulsion de bitume, charge et ciment) qui recouvre les plus gros granulats du GBR. Un échec de type adhésif est un indice de la mauvaise liaison entre les deux composants.

1.2.5 Production du CBTM

La conception des mélanges est le processus qui conduit à la production de matériaux de construction avec la qualité et la cohérence nécessaires pour remplir leurs fonctions prévues. Le processus de production comprend de nombreux aspects, tels que le choix des matériaux, ainsi que les procédures de transport, de pose et de compactage. Un processus de production réalisé de manière efficace optimise la consommation d'énergie de chaque aspect, influençant directement les coûts finaux du projet (Xiao et al. 2018).

Le tableau 1.1 présente les différents avantages et inconvénients des ajouts bitumineux et cimentaires du mélange CBTM.

Tableau 1.1 : Avantages et inconvénients des ajouts bitumineux et cimentaires
traduit de Xiao et al. (2018)

Liant	Avantages	Inconvénients
Emulsion de bitume	1) Flexibilité (type de matériau viscoélastique)	1) Distribution non uniforme

	<p>2) Facilité d'application et d'acceptation</p> <p>3) Développement rapide de la force</p> <p>4) La circulation peut être ouverte rapidement</p>	2) Sensibilité à l'orniérage
Ciment	<p>3) Disponibilité, réduction des coûts et facilité d'application</p> <p>5) Les spécifications sont généralement disponibles</p> <p>6) Résistance à la compression et durabilité améliorées.</p>	<p>4) Fissuration par retrait</p> <p>5) Nécessite un murissement et une protection contre le trafic précoce.</p>

La conception de mélanges de CBTM est particulièrement difficile en raison du nombre et des différents types d'ingrédients qui composent ces matériaux. Chaque composant, GBR, eau, émulsion de bitume et ciment, avec sa propre variabilité, sa disponibilité et son coût, doit être mélangé et traité pour formuler un produit composite (Asphalt Academy, 2009). Tebaldi et al. (2014) ont fourni une grande synthèse des procédures de mélange pour la préparation des échantillons pour le CBTM fabriqué avec une émulsion (Tableau 1.2).

Tableau 1.2 : Procédures de mélange CRM avec ajout de bitume (GBR, ciment ou chaux et émulsion) Traduit de Tebaldi, Dave, & Marsac (2014)

Méthode de conception	Température d'émulsion (°C)	Ordre de mélange	Méthode de mélange

Procédure du Minnesota	60	GBR et eau mélangé puis mélangé avec l'émulsion	Manuelle
Procédure Norvège	Température ambiante	GBR, eau et émulsion mélangés en même temps	Manuelle/Mécanique
Procédure italienne	Température ambiante	GBR et granulats, eau, ciment, émulsion	Manuelle
Procédure de Wirtgen	Température ambiante	GBR, ciment, eau et émulsion mélangés en une seule fois. GBR, chaux et eau mélangés au moins 4 h avant le mélange avec l'émulsion.	Mélangeur mécanique
Spécification proposée par le NYS DOT	25	GBR mélangé avec de l'eau. Puis avec émulsion	Mécanique un échantillon mélangé à la fois, temps de mélange $\leq 60s$
Directives d'Afrique du Sud utilisant le compactage vibratoire	Température sur le terrain	GBR et ciment/chaux mélangés. Puis mélangé avec de l'eau et conservé pendant 15 à 30 min. Mélanger avec l'émulsion et conserver pendant 40 à 60 min avant le compactage	Mélangeur de pugmill.

1.2.6 Procédés de compactage

Dans l'état actuel des pratiques, il existe quatre grands types de procédés de compactage en laboratoire pour les mélanges CBTM : impulsif (marteau Marshall et pilon Proctor), statique (compacteur Duriez), statique et pétrissage (Presse à cisaillement giratoire-PCG) et vibratoire (marteau vibrant). Le choix parmi ces méthodes dépend principalement du rôle spécifique du CBTM dans la structure de la chaussée et des expériences techniques. Lorsque les CBTM sont utilisés comme matériau granulaire amélioré, le compactage impulsif pourrait

être plus fiable, tandis que lorsqu'ils sont utilisés comme substitut d'un mélange lié, le pétrissage ou le compactage vibratoire pourraient être plus efficaces.

L'un des objectifs de la préparation des échantillons en laboratoire est de compacter les échantillons d'une manière similaire au compactage sur le terrain. Cependant, la mesure dans laquelle l'une de ces méthodes de conception de mélange simule le compactage sur le terrain n'est pas claire (Tebaldi et al. 2014).

L'un des problèmes du recyclé à froid est la simulation en laboratoire du mélange sur le terrain puisque l'équipement utilisé en laboratoire et la taille des échantillons diffèrent de celle sur le terrain. La distribution des vides d'air dans le mélange est fonction de nombreux facteurs tels que la composition du mélange, la méthode de compactage et les propriétés des granulats.

Le choix parmi les différentes méthodes de compactage et l'énergie sont également importants pour bien représenter les conditions de terrain. De plus, l'influence de l'énergie de compactage et de la densité résultante (teneur en vides d'air) dans le CBTM est d'une extrême importance pour le murissement et le comportement mécanique du mélange (Jiang et al. 2019).

Dans ce cas également, on peut observer que l'eau commence à s'écouler et à être collectée lorsque les vides d'air atteignent une valeur constante (environ 2 à 3 %).

1.2.7 Protocoles de Murissement

Le murissement en laboratoire du CBTM vise à simuler les conditions de cure sur le terrain tout en essayant d'accélérer l'obtention des propriétés à long terme (Jenkins et al. 2008). Par le terme « propriétés à long terme », on entend l'état du matériau pour lequel l'évolution de ses propriétés est presque stable. En fait, il est tout à fait impossible d'établir si les mélanges CBTM sont totalement durcis ou non. Cependant, les facteurs qui influencent le murissement en laboratoire et sur le terrain sont extrêmement difficiles à standardiser et à reproduire. Ils sont liés à la composition du mélange (types de liants et dosage), aux paramètres de construction (degré de compactage, épaisseur de couche, conditions de drainage, phases de construction) et aux facteurs environnementaux. (Température, humidité, vent).

Lorsqu'on utilise à la fois une émulsion de bitume et des ajouts minéraux, le processus de la cure résulte en réalité de plusieurs mécanismes : rupture de l'émulsion, perte d'humidité et hydratation des éventuels liants cimentaires. Par conséquent, un protocole de mursissement simulé en laboratoire doit prendre en compte le mécanisme de la cure unique caractérisant les composants utilisés (rupture de l'émulsion/perte d'humidité et hydratation du ciment), en prêtant attention à la forme, aux dimensions et aux conditions limites de l'échantillon ainsi qu'en contrôlant la température de mursissement et l'humidité relative (Fabrizio et al. 2015).

En particulier, le taux de cure initial et l'eau résiduelle du CBTM sont extrêmement importants pendant les activités de construction. Ils contrôlent le moment où les couches supérieures peuvent être posées et donc le moment où la chaussée réhabilitée peut être rouverte à la circulation.

1.2.8 Murissement en laboratoire pour les mélanges d'émulsion de bitume

Un aspect particulier de la cure dans les CBTM est la présence de liants bitumineux et hydrauliques, qui se caractérisent par l'interaction de différents mécanismes physiques et chimiques. Les mécanismes de mursissements liés à la phase bitumineuse impliquent essentiellement la rupture de l'émulsion et l'expulsion de l'eau.

Dans un premier temps, la floculation et la coalescence des gouttelettes de bitume conduisent à la formation de films bitumineux incorporant une partie des particules les plus fines des granulats (filler et sable fin), du ciment et de l'eau. Ensuite, la cohésion est assurée par la perte d'humidité par évaporation et les voies d'écoulement induites par la pression interstitielle. La cure implique également des réactions chimiques liées à l'hydratation du ciment. À faible dosage de ciment, les produits d'hydratation se dispersent à l'intérieur des films de bitume frais augmentant la viscosité du mélange et améliorant la résistance aux déformations permanentes.

À un dosage de ciment plus élevé, le volume de produits d'hydratation augmente pour former une matrice rigide qui relie les granulats plus grossiers. De plus, comme les réactions d'hydratation du ciment nécessitent la présence d'eau, l'utilisation de ciment accélère le processus de mursissement de l'émulsion en réduisant la quantité d'eau libre. La résistance et

la rigidité augmentent normalement en fonction de la quantité d'eau perdue pendant la cure. Le ciment réagit généralement presque complètement dans le mélange (Cardone et al. 2015; Graziani et al. 2018), et la quantité finale d'eau libre est réduite par l'eau impliquée dans la réaction.

D'autre part, même si le matériau est durci pendant plus de 28 jours, une petite quantité d'eau évaporable reste toujours dans le mélange. En fait, il a été montré qu'après 3 jours de murissement à 20 ± 1 °C, le ciment dans les mélanges CBTM avec émulsion cationique avait un degré d'hydratation d'environ 70 % ; et que cette valeur était également probablement en augmentation (Fang et al. 2016).

(Bocci et al. 2011) ont étudié l'influence des conditions de cure, de la température et de l'humidité sur le comportement mécanique de ces matériaux. Ils ont analysé le module de rigidité sur trois températures de murissement représentant des conditions saisonnières typiques : 40 °C, 20 °C et 5 °C. Les résultats ont montré que des températures plus élevées entraînaient des taux plus élevés d'augmentation de la rigidité et des valeurs maximales plus élevées. Néanmoins, même si les basses températures ont ralenti le processus de murissement, elles n'ont pas pénalisé les performances potentielles du mélange. De plus, ces mélanges ont montré une bonne résistance globale à l'humidité, quelle que soit la température de murissement.

1.3 Modélisation des caractéristiques du CBTM

Le processus de murissement des mélanges CBTM est caractérisé par une perte de masse due à l'évaporation de l'eau ; et une augmentation des propriétés mécaniques, qui est en partie causée par l'hydratation du ciment (Dolzycki, Jaczewski, et Szydłowski 2017). La perte d'eau et la réaction du ciment ont une tendance évolutive dans le temps, qui peut être observée en enregistrant le paramètre de manière expérimentale. Ces paramètres peuvent être facilement modélisés pour prédire les valeurs à long terme et en même temps les paramètres du modèle peuvent être utilisés pour comparer les différents mélanges CBTM analysés.

Initialement, le modèle de Michaelis-Menten a été utilisé pour les mélanges CBTM afin d'évaluer la tendance des propriétés du matériau en fonction du temps. Cependant, d'autres modèles sont présents dans la littérature, comme la méthode de la maturité. Elle consiste à mesurer l'historique de température du béton pendant la cure, ce qui permet d'estimer le degré d'hydratation et donc l'évolution de la résistance (Galobardes et al. 2015).

Dans le cas où une charge répétée (par exemple la circulation) est appliquée à un matériau bitumineux, un champ de déformation 3D est observé, mais il peut être simplifié en 2D le long des directions longitudinale et transversale de la charge appliquée. En fonction de l'amplitude de déformation transmise au matériau, ainsi que du nombre de cycles d'application de la charge, la chaussée présente différents types de comportements et éventuellement une rupture (Figure 1.3).

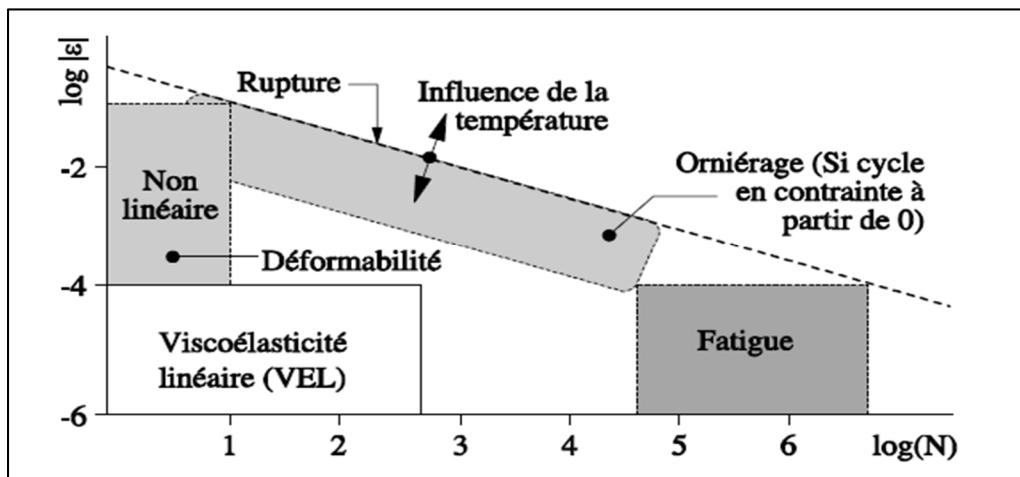


Figure 1.3 : Comportement typiquement observé dans les mélanges bitumineux
Tirée de Di Benedetto et al. (2001)

Lorsque la déformation et le nombre de cycles appliqués sont faibles, le matériau n'est pas censé s'endommager et se comporter comme un matériau viscoélastique linéaire (VEL). La contribution visqueuse est donnée par le liant bitumineux présent dans le mélange. Le comportement général d'un matériau VEL est compris dans deux limites. À des taux d'application de charges élevées (hautes fréquences), ou à très basses températures, il se comporte comme un matériau parfaitement élastique. À de très basses fréquences ou à haute température, il se comporte comme un matériau parfaitement visqueux. En conséquence, la

réponse matérielle entre ces deux extrêmes est régie par la théorie VEL (Hervé Di Benedetto et Corté 2005).

La caractérisation VEL d'un matériau bitumineux peut être évaluée par des tests de module complexes.

1.3.1 Module Complexe

Par définition, le module complexe est le coefficient de proportionnalité entre l'amplitude complexe sinusoïdale de la contrainte, pour une fréquence donnée, et l'amplitude sinusoïdale de la déformation ε (Carter et Perraton 2002).

Le module complexe E^* d'un matériau est une unité complexe composée d'une partie réelle, ou module de stockage E_1 , et d'une partie imaginaire, ou module de perte E_2 :

$$E^* = E_1 + iE_2 \quad (1.1)$$

Où i est le nombre imaginaire. Pour les mélanges bitumineux, E^* dépend de la température et du taux de chargement.

La norme du module complexe $|E^*|$ peut être mesurée par l'application d'une contrainte sinusoïdale qui correspond à une réponse sinusoïdale de la déformation, qui est normalement retardée par rapport à la contrainte d'une quantité définie comme l'angle de phase, φ

L'essai du module complexe (E^*) est effectué pour déterminer le comportement viscoélastique linéaire (VEL) des mélanges bitumineux à différentes températures et différentes fréquences par rapport à un angle de phase φ (Carter et Perraton 2002). Par conséquent, un matériau traité avec de la mousse ou de l'émulsion, avec un comportement viscoélastique linéaire prouvé, peut être caractérisé à la fois par l'angle de phase et le module complexe correspondant.

Le module complexe est mesuré par un test direct de traction-compression effectué dans une cellule de chargement. Il a l'avantage d'être un essai homogène, c'est-à-dire que la charge appliquée à l'échantillon testé entraîne une répartition uniforme de la contrainte dans tout le matériau et, par conséquent, des propriétés rhéologiques peuvent être déduites en mesurant la

déformation. Les résultats obtenus à partir de l'essai sont analysés à travers le modèle 2S2P1D (Hervé Di Benedetto et al. 2004)

Les équations qui décrivent les fonctions de contrainte et de déformation ($\sigma(t)$ et $\varepsilon(t)$), ainsi que le module complexe E^* sont :

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \sin(\omega t) \quad (1.2)$$

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot \sin(\omega t - \phi) \quad (1.3)$$

$$E^* = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot e^{i\phi} = |E^*| \cdot e^{i\phi} \quad (1.4)$$

Où $\omega=2\pi f$ représente la pulsation et f représente la fréquence.

L'angle de phase peut varier de 0° , typique d'un matériau parfaitement élastique, à $\pi/2$, typique d'un matériau parfaitement visqueux. Ce paramètre représente la rotation du vecteur de norme $|E^*|$ dans le plan imaginaire de Cole-Cole (E_1 vs E_2). Par conséquent, la norme du module complexe $|E^*|$ peut-être déterminé comme :

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (1.5)$$

Le $|E^*|$ et ϕ dans les matériaux VEL sont fortement influencée par la température et la fréquence de chargement. En général, pour un même matériau soumis à une contrainte sinusoïdale, $|E^*|$ tend à augmenter lorsque la température diminue (ou que la fréquence augmente), tandis que ϕ tend à augmenter lorsque la température augmente (ou que la fréquence diminue). Ce comportement est habituel dans les mélanges d'enrobés à chaud, mais il est également respecté dans les mélanges CBTM (Figure 1.4).

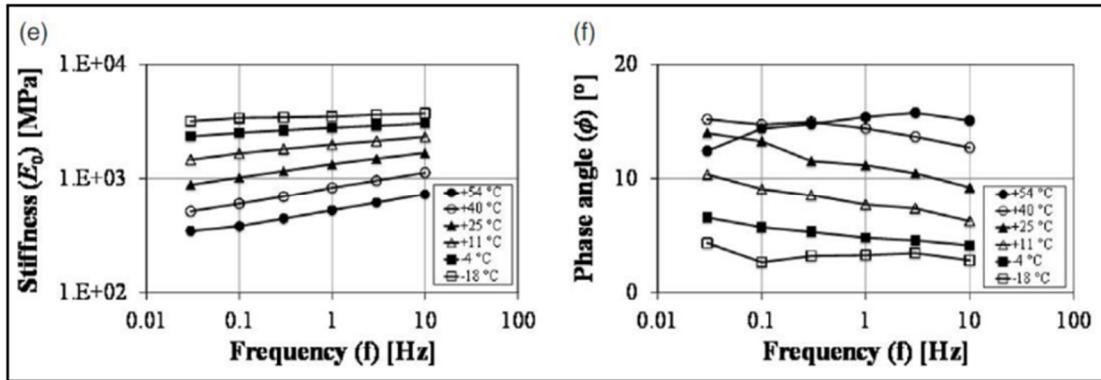


Figure 1.4 : Courbes isothermes pour les mélanges CBTM (6 températures, 6 fréquences) Tirée de Godenzoni, Graziani, et al. (2016)

De plus, en raison de leur composition physique (faible dosage de bitume, vides d'air élevés, faible enrobage de granulats), les CBTM présentent généralement des valeurs de rigidité $|E^*|$ et l'angle de phase ϕ plus faible par rapport à l'enrobé à chaud (Graziani et al. 2020).

À partir des courbes isothermes obtenues par les résultats expérimentaux, on peut clairement observer que la même valeur de $|E^*|$ ou ϕ peut être obtenu à différentes températures ou fréquences. Si tel est le cas, cela signifie que le matériau respecte le Principe de Superposition Temps-Température (PSTT). Ceci peut également être supposé si les points expérimentaux suivent une courbe unique dans l'espace de Black ($|E^*|$ vs ϕ) ou le plan de Cole-Cole. Par exemple, les liants modifiés aux polymères ne respectent pas le PSTT en raison de la présence de polymères dans le mélange (Olard et Di Benedetto 2003).

Lorsque le PSTT s'applique, il est possible de décrire la norme du module complexe $|E^*|$ où l'angle de phase ϕ comme propriétés dépendant uniquement de la fréquence, appelée dans ce cas fréquence réduite f_{red} . Après avoir sélectionné une température de référence T_r et sa courbe isotherme associée, les courbes isothermes restantes peuvent être décalées d'une certaine quantité sur l'axe des fréquences pour suivre la courbe de référence. La nouvelle position des

courbes isothermes est caractérisée par les mêmes valeurs de $|E^*|$ ou ϕ , mais la fréquence est traduite par un facteur de décalage a_T :

$$f_{red} = f \cdot a_T \quad (1.6)$$

Il est évident que pour la courbe isotherme de température de référence, $a_T = 1$. Les résultats ainsi exprimés sont appelés « courbes maîtresses » (Figure 1.5).

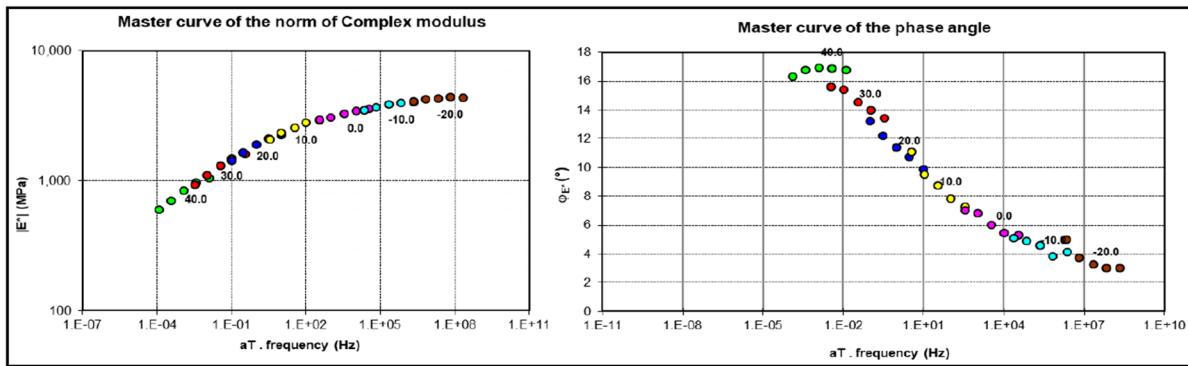


Figure 1.5 : Courbes maîtresses pour un mélange CBTM à $T_r = 20$ °C (5 fréquences, 7 températures) Tirée de Simone Raschia (2020, p. 41)

Le modèle de William, Landel et Ferry (WLF) est souvent utilisé pour estimer la tendance des facteurs de décalage a_T en fonction de la température (Ferry 1980) :

$$\log(a_T) = -\frac{C_1(T - T_r)}{C_2 + T - T_r} \quad (1.7)$$

C_1 et C_2 représentent les constantes de matériau. Ces 2 constantes varient en fonction de la température de référence.

1.3.2 Modélisation rhéologique

La principale caractéristique des mélanges CBTM est la présence combinée de bitume et de ciment. La contribution des deux liants rend la description thermomécanique et rhéologique de ces matériaux différente des approches traditionnelles suivies pour les HMA. En effet, les mélanges CBTM pourraient être considérés comme un matériau intermédiaire entre les mélanges granulaires non liés, les mélanges cimentés et les mélanges bitumineux. Les modèles rhéologiques développés jusqu'à présent conviennent aux systèmes où la dissipation à faible niveau de déformation peut être expliquée en considérant le comportement VEL.

Cette hypothèse est considérée comme valide, probablement parce que les HMA se caractérisent par une teneur en bitume efficace plus élevée et des vides inférieurs par rapport aux mélanges CBTM. Pour ces mélanges, les granulats ne sont pas complètement enrobés par le film de bitume, qui est au contraire dispersé de manière irrégulière. L'utilisation de GBR comme roche noire implique la présence du liant vieilli en plus du liant vierge (Asphalt Academy, 2009). De telles considérations peuvent expliquer, à l'échelle locale, le comportement observé lors des essais rhéologiques et doivent être prises en compte pour la modélisation rhéologique des mélanges CBTM.

La nature VEL des matériaux permet de les représenter sous forme de modèles analogiques, qui sont composés d'amortisseurs linéaires et de ressorts (éléments élastiques). L'importance des modèles analogiques est représentée par leur capacité à décrire les phénomènes physiques du matériau, ce qui, par ailleurs, n'est pas possible avec les fonctions mathématiques empiriques. Les modèles les plus simples pour les matériaux VEL sont les modèles de Maxwell et de Kelvin-Voigt (Ferry 1980).

Dans le premier, le ressort et l'amortisseur sont placés en série, tandis que dans le second, ils sont placés en parallèle. Comme ces modèles ne sont pas assez avancés pour la description du comportement des matériaux bitumineux, ils ont servi de point de départ au développement de modèles de Huet-Sayegh. La combinaison est dans ce cas en série d'un ressort (rigidité E_0) et de deux amortisseurs paraboliques (k et h) en parallèle avec un second ressort (rigidité E_{00}) (Figure 1.6).

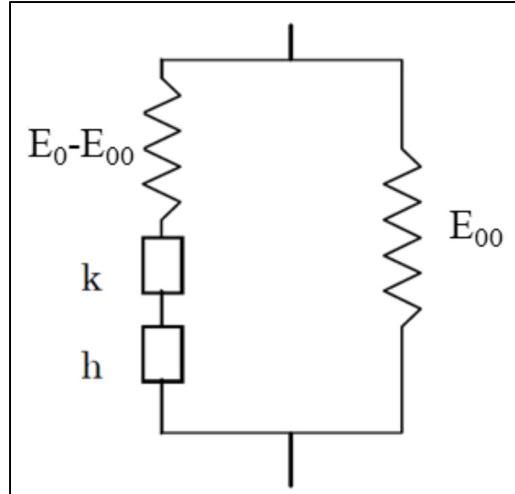


Figure 1.6 : Modèle de Huet Sayegh

Le modèle viscoélastique linéaire de Huet-Sayegh est un bon outil pour représenter les propriétés rhéologiques des mélanges bitumineux, mais pas des liants, notamment aux basses fréquences (ou hautes températures). L'expression analytique du module complexe de Huet-Sayegh est décrite dans l'équation suivante :

$$E_{HS}^*(i\omega\tau_E) = E_\infty + \frac{E_0 - E_\infty}{1 + \delta(i\omega\tau_E)^{-k} + (i\omega\tau_E)^{-h}} \quad (1.8)$$

où i est le nombre complexe défini comme $i^2 = -1$, ω est la pulsation définie comme $\omega = 2\pi f$ (rad/s),

f est la fréquence (Hz), k et h sont des exposants constants ($0 < k < h < 1$), δ est une constante, E_{00} (MPa) est le module statique pour $\omega \rightarrow 0$, E_0 (MPa) est le module vitreux lorsque $\omega \rightarrow \infty$, et τ_E (s) est le temps caractéristique, qui est le seul paramètre dépendant de la température :

$$\tau_E(T) = a_T(T)\tau_{0E} \quad (1.9)$$

Où $\alpha_T(T)$ est le facteur de décalage à une température T .

$\tau_E(T) = \tau_{0E}$ (s) à la température de référence T_r .

$\tau_E(T)$ est déterminé à chaque isotherme en minimisant l'erreur entre la norme mesurée et modélisée du module complexe.

Il a été récemment observé que l'application du modèle de Huet-Sayegh au CBTM et la focalisation de l'ajustement sur le $|E^*|$ conduisaient à une erreur systématique dans la modélisation de l'angle de phase (ϕ), paramètre caractérisant la dissipation d'énergie visqueuse (Graziani et al. 2020). En particulier, un décalage de phase constant indépendant de la fréquence et de la température a été observé entre les valeurs modélisées et expérimentales. Par conséquent, le modèle sous-estime la dissipation totale d'énergie en ne considérant que la composante visqueuse. De ce fait, il semble que les mélanges CBTM se caractérisent par une dissipation totale d'énergie composée d'une composante visqueuse et de phénomènes non linéaires (non visqueux). Cet aspect est décrit comme une dissipation d'énergie probablement due au contact et au frottement de granulat à granulat. Comme solution, ils ont proposé une modification analytique de l'équation de Huet-Sayegh, qui consiste en l'ajout d'un angle de phase constant et exprimé par l'équation suivante :

$$E^*_{HSq}(i\omega\tau_E) = E^*_{HS}(i\omega\tau_E) \cdot e^{iq\frac{\pi}{2}} \quad (1.10)$$

Où $E_{HS*}(i\omega\tau_E)$ est le modèle de Huet-Sayegh ; et le terme $\exp(iq\pi/2)$ représente un élément de dissipation supplémentaire avec un angle, ϕ_{AEP} , égal à $q\pi/2$ sans affecter la valeur absolue du module complexe.

Une telle correction a conduit à un meilleur ajustement des données expérimentales obtenues pour les mélanges CBTM ; mais sous cette forme, le modèle n'est adapté qu'au chargement sinusoïdal et ne peut pas être utilisé pour étendre la représentation du matériau dans le domaine temporel pour un autre chemin de chargement. Cet inconvénient n'existe pas pour le modèle DBN présenté ci-dessous. Dans la littérature, le modèle 2S2P1D est largement utilisé pour

décrire le comportement rhéologique des mélanges bitumineux dans le domaine VEL avec une bonne approximation. De plus, les paramètres qui définissent le modèle 2S2P1D sont utilisés dans le processus d'étalonnage du modèle DBN.

1.3.3 Le Modèle 2S2P1D

Le modèle 2S2P1D est un modèle rhéologique viscoélastique linéaire composé de deux éléments paraboliques, deux ressorts, et un amortisseur. En particulier, un ressort est placé en parallèle avec une série des éléments restants (Figure 1.7). De sa nature, ce modèle est largement utilisé pour caractériser le comportement unidimensionnel ou tridimensionnel des matériaux bitumineux (liants, mastics et mélanges) (Hervé Di Benedetto et al. 2007 ; 2004 ; Tiouajni et al. 2011)

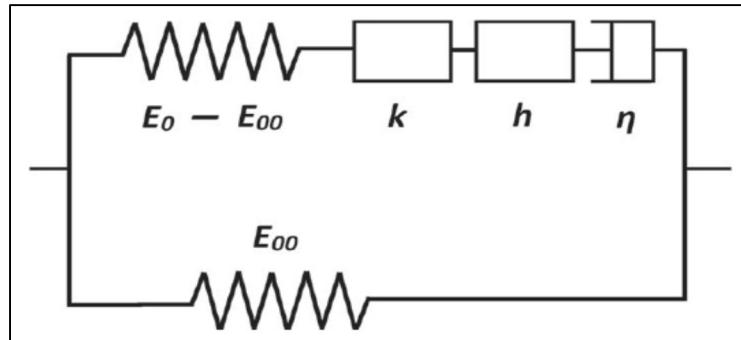


Figure 1.7 : Représentation du modèle 2S2P1D
réadapté de Olard et Di Benedetto (2003)

L'expression analytique du module complexe dans le modèle 2S2P1D est donnée dans l'équation suivante pour une température de référence fixe :

$$E_{2S2P1D}^*(i\omega\tau_E) = E_\infty + \frac{E_0 - E_\infty}{1 + \delta(i\omega\tau_E)^{-K} + (i\omega\tau_E)^{-h} + (i\omega\beta\tau_E)^{-1}} \quad (1.11)$$

Où certains paramètres sont déjà expliqués, et β est un paramètre lié à la viscosité de l'amortisseur $\eta = (E_0 - E_\infty) \beta \tau$ lorsque $\omega \rightarrow 0$.

Comme déjà mentionné, ce modèle est particulièrement adapté aux mélanges bitumineux ou aux matériaux avec presque seulement une dissipation visqueuse et avec sept constantes peut décrire complètement le comportement rhéologique des mélanges. Cependant, il est possible qu'en cas de mélanges CBTM, le 2S2P1D ne soit pas en mesure de bien représenter le comportement du matériau.

Pour un nombre de cycles limité et dans le domaine des petites déformations, le comportement du matériau est considéré comme viscoélastique linéaire. Par conséquent, la représentation schématique correspond à un Kelvin-Vöigt généralisé (KVG) avec une dissipation plastique supplémentaire dans les ressorts D (Figure 1.8) (Attia 2020).

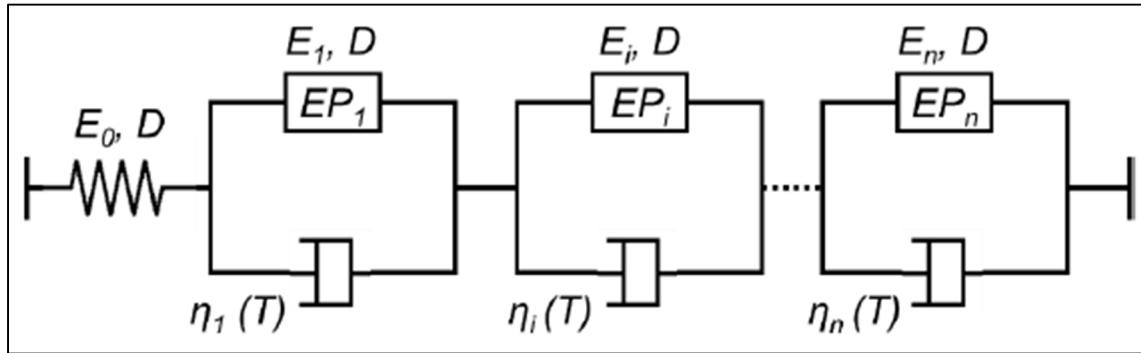


Figure 1.8 : Représentation unidirectionnelle du modèle DBN pour les mélanges bitumineux appliquée dans le domaine des petites déformations

1.3.4 Principe de superposition Temps-Température (PSTT)

Il est nécessaire de considérer à la fois la température et la dépendance temporelle (ou fréquentielle) du matériau pour décrire le comportement viscoélastique linéaire. À l'examen des courbes isothermes, on constate qu'une même valeur de module pour un matériau peut être obtenue à partir de différents couples (fréquence, température). Cette propriété est appelée Principe de Superposition Temps-Température (PSTT) ou équivalence Temps-Température (H. Di Benedetto, Partl, Francken, et Saint-André 2001). Il est utilisé pour décrire les matériaux viscoélastiques. Avec ce principe, $E^*(\omega, T)$ peut être transformé en $E^*(\omega, fr(T))$. En choisissant arbitrairement une température de référence T_r , il est possible de tracer la courbe $(\log|E^*|, \log fr)$ en déplaçant, chaque isotherme, par rapport à l'isotherme correspondant à T_r , parallèlement

à l'axe des fréquences jusqu'à ce que les points ayant le même module se superposent. La courbe unique est appelée « courbe maîtresse ». La figure 1.9 présente un exemple de courbe maîtresse obtenu pour un mélange bitumineux à $T_r = 10^\circ\text{C}$ (H. Di Benedetto, Partl, Francken, et Saint-André 2001).

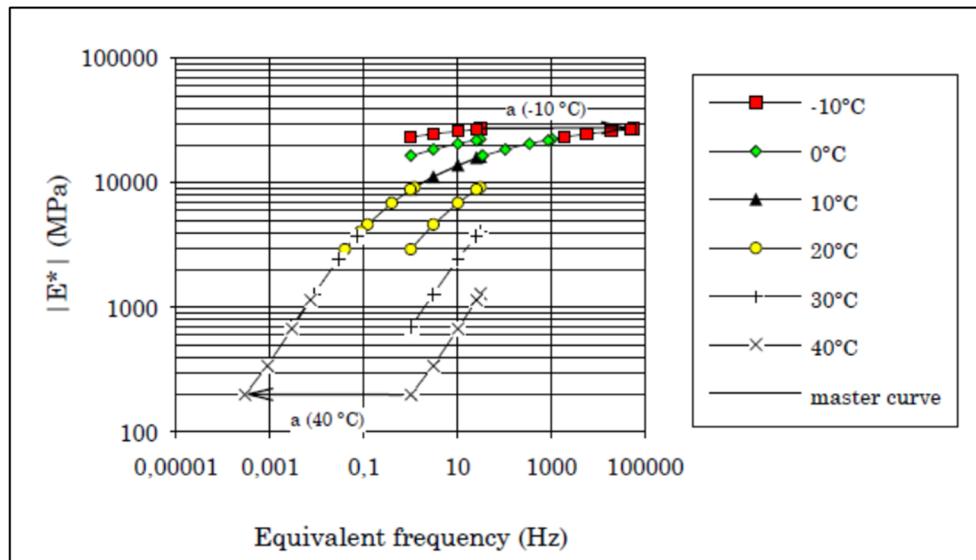


Figure 1.9 : Exemple de courbe maîtresse à 10°C
Tirée de Di Benedetto et De la Roche (1998)

Une courbe maîtresse permet la comparaison d'enrobés testés à différentes fréquences et différentes températures. De plus, elle présente les valeurs de module pour des températures et des fréquences qui ne sont pas accessibles expérimentalement (Pellinen 2001).

Plusieurs équations différentes ont été utilisées pour décrire la relation de superposition temps température pour obtenir des facteurs de décalage dans les matériaux viscoélastiques, mais la plus fréquemment utilisée est l'équation de Williams, Landell et Ferry (WLF).

(Raschia et al. (2021) montrent que le PSTT est applicable aux mélanges CBTM. En conséquence, les courbes isothermes de la norme du module complexe, $|E^*|$, et de l'angle de phase, sont décalées afin d'obtenir les courbes maîtresses à une température de référence $Tr = 20^\circ\text{C}$ (Figure 1.10).

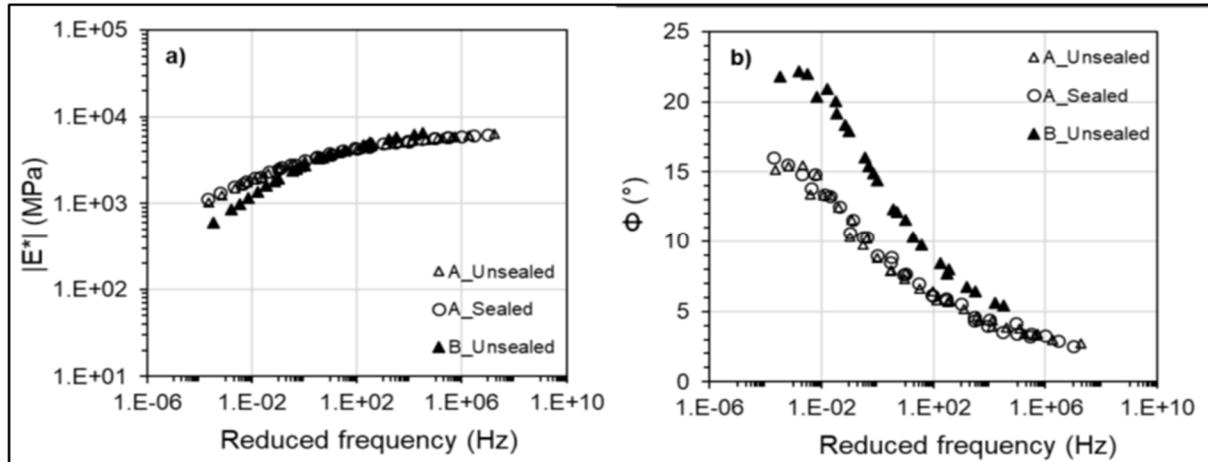


Figure 1.10 : Courbes maîtresses de : a) La norme du module complexe $|E^*|$ et, b) angle de phase φ à $Tr = 20^\circ\text{C}$,
Tirée de Simone Raschia (2020, p. 172)

1.4 Caractérisation en fatigue des matériaux recyclés à froid

L'essai de fatigue permet de simuler au laboratoire le comportement des enrobés sous charges de trafic ainsi que les charges thermiques. L'essai est effectué au laboratoire sur des éprouvettes cylindriques. Généralement, la charge sinusoïdale appliquée correspond à un déplacement (déformations) ou une force (contrainte) d'amplitude constante. Ainsi, l'essai de fatigue peut être effectué en utilisant deux modes de chargement différents (contrôlé par la déformation/contrainte) comme indiqué dans la figure 1.11.

- Dans l'essai d'effort contrôlé, l'essai est contrôlé par une force qui est maintenue constante pendant l'essai, mais l'effort augmente avec le nombre de répétitions. La fatigue est définie comme une rupture de l'éprouvette.

- Dans l'essai en déformation contrôlée, la déformation est appliquée sur l'éprouvette avec une fréquence et amplitude constante et la contrainte diminue en fonction des applications de charge.

La fatigue se produit lorsque la charge diminue jusqu'à un pourcentage prédéterminé de la charge initiale, généralement 50 % (Artamendi et Khalid 2004).

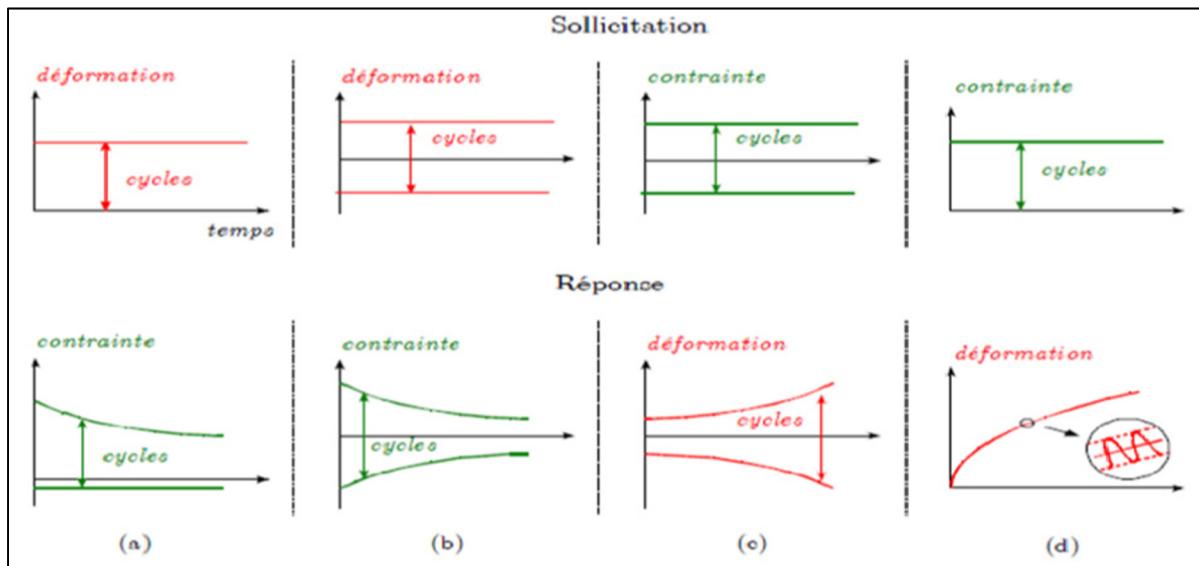


Figure 1.11 : Chemins de sollicitation possibles et courbes enveloppes des cycles réponses obtenues en déformation imposée (a et b) et contrainte imposée (c et d)

Tirée de Nguyen (2010, p. 60)

Fondamentalement, nous concentrons notre attention sur la description détaillée de l'essai de traction-compression tel qu'il est utilisé dans cette étude pour mesurer le module complexe et les propriétés thermomécaniques dans les mélanges CBTM. Des essais de traction-compression sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques (hauteur 150 mm, diamètre 75 mm) (Daniel Perraton et al. 2003).

Selon Baaj (2002), plusieurs critères sont proposés dans la littérature pour caractériser la rupture par fatigue des matériaux bitumineux. Certaines sont utilisées pour déterminer l'état d'endommagement de l'éprouvette et d'autres pour préciser la durée de vie.

Un dernier élément important dans l'analyse de l'essai de fatigue est le potentiel d'autoréparation des enrobés bitumineux. Généralement, l'éprouvette est sollicitée de manière continue. Cependant, il a été observé que les caractéristiques rhéologiques se récupèrent après

une période de repos. Ce qui explique la sous-estimation de la durée de vie (surestimation de l'endommagement) dans les essais de fatigue en mode continu par rapport à la durée de vie réelle dans la chaussée (Hervé Di Benedetto, Ashayer Soltani, et Chaverot 1996 ; Baaj 2002).

1.4.1 Critère basé sur l'évolution du module de rigidité

Dans un résultat d'essai de fatigue typique, où la sollicitation est imposée, trois phases différentes peuvent être identifiées en fonction du nombre de cycles jusqu'à la rupture comme le montre la figure 1.12 (Hervé Di Benedetto, Ashayer Soltani, et Chaverot 1996).

- Phase I : c'est la phase d'adaptation qui est marquée par une décroissance rapide de la raideur de l'échantillon due à la fois à l'endommagement par fatigue et à l'augmentation de la température (Hervé Di Benedetto, Ashayer Soltani, et Chaverot 1996).
- Phase II : c'est la phase de fatigue qui se caractérise par une baisse modérée des valeurs de module et l'établissement d'une évolution régulière et quasi linéaire de l'endommagement. Le rôle de la fatigue est prédominant sur la diminution de la raideur (Baaj 2002).
- Phase III ou phase de défaillance : durant cette phase, il y a une chute rapide du module. Elle correspond aux macro-fissures qui apparaissent progressivement dans l'échantillon et se propagent jusqu'à la rupture à la fin de cette phase.

Par définition, si le module atteint 50 % de sa valeur initiale indiquée au 1^{er} cycle de chargement avec les mêmes conditions d'essai (fréquence et température), l'éprouvette est considérée rompue (Baaj 2002). La durée de vie en fatigue dans ce cas est définie comme le nombre de répétitions qui provoquent une chute de 50 % de la raideur calculée (Tayebali, Rowe, et Sousa 1992) (Figure 1.12). La durée de vie en fatigue N_f , déterminée à partir de ce critère est utilisée pour le dimensionnement des chaussées en France (Baaj 2002).

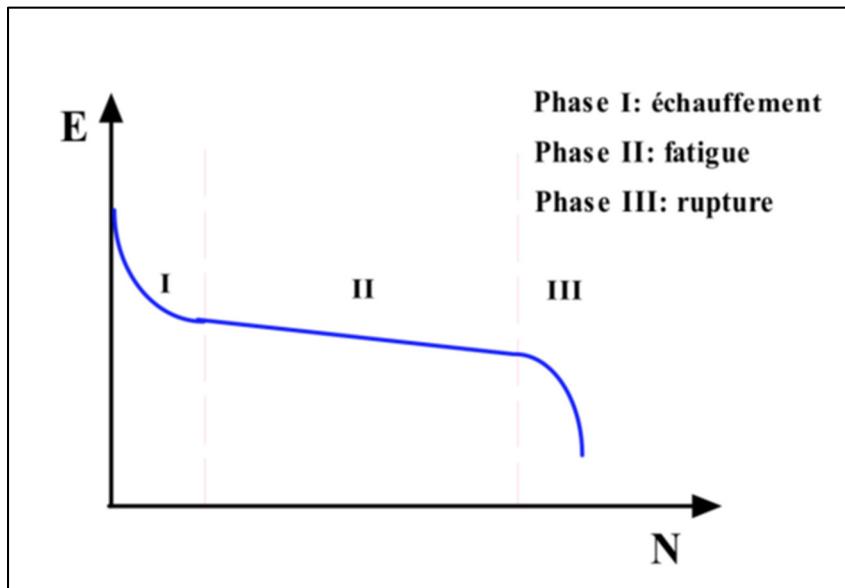


Figure 1.12 : Distinction de trois phases différentes dans un essai de fatigue

1.4.2 Critère de fin de phase II

Le critère de fin de la phase II identifie le moment de changement de mode d'endommagement et indique le début de la phase III. La durée de vie en fatigue $N_{\text{fII/III}}$ est le nombre de cycles qui correspond au point de changement de la phase II à la phase III. Les différents processus non liés à la fatigue n'ont pas d'effet sur la valeur de $N_{\text{fII/III}}$, ainsi que la phase de rupture liée à la propagation de la macrofissure dans l'éprouvette n'affecte pas la valeur de $N_{\text{fII/III}}$.

1.4.3 Essai de traction/compression sur éprouvette cylindrique

L'expérience choisie est l'essai classique de traction-compression sur des échantillons cylindriques (hauteur 150 mm, diamètre 75 mm) (Perraton et al. 2003). Ce type d'essai permet d'étudier le comportement viscoélastique linéaire (VEL) et de déterminer l'endommagement par fatigue des mélanges bitumineux. Cet essai est considéré comme homogène, car les valeurs de déformation et de contrainte sont égales à chaque point de l'échantillon. Plusieurs

caractéristiques mécaniques peuvent être déterminées à partir de cet essai (la rigidité, le coefficient de Poisson...).

Les essais de traction/compression (Figure 1.13) ont été effectués dans le laboratoire LCMB à une température de 10 °C et à la fréquence de sollicitation de 1 Hz en mode de déformation imposée ($50\mu\text{def}$).

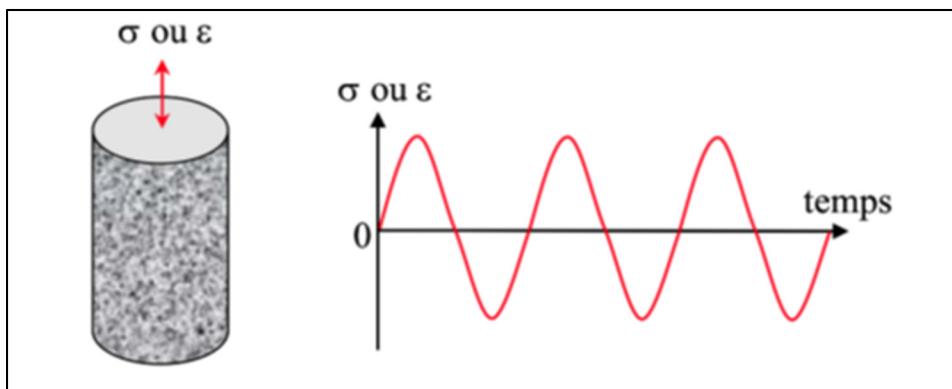


Figure 1.13 : Principe de sollicitation en traction-compression sur éprouvette cylindrique Extrait de Nguyen (2009)

1.5 Conclusion

L'utilisation de la technique de recyclage à froid des enrobés bitumineux devient très répandue ces dernières années grâce aux avantages économiques et environnementaux que représente cette technique de construction de chaussée.

Les matériaux traités au ciment et au bitume (CBTM) sont un type particulier des enrobés recyclés à froid. Le CBTM est composé des granulats bitumineux recyclés (GBR), de l'émulsion de bitume, du ciment et du filler et de l'eau. L'utilisation de l'émulsion de bitume permet la fabrication des mélanges CBTM à température atmosphérique. L'utilisation du ciment engendre l'augmentation de la rigidité de mélange.

La performance des chaussées en CBTM se détériore progressivement en raison de la répétition des charges des véhicules.

Les essais de fatigues en laboratoire permettent la simulation du chargement appliqué au niveau de la chaussée en service.

L'étude des propriétés rhéologiques permet une compréhension plus profonde du comportement du matériau par l'application du modèle rhéologique 2S2P1D.

CHAPITRE 2

ÉNONCÉ DU PROBLÈME ET OBJECTIF

Au Québec, les techniques de recyclage à froid sont largement employées, grâce à leur contribution en termes de durabilité économique et environnementale. Plusieurs sections de chaussée, totalisant plus de 809 km depuis 1992, ont fait l'objet de travaux de retraitement en place (RP) avec de recyclage à froid des enrobés au cours des 12 dernières années et plus (Bergeron et al. 2005). De nombreux projets sont réalisés suivant cette nouvelle voie, et les recherches scientifiques axées sur ces matériaux se multiplient considérablement ces dernières années. De plus, un avantage majeur des matériaux bitumineux recyclés à froid (CRM) par rapport aux techniques de recyclage à chaud est la possibilité de réutiliser des pourcentages plus élevés de granulats bitumineux recyclés (GBR) (Stimilli et al. 2013). Néanmoins, la conception de la chaussée de la réhabilitation et la réalisation elle-même sont souvent basées sur l'expérience acquise, et non sur les directives standard ou les principes scientifiques. Jusqu'à présent, la simulation en laboratoire de ce qui se passe réellement sur le terrain (et inversement) reste une question complexe (Serfass et al. 2004).

Certaines recherches mentionnent que les enrobés recyclés à froid et les enrobés à chaud présentent des modules de rigidité similaires (REF). Cependant cette comparaison n'est possible qu'à une température bien déterminée et à une fréquence bien précise. La rigidité des enrobés recyclés à froid et à chaud présente un écart parfois positif et négatif selon plusieurs paramètres.

Il convient de noter que les caractéristiques des enrobés recyclés à froid évoluent dans le temps. Par exemple, la stabilité de ces matériaux est faible au plus jeune âge et augmente avec le temps. Il existe encore des lacunes où plus de travail nécessaire pour une compréhension meilleure au niveau de l'évolution du comportement de ces enrobés. Les enrobés traités à l'émulsion de bitume, ont des caractéristiques évolutives dans le temps, qui sont liées, au nombre de cycle de chargement, teneur en eau, température, teneur en vide, etc....). Pour cette raison, il est important de concevoir un bon matériau, empêchant un manque permanent de résistance à long terme et le gaspillage de millions de dollars.

De nombreux chercheurs dans le domaine de l'ingénierie routière (Yan et al. 2010) évaluent la qualité des couches recyclées à l'aide d'essais de tenue à la fatigue sous charges cycliques (contrainte ou déformation contrôlée). Les charges cycliques réduisent la capacité structurelle de la chaussée, ce qui résulte de la baisse du module d'élasticité et de l'augmentation de la déformation (Mannan, Islam, et Tarefder 2015).

La charge répétée du trafic peut contribuer aux dégradations de la chaussée, mais peut également causer la rupture par fatigue. La durée de vie en fatigue d'une chaussée est affectée par deux facteurs majeurs : l'un est lié à la charge et l'autre est lié au matériau (Hafeez et al. 2013). Les facteurs liés à la charge comprennent la fréquence de chargement qui relie la vitesse du véhicule et la contrainte induite par la charge au bas de la couche d'enrobé. Les facteurs liés aux matériaux comprennent les propriétés de l'enrobé et du liant. Il est donc nécessaire de comprendre l'influence des cycles de chargement répétés sur les propriétés mécaniques des matériaux recyclés à froid traités à l'émulsion de bitume.

Très peu d'informations sont disponibles dans la littérature et dans la pratique sur la comparaison du comportement entre les enrobés à chaud et les recyclés à froid. On pense qu'il y a un changement dans le comportement rhéologique (module complexe), pas seulement une chute de module, mais aussi un changement dans la courbe maîtresse du module complexe après un nombre bien déterminé de cycles de chargement.

L'objectif principal de ce travail de recherche étant l'évaluation de l'évolution du comportement thermomécanique des CBTM selon des cycles de chargement, il a été nécessaire de diviser le travail de laboratoire en deux parties principales. Premièrement, une formulation d'un seul mélange CBTM a dû être effectuée. Une fois la formulation établie, des essais de module complexe en tension-extension uniaxiale ont été effectués avant et après des cycles de chargement qui représentent un chargement dû au trafic.

L'objectif de ce travail est d'évaluer l'effet des cycles de chargements sur les propriétés thermomécaniques des mélanges CBTM. La performance a été évaluée par un test de module complexe complet après un nombre bien déterminé de cycles de chargement.

Le CHAPITRE 1 présente une mise à jour de la littérature scientifique spécifiquement liée au sujet de cette recherche, qui a conduit à l'énoncé du problème et aux objectifs de recherche.

Le CHAPITRE 2 introduit la problématique et l'objectif de la recherche.

Le CHAPITRE 3 donne une description à la fois théorique et pratique sur la conception, la fabrication des mélanges CBTM ainsi que les différents essais mécaniques faits dans cette étude. Les propriétés des matériaux utilisés dans cette recherche sont présentées et analysées dans la section 1. Les échantillons de GBR ont été évalués en matière de granulométrie, de la teneur en liant du GBR. De même, les propriétés des liants bitumineux utilisés dans cette étude sont présentées et expliquées. La section 2 présente la fabrication des éprouvettes. Les dalles rectangulaires de mélanges CBTM ont été fabriquées à l'aide de compacteurs à roues (LCPC). Les échantillons de dalles ont été compactés à l'aide d'un compacteur de dalles à 5 % de vides. La taille des échantillons de dalles est de 500 mm de longueur, 180 mm de largeur et 100 mm d'épaisseur. Les éprouvettes cylindriques compactées ont été percées dans l'épaisseur de la dalle avec un diamètre de 75 mm et une hauteur de 150 mm pour les essais mécaniques.

Le CHAPITRE 4 présente les résultats obtenus en analysant les données récupérées et donne des interprétations sur l'effet des cycles de chargement sur l'évolution du comportement des mélanges CBTM. Les principales conclusions de cette recherche sont décrites ainsi que quelques recommandations utiles pour les travaux futurs.

CHAPITRE 3

CAMPAGNE EXPÉRIMENTALE

3.1 Introduction

Ce chapitre est séparé en deux parties. Premièrement une description des matériaux utilisés pour la formulation du CBTM est donnée avant de discuter de la formulation elle-même et de la fabrication des CBTM. Deuxièmement, le programme expérimental comprenant des cycles de fatigues et des essais de module complexe est présenté.

3.2 Matériaux et formulation

3.2.1 GBR

Les granulats bitumineux recyclés (GBR) ont été échantillonnés à partir d'un tas à une usine dans la région de Brossard (Canada). L'échantillonnage a été réalisé suivant la méthode d'essai LC21-010. Par la suite, il a été entreposé dans des seaux de 30 kg au laboratoire à l'ÉTS.

Le matériau a été homogénéisé manuellement à l'aide d'une pelle à tête carrée avant d'être divisée en quatre. Ensuite, le matériau a été divisé en quatre quarts égaux avant d'être recombiné (le quart 1 avec le 3e quart et le deuxième quart avec le 4e). Les échantillons séparés (environ 30 kg) ont été placés dans des seaux en plastique scellés pour être stockés jusqu'à ce qu'on en ait besoin pour l'analyse. Le matériel dans les seaux a été séparé mécaniquement au besoin.

En premier lieu, le GBR est séché dans un four à 60 °C pendant 4 jours. Par la suite, les essais de caractérisation de GBR sont présentés comme suit :

- Essai granulométrique selon la norme LC 21-040 (Figure 3.3),

- Essai d'absorption d'eau selon la norme LC 21-065,
- Essai de teneur en bitume en utilisant la fournaise, (Figure 3.1), selon la norme LC 26-006



Figure 3.1 : Fournaise à ignition

Un seul type de GBR a été utilisé dans le cadre de ce travail, formulé en laboratoire avec une émulsion de bitume CSS-1. La figure 3.3 présente la courbe granulométrique de GBR utilisé dans cette recherche et ses propriétés sont affichées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Propriété des GBR (essai de laboratoire LCMB)

Propriétés	Standard	Unité	Valeur
Contenu de liant	ASTM D6307	%	5,3
Dimension nominale maximale de particule	ASTM D448-03	mm	14
Densité Maximale	ASTM C127-128	g/cm ³	2,5
Absorption d'eau	ASTM C127-128	%	1,1

La densité apparente a été évaluée à 2,577 g/cm³ et l'absorption d'eau à 1 % (EN 1097-6 2013).

Pour l'analyse granulométrique, on a pris un sous-échantillon de 1,0 kg. Pour l'essai de conception du mélange, les matériaux GBR de chaque seau de stockage ont été divisés en 8 échantillons à l'aide de la méthode de séparation.



Figure 3.2 : Séparateur d'échantillon GBR

La granulométrie du GBR a été déterminée selon la méthode LC 21-040. Comme expliqué précédemment, le GBR a été mis en lots pour obtenir 8 échantillons de 1000 grammes, séchés au four (60 °C). Le tamisage humide n'a pas été effectué, car le GBR contient beaucoup de fines. Ce test a été utilisé pour déterminer la distribution des particules de la courbe noire du matériau GBR.

Les résultats montrent que le GBR tel qu'il a été reçu contenait 42 % de granulats grossiers retenus par le tamis de 5 mm et 92 % étaient retenus sur le tamis de 0,630 mm avant extraction de bitume.

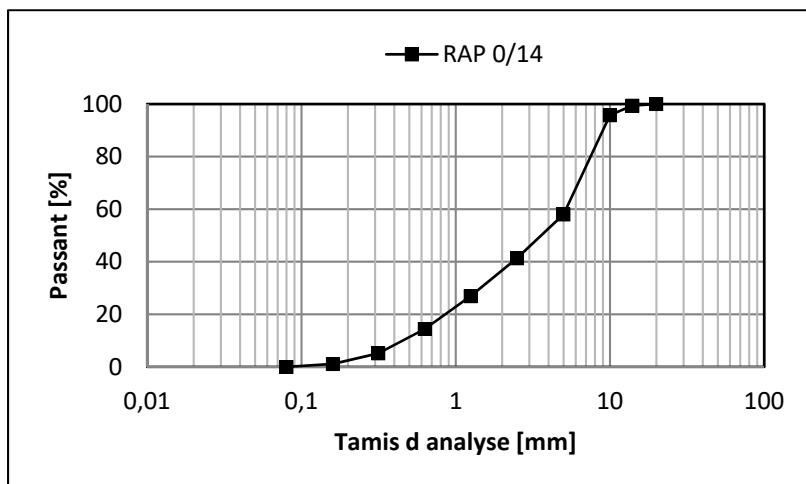


Figure 3.3 : Analyse granulométrique du GBR utilisé

3.2.2 Teneur en liant du GBR par ignition

La quantité de liant bitumineux présente dans les échantillons de GBR a été déterminée par la méthode LC 26-006 (MTQ 2010) : « Détermination de la teneur en bitume par ignition ». Deux quantités de GBR se sont vu attribuer un numéro et ce numéro a été choisi au hasard pour les tests afin de réduire tout biais de procédure dans les résultats du test. Dans cette procédure de test, chaque échantillon de GBR (1000 grammes) est chauffé à environ 540 °C pendant 45 minutes et le liant bitumineux est brûlé de l'échantillon par allumage. Après cela, le granulat est refroidi à la température ambiante. La teneur en bitume est déterminée à partir de la différence entre les masses initiale et finale de l'échantillon. La teneur en bitume du GBR est donnée dans le tableau 3.2. Les résultats montrent que les GBR ont une teneur moyenne en bitume d'environ 5,3 % en poids du mélange total.

Tableau 3.2 : Teneur en bitume du GBR par méthode d'allumage

GBR	Echantillon1	Echantillon2
Masse initiale de l'échantillon avant l'ignition (g)	1653,9	1641,3
Masse finale de l'échantillon après l'ignition (g)	1568,3	1557,2
Facteur de correction (%)	0,15	
Teneur en bitume corrigée (%)	5,33	5,27
Moyenne	5,29	

3.2.3 Émulsion de bitume et filler actif

L'émulsion de bitume est un composant très sensible à la température. En particulier, elle est généralement stockée à des températures comprises entre 20 °C et 40 °C afin de maintenir un niveau acceptable de stabilité des gouttelettes de bitume en suspension (Needham 1996).

L'émulsion utilisée est une émulsion CSS1 (ASTM 2020a) cationique à prise lente qui contient 63 % de bitume traditionnel . Cette émulsion a un comportement à prise lente et agit comme un lubrifiant pendant la phase de compactage. Sa formulation spéciale a été conçue pour mélanger des teneurs élevées en fines, par conséquent, il est possible d'obtenir des temps d'ouvrabilité longs et une grande stabilité. La dilution d'une émulsion diminue sa viscosité, ce qui facilite son application. Elle modifie cependant le pourcentage de liant résiduel et prolonge le temps de mûrissement. Le dosage des liants (bitume de l'émulsion) est le même pour tous les mélanges (1 % du bitume résiduel), et le dosage de l'agent stabilisant (charge active) est fixé à 1 % pour tous les mélanges (tableau 3.3).

Tableau 3.3 : propriétés de l'émulsion de bitume (donnée du fournisseur)

Caractéristique de l'émulsion	Méthode d'essai	Valeur
Retenu sur tamis 850 µm (% masse)	ASTM D6933	0,01
Stabilité au stockage 24 heures (%)	ASTM D6930	0,10

Viscosité Saybolt-Furol à 25 °C (sec)	ASTM D7496	28,1
Résidu de distillation à 260 °C (%)	ASTM D6997	62,8
Pénétration, 25 °C, 100 g, 5 s (0,1 mm)	ASTM D5	170
Charge de particules	-	POSITIVE

Depuis le début des années 1970, de nombreuses études ont montré que le ciment peut améliorer la résistance mécanique initiale et les propriétés de performance du mélange d'émulsion de bitume (Du 2014 ; Brown et Needham 2000). Sur la base de plusieurs travaux de recherche, en ajoutant du ciment, la rigidité et la fragilité du BSM seront augmentées (Oruc, Celik, et Akpinar 2007). Cela réduira la déformation à la rupture et des déformations initiales élevées réduiront considérablement la durée de vie à la rupture. De plus, les matériaux contenant moins de 1,5 % (en masse) de ciment ne souffrent généralement pas de la fissuration par retrait (Sebesta 2005).

De plus, certains chercheurs suggèrent d'utiliser de la chaux hydratée, des cendres volantes ou d'autres matériaux chimiques pour améliorer les propriétés de performance du mélange recyclé à l'émulsion.

Le concept derrière le CBTM est de profiter de l'équilibre entre les liaisons bitumineuses et cimentaires pour contrôler la résistance, la rigidité et la sensibilité thermique du mélange. Lorsque le bitume est le liant dominant, les mélanges CBTM présentent une sensibilité thermique et sont sujets à la rupture par fatigue. Si le ciment est le liant dominant, les mélanges CBTM présentent une rigidité élevée et peuvent être sujets à un comportement fragile.

Dans ce mélange, les caractéristiques de ciment et de filler sont représentées dans le tableau 6.

Tableau 3.4 : Propriétés de ciment et de filler

Matériaux	Absorption (%)	Densité de particules (g/cm3)	Taille maximale des particules
Ciment	0	3,015	80 µm
Filler	1	2,757	80 µm

Le mélange CBTM considéré est composé de GBR et de filler sous forme de granulats, en proportion de 95 % et 4,5 % en masse, respectivement. Le filler est utilisé pour répondre aux exigences de calibrage, car le GBR se caractérise généralement par une teneur insuffisante en fines du fait des agglomérations. Un dosage de ciment de 0,5 % en masse de granulats est ajouté comme Co-liant. le ciment est utilisé pour améliorer la cohésion et la dispersion du bitume, ainsi que pour augmenter la vitesse initiale du processus de murissement Le ciment est de type usage général (GU) (Tableau 3.4) CSA A3000-13 (Canadian Standards Association 2013) avec une résistance à la compression à 28 jours de 43,9 MPa (ASTM 2020b).

Cependant, il convient de préciser que la réponse mécanique d'un CBTM est extrêmement dépendante des proportions dans lesquelles le bitume et le ciment sont mélangés. Le comportement du ciment et du bitume agissent simultanément en considérant le rapport pondéral entre le bitume en émulsion résiduel dans l'enrobé (BR) et le dosage de ciment utilisé (C). Le ciment permet d'atteindre une rigidité élevée et, en augmentant le dosage résiduel de bitume (BR), une résistance élevée à la rupture peut également être fournie.

L'émulsion de bitume peut présenter différentes manières de floculer et éventuellement de se briser à la surface des granulats, en fonction notamment de l'attraction chimique entre les gouttelettes de bitume et les granulats. Dans des situations plus pratiques et faute de matériel de laboratoire spécifique, il est difficile d'évaluer avec précision à la fois la composition des granulats et de l'émulsion de bitume. Concernant les granulats, l'identification devient plus difficile lorsqu'il s'agit de GBR stocké, car son caractère aléatoire le rend composé de nombreuses variables. 1,0 % de bitume résiduel en masse de granulats a été utilisé dans le mélange (1,6 % d'émulsion de bitume). La distribution des pourcentages des

différents matériaux constituant le mélange a été choisie en prenant en compte les petites quantités perdues qui restent collées sur la surface du malaxeur lors de fabrication du mélange.

3.2.4 Préparation du mélange

Afin de faciliter le contrôle de l'eau, les granulats de bitumes recyclés sont séchés dans un four à $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ pendant 3 jours. L'eau contenue dans le mélange provenant de l'émulsion et d'eau additionnelles nécessaire pour l'absorption des granulats et la maniabilité du mélange. Le mélange a été soigneusement fabriqué, en ajoutant progressivement la charge active respective, la partie de l'eau supplémentaire et l'émulsion. Le mélange est fabriqué manuellement pendant au moins une minute à température ambiante pour chaque étape d'addition, le temps nécessaire pour assurer un bon enrobage des particules.

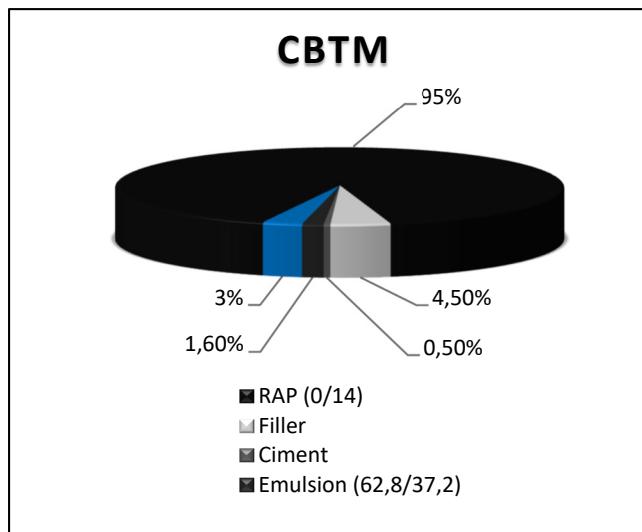


Figure 3.4 : Composition de Mélange CBTM

Le dosage en bitume résiduel des mélanges CBTM a été fixé à 1,0 % de la masse des granulats, conformément à un processus de conception de mélange antérieur. En ce qui concerne l'eau, la teneur totale a également été fixée de manière préliminaire à 3,0 % par masse de granulats. Cette quantité de l'eau est en partie absorbée par les granulats GBR. Le bitume résiduel de l'émulsion est considéré comme totalement efficace. Le dosage de l'eau a été choisi

afin d'atteindre les vides fixes dans le mélange en évitant un effort de compactage élevé et une perte de matériau pendant le compactage (Raschia et al. 2019).

Il a été démontré que les matériaux CBTM durcis à des températures inférieures à 20 °C et ne présentaient pas d'inconvénients dans l'évolution des propriétés mécaniques et structurales à l'avenir, à condition que le projet soit réalisé avec précision (Bocci et al. 2011).

3.2.5 Compactage des plaques

La procédure de production des CBTM a été réalisée en ajoutant aux agrégats (GBR, filler), du ciment, de l'eau supplémentaire et de l'émulsion, dans cet ordre, la densité maximale du mélange était égale à 2,563.

Afin de construire des échantillons représentatifs du terrain, le processus de compactage a été effectué à l'aide d'un compacteur à plaque LCPC au laboratoire du LCMB. Les dimensions des dalles sont généralement de 500 mm de longueur par 180 mm de largeur et 100 mm d'épaisseur. 2 plaques ont été utilisées pour cette partie du travail selon les disponibilités de matériaux. Le compacteur du MLPC est constitué d'un demi-essieu (deux petits pneus) roulant d'avant en arrière à vitesse constante et à pression constante parallèlement à l'axe du moule (Figure 3.5).



Figure 3.5 : Compacteur de plaque LCPC

Après 48 h, l'échantillon devient suffisamment stable pour permettre le démoulage (Figure 3.6). À ce stade, une période de cure de 10 jours à 40 °C avant le carottage est recommandée et respectée afin d'assurer une cure adéquate des mélanges CBTM. Une bonne homogénéité est requise et le processus de compactage doit être parfaitement contrôlé selon la norme LC 26-400 (ministère des Transports de Québec 2019).



Figure 3.6 : Première plaque compacte

3.2.6 Sciage et carottage

La plaque est sciée, selon l'axe transversal, en 3 tranches. La scie est effectuée en laboratoire par un appareil approprié afin d'obtenir des faces planes (Figure 3.7).



Figure 3.7 : Échantillon scié pour fin de carottage

À partir de chaque tranche sciée, il est préférable de prélever une seule éprouvette de 75 mm de diamètre pour s'assurer d'obtenir des carottes homogènes au niveau de compacité (Ashayer Soltani 1998).

Le carottage des éprouvettes cylindriques du côté long des dalles a été effectué au laboratoire, comme illustré à la figure 3.8. Il est important de noter que le carottage a été effectué dans la direction perpendiculaire à la direction du compactage. La machine à carotter est composée d'une foreuse électrique avec des forets creux et un système de refroidissement par eau. Trois éprouvettes cylindriques sont carottées à partir de chaque dalle de CBTM (75 mm de diamètre, 150 mm de hauteur).



Figure 3.8 : Carotteuse

Pour assurer la planéité des surfaces aux extrémités de l'éprouvette, une machine de resurfaçage a été utilisée. Les surfaces des éprouvettes deviennent lisses et prêtes pour un bon collage des casques. Cela permet également d'assurer un alignement correct après que les échantillons ont été collés aux casques de chargement (Figure 3.9).



Figure 3.9 : Resurfaceuse et éprouvettes obtenues

Par la suite, les carottes sont posées horizontalement dans un lit de sable afin d'éviter leur gauchissement jusqu'au jour de l'essai. Ses propriétés sont affichées au tableau 3.5.

Tableau 3.5 : Propriétés des éprouvettes cylindriques

Éprouvette	Diamètre (mm)	Hauteur (mm)	Densité	Teneur en vides (%)
P1A1	74,8	152,4	2,370	6,5
P1A2	74,7	149,7	2,377	6,2
P1A3	74,8	134,4	2,372	6,4
P2A1	74,9	152,6	2,377	6,2
P2A2	74,8	149,9	2,367	6,6
P2A3	74,9	149,6	2,372	6,4

3.3 Campagne expérimentale

L'objectif principal de cette recherche étant l'évaluation de l'évolution du comportement thermomécanique des CBTM selon des cycles de chargement.

Afin de déterminer les performances mécaniques du CBTM en petites déformations, un essai de module complexe a été réalisé.

Ensuite, un essai de fatigue a été fait dans le but de connaître la durée de vie du CBTM et le nombre de cycles maximal avant la rupture de l'éprouvette.

Un protocole expérimental spécifique a été mis au point pour la réalisation des essais. Premièrement, un essai de module complexe initial a été effectué suivi d'une période de sollicitation sinusoïdale en mode de déformation imposée. La durée de cette période correspond aux 5000 premiers cycles de sollicitations. Ensuite, cette période est suivie immédiatement par un essai de module complexe complet. Le même processus a été répété après 25 000 cycles et 35 000 cycles sans temps de repos.

Les essais de traction/compression et l'essai de fatigue ont été faits à une température de 10 °C et à une fréquence de 1 Hz. Une étude menée par (Mollenhauer, Wistuba, et Rabe 2009) montre que des fréquences plus élevées ressemblent à une vitesse plus élevée du véhicule, ce qui entraîne une rigidité dynamique plus élevée de la chaussée. La fréquence de 10 Hz est normalement supposée pour l'enrobé à chaud traditionnel, qui a une rigidité nettement plus élevée. Choisir 10 Hz pour CBTM, cela endommagerait probablement le matériau trop rapidement, conduisant à des résultats insignifiants.

De plus, le niveau de déformation imposée doit être bien choisi. En effet, dans certains essais, l'intensité de la déformation imposée réduit largement la durée de vie. À cet égard, selon la norme européenne il est important de se soumettre à pas moins de 10 000 cycles pour évaluer les performances en fatigue. Ce dernier point met en évidence l'importance de l'amplitude de déformation imposée.

La durée de vie pour une amplitude de déformation de 50 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour cet enrobé est de l'ordre de 50 000 cycles. Mannan, Islam, et Tarefder (2015) ont montré que les mélanges GBR ont moins de résistance à la fissuration par fatigue que les mélanges sans GBR pour une température et une fréquence de chargement constantes. Nous étions alors dans l'obligation de diminuer la durée de sollicitation (5000, 25 000, 35 000) entre 2 essais de module complexe consécutifs afin de ne pas entamer la phase de rupture rapidement et également pour pouvoir effectuer plusieurs périodes de sollicitation avant la rupture de l'éprouvette.

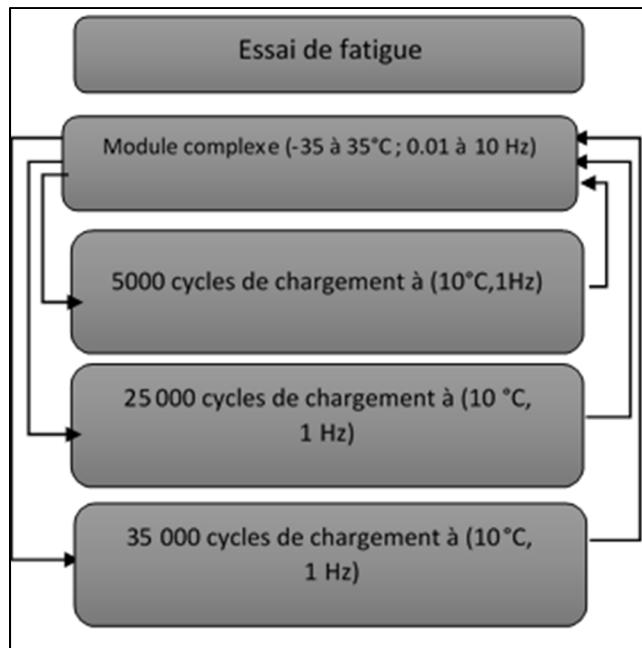


Figure 3.10 : Plan expérimental

3.4 Dispositif expérimental

3.4.1 Presse hydraulique et système de pilotage et d'acquisition

Le montage d'essai est le même pour les essais de module complexe et de fatigue. Il se compose d'une presse servo-hydraulique MTS (Material Testing System) qui est commandée par un système électronique, série 8800, avec une cellule de charge de 50 kN et une pression nominale de fonctionnement de 210 bar (Figure 3.11).

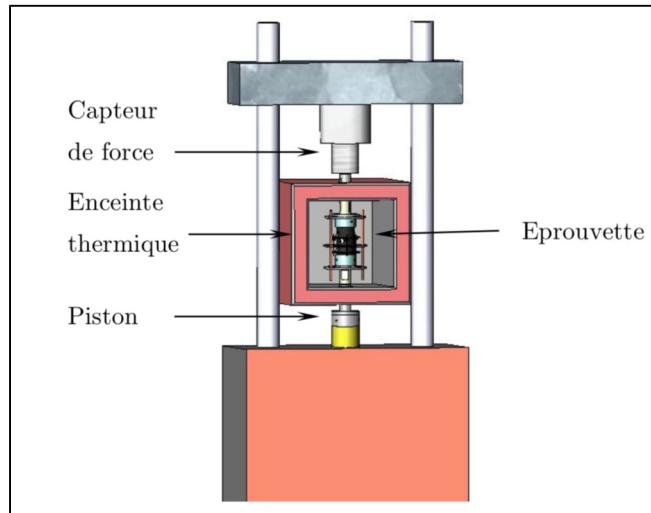


Figure 3.11 : Schéma de la presse hydraulique utilisée pour l'essai de traction/compression
Tirée de Nguyen (2009, p. 101)

Avant le début de l'essai, l'éprouvette est fixée dans la presse et le pilotage se fait, par le tableau de commande, en mode manuel. En cours d'essai et grâce à un ordinateur générant le logiciel Test Star® II, la presse est asservie automatiquement. L'asservissement peut se faire en mode de contrôle de déformation sur la moyenne des trois extensomètres ou en mode de contrôle de force sur le capteur de force.

3.4.2 Collage des casques

Pour tester les éprouvettes en traction-compression, il est nécessaire d'utiliser des casques d'essai appropriés. L'alignement vertical de l'éprouvette est un facteur important pour éviter les charges latérales ou les moments de flexion créés pour obtenir l'homogénéité en traction-compression axiale (Ashayer Soltani 1998). L'opération de collage se déroule comme suit : tout d'abord, les casques en aluminium sont nettoyés avec de l'acétone pour assurer une bonne adhésion avec l'éprouvette. Puis une couche d'époxy fine et uniforme est mise sur les casques et les surfaces planes de l'éprouvette. Ensuite, les casques supérieur et inférieur sont maintenus en place grâce à un système d'anneaux de fixation et de vis (le dispositif de collage sur banc disponible au LCMB), et ensuite sont réglables en diamètre (Figure 3.12). Cette machine est

capable d'accueillir des éprouvettes de différentes hauteurs et diamètres. Enfin, le dispositif de serrage maintient les casques appuyés contre l'éprouvette pendant 4 heures au minimum (cure de la colle) pour assurer une bonne fixation. La figure 3.13 montre la forme de l'éprouvette après le collage.



Figure 3.12 : Appareil pour le collage des casques

Les déformations axiales ont été mesurées à l'aide de trois extensomètres MTS placés sur l'échantillon espacés de 120° et reliés par des ressorts autour du milieu de l'échantillon (Figure 3.13).



Figure 3.13 : Extensomètres distants de 120°

L'éprouvette est fixée soigneusement au vérin de la presse MTS, solidarisé de façon à éviter toute sollicitation avant le début de l'essai. La force initiale verticale est nulle (Baaj 2002).



Figure 3.14 : Montage de l'éprouvette dans l'enceinte thermique

3.4.3 Mise en température

La mesure de la température a été effectuée en utilisant deux sondes de température (PT100) collées sur l'éprouvette et qui mesurent l'évolution de la température à la surface tout au long de l'essai. La durée de conditionnement de l'enceinte thermique est au minimum 4 heures pour que la température visée de l'éprouvette soit atteinte. Cette durée est respectée pour les essais de module complexe et les essais de chargement répétés.

3.4.4 Acquisition des données et procédures expérimentales

Les données recueillies au cours du test sont utilisées pour obtenir les caractéristiques des échantillons testés. La force, les valeurs données par les trois extensomètres et les températures mesurées par la sonde sont enregistrées à chaque acquisition de données. Chaque acquisition

consiste en l'enregistrement de deux cycles consécutifs sur 200 points. L'intervalle de temps est adapté pour avoir 100 points par cycle.

Le choix de deux cycles permet d'obtenir un calcul plus précis de la contrainte, de la déformation et de l'angle de phase à chaque cycle. De plus, le système et le logiciel d'acquisition permettent d'enregistrer les données suivantes :

- Le temps (t)
- La force (F) qui sert après dans le calcul de la contrainte (σ_1)
- Le déplacement axial de trois extensomètres pour calculer les déformations de l'éprouvette
- La déformation axiale moyenne de l'éprouvette.
- Les températures mesurées par la sonde PT100 et/ou thermocouple ;
- Le nombre de cycles.

3.4.5 Procédure de l'essai de module complexe

Comme indiqué précédemment, les essais de module complexe sont effectués à différentes températures et à différentes fréquences. Tous les essais sont effectués à huit températures (-35, -25, -15, -5, 5, 15, 25, 35 °C). À chaque température, un balayage de fréquence composé de sept fréquences (0,01, 0,03, 0,1, 0,3, 1, 3, 10 Hz) a été effectué et une déformation imposée de 50 $\mu\text{m}/\text{m}$. Pour atteindre une température homogène dans l'éprouvette, le temps de conditionnement imposé était de 4 heures. La température de l'essai est réglée de la plus basse à la plus haute. Par ailleurs, la sollicitation pour une température donnée est appliquée en passant de la plus rapide à la plus lente en tenant en compte de 2 minutes de repos pour chaque changement de fréquence.

Pendant tous les essais de module complexe, l'éprouvette est soumise à une charge axiale oscillante sinusoïdale en traction et en compression (en passant par zéro). Les essais de module

complexe ont été considérés comme non destructifs, ce qui permet de réaliser des essais de cycles de chargement répété ultérieurs.

3.4.6 Procédure de l'essai de fatigue

Le phénomène de fatigue illustre la dégradation de la chaussée bitumineux. Au niveau du laboratoire, les essais de fatigues sont effectués à des températures comprises entre 0 et 20 °C et des fréquences entre 10 Hz allant jusqu'à 40 Hz. La température utilisée en France par exemple est égale à 10 °C (Hervé Di Benedetto et Corté 2005).

Baaj (2002) a démontré que le mode de sollicitation n'affecte pas le comportement en fatigue puisque les essais en mode de déformation/contrainte donnent un résultat unique et connu.

La caractérisation de la fatigue a été réalisée au moyen d'essais de traction-compression uniaxiale sur des éprouvettes cylindriques. La configuration du test expérimental est presque la même que celle du test de module complexe. L'essai de fatigue a été réalisé à une seule fréquence de chargement de 1 Hz à 10 °C. L'avantage d'utiliser cet essai par rapport aux autres tests de fatigue conventionnels est la possibilité de maintenir l'état homogène de contrainte et de déformation dans l'échantillon pendant le processus de l'essai. Les valeurs de déformation axiale ont été mesurées à l'aide de trois extensomètres. La moyenne des valeurs enregistrées a été considérée comme le niveau de contrainte dans l'échantillon. Des mesures de la qualité des données ont été utilisées pour s'assurer que l'hypothèse d'une condition de contrainte/déformation homogène n'a pas été violée.

La fissuration causée par la fatigue se produit par la charge répétée du trafic sur les chaussées. La durée de vie en fatigue d'une chaussée est affectée par la charge et le matériau. Les facteurs liés à la charge comprennent la fréquence de chargement qui relie la vitesse du véhicule et la contrainte induite par la charge au bas de la couche d'enrobé. Les facteurs liés aux matériaux comprennent les propriétés de l'enrobé et les propriétés du liant (bitume). Bien sûr, la température affecte toutes ces propriétés matérielles. Les effets de ces facteurs tels que la fréquence de chargement et le niveau de déformation sur la durée de vie de l'enrobé à chaud ont été étudiés depuis longtemps. Cependant, les effets de ces facteurs sur la durée de vie en fatigue de l'enrobé recyclé à froid n'ont pas encore été étudiés.

Il est important de noter que cette étude n'a pas examiné la répétabilité de l'essai de fatigue en raison de contraintes de temps et de matériau. Une seule éprouvette a été testée et analysée dans la présente étude. Cependant, selon (Baaj 2002), il a été démontré que les essais de fatigue en traction-compression ont une bonne répétabilité par rapport aux autres types d'essais de fatigue (Baaj 2002).

CHAPITRE 4

RÉSULTATS DES ESSAIS

Ce chapitre comprend trois sections principales : la première présente les résultats de l'essai de fatigue afin de déterminer le nombre de cycles maximal avant la rupture de l'éprouvette. La deuxième section présente les résultats de l'essai de module complexe du mélange. Les résultats sont présentés à l'aide de courbes isothermes, de courbes isochrones, du plan Cole-Cole (plan complexe) et de l'espace de black après différents cycles de chargement en utilisant le modèle rhéologique 2S2P1D pour ajuster les résultats expérimentaux pour les essais réalisés. La section 3 décrit une étude de répétabilité des essais de module complexe.

Les éprouvettes utilisées dans cette étude sont identifiées comme suit :

- L'éprouvette P1A1 a été utilisée dans l'essai de module complexe initial (référence) ;
- L'éprouvette P1A3 est utilisée pour l'essai de fatigue ;
- Les éprouvettes P1A2 et P2A2 ont été utilisés pour l'essai de module complexe avant et après des cycles de chargements ;
- Les éprouvettes P2A1 et P2A3 ont été cassées lors de leurs installations dans la chambre thermique pour un essai secondaire de fatigue et de module complexe avant et après des cycles de chargement.

Notons que l'ensemble des résultats a été rigoureusement traité suivant la démarche qui sera présentée dans ce chapitre.

4.1 Présentation des résultats de l'essai de fatigue

L'objectif de l'essai de fatigue était principalement de déterminer la durée de vie en fatigue du mélange CBTM étudié. Le critère de rupture classique est l'un des critères de fatigue les plus connus (Baaj 2002). Par définition, l'échantillon est considéré comme rompu si son

module atteint la moitié de sa valeur initiale mesurée au premier cycle de chargement dans les mêmes conditions d'essai (température et fréquence). Ainsi, la durée de vie en fatigue N_f est définie comme le nombre de répétitions qui provoquent une chute de 50 % de la raideur calculée (Tayebali, Rowe, et Sousa 1992). La durée de vie en fatigue N_f , déterminée à partir de ce critère est utilisée pour la conception des chaussées (Baaj 2002). Cependant, ce critère n'était pas valide pour le mélange étudié vu que l'éprouvette s'est rompue avant d'atteindre 50 % du module initial.

L'essai de fatigue a été effectué à une seule température (10 °C), et suivant une sollicitation cyclique sinusoïdale de fréquence constante (1 Hz), sur l'éprouvette P1A3. L'essai est effectué une seule fois en raison du nombre limité d'éprouvettes. Grâce aux acquisitions de données, on a pu tracer l'évolution de la raideur en cours de sollicitation et la courbe de $|E^*|$ en fonction du nombre de cycles comme la montre la figure 4.1.

L'évolution de $|E^*|$ au cours de l'essai, présente 2 phases différentes. Une phase, au début de l'essai, caractérisé par une chute rapide de module à vitesse décroissante causé par les effets biaisant, et une phase où la diminution de module est quasi linéaire. La rupture de l'éprouvette était brusque en cours de sollicitation.

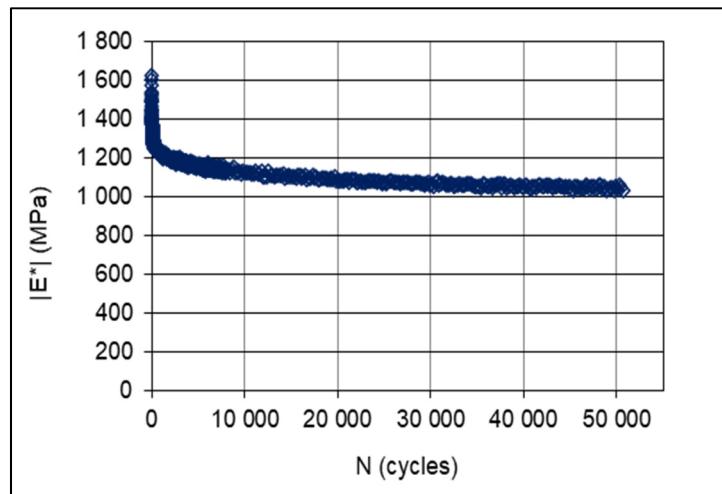


Figure 4.1 : Évolution de la raideur en fonction du nombre de cycles pour l'éprouvette P1-A3, testé en mode de déformation (10 °C, 1 Hz, 50µdef)

Dans les premiers cycles de sollicitation, l'influence de l'échauffement due au caractère visqueux de l'enrobé ainsi que la fatigue explique la diminution importante de la $|E^*|$.

Tout au long de la deuxième phase, la courbe de module complexe est quasi plane en cours des cycles de chargement, cette légère diminution est peut être relative à des microfissurations au niveau du matériau. Toutefois, en cas d'essai non dommageable (peu de cycles de sollicitation), il a été montré que les propriétés rhéologiques de l'enrobé sont réversibles suivant une période de repos. Ce phénomène peut être expliqué par à un changement de structure du bitume sous l'action des sollicitations. C'est la thixotropie (La Roche 1996).

Selon la méthode d'essai de la norme EN-12697-24, la durée de vie à la rupture doit être déterminée comme le nombre total d'applications de charge qui provoque une rupture complète de l'éprouvette. Cette définition est illustrée à la figure 4.1. La durée de vie est de 52 000 cycles de chargement répétés. Cette rupture par fatigue précoce du mélange CBTM peut être due à la mauvaise interaction entre le GBR et le liant vierge.

4.1.1 Évolution de la température

La figure 4.2 montre l'évolution de la température, mesurée avec les deux capteurs de température de type PT 100 placés à la surface de l'éprouvette, en fonction du nombre de cycles pour l'échantillon P1-A3. Alors que la température de l'enceinte était thermo-régulée à 10 °C, on a noté un échauffement rapide de 0,4 °C en début d'essai jusqu'à 50 000 cycles. Les changements de température pendant les essais de fatigue sont une conséquence de la dissipation directe d'énergie. Ainsi, la courbe d'évolution de l'énergie dissipée est souvent une courbe décroissante conduisant à un refroidissement en troisième phase jusqu'à la fin de l'essai (Baaaj 2002).

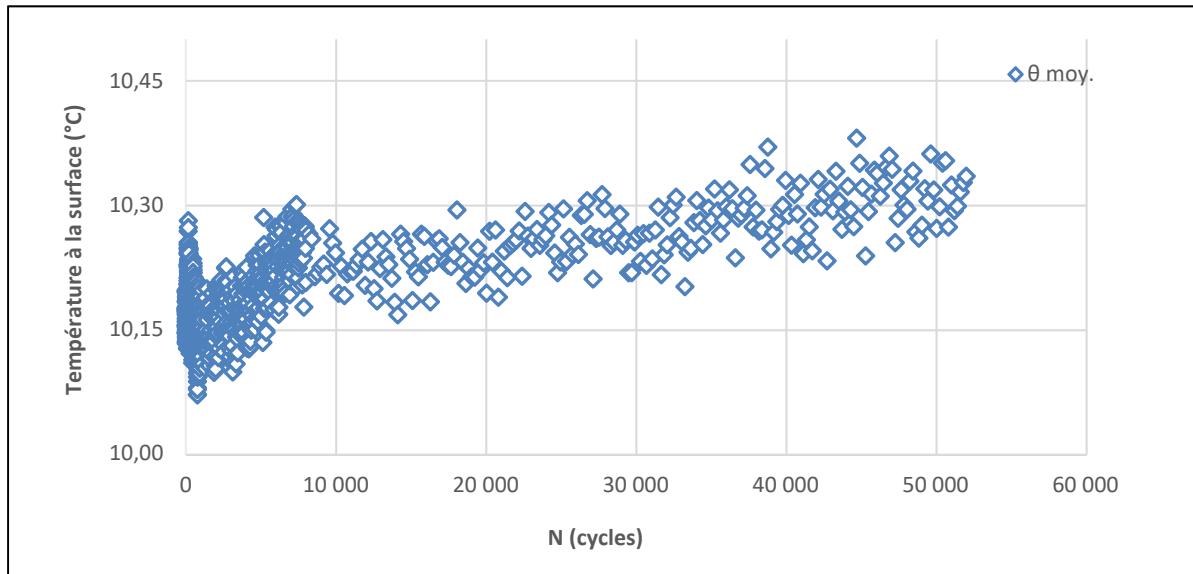


Figure 4.2 : Courbe de l'évolution de la température sur la surface de l'éprouvette en fonction du nombre de cycles

4.2 Choix du nombre de cycles de chargement

L'analyse de la courbe de fatigue montre que le mélange étudié se rompe après 50000 cycles de chargement répété, étant donné que l'objectif de cette étude est d'évaluer l'évolution du comportement de CBTM dans le temps sous l'effet du trafic, nous étions dans l'obligation de choisir des intervalles de cycles de chargement plus petit que 50 000 cycles (0, 5 000 ; 5 000, 25 000 ; 25 000, 35 000) afin de ne pas entamer la phase de rupture très rapidement.

4.3 Présentation des résultats de l'essai de module complexe

L'essai de module complexe permet de connaître le comportement viscoélastique linéaire en petites déformations de l'enrobé utilisé. Les résultats obtenus à partir de cet essai permettent de rendre compte du comportement viscoélastique linéaire de ces matériaux. Nous avons effectué des répétitions en testant deux éprouvettes afin d'étudier la variation des résultats du module complexe. La teneur en vides d'air de toutes les éprouvettes testées se situe dans la fourchette de 6 %. Seuls les résultats obtenus avec un bon indice de qualité, IQ (moins de 15 %) sont indiqués et utilisés dans l'analyse, sauf pour les résultats à basse température, où la valeur de l'IQ peut être supérieure à 15 %. Nous avons constaté qu'il peut aller un peu plus

haut parce que la rigidité de l'enrobé bitumineux est importante et peut réduire le niveau de déformation. Les autres résultats qui ne respectaient pas les conditions d'acceptation ont été rejettés de l'analyse, et comme ce dernier est non destructif, les éprouvettes ont été utilisées ensuite pour des essais de chargement répété.

Les différentes composantes du module complexe diffèrent par la température et la fréquence de chargement, qui sont fixées pour chaque essai élémentaire. Les sections suivantes montrent des exemples de résultats d'essais de module complexe $|E^*|$, φ , E_1 , E_2 présentés en traçant la norme du module complexe $|E^*|$ en fonction de la fréquence Fr (Figure 4.3). Ces résultats sont tirés de Di Benedetto et De la Roche (H. Di Benedetto, Partl, Francken, et De La Roche Saint-André 2001).

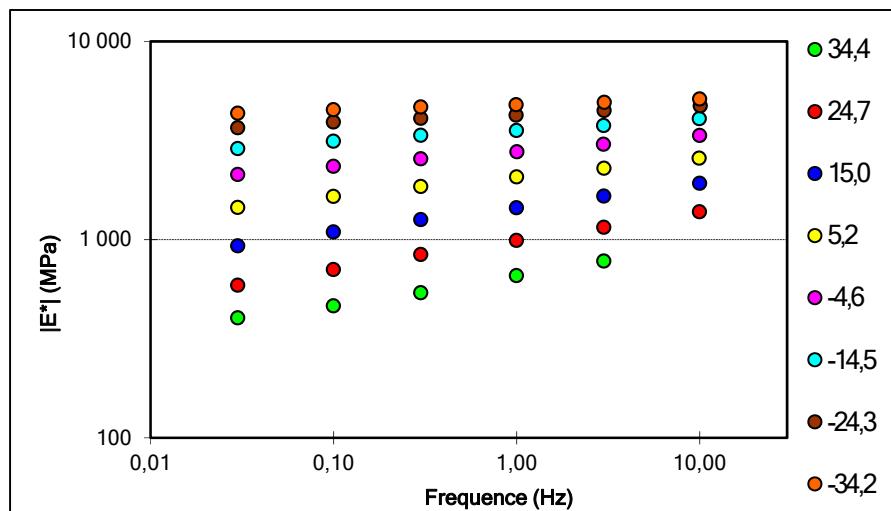


Figure 4.3 : Courbes isothermes pour les mélanges CBTM (6 températures, 6 fréquences) éprouvette P1A1

Les courbes isothermes de la norme du module complexe et de l'angle de phase peuvent être décalées d'une température de référence choisie. Cette procédure est effectuée par l'algorithme de décalage de forme fermée (CFS) qui minimise l'aire entre deux courbes successives et donne une estimation indépendante de l'opérateur (Gergesova et al. 2011; Graziani et al. 2020).

4.3.1 Modèles mécaniques utilisés en viscoélastique linéaire

Les modèles mécaniques relient la contrainte à la déformation ou vice-versa en basant sur des équations différentielles linéaires qui permettent l'expression du comportement viscoélastique (Lundström 2002). Ces derniers consistent en des combinaisons d'éléments tels que des ressorts élastiques et des amortisseurs visqueux qui obéissent respectivement à la loi de Hooke et de Newton. Les modèles les plus simples sont celle de Maxwell et Kelvin qui se composent d'un seul ressort et d'un seul amortisseur, en série ou en parallèle. D'un point de vue pratique, ces deux modèles ne peuvent représenter correctement le comportement viscoélastique linéaire complexe des matériaux bitumineux (Olard et Di Benedetto 2003).

Par conséquent, les modèles Burger ou Huet-Sayegh ou 2S2P1D sont les plus fréquemment utilisés pour décrire le comportement viscoélastique linéaire des mélanges bitumineux. Dans cette étude, on a choisi le modèle 2S2P1D. Il traduit correctement le comportement viscoélastique linéaire pour tous les matériaux bitumineux (n'importe quelle gamme de fréquences et de températures) dans les domaines de petites déformations (Olard et Di Benedetto 2003; Delaporte et al. 2007).

Le modèle 2S2P1D (2 ressorts, 2 éléments paraboliques et 1 amortisseur linéaire), développé au laboratoire DGCB de l'ENTPE (Olard et Di Benedetto 2003), est une combinaison d'éléments simples (ressort, amortisseur, et amortisseur à fluage parabolique).

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

$$E_{2S2P1D}^*(i\omega\tau_E) = E_\infty + \frac{E_0 - E_\infty}{1 + \delta(i\omega\tau_E)^{-K} + (i\omega\tau_E)^{-h} + (i\omega\beta\tau_E)^{-1}} \quad (4.1)$$

Avec :

i : Nombre complexe défini par $i^2 = -1$;

E_{00} (MPa) : Module statique (valeur minimale du module, enrobés soumis à basse fréquence $[\omega \rightarrow 0]$ et des hautes températures) ;

E_0 (MPa) : Module instantané ou vitreux (valeur maximale du module, enrobés soumis à très hautes fréquences [$\omega \rightarrow \infty$] et/ou des basses températures) ;

ω : Pulsation = $2 \pi F_r$;

F_r : Fréquence (Hz) ;

τ_E (s) : Paramètre ayant la dimension de temps et qui s'apparente à un temps de retard dont la valeur varie avec la température ;

δ : Constante ;

h, k : Paramètres (constantes) des éléments paraboliques du modèle ($0 < k < h < 1$) ;

β : Constante sans dimensions ;

η : Viscosité newtonienne, $\eta = (E_0 - E_00) \beta \tau$ quand $\omega \rightarrow 0$.

4.3.2 Calage et détermination des paramètres 2S2P1D

Afin de modéliser le comportement viscoélastique de chaque enrobé étudié, il est nécessaire de caler les valeurs calculées à celles mesurées par l'expérimentation, il suffit, tout simplement, de changer les paramètres ($E_0, E_\infty, k, h, \beta, \delta$). Ces paramètres sont déterminés en obtenant la courbe de meilleur ajustement pour les valeurs de module complexe mesurées tracées dans les diagrammes d'espace de Cole – Cole et Black des modèles 2S2P1D.

La figure 4.4 illustre la répercussion de chacun des paramètres sur la modélisation.

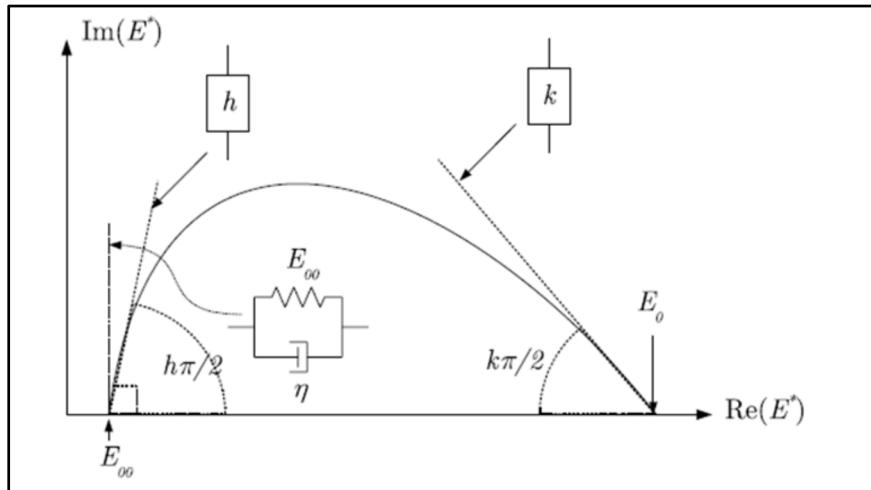


Figure 4.4 : Influence des paramètres du modèle 2S2P1D sur l'évolution du module complexe dans le plan Cole-Cole
Tirée de Nguyen (2009, p. 134)

Les évolutions de τ ont été approchées par le modèle de William-Landel-Ferry (WLF) (Ferry, 1980). Lorsque l'on considère l'effet de la température, le nombre de constantes devient neuf, incluant les deux constantes WLF (C_1 et C_2 calculées à la température de référence), qui sont établies à l'aide de l'outil solveur sur Excel en considérant les valeurs de τ établies pour les différentes températures d'essai.

$$\log(a_T) = -\frac{C_1(T - T_0)}{C_2 + T - T_0} \quad (4.2)$$

Avec :

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

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

T_r ($^\circ\text{C}$) : Température de référence (constante) ;

C1, C2 : Constantes.

- **Le modèle 2S2P1D**

Comme indiqué précédemment, le modèle 2S2P1D est un modèle rhéologique viscoélastique linéaire composé de 2 ressorts, 2 éléments paraboliques et 1 amortisseur. En particulier, un ressort est placé en parallèle avec une série des éléments restants. De par sa nature, ce modèle est largement utilisé pour modéliser le comportement unidimensionnel ou tridimensionnel des matériaux bitumineux (liants, mastics et mélanges).

Comme déjà mentionné, ce modèle est particulièrement adapté aux mélanges bitumineux ou aux matériaux avec presque seulement une dissipation visqueuse et avec sept constantes peut décrire complètement le comportement rhéologique des mélanges HMA. Cependant, il est possible que, dans le cas des mélanges CBTM, le 2S2P1D ne soit pas en mesure de bien représenter le comportement du matériau. En analysant les paramètres du modèle dans la littérature, on observe que E_0 et E_{00} sont significativement différents entre les enrobés à chaud et le CBTM. En effet, la raideur des ressorts dépend principalement du squelette d'agrégat et de la teneur en vides d'air. En général, E_0 dans les mélanges CBTM est plus faible que dans les enrobés traditionnels en raison des vides d'air plus élevés et du dosage de bitume plus faible. D'autre part, la valeur de E_{00} dans les mélanges CBTM est généralement plus élevée en raison de la présence de ciment. Ce dernier constitue une phase de rigidification également à très hautes températures (ou très basses fréquences), lorsque la phase bitume est considérée comme fluide. De plus, la viscosité de l'amortisseur et le paramètre associé β sont environ 10 fois plus élevés dans le CBTM que dans l'enrobé à chaud. L'amortisseur joue un rôle faible lorsque le ciment est utilisé avec du bitume.

4.4 Répétabilité des résultats de module complexe

Le but de cette section est de démontrer la différence du résultat de $|E^*|$ entre les 3 répétitions qui ont été testées pour le même mélange. Les résultats de reproductibilité sont importants. Avec cela, il est possible de savoir si la variation existante due à la l'influence d'un paramètre spécifique est significative ou si elle se produit dans la plage de répétabilité entre les échantillons. La quantité de GBR et de l'émulsion de bitume disponible au laboratoire nous a permis de réaliser seulement 3 répétitions sur les éprouvettes (P1A1, P1A2, P2A2) pour le même mélange, utilisées dans le test de module complexe initiale avant tout cycle de chargements.

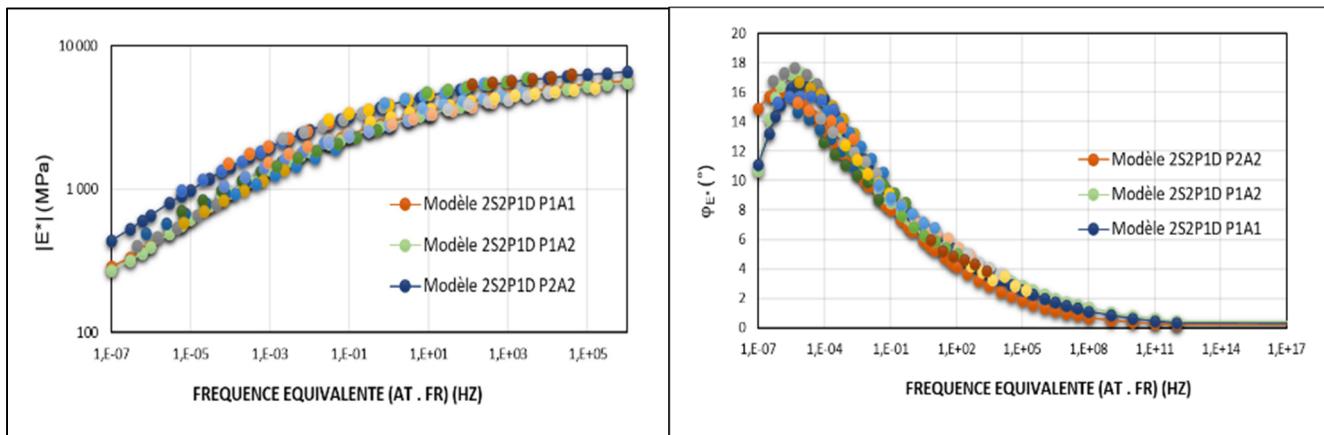


Figure 4.5 : Courbe maîtresse avant chargement cyclique des éprouvettes selon la répétabilité du module complexe. Simulation avec le modèle 2S2P1D ($Tr = -5^{\circ}\text{C}$)

Les données d'essais sont présentées dans les figures 4.5. Des courbes maîtresses ont été construites en utilisant la méthode décrite dans la section précédente. La température de référence pour toutes les courbes maîtresses est de -5°C . Nos résultats montrent une faible différence dans les valeurs de module entre les trois échantillons.

Même si les résultats $|E^*|$ dans la courbe maîtresse pour le mélange P2A2 ont montré qu'il existe une différence avec les deux autres échantillons, leurs modules de stockage maximaux sont toujours comparables. Les paramètres du modèle 2S2P1D des 3 essais sont présentés dans

le tableau 4.1. Les valeurs du module statique (E_0) sont respectivement 7 900 et 6 900 et 6800 MPa pour les échantillons P2A2, P1-A2 et P1A1. De plus, les valeurs du module vitreux (E_{00}) sont respectivement 320, 230 et 200. Cela signifie que les valeurs du module sont faibles et que la différence entre les deux valeurs est également faible et qu'elle se situe toujours dans la plage de précision de la mesure de la machine. Donc, la répétabilité et la reproductibilité des essais de module complexe sur éprouvette cylindrique sont très satisfaisantes.

Tableau 4.1 : Constantes du modèle 2S2P1D calibrées pour le CBTM des 3 éprouvettes

Éprouvette	E_{00} (MPa)	E_0 (MPa)	K	h	δ	τ (s)	β
P1A1	200	6800	0,14	0,41	3,3	100	5000
P1A2	230	6900	0,13	0,43	3,5	100	3500
P2A2	320	7900	0,14	0,41	3,3	1000	5000

4.4.1 Courbe dans le plan de Cole-Cole

Les résultats des essais de module complexe peuvent être tracés dans un plan complexe : « le plan Cole-Cole ». Le module de stockage (E_1) est tracé sur l'axe réel (l'axe des abscisses) et le module de perte (E_2) est tracé sur l'axe imaginaire (l'axe des ordonnées). Par conséquent, la valeur de module tracée ($|E^*|$) doit former une courbe unique, indépendante de la température ou de la fréquence (Pellinen 2001).

Dans le plan Cole-Cole, la courbure est une caractéristique du matériau étudié. Huet (1963) a montré que cette représentation donne une courbe unique en forme d'arc de cercle. Il peut être utilisé pour calibrer un modèle de comportement rhéologique. Cette représentation permet d'évaluer la qualité des données d'essai à des températures intermédiaires et basses. Cependant, il n'est pas très précis pour le module aux faibles valeurs à haute température (Pellinen 2001).

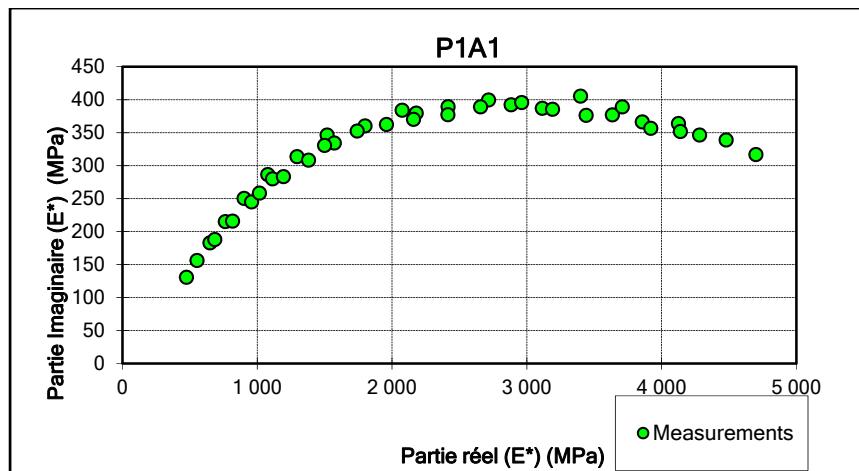


Figure 4.6 : Courbe du $|E^*|$ dans le plan de Cole-Cole

La figure 4.6 montre la courbe du module complexe dans le plan Cole-Cole de l'éprouvette P1A1. Les données mesurées sont disposées le long d'une ligne continue, ce qui signifie que le PSTT est valide et que le matériau est thermothéologiquement simple.

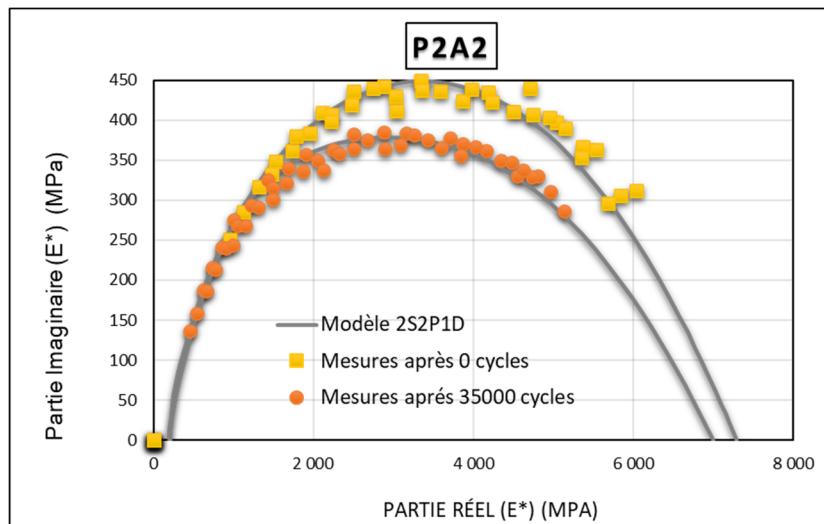


Figure 4.7 : Courbes du $|E^*|$ dans le plan Cole-Cole (avant et 35 000 cycles de chargement)

La figure 4.7 montre les résultats expérimentaux modélisés par le modèle 2S2P1D. Les paramètres du modèle pour les mélanges testés sont répertoriés dans le tableau 4.2. Il est à noter que les valeurs du module vitreux (E_{00}) à basse température (hautes fréquences) pour la même éprouvette testée avant et après 35 000 cycles sont respectivement 7300 MPa et 7000 MPa. Les valeurs du module statique (E_0) à haute température (basses fréquences) sont

assez similaires (200 et 210 MPa, respectivement). Dans ce cas, la phase bitumineuse peut être considérée comme fluide et la rigidité est peut-être influencée par la phase d'agrégat.

Étant donné que la seule variable est le nombre de cycles de chargement, la comparaison des 2 courbes paraît difficile, pour ce faire, une courbe de module normalisé a été tracée afin de comprendre l'effet de cycles de chargement après 35 000 cycles.

Tableau 4.2 : Constantes du modèle 2S2P1D calibrées pour les éprouvettes testées (7 constantes de E^*)

Éprouvette	Nombre de cycles	E_{00} (MPa)	E_0 (MPa)	K	h	δ	τ	β
P1A2	0	200	7 300	0,15	0,39	3,4	1 000	5 000
P1A2	35 000	210	7 000	0,13	0,39	3,0	45	900

On peut constater que les paramètres de dissipation viscoélastique linéaire h , k , δ et β sont similaires autant avant qu'après 35 000 cycles de chargement

Le temps caractéristique (τ_E) peut être lié à la consistance de la phase bitume et il est plus élevé pour les bitumes plus durs (Mangiafico et al. 2014). Cependant, le bitume résiduel utilisé provient d'une seule émulsion.

4.4.2 Courbe dans l'espace de Black

La représentation de l'espace de Black consiste à tracer le logarithme du module complexe E^* en fonction de l'angle de phase correspondant. La figure 4.8 montre une présentation de courbe des modules complexes dans l'espace de Black pour l'éprouvette testée, soit l'éprouvette P1A1.

On peut observer que dans tous les cas, les points expérimentaux suivent une ligne continue, indiquant que le Principe de Superposition Temps-Température (PSTT) est respecté et que le modèle rhéologique décrit ci-dessus puisse être appliqué.

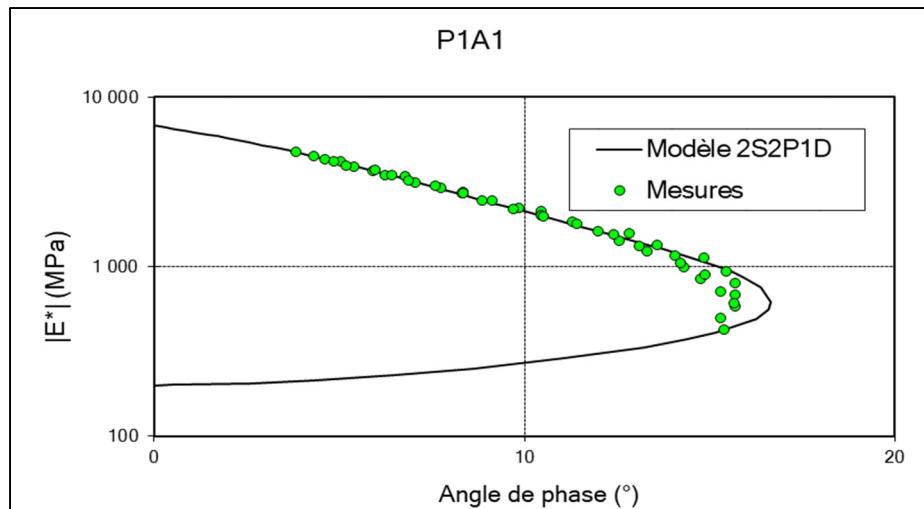


Figure 4.8 : Courbe du $|E^*|$ dans l'espace de Black
(échantillon P1-A1)

Les propriétés rhéologiques des mélanges peuvent également être exprimées en termes d'angle de phase (δ). L'angle de phase est approximativement égal à la dérivée du logarithme de la rigidité par rapport à la fréquence, où une valeur de 0 degré signifie un matériau purement élastique et 90° signifie un matériau purement visqueux.

Dans l'espace de Black, le module dynamique est généralement représenté sur une échelle logarithmique en fonction de l'angle de phase. Lorsque le matériau obéit au principe de superposition Temps-Température, tous les points expérimentaux tombent dans une seule courbe. Cette courbe permet de visualiser la zone du module aux petites valeurs et notamment la diminution de l'angle de phase pour les hautes températures. Ce phénomène de retour élastique est lié à la présence des agrégats dans le mélange. En effet, les granulats ont un comportement élastique (Baaj 2002).

Le seul paramètre pouvant affecter l'angle de phase était la source de GBR et l'interaction avec l'émulsion de bitume. Puisqu'une seule source de GBR utilisé dans cette étude, la gamme de valeur de $|E^*|$ sont tout à fait les mêmes pour les tests effectués. On voit bien que le chargement répété (après 35 000 cycles) sur l'éprouvette n'affectait pas significativement la rigidité des mélanges ainsi que la capacité de dissipation d'Énergie (Figure 4.9).

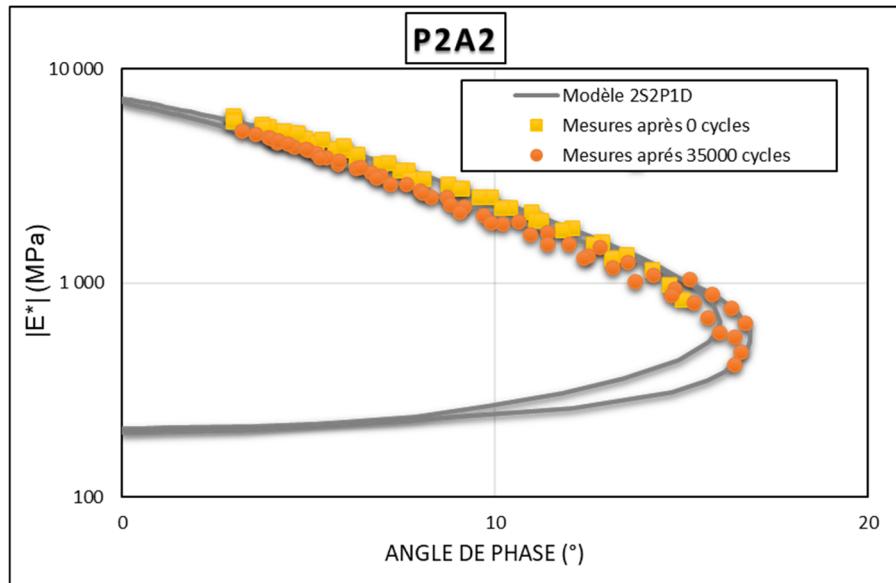


Figure 4.9 : Courbes de $|E^*|$ dans l'espace black (avant et après 35 000 cycles de chargement)

4.4.3 Courbe normalisée

Le module complexe normalisé ($E^{* \text{ norm}}$) tel que proposé par Di Benedetto est introduit dans l'équation suivante (Nguyen, Di Benedetto, et Sauzéat 2012) :

$$E^{* \text{ norm}} = \frac{E^* - E_{00}}{E_0 - E_{00}} \quad (4.3)$$

Où : E_{00} et E_0 sont des valeurs asymptotiques de la norme de module complexe lorsque la fréquence tend vers 0 et l'infini.

Le module normalisé (norme E^*) permet de comparer le comportement VEL des matériaux sans l'influence des modules asymptotiques (E_0 et E_{00}) qui sont influencés par le squelette granulaire et la teneur en vides d'air. L'analyse de $|E^*|$ en représentation de Cole-Cole et dans l'espace Black permet de juger de la forme générale des résultats de modules complexes.

La comparaison des courbes normalisées pour le CBTM avant et après 35 000 cycles de chargement est donnée sur la figure 4.10 et montre qu'elles ne se superposent pas. Cela pourrait s'expliquer par la sous-estimation des résultats à très basse température, potentiellement due à des problèmes de distorsion avec le test du module complexe.

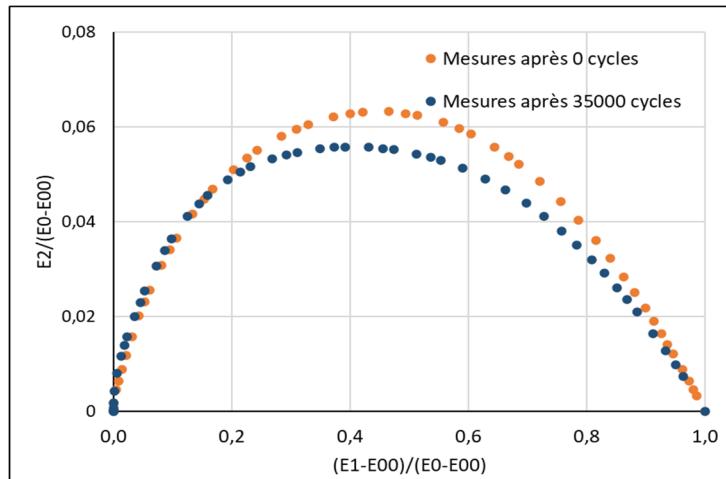


Figure 4.10 : Courbes de module complexe normalisées dans le diagramme de Cole-Cole de l'éprouvette P2-A2 testé avant et après 35 000 cycles de chargements

D'après cette figure, nous pouvons voir que la courbe après 35 000 cycles de chargement a un aspect un peu différent, mais on peut dire qu'ils ont un comportement « conservateur ». C'est probablement parce que le paramètre δ utilisé pour la calibration du modèle 2S2P1D de l'échantillon après des cycles de chargements était moins élevé que le test initial.

Généralement, il faut garder à l'esprit qu'il s'agit d'un mélange contenant une matière recyclée et que tout contrôler n'est pas une tâche aisée. Cela suggère que le terme associé à la variabilité entre les échantillons devrait être étudié plus avant en faisant au moins 5 plaques et en testant 3 échantillons de chaque plaque pour obtenir plus d'informations sur cet aspect.

C'est curieux de voir que le $|E^*|$ normalisé du mélange après des cycles de chargement est plus petit. C'est peut-être à cause du dommage du GBR qui peut être brisé au cours des cycles de chargement effectuant un changement au niveau du squelette granulaire.

Puisqu'un seul bitume a été utilisé cette recherche, l'écart entre les valeurs de E_0 peut être expliqué par la teneur en vide. La teneur en vides peut être influencée par les cycles de chargement répétés. Cependant, le taux de variation de E_0 reste vague. Comme nous avons utilisé que deux éprouvettes dans cet essai, il est très difficile de trouver une explication exacte entre les cycles de chargement et la variation de E_0 .

4.4.4 Les courbes maîtresses

Il est possible en utilisant la propriété d'équivalence Temps-Température (PETT), de construire une courbe unique ($\log|E^*|$, $\log(f_r)$) pour une température de référence (T_r) choisie arbitrairement. Cette courbe est obtenue en déplaçant, parallèlement à l'axe des fréquences, chaque isotherme, par rapport à l'isotherme correspondant à la température de référence, jusqu'à obtenir une superposition de points ayant la même valeur de module. La courbe obtenue est appelée « courbe maîtresse ».

La figure 4.11 présente un exemple de courbe maîtresse tracée pour la température de référence T_r égale à $-3,9^{\circ}\text{C}$.

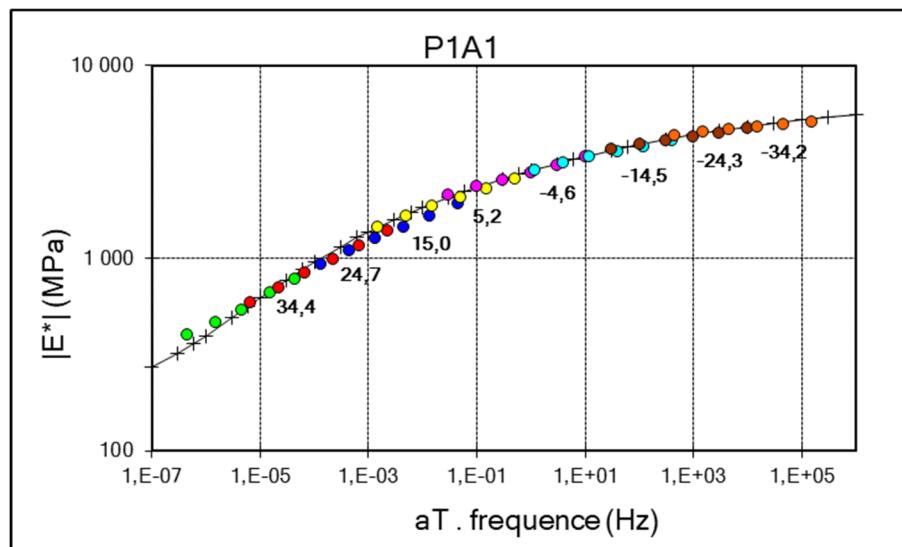


Figure 4.11 : Courbe maîtresse pour un mélange CBTM
à $T_r = -3,9^{\circ}\text{C}$ (5 fréquences, 8 températures)

Les paramètres du modèle 2S2P1D sont déterminés manuellement pour assurer le meilleur ajustement possible entre les données mesurées et modélisées. Le décalage a été effectué au moyen d'un algorithme de décalage de forme fermée (CFS) qui minimise l'aire entre deux courbes isothermes successives de $|E^*|$ et estime les facteurs de décalage (Gergesova et al. 2011).

Une courbe maîtresse permet de comparer les enrobés bitumineux qui ont été testés à différentes fréquences et à différentes températures (Pellinen 2001). Plusieurs équations différentes ont été utilisées pour décrire la relation de superposition temps/température afin d'obtenir des facteurs de décalage dans les matériaux viscoélastiques, mais la plus fréquemment utilisée est celle de Williams, Landell et al. et Ferry (WLF).

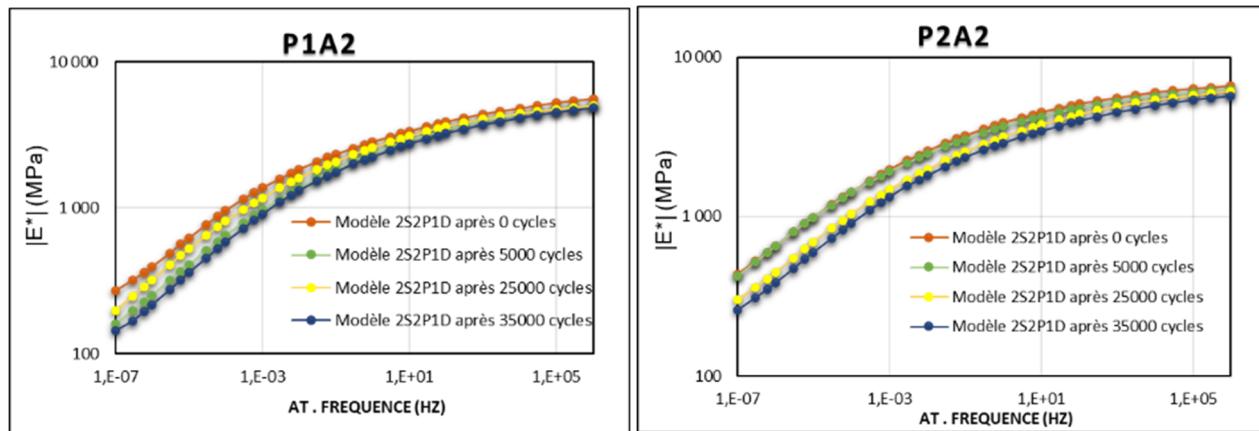


Figure 4.12 : Courbe maîtresse du module complexe avant et après chargement cyclique de l'éprouvette P1A2 et P2A2. Simulation avec le modèle 2S2P1D ($T_r = -5^\circ\text{C}$)

Tableau 4.3 : Constantes du modèle 2S2P1D calibrées pour l'éprouvette P1A2 et P2A2 avant et après cycles de chargements.

		E_0 (MPa)	E_∞ (MPa)	k	h	δ	τ_E (s)	β
P1A2	Après 0 cycles	230	6900	0,13	0,43	3,5	100	3500
	Après 5000 cycles	100	6000	0,15	0,39	3,3	50	1700
	Après 25000 cycles	85	5800	0,15	0,41	3,9	300	8000
	Après 35000 cycles	130	6200	0,13	0,39	3,0	12	900

P2A2	Après 0 cycles	200	7300	0,15	0,39	3,4	1000	5000
	Après 5000 cycles	160	7300	0,14	0,4	3,9	650	1700
	Après 25000 cycles	170	7000	0,15	0,41	3,9	300	8000
	Après 35000 cycles	210	7000	0,13	0,39	3,0	45	900

La figure 4.12 montre les courbes maîtresses des tests de module complexe avant et après 5 000, 25 000, 35 000 cycles de chargement. La partie supérieure du $|E^*|$ Les courbes maîtresses s'approchent asymptotiquement d'une rigidité maximale unique d'environ 5 GPa. À basses fréquences et hautes températures, les courbes maîtresses ne s'approchent pas d'une même valeur minimale. On remarque que la valeur minimale correspond à la courbe maîtresse après 35 000 cycles de chargement. Les 4 courbes maîtresses sont similaires pour des fréquences équivalentes supérieures à 1000 Hz d'après (H. Di Benedetto, Partl, Francken, et Saint-André 2001 ; Baaj 2002), il a été observé que les périodes de repos vont permettre une forme de « récupération » des caractéristiques rhéologiques du matériau. Toutefois, on voit une variation de rigidité pour des fréquences inférieures à 1000 Hz. Notamment, la norme du module complexe après 35 000 cycles semble plus petite que les autres aux hautes

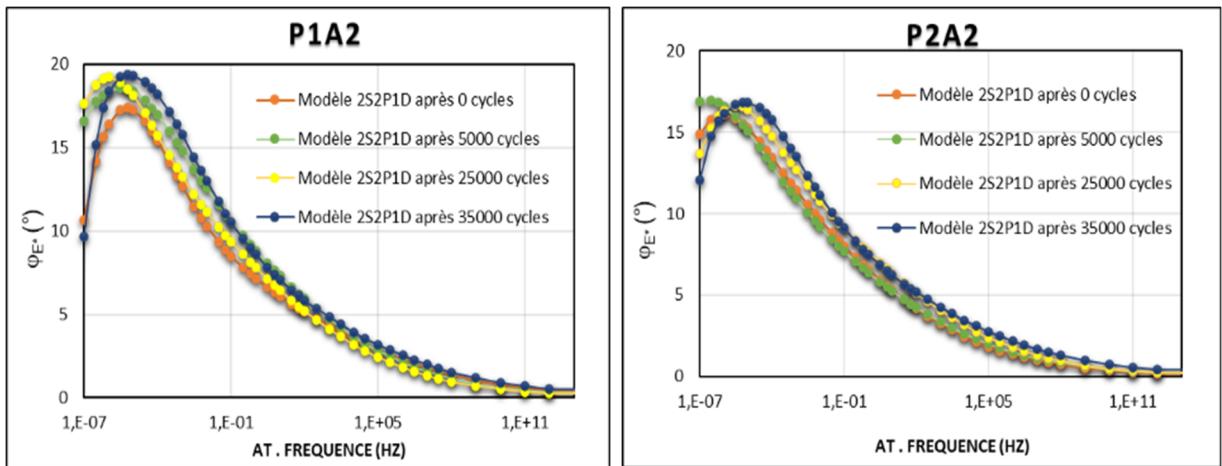


Figure 4.13 : Courbe maîtresse de l'angle de phase avant et après chargement cyclique de l'éprouvette P1A2 et P2A2. Simulation avec le modèle 2S2P1D ($Tr = -5^\circ C$)

températures. Pour mieux comparer les courbes et voir la variation du module complexe, un coefficient d'évolution de GBR va être introduit dans le paragraphe suivant. Ce comportement pourrait être dû à la variation de la teneur en vides plus faible. En effet, l'impact d'une différence de teneur en vides est beaucoup plus remarqué dans les basses fréquences et les hautes températures.

La figure 4.13 présente la courbe maîtresse d'angle de phase pour les tests effectués dans le même principe de chargement. Après 35 000 cycles, le mélange présente une réponse plus visqueuse à une fréquence plus élevée (température plus basse). La courbe maîtresse d'angle de phase révèle que pour des températures plus élevées (ou de basses fréquences), après 35 000 cycles le mélange présente une réponse plus élastique.

Pour toutes les courbes, l'angle de phase augmente jusqu'à une valeur maximale puis diminue, ce phénomène est dû à la présence de bitume qui devient moins visqueux à haute température.

La comparaison des valeurs de normes et d'angles de phase est nécessaire pour comprendre mieux les écarts existants entre les différentes courbes. Cependant, puisque la presse hydraulique ne permet pas d'obtenir des températures exactes pour tous les essais, la comparaison était difficile.

4.4.5 Comparaison des courbes maîtresses

Dans cette recherche, afin de comparer objectivement les résultats du module complexe des mélanges avec le GBR, le coefficient d'évolution du GBR, C^*_E est introduit. Le calcul de ce coefficient a été proposé par Di Benedetto (Delaporte et al. 2009). Le coefficient d'évolution complexe est défini comme le rapport entre le module complexe d'un mélange spécifique à la fréquence équivalente et le module complexe d'un mélange de référence à la même fréquence comme écrit dans l'équation (4.4).

$$C^*_E(f_e) = \frac{E^*_{mix}}{E^*_{ref-mix}} = |C^*_E| \cdot e^{i\varphi_E} \quad (4.4)$$

C^*_E est un nombre complexe. Sa norme est le rapport des normes du module complexe du mélange recyclé à celui de la référence (4.5). Son angle de phase est la différence entre l'angle de phase du mélange recyclé et celui de la référence telle que déterminée par l'équation (4.6).

$$|C_E^*| = \left| \frac{E_{mix}^*}{E_{ref-mix}^*} \right| \quad (4.5)$$

$$\varphi_E = \varphi_{E_{mix}^*} - \varphi_{E_{ref-mix}^*} \quad (4.6)$$

Il est important de noter que la valeur $|C_E^*|$ est calculée par rapport au mélange de référence.

Cette section a été utilisée pour étudier la différence de rigidité avant et après des cycles de chargements répétés sur les 2 éprouvettes testées en utilisant l'évolution du coefficient de variation ($|C_E^*|$) comme outil de quantification. Nous aimerions savoir s'il y aura un changement dans la valeur du module ou non et quelle est la différence.

La figure 4.14 montre la proportion de rigidité entre les courbes maîtresses qui correspond à l'essai de module complexe avant et après 5 000, 25 000 et 35 000 cycles de chargement répété à l'aide de la valeur ($|C_E^*|$) calculée à partir des données du modèle 2S2P1D.

Pour comparer les résultats, il faut avoir le même effet de conditionnement en gardant à l'esprit que les températures de test ne sont pas exactement les mêmes mais c'est plus ou moins la même. Ainsi, pour faire les calculs de ($|C_E^*|$), on fixe le $|E^*|$ du premier essai comme référence et on calcule le rapport du module du deuxième essai par rapport au module du premier essai (dont nous choisissons comme référence), exactement comme proposé précédemment dans l'équation 4.5. Il convient de noter que nous sélectionnons toujours le test initial comme référence.

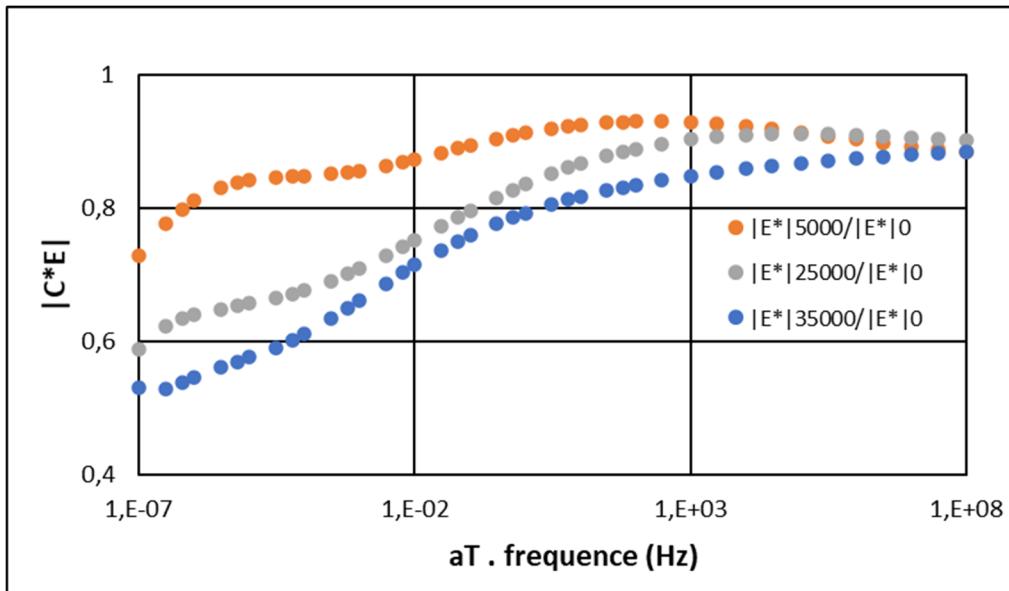


Figure 4.14 : $|C^*E|$ en fonction de la fréquence équivalente (P1A2).
 $Tr = -5^\circ C$

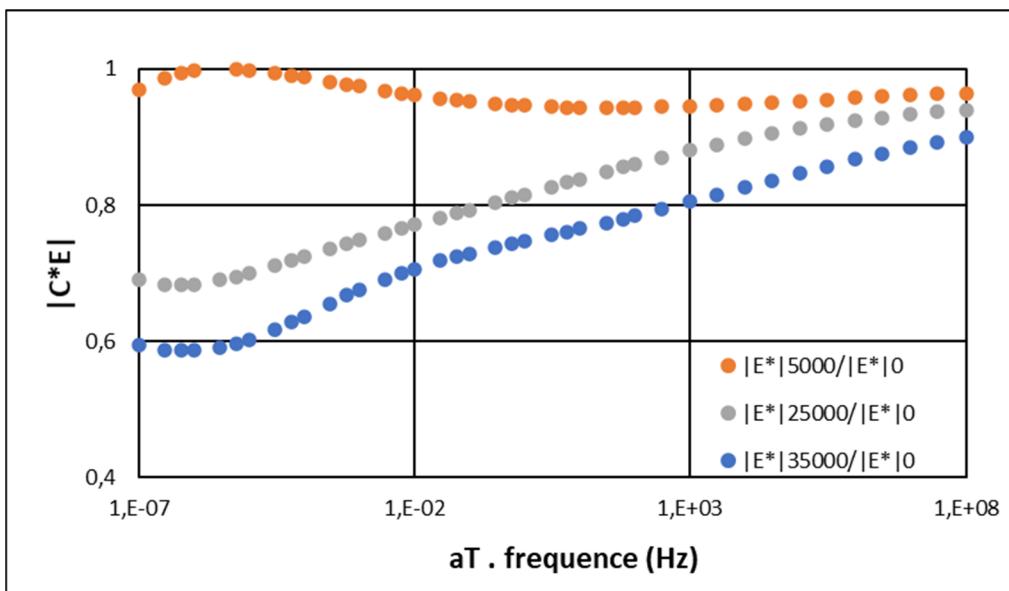


Figure 4.15 : $|C^*E|$ en fonction de la fréquence équivalente (P2A2). $Tr = -5^\circ$

Néanmoins, nous proposons d'utiliser toujours $|C^*E|$ obtenu à partir de la modélisation, car c'est un moyen facile de montrer les différences dans les mêmes conditions (température et

fréquence). Ces résultats révèlent qu'à haute fréquence (faible température), les écarts entre deux échantillons dans tous nos cas sont faibles.

Les résultats rapportés après 5000 cycles montre que la valeur de $|C^*E|$ est de 80 % dans une gamme de fréquences inférieure à 1 Hz et de 90 % pour des fréquences supérieures à 1 Hz. Pour une variation de 10 à 20 % de rigidité, le matériau ne peut pas être considéré comme endommagé. Par conséquent, toute variation inférieure à 20 % ne pourra pas être directement associée à l'influence directe des cycles de chargement. Toutefois, après 25 000 et 35 000 cycles de chargement, la valeur de $|C^*E|$ est d'environ 55 % à haute température (basse fréquences) et 10 % à basse température (haute fréquence). Cela peut montrer que seulement après 25 000 cycles de chargement, le module complexe commence à diminuer allant jusqu'à la moitié au niveau de température élevée. Ce qui indique que la température a affecté la rigidité du matériau. À très hautes fréquences, la légère variation du module peut être à cause de la période (temps de conditionnement de la chambre thermique) entre la fin des cycles de chargements et le début de l'essai de module complexe qui permet la réparation de micro-dommages. Comme nous l'avons mentionné précédemment, la variation semble importante, mais en fait il n'apparaît qu'à basse fréquence (haute température).

Néanmoins, cette variation de 50 % serait considérée comme faible, car cela se produit à très faible fréquence. Comme nous l'avons noté dans la section précédente, nous pouvons avoir environ 10 % de variation entre les deux répétitions pour le même mélange à haute fréquence et/ou basse température. À basse fréquence et/ou haute température la variation du $|E^*|$ peut atteindre jusqu'à 50 %. Même dans ce cas, il serait considéré comme faible.

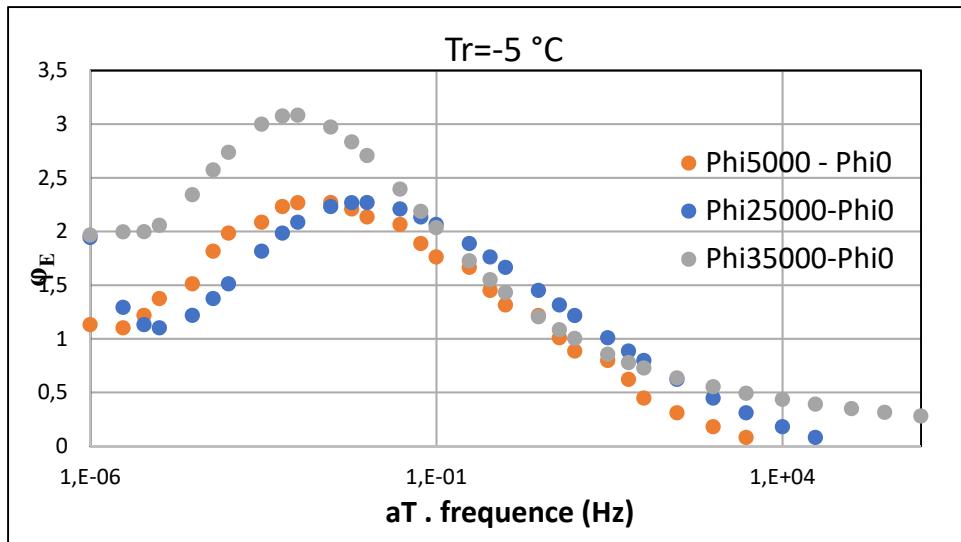


Figure 4.16 : ϕ_E en fonction de la fréquence équivalente (P2A2). $Tr = -5^\circ$

La Figure 4.16 montre les angles de phase avant et après 5000, 25000, 35000 cycles de chargement. On observe dans les basses fréquences ($Fr < 1 \text{ Hz}$) que les écarts ont une valeur supérieure à 1° ce qui signifie que les valeurs d'angles de phase sont plus élevées après les cycles de chargement et à haute température et que celui-ci adopte un comportement plus visqueux. Ce comportement était prévisible étant donné généralement un matériau bitumineux possédant des modules de rigidité plus faibles possède également des angles de phase plus élevés. Pour des fréquences plus que 1 Hz toutefois, on remarque une diminution de l'écart allons vers 0.

Encore une fois, plus on se trouve dans les basses fréquences/hautes températures et plus le rôle du bitume a un impact sur les comportements mécaniques de l'enrobé. Rappelons que plus l'angle de phase est élevé et plus l'enrobé adopte un comportement visqueux.

SOMMAIRE

Cette recherche visait à améliorer les connaissances sur le comportement thermomécanique des matériaux traités au bitume cimentaire (CBTM). Dans la majorité des cas, plusieurs facteurs concernant la production d'enrobés à froid en général sont fournis par des directives locales ou l'expérience passée sur le terrain, sans avoir une approche scientifique solide.

Dans le même temps, cette technique est encore considérée comme assez nouvelle et davantage d'efforts doivent être déployés en termes de recherche afin d'éviter les problèmes liés à la durée de vie. Une connaissance adéquate influencera positivement la diffusion future d'un savoir-faire correct lors de la gestion et la réhabilitation des chaussées.

Le travail expérimental réalisé dans cette étude a été divisé en deux parties. La partie 1 décrit les matériaux utilisés pour la formulation et la fabrication du CBTM. La partie 2 comporte des cycles de fatigues et des essais de module complexe.

Les conclusions suivantes peuvent être déduites :

- D'après les résultats de fatigue, la courbe de fatigue ressemble aux courbes de fatigue pour les enrobés bitumineux, ce qui montre que le CBTM est un matériau viscoélastique linéaire.
- Les résultats expérimentaux du module complexe en laboratoire sont jugés satisfaisants, car ils respectent le modèle rhéologique 2S2P1D.
- Le modèle 2S2P1D simule généralement bien le comportement viscoélastique linéaire du mélange CBTM dans la plage de températures et de fréquences mesurées ;
- Le module normalisé a permis de faire la comparaison du comportement de CBTM avant et après des cycles de chargements.
- Seulement à partir de 25000 cycles de chargement répété et au basses fréquences et/ou hautes températures, que la rigidité du CBTM a diminué allant jusqu'au 50 % environ.
- La répétabilité du test de module complexe s'est avérée bonne sur une large gamme de températures et de fréquences équivalentes.

- Le temps entre la fin de l'essai de fatigue et le début de l'essai de module complexe est peut-être suffisant pour réparer le micro dommage. Ainsi que l'utilisation d'une fréquence de 1 Hz est peut-être très lente que le CBTM s'autorépare en chaque cycle de chargement.

RECOMMANDATIONS

La prochaine étape de cette étude consiste à tester un plus grand nombre d'échantillons pour mieux comprendre la variabilité. Différentes conceptions de mélange doivent également être testées pour voir l'influence des différentes composantes sur le comportement des matériaux recyclés. Le même exercice doit également être effectué avec des enrobés à base de mousse de bitume et en augmentant l'intervalle de nombre de cycles de chargement appliqué sur l'enrobé. Ainsi qu'une analyse statistique est fortement recommandée pour être capable de donner des résultats plus concrets et précis.

Il est recommandé d'étudier l'effet de différentes distributions d'agrégats et/ou sources de GBR sur les performances à long terme des mélanges, telles que la fatigue ou la déformation permanente. Beaucoup d'efforts doivent être déployés lors de la conception du mélange pour assurer une durée de vie plus longue de la nouvelle chaussée.

Les propriétés viscoélastiques et la résistance à la rupture peuvent être fortement affectées par l'affinité entre l'émulsion de bitume et la source de GBR, ainsi que la teneur en ciment définissant la résistance initiale et finale. De plus, il est recommandé de prendre en compte une approche à 3 paramètres lors de la conception du mélange. C'est-à-dire la teneur en ciment, le type d'éulsion de bitume et la source d'enrobé, en plus de l'eau, afin d'assurer de meilleures performances tant en termes de résistance initiale que de réponse visqueuse.

L'utilisation d'une éulsion de bitume modifié améliorera probablement le comportement à la fatigue (et à la récupération) en raison de la présence des polymères SBS.

Il est recommandé d'effectuer des tests de fatigue avec des périodes de repos. Les périodes de repos doivent permettre d'observer si les dommages accumulés pendant la fatigue sont totalement/partiellement/non récupérables. Cela pourrait donner des indications importantes sur la phase visqueuse dans les mélanges CBTM.

Après avoir résolu les limites développées au cours de cette recherche, il sera nécessaire de vérifier si les résultats obtenus en laboratoire sont similaires quand les mélanges seront produits dans la Centrale d'enrobage.

ANNEXE I

INFORMATIONS RELATIVES AUX ESSAIS MÉCANIQUES

Tableau-A I-1 : Caractéristiques physiques des éprouvettes

éprouvette	Longueur (L, mm)			Diamètre (D,mm)				masse sèche (A)	masse sss(B)	masse ds l'eau ©	T° (eau)	densité brute dmb	teneur en vide (Vi, %)	
	Mesures		Moy	Mesures		Moy								
P1A1	152,4	152,4	152,4	152,4	74,8	74,8	74,9	74,8	1331,9	1332,6	768,5	22,3	2,37	6,5
P1A2	149,7	149,6	149,7	149,7	74,6	74,7	74,7	74,7	1306,8	1307,2	755,4	22,3	2,38	6,2
P1A3	134,1	134,7	134,5	134,4	75,0	74,9	75,0	75,0	1128,1	1127,9	650,5	22,3	2,37	6,4
P2A1	152,5	152,3	152,9	152,6	74,9	74,8	74,9	74,9	1332,2	1332,1	769,6	22,3	2,38	6,2
P2A2	149,7	149,9	150	149,9	74,8	74,9	74,8	74,8	1307,1	1306,8	752,6	22,3	2,37	6,6
P2A3	148,5	148,3	148,7	148,5	74,85	74,89	74,91	74,9	1295,6	1296,8	748,6	22,3	2,37	6,4

Mesure de l'essai de module complexe de l'éprouvette P1A1 après 0 cycle

Temp.	Freq.	E*	ϕ	E1	E2
(°C)	(Hz)	(MPa)	(°)	(MPa)	(MPa)
34,2	10,00	1113	14,2	1079	273
34,2	3,00	905	15,4	873	241
34,2	1,00	754	16,1	724	209
34,2	0,30	614	16,6	588	175
34,2	0,10	515	16,7	493	148
34,2	0,03	431	16,4	413	121
34,2	0,01	363	16,1	348	101
24,1	9,99	1580	11,6	1548	318
24,0	3,00	1330	12,9	1297	298
24,1	1,00	1138	13,7	1106	270
24,1	0,30	942	15,0	910	244
24,1	0,10	792	16,1	761	220
24,1	0,03	673	15,7	648	183
24,1	0,01	566	16,5	543	161
14,2	10,02	2214	9,2	2185	354

14,1	3,00	1910	10,6	1877	352
14,2	1,00	1669	11,4	1636	329
14,2	0,30	1427	12,3	1394	305
14,2	0,10	1239	13,4	1205	288
14,2	0,03	1043	13,8	1012	248
14,2	0,01	904	14,8	874	230
2,6	10,02	3104	6,8	3082	369
2,7	3,01	2708	8,1	2682	380
2,7	1,00	2452	8,6	2425	367
2,7	0,30	2157	9,7	2126	364
2,6	0,10	1921	10,6	1889	353
2,6	0,03	1698	10,9	1667	321
2,6	0,01	1504	11,9	1472	310
-6,6	10,05	3784	5,4	3766	356
-6,6	3,00	3454	6,3	3433	382
-6,6	1,00	3157	6,9	3133	381
-6,6	0,30	2881	7,8	2855	389
-6,6	0,10	2608	8,2	2581	373
-6,6	0,03	2322	8,7	2295	351
-6,6	0,01	2120	9,6	2090	355
-16,1	10,06	4513	4,0	4501	314
-16,1	3,00	4134	4,9	4119	356
-16,1	1,00	3898	5,5	3880	371
-16,1	0,30	3602	6,0	3582	376
-16,1	0,10	3296	6,9	3271	397
-16,1	0,03	3023	6,9	3000	365
-16,1	0,01	2792	7,4	2769	360
-26,1	9,96	5056	2,7	5050	235
-26,1	3,00	4769	3,5	4761	289
-26,1	1,00	4506	3,8	4496	301
-26,1	0,30	4270	5,0	4254	369
-26,1	0,10	4032	5,2	4015	365
-26,1	0,03	3746	5,4	3729	350
-26,1	0,01	3508	6,3	3487	383
-35,7	10,28	5505	2,0	5501	194
-35,6	2,99	5170	2,8	5164	256
-35,7	1,00	5018	3,1	5010	273
-35,7	0,30	4846	3,7	4836	312

-35,7	0,10	4570	4,2	4558	334
-35,7	0,03	4220	4,6	4207	335
-35,7	0,01	4047	5,2	4030	366

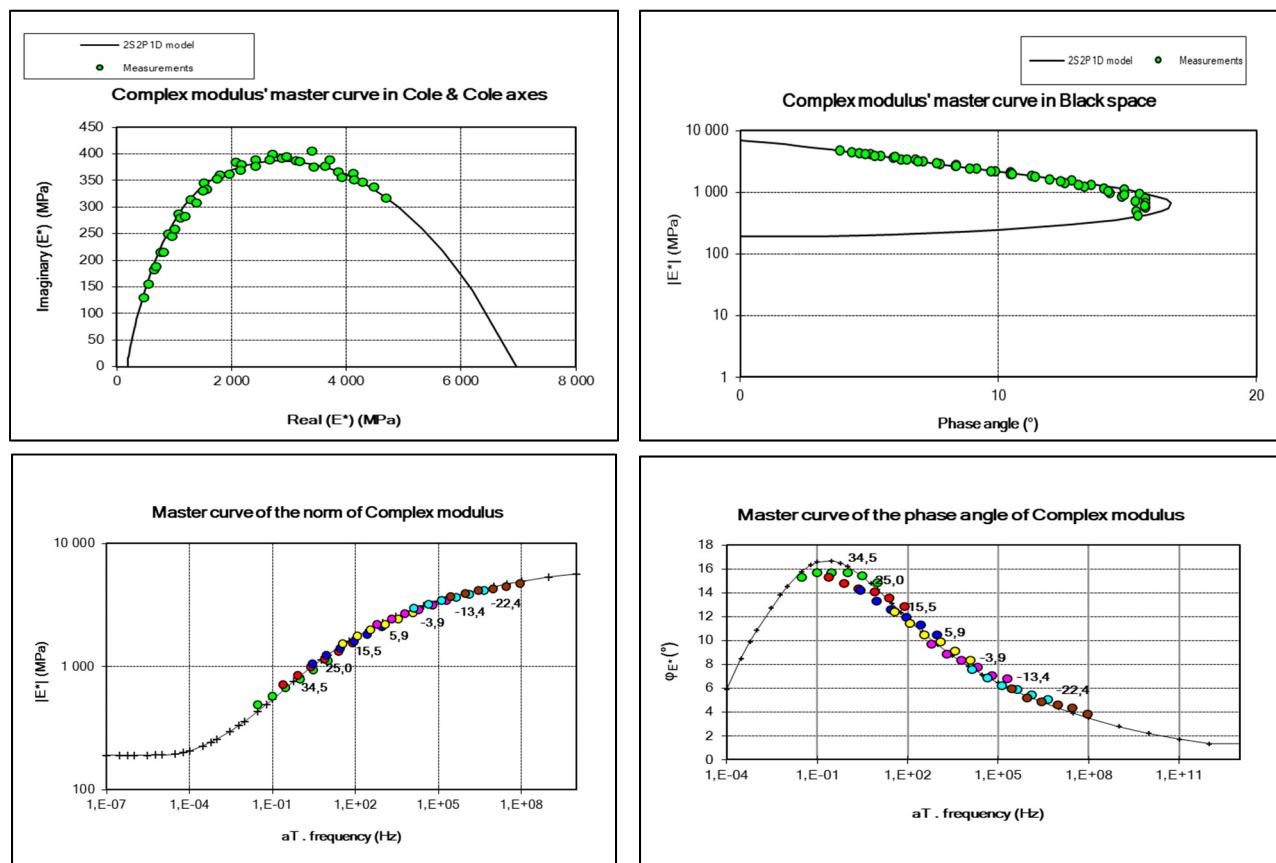


Figure-A I-0.1 : Présentation de courbe de module complexe de l'éprouvette P1A1 après 0 cycle

Mesure de l'essai de module complexe de l'éprouvette P1A2 après 0 cycle

Temp.	Freq.	$ E^* $	ϕ	E1	E2
(°C)	(Hz)	(MPa)	(°)	(MPa)	(MPa)
34,4	3,00	778	16,6	746	222
34,4	1,00	656	17,2	627	194
34,4	0,30	539	17,7	513	163
34,4	0,10	462	17,3	441	137
34,4	0,03	402	16,8	385	116
34,4	0,01	384	16,5	368	109
24,7	9,99	1378	13,2	1342	314

24,7	3,00	1151	14,2	1116	282
24,7	1,00	989	15,1	955	257
24,7	0,30	840	15,9	807	230
24,7	0,10	706	16,3	677	198
24,7	0,03	588	16,7	563	169
24,7	0,01	493	17,2	471	146
15,0	10,01	1919	10,5	1887	351
15,0	3,00	1656	11,5	1622	330
15,0	1,00	1446	12,3	1413	309
15,0	0,30	1259	13,3	1225	289
15,0	0,10	1091	14,0	1059	264
15,0	0,03	929	14,8	898	237
15,0	0,01	782	15,5	753	209
5,2	9,95	2572	8,5	2543	380
5,2	3,00	2289	9,2	2259	364
5,2	1,00	2070	9,7	2040	349
5,3	0,30	1849	10,2	1820	328
5,2	0,10	1649	11,2	1617	321
5,2	0,03	1450	12,0	1418	300
5,2	0,01	1256	13,0	1224	282
-4,6	10,01	3344	6,5	3323	376
-4,6	2,99	3022	7,2	2998	379
-4,6	1,01	2767	7,8	2742	373
-4,6	0,30	2551	8,2	2525	362
-4,6	0,10	2340	8,7	2313	352
-4,6	0,03	2125	9,6	2096	353
-4,6	0,01	1886	10,4	1855	341
-14,5	9,96	4068	5,0	4052	351
-14,5	2,99	3759	5,4	3742	357
-14,5	1,00	3546	6,1	3526	377
-14,5	0,30	3353	6,4	3332	374
-14,5	0,10	3129	6,6	3109	358
-14,5	0,03	2875	7,2	2852	361
-14,5	0,01	2610	8,2	2583	373
-24,3	10,10	4721	3,7	4711	301
-24,3	3,01	4475	4,1	4464	317
-24,3	1,00	4241	4,4	4228	328
-24,3	0,30	4085	5,0	4069	359

-24,3	0,10	3910	5,2	3894	351
-24,3	0,03	3657	5,5	3640	349
-24,3	0,01	3418	6,4	3397	378
-34,3	10,00	5112	2,6	5106	231
-34,3	3,02	4921	2,9	4915	247
-34,2	1,00	4786	3,5	4777	294
-34,3	0,30	4658	3,3	4650	267
-34,2	0,10	4513	3,8	4503	298
-34,2	0,03	4336	4,2	4324	320
-34,3	0,01	4114	4,6	4101	333

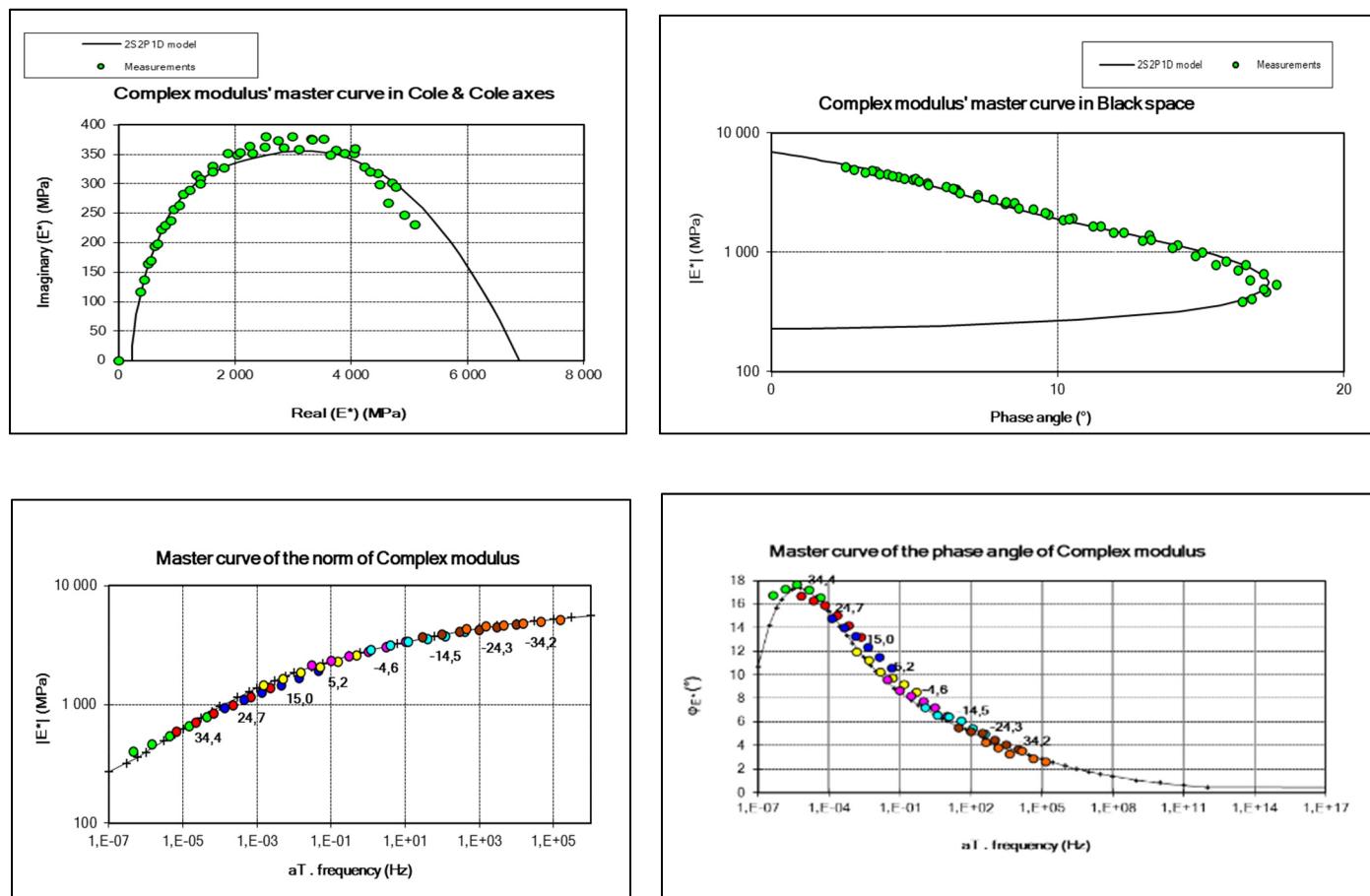


Figure-A I-0.2 : Présentation de courbe de module complexe de l'éprouvette P1A2 après 0 cycle

Mesure de l'essai de module complexe de l'éprouvette P1A2
après 5000 cycles

Temp.	Freq.	E*	ϕ	E1	E2
(°C)	(Hz)	(MPa)	(°)	(MPa)	(MPa)
34,4	10,00	767	17,5	732	230
34,4	3,00	624	18,3	592	196
34,4	1,00	526	18,8	497	170
34,4	0,30	430	19,2	406	141
34,4	0,10	357	19,4	337	119
34,4	0,03	302	18,9	286	98
34,4	0,01	262	18,3	249	82
24,7	10,01	1167	14,2	1131	287
24,7	3,00	971	15,4	936	257
24,7	1,00	821	16,2	788	229
24,6	0,30	688	17,0	658	201
24,7	0,10	573	17,7	546	174
24,7	0,03	474	18,2	450	148
24,7	0,01	393	18,4	373	124
15,0	10,02	1629	11,7	1596	329
15,0	3,00	1404	12,7	1370	309
15,0	1,00	1232	13,4	1199	285
15,0	0,30	1064	14,2	1031	261
15,0	0,10	916	14,9	885	236
15,0	0,03	770	15,9	741	211
15,0	0,01	645	16,7	618	186
5,2	10,01	2211	9,5	2181	365
5,2	3,01	1946	10,1	1915	342
5,2	1,00	1753	10,8	1721	329
5,3	0,30	1553	11,4	1523	308
5,2	0,10	1364	12,4	1333	292
5,3	0,03	1194	13,1	1163	271
5,2	0,01	1037	14,0	1006	250
-4,6	10,02	2883	7,4	2859	370
-4,6	2,99	2615	8,0	2590	364
-4,5	1,00	2393	8,5	2367	353
-4,6	0,30	2220	8,9	2193	345
-4,5	0,10	2000	9,7	1972	335
-4,5	0,03	1799	10,4	1769	326

-4,6	0,01	1588	11,2	1558	309
-14,5	10,03	3618	5,5	3601	346
-14,5	2,99	3367	6,0	3348	354
-14,5	1,00	3159	6,4	3140	350
-14,5	0,30	2939	7,0	2917	358
-14,4	0,10	2737	7,5	2714	359
-14,5	0,03	2532	8,0	2508	352
-14,5	0,01	2296	8,7	2269	349
-24,2	10,07	4258	4,1	4247	303
-24,2	2,99	4048	4,4	4036	309
-24,2	1,00	3875	4,8	3862	324
-24,2	0,30	3705	5,1	3690	330
-24,2	0,10	3531	5,8	3513	355
-24,2	0,03	3347	5,9	3330	342
-24,2	0,01	3090	6,8	3068	367
-34,2	10,03	4834	2,7	4829	231
-34,1	2,99	4632	3,2	4624	260
-34,1	1,00	4452	3,6	4443	282
-34,1	0,30	4345	4,0	4334	304
-34,2	0,10	4214	4,3	4202	315
-34,1	0,03	4055	4,3	4044	306
-34,1	0,01	3812	5,1	3797	337

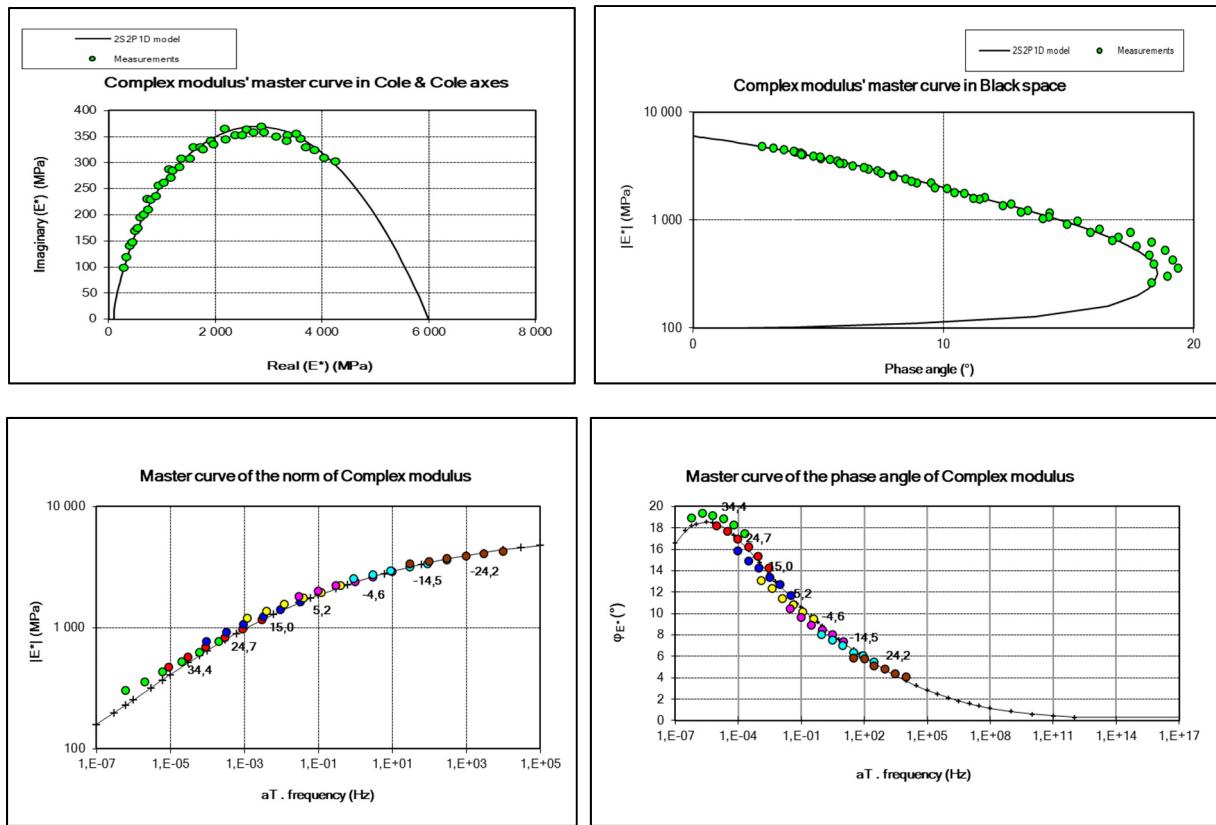


Figure-A I-0.3 : Présentation de courbe de module complexe de l'éprouvette P1A2 après 5000 cycles

Mesure de l'essai de module complexe de l'éprouvette P1A2 après 25 000 cycles

Temp.	Freq.	$ E^* $	ϕ	E1	E2
(°C)	(Hz)	(MPa)	(°)	(MPa)	(MPa)
-34,1	0,01	3681	5,4	3665	345
-34,1	0,03	3876	4,7	3863	315
-34,2	0,10	4074	4,1	4064	292
-34,1	0,30	4180	3,9	4170	284
-34,1	1,00	4266	3,6	4258	269
-34,2	2,99	4400	3,4	4392	261
-34,2	9,93	4556	3,0	4550	239
-24,2	0,01	2910	7,0	2888	355
-24,2	0,03	3148	6,2	3130	338
-24,3	0,10	3337	5,7	3321	329

-24,2	0,30	3563	5,4	3547	333
-24,3	1,01	3664	4,9	3650	314
-24,3	2,99	3791	4,7	3778	309
-24,2	9,96	4021	4,3	4010	301
-14,4	0,01	2160	8,9	2134	333
-14,4	0,03	2376	8,0	2352	332
-14,4	0,10	2594	7,5	2572	340
-14,4	0,30	2803	7,0	2782	343
-14,4	1,00	2972	6,5	2953	338
-14,4	3,00	3141	6,2	3123	337
-14,5	10,16	3407	5,7	3390	341
-4,5	0,01	1486	11,4	1457	293
-4,5	0,03	1679	10,6	1650	309
-4,5	0,10	1875	9,7	1847	317
-4,5	0,30	2067	9,2	2040	330
-4,4	1,00	2245	8,7	2219	339
-4,5	3,00	2441	8,1	2416	344
-4,4	9,95	2697	7,5	2674	352
5,3	0,01	956	14,2	927	235
5,3	0,03	1121	13,3	1090	259
5,3	0,10	1283	12,2	1254	271
5,3	0,30	1435	11,5	1406	287
5,3	1,00	1617	11,0	1588	308
5,3	3,00	1796	10,4	1767	323
5,3	9,99	2060	9,6	2031	343
15,0	0,01	584	17,1	559	171
15,1	0,03	707	16,0	679	195
15,0	0,10	840	15,1	810	219
15,0	0,30	969	14,5	938	242
15,0	1,00	1137	13,6	1106	267
15,0	3,00	1298	12,9	1265	289
15,1	9,98	1529	11,8	1497	313
24,7	0,01	366	18,4	348	116
24,8	0,03	439	18,0	417	135
34,4	9,99	707	17,6	673	214
34,4	3,00	578	18,3	549	182
34,4	1,00	484	18,9	458	157
34,4	0,30	398	19,4	376	133

34,4	0,10	333	19,3	315	110
34,4	0,03	278	18,9	263	90
34,4	0,01	240	18,2	228	75
24,8	10,01	1087	14,4	1053	270
24,7	3,00	892	15,7	859	241
24,8	1,00	762	16,3	731	214
24,7	0,30	639	17,3	611	190
24,7	0,10	534	17,7	509	163
24,8	0,03	439	18,0	417	135
24,7	0,01	366	18,4	348	116
15,1	9,98	1529	11,8	1497	313
15,0	3,00	1298	12,9	1265	289
15,0	1,00	1137	13,6	1106	267
15,0	0,30	969	14,5	938	242
15,0	0,10	840	15,1	810	219
15,1	0,03	707	16,0	679	195
15,0	0,01	584	17,1	559	171
5,3	9,99	2060	9,6	2031	343
5,3	3,00	1796	10,4	1767	323
5,3	1,00	1617	11,0	1588	308
5,3	0,30	1435	11,5	1406	287
5,3	0,10	1283	12,2	1254	271
5,3	0,03	1121	13,3	1090	259
5,3	0,01	956	14,2	927	235
-4,4	9,95	2697	7,5	2674	352
-4,5	3,00	2441	8,1	2416	344
-4,4	1,00	2245	8,7	2219	339
-4,5	0,30	2067	9,2	2040	330
-4,5	0,10	1875	9,7	1847	317
-4,5	0,03	1679	10,6	1650	309
-4,5	0,01	1486	11,4	1457	293
-14,5	10,16	3407	5,7	3390	341
-14,4	3,00	3141	6,2	3123	337
-14,4	1,00	2972	6,5	2953	338
-14,4	0,30	2803	7,0	2782	343
-14,4	0,10	2594	7,5	2572	340
-14,4	0,03	2376	8,0	2352	332
-14,4	0,01	2160	8,9	2134	333

-24,2	9,96	4021	4,3	4010	301
-24,3	2,99	3791	4,7	3778	309
-24,3	1,01	3664	4,9	3650	314
-24,2	0,30	3563	5,4	3547	333
-24,3	0,10	3337	5,7	3321	329
-24,2	0,03	3148	6,2	3130	338
-24,2	0,01	2910	7,0	2888	355
-34,2	9,93	4556	3,0	4550	239
-34,2	2,99	4400	3,4	4392	261
-34,1	1,00	4266	3,6	4258	269
-34,1	0,30	4180	3,9	4170	284
-34,2	0,10	4074	4,1	4064	292
-34,1	0,03	3876	4,7	3863	315
-34,1	0,01	3681	5,4	3665	345

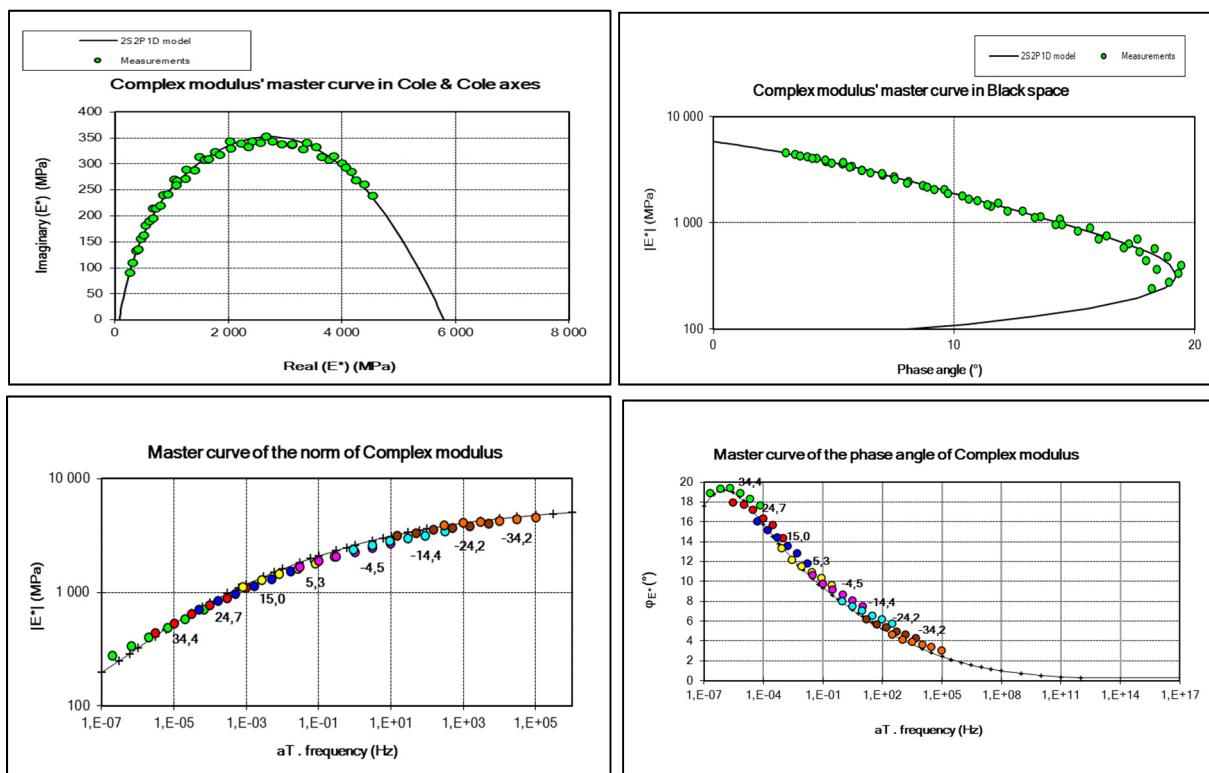


Figure-A I-0.4 : Présentation de courbe de module complexe de l'éprouvette P1A2 après 25 000 cycles

Mesure de l'essai de module complexe de l'éprouvette

P1A2 après 35 000 cycles

Temp.	Freq.	E*	ϕ	E1	E2
(°C)	(Hz)	(MPa)	(°)	(MPa)	(MPa)
34,5	9,99	665	17,8	633	203
34,5	3,00	548	18,5	520	174
34,5	1,00	463	18,8	438	149
34,5	0,30	378	19,3	357	125
34,5	0,10	318	19,2	301	105
34,4	0,03	267	19,2	252	88
34,5	0,01	229	18,5	217	73
24,8	10,00	1012	14,9	978	260
24,8	3,00	840	15,9	808	230
24,8	1,00	716	16,6	686	205
24,8	0,30	598	17,6	570	180
24,8	0,10	501	18,1	476	155
24,8	0,03	409	18,4	388	129
24,8	0,01	340	18,6	322	108
15,1	9,99	1415	12,3	1383	301
15,1	3,00	1214	13,2	1182	278
15,1	1,00	1060	14,1	1028	258
15,1	0,30	912	14,6	883	230
15,1	0,10	783	15,6	754	210
15,1	0,03	659	16,4	632	186
15,1	0,01	549	17,2	525	162
5,3	10,01	1987	9,7	1958	333
5,3	3,00	1727	10,5	1698	316
5,3	1,00	1548	11,0	1519	297
5,3	0,30	1367	11,8	1338	279
5,3	0,10	1206	12,8	1176	267
5,3	0,03	1045	13,6	1015	245
5,3	0,01	900	14,4	871	224
-4,5	9,95	2602	7,5	2579	341
-4,5	2,99	2312	8,2	2288	329
-4,5	1,00	2126	8,9	2101	328
-4,4	0,30	1955	9,3	1930	314
-4,4	0,10	1784	10,1	1756	313
-4,5	0,03	1609	10,8	1580	302

-4,5	0,01	1403	11,5	1375	280
-14,4	9,98	3285	5,7	3269	327
-14,4	3,02	3025	6,4	3007	335
-14,4	1,00	2833	6,9	2813	341
-14,4	0,30	2650	7,4	2629	339
-14,4	0,10	2489	7,5	2468	324
-14,4	0,03	2278	8,2	2254	325
-14,4	0,01	2062	9,0	2036	322
-24,2	9,98	3931	4,3	3920	296
-24,2	3,02	3732	4,8	3719	311
-24,2	1,00	3586	5,0	3572	313
-24,2	0,30	3429	5,4	3414	322
-24,3	0,10	3273	5,9	3255	337
-24,2	0,03	3075	6,5	3055	351
-24,2	0,01	2833	6,9	2813	342
-34,2	10,02	4410	3,1	4404	240
-34,2	3,00	4265	3,5	4257	259
-34,1	1,01	4150	3,8	4140	277
-34,1	0,30	4052	4,2	4041	295
-34,2	0,10	3893	4,5	3881	305
-34,1	0,03	3753	4,8	3740	312
-34,1	0,01	3502	5,5	3486	333

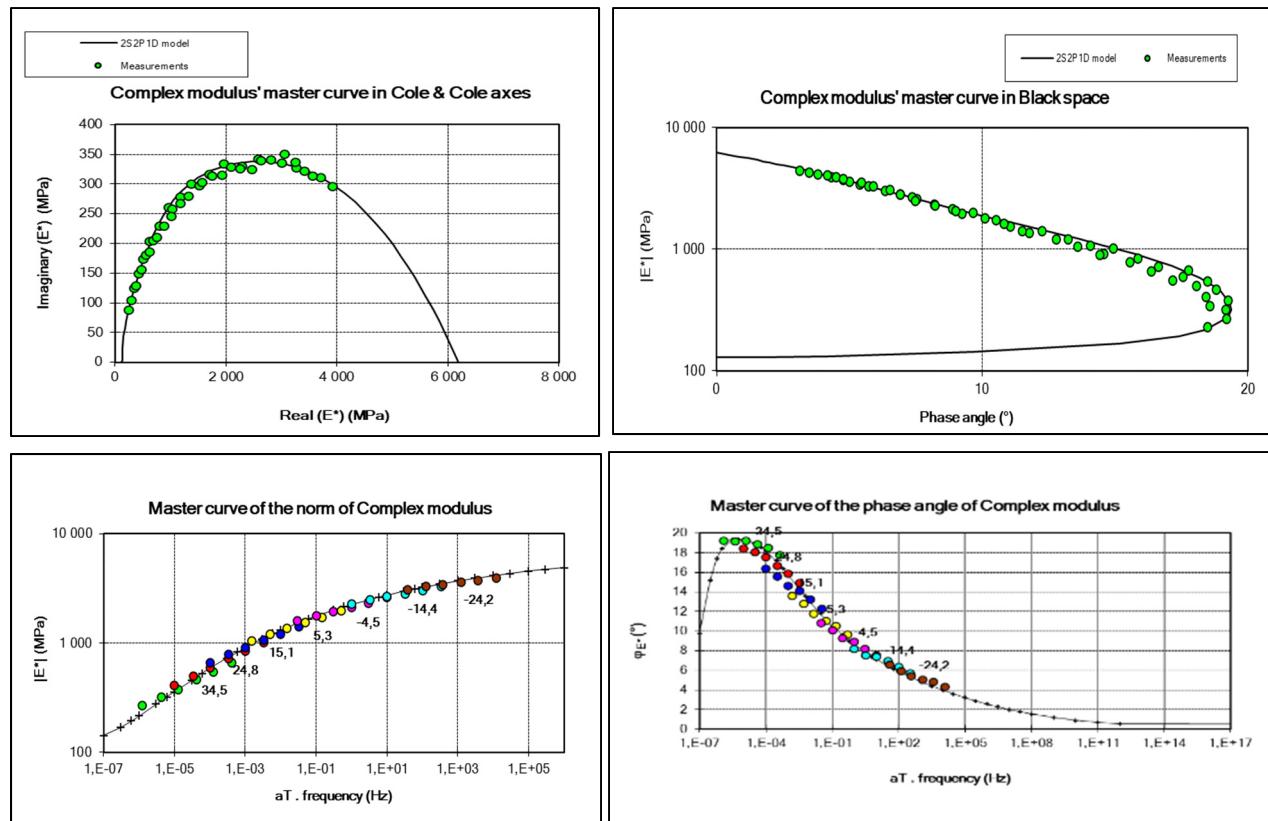


Figure-A I-0.5 : Présentation de courbe de module complexe de l'éprouvette P1A2 après 35 000 cycles

Mesure de l'essai de module complexe de l'éprouvette P2A2 après 0 cycle

Temp.	Freq.	E*	ϕ	E1	E2
(°C)	(Hz)	(MPa)	(°)	(MPa)	(MPa)
-34,0	0,01	5060	4,7	5043	413
-34,0	0,03	5369	3,8	5357	353
-34,0	0,10	5556	3,8	5544	364
-33,9	0,30	5693	3,0	5685	295
-34,0	1,00	5849	3,0	5841	305
-34,0	2,99	6044	3,0	6035	312
-33,9	10,01	6361	9,5	6356	236
-24,1	0,01	4407	5,9	4383	455
-24,1	0,03	4729	5,3	4708	440
-24,1	0,10	4972	4,7	4955	404
-24,0	0,30	5159	4,3	5144	389
-24,1	1,00	5380	3,9	5368	366
-24,1	2,99	5642	18,4	5631	334
-24,1	10,00	5986	10,1	5978	285
-14,2	0,01	3650	7,1	3622	453
-14,2	0,03	3999	6,3	3975	438
-14,2	0,10	4261	5,7	4240	423
-14,2	0,30	4524	5,2	4505	411
-14,2	1,00	4763	4,9	4746	406
-14,2	2,99	5053	4,5	5037	396
-14,2	10,03	5442	18,5	5427	367
-4,3	0,01	2780	9,0	2746	437
-4,3	0,03	3072	7,7	3044	412
-4,3	0,10	3386	7,4	3357	438
-4,2	0,30	3615	6,9	3589	436
-4,2	1,00	3892	6,3	3869	424
-4,3	3,00	4204	5,9	4181	435
-4,3	10,01	4611	12,5	4590	429
5,6	0,01	1966	11,2	1929	383
5,6	0,03	2260	10,2	2224	398
5,6	0,10	2521	9,6	2486	419

5,6	0,30	2782	9,1	2747	440
5,5	1,00	3065	8,1	3035	429
5,6	3,01	3381	7,6	3351	449
5,6	9,98	3781	13,8	3756	421
15,3	0,01	1312	13,1	1278	298
15,3	0,03	1522	12,6	1485	332
15,3	0,10	1771	11,8	1733	362
15,3	0,30	1998	11,1	1961	384
15,3	1,00	2258	10,4	2221	408
15,3	3,00	2540	9,9	2502	436
15,4	9,99	2919	8,7	2885	442
25,0	0,01	838	15,0	809	217
25,1	0,03	991	14,7	959	251
25,0	0,10	1162	14,2	1127	285
25,0	0,30	1355	13,5	1318	317
25,1	1,00	1570	12,9	1530	349
25,0	3,00	1821	12,0	1781	380
25,1	10,00	2153	11,0	2113	408
34,4	0,01	384	16,5	368	109
34,4	0,03	402	16,8	385	116
34,4	0,10	462	17,3	441	137
34,4	0,30	539	17,7	513	163
34,4	1,00	656	17,2	627	194
34,4	3,00	778	16,6	746	222
34,4	10,00	780	16,5	760	230

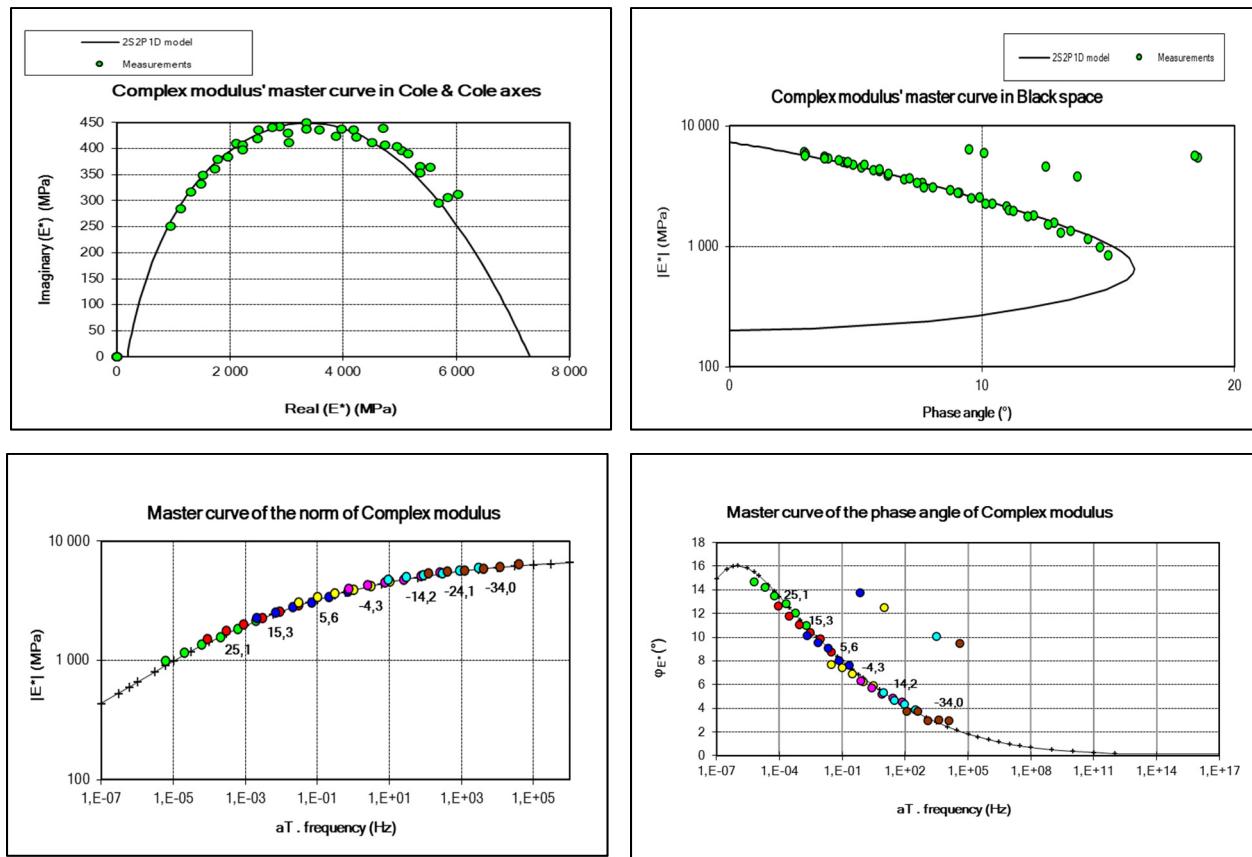


Figure-A I-0.6 : Présentation de courbe de module complexe de l'éprouvette P2A2 après 0 cycle

Mesure de l'essai de module complexe de l'éprouvette P2A2 après 5000 cycles

Temp.	Freq.	$ E^* $	ϕ	E1	E2
(°C)	(Hz)	(MPa)	(°)	(MPa)	(MPa)
34,7	10,00	1246	14,7	1205	316
34,7	3,00	1041	15,5	1003	278
34,7	1,00	889	15,9	854	244
34,7	0,30	748	16,3	718	210
34,7	0,10	639	16,5	612	181
34,7	0,03	540	16,6	517	154
34,7	0,01	464	16,5	445	132
25,0	9,99	1744	12,3	1704	370
25,0	3,00	1493	13,1	1455	337
25,0	1,00	1295	13,7	1258	307
25,0	0,30	1106	14,5	1071	277

25,0	0,10	943	15,2	910	247
25,0	0,03	804	15,6	774	217
25,0	0,01	686	15,7	660	186
15,3	10,01	2318	10,1	2282	406
15,3	3,00	2044	10,9	2008	385
15,3	1,00	1826	11,3	1790	359
15,3	0,30	1618	12,3	1580	345
15,3	0,10	1420	12,9	1384	317
15,3	0,03	1218	13,6	1184	287
15,3	0,01	1055	14,3	1022	260
5,5	9,99	3024	8,2	2993	432
5,6	3,00	2686	8,6	2655	403
5,5	1,00	2472	9,2	2441	394
5,5	0,30	2242	9,6	2210	375
5,5	0,10	2028	10,2	1996	357
5,5	0,03	1813	10,9	1780	343
5,6	0,01	1597	11,7	1564	324
-4,3	10,00	3719	6,5	3695	420
-4,3	3,00	3423	6,7	3400	401
-4,3	1,00	3209	7,3	3183	410
-4,3	0,30	2988	7,9	2960	409
-4,2	0,10	2788	8,0	2761	387
-4,3	0,03	2557	8,7	2527	388
-4,3	0,01	2294	9,5	2263	379
-14,2	10,08	4491	5,1	4473	395
-14,2	3,00	4216	5,3	4198	388
-14,2	1,00	3973	5,8	3953	400
-14,2	0,30	3831	6,3	3808	424
-14,2	0,10	3612	6,3	3590	398
-14,2	0,03	3374	7,0	3349	409
-14,2	0,01	3090	7,5	3063	404
-24,1	9,99	5234	3,9	5221	358
-24,1	2,99	4907	4,2	4893	361
-24,1	1,00	4747	4,4	4733	368
-24,1	0,30	4643	4,6	4629	369
-24,1	0,10	4437	4,8	4421	371
-24,1	0,03	4256	5,2	4239	387
-24,1	0,01	3936	6,0	3914	414

-34,0	10,08	5660	2,9	5653	282
-34,0	3,02	5403	3,3	5394	315
-34,1	1,01	5294	3,6	5283	330
-34,1	0,30	5236	3,8	5224	348
-34,0	0,10	5090	3,8	5079	335
-34,1	0,03	4932	4,2	4918	360
-34,0	0,01	4643	4,7	4628	376

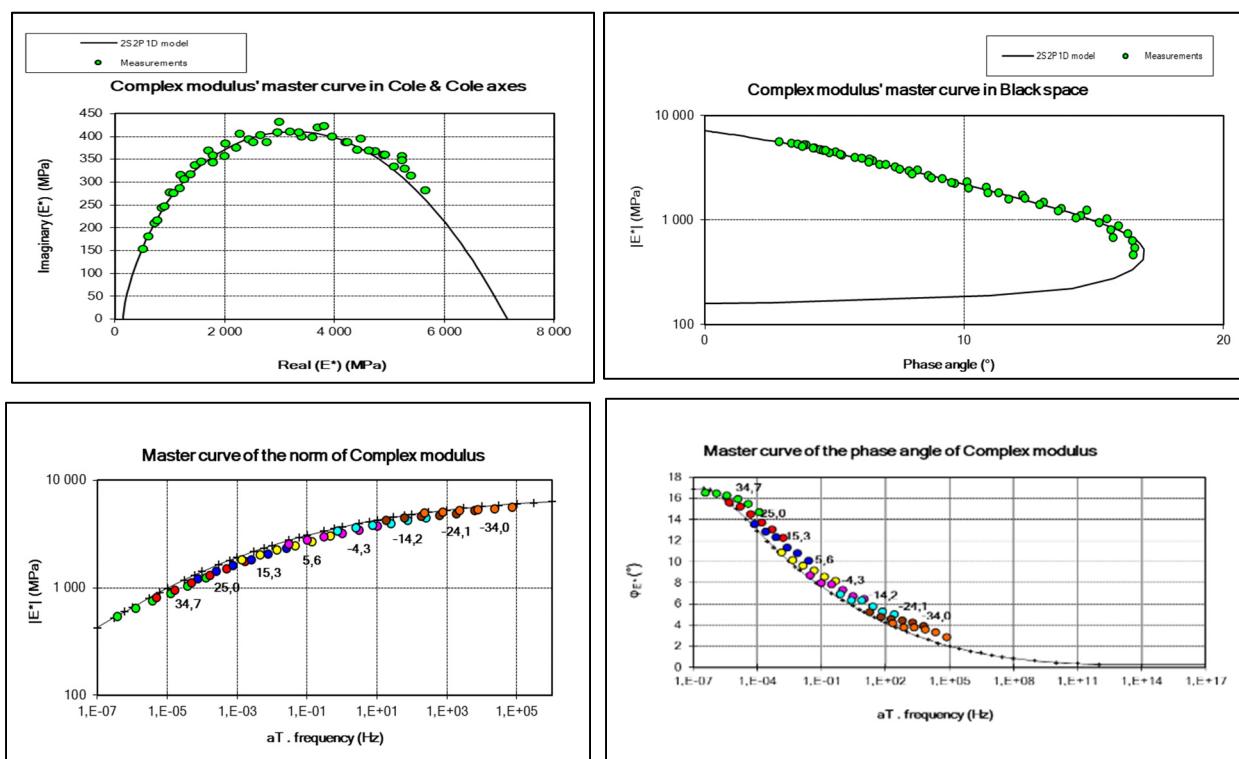


Figure-A I-0.7 : Présentation de courbe de module complexe de l'éprouvette P2A2 après 5000 cycles

Mesure de l'essai de module complexe de l'éprouvette P2A2 après 25 000 cycles

Temp.	Freq.	E*	ϕ	E1	E2
(°C)	(Hz)	(MPa)	(°)	(MPa)	(MPa)
34,7	9,99	1127	15,1	1089	293
34,7	3,00	960	15,6	924	258
34,7	1,00	824	16,0	792	227
34,7	0,30	697	16,2	670	194
34,7	0,10	596	16,5	572	169

34,7	0,03	506	16,5	485	144
34,7	0,01	436	16,3	418	122
25,0	9,99	1567	12,5	1530	339
25,0	3,00	1348	13,4	1312	313
25,0	1,00	1173	14,0	1138	284
25,0	0,30	1020	14,6	987	257
25,0	0,10	874	15,2	843	228
25,0	0,03	737	15,6	710	198
25,0	0,01	624	15,9	600	170
15,3	10,02	2118	10,4	2084	381
15,3	3,00	1829	11,2	1794	354
15,3	1,00	1637	11,6	1604	330
15,3	0,30	1457	12,5	1422	316
15,3	0,10	1274	13,0	1241	287
15,3	0,03	1119	13,5	1088	260
15,3	0,01	950	14,2	921	233
5,6	10,03	2700	8,6	2670	402
5,6	3,00	2419	9,0	2389	380
5,5	1,00	2183	9,7	2152	369
5,6	0,30	2006	10,1	1975	351
5,6	0,10	1825	10,7	1793	338
5,5	0,03	1639	11,1	1608	315
5,6	0,01	1431	12,0	1400	297
-4,3	10,04	3396	6,6	3373	393
-4,3	3,00	3112	7,5	3086	406
-4,3	1,00	2898	7,8	2871	393
-4,2	0,30	2684	8,0	2657	373
-4,3	0,10	2494	8,2	2469	356
-4,3	0,03	2281	9,3	2250	370
-4,3	0,01	2068	9,8	2038	351
-14,2	10,19	4106	5,5	4087	392
-14,2	3,00	3855	5,5	3837	372
-14,2	1,00	3694	6,0	3673	387
-14,2	0,30	3456	6,3	3435	382
-14,2	0,10	3277	6,7	3254	385
-14,2	0,03	3066	7,0	3043	374
-14,2	0,01	2812	7,9	2785	388
-24,1	10,05	4855	4,1	4842	350

-24,0	3,02	4584	4,6	4569	371
-24,0	1,00	4429	4,8	4414	367
-24,1	0,30	4314	5,2	4297	387
-24,0	0,10	4174	5,1	4157	372
-24,0	0,03	3948	6,0	3927	409
-24,1	0,01	3670	6,1	3649	389
-34,0	9,96	5391	3,1	5383	295
-34,0	3,00	5163	3,5	5153	316
-34,0	1,00	5042	3,7	5032	327
-33,9	0,30	4978	3,8	4966	332
-34,0	0,10	4801	4,1	4789	341
-34,0	0,03	4694	4,5	4679	367
-34,0	0,01	4419	4,9	4403	374

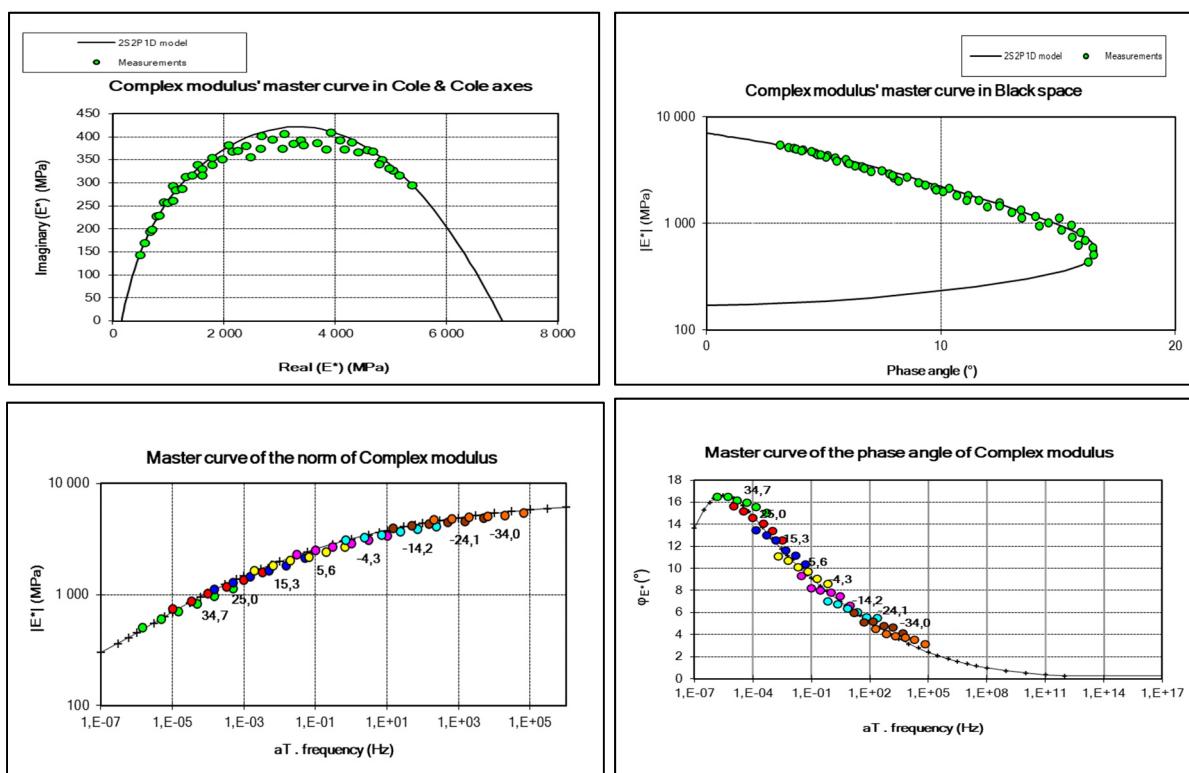


Figure-A I-0.8 : Présentation de courbe de module complexe de l'éprouvette P2A2 après 25 000 cycles

Mesure de l'essai de module complexe de l'éprouvette

P2A2 après 35 000 cycles

Temp.	Freq.	$ E^* $	ϕ	E1	E2
(°C)	(Hz)	(Mpa)	(°)	(MPa)	(MPa)
34,7	10,01	1048	15,2	1011	275
34,7	3,00	887	15,8	854	242
34,7	1,00	766	16,3	735	215
34,7	0,30	651	16,7	624	187
34,7	0,10	562	16,4	539	159
34,7	0,03	477	16,6	457	136
34,7	0,01	415	16,4	398	117
25,0	10,00	1470	12,8	1433	326
25,0	3,00	1256	13,6	1221	294
25,0	1,00	1092	14,2	1059	268
25,0	0,30	940	14,8	909	240
25,0	0,10	807	15,3	778	213
25,0	0,03	691	15,7	665	187
25,0	0,01	586	16,0	563	162
15,3	10,01	1937	10,6	1904	357
15,3	3,00	1724	11,4	1690	340
15,3	1,00	1521	12,0	1488	315
15,3	0,30	1348	12,5	1316	291
15,3	0,10	1182	13,1	1151	269
15,3	0,03	1027	13,8	998	244
15,3	0,01	880	14,7	851	223
5,5	10,01	2528	8,7	2499	382
5,5	3,00	2279	9,2	2250	363
5,5	1,00	2080	9,7	2051	350
5,5	0,30	1899	10,2	1869	336
5,5	0,10	1694	10,9	1664	322
5,5	0,03	1521	11,4	1491	301
5,5	0,01	1318	12,4	1287	282
-4,3	10,05	3190	6,9	3167	384
-4,3	2,99	2909	7,6	2883	385
-4,3	1,00	2704	8,0	2677	375
-4,3	0,30	2531	8,3	2504	364

-4,3	0,10	2349	8,8	2321	358
-4,3	0,03	2149	9,0	2122	338
-4,3	0,01	1925	9,9	1896	330
-14,3	9,96	3887	5,5	3870	370
-14,3	3,02	3626	5,8	3607	366
-14,3	1,01	3449	6,3	3428	376
-14,3	0,30	3280	6,7	3258	381
-14,3	0,10	3113	6,8	3091	369
-14,3	0,03	2918	7,2	2895	365
-14,3	0,01	2655	8,0	2629	372
-24,1	10,07	4561	4,2	4549	331
-24,1	3,00	4355	4,6	4341	350
-24,1	1,00	4183	5,0	4167	362
-24,1	0,30	4047	5,2	4031	367
-24,1	0,10	3862	5,3	3846	356
-24,1	0,03	3734	5,8	3714	378
-24,1	0,01	3478	6,4	3456	387
-34,0	10,06	5141	3,2	5133	286
-34,0	2,99	4979	3,6	4969	311
-34,0	1,01	4820	3,9	4809	330
-34,0	0,30	4749	4,0	4738	329
-34,0	0,10	4635	4,2	4623	338
-34,0	0,03	4499	4,4	4485	347
-34,0	0,01	4237	4,9	4221	362

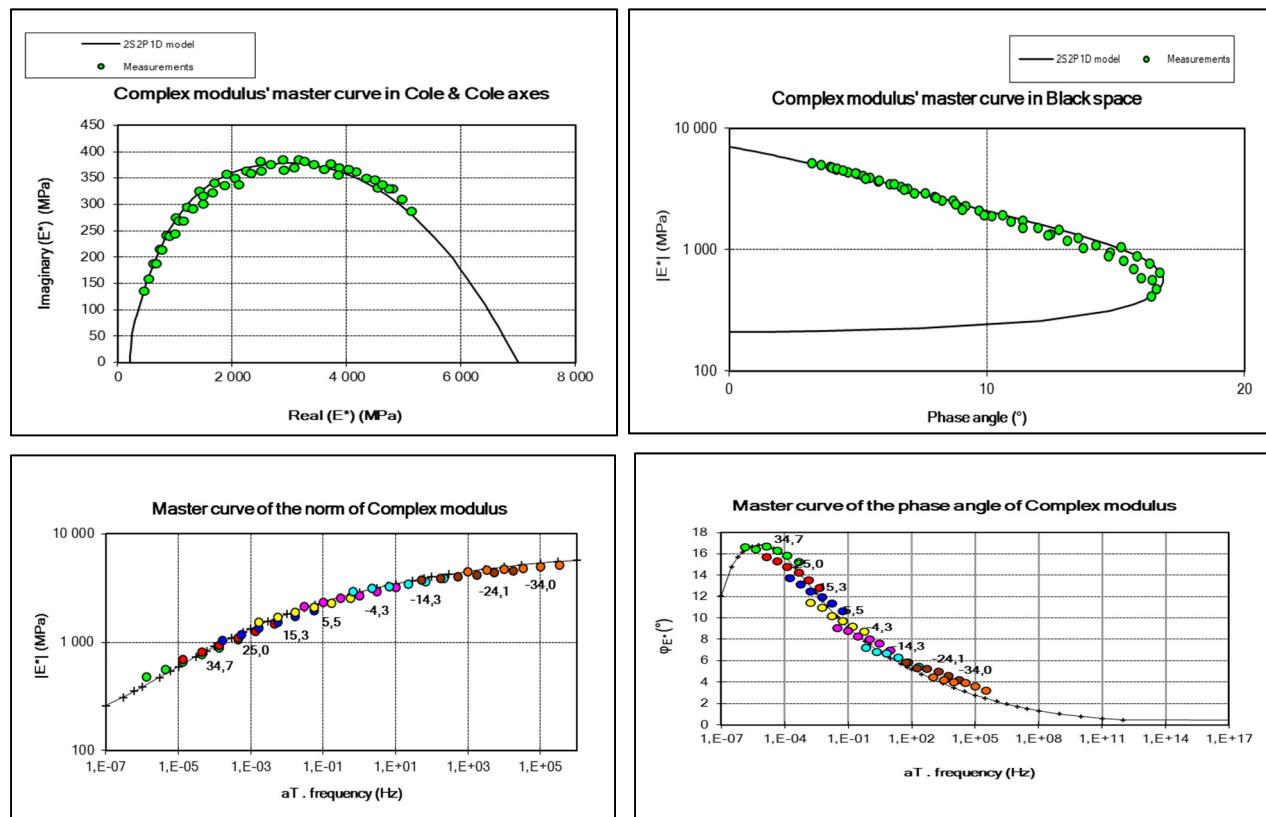
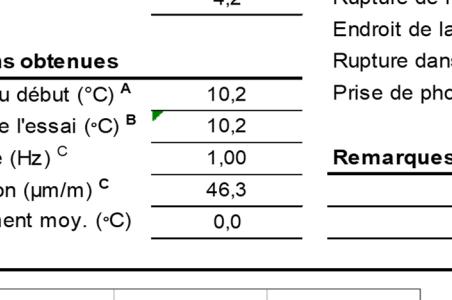
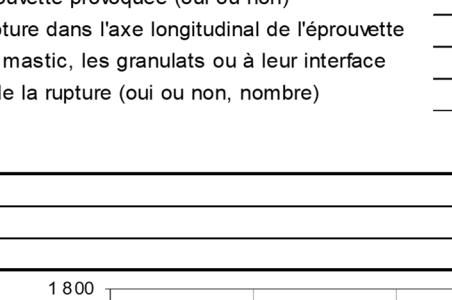
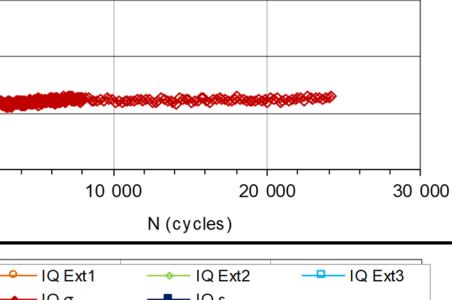
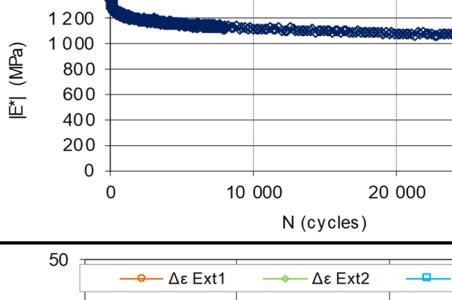


Figure-A I-0.9 : Présentation de courbe de module complexe de l'éprouvette P2A2 après 35 000 cycles

Tableau-A I-2 : Information relative à l'essai de fatigue

Réalisation de l'essai		
Essai (T/C, 2 ou 4 pts)	T/C	
Date (AAAA-MM-JJ)	20/07/2018	
Opérateur (nom)	S.L.	
Laboratoire (nom)	LCMB	
Équipements		
Presse hydraulique (#)	MTS810	
Longueur capteurs (mm)	50	
Capteur 1 (# série)	4224	
Capteur 2 (# série)	5259	
Capteur 3 (# série)	4402	
Éprouvette		
Enrobé (type)	EME14	
Numéro (#)	5A2	
Dimensions (ϕ et L) (mm)	74,77 x 150,44	
Vi (%)	4,2	
Conditions obtenues		
Tempér. au début ($^{\circ}$ C) ^A	10,2	
Tempér. de l'essai ($^{\circ}$ C) ^B	10,2	
Fréquence (Hz) ^C	1,00	
Déformation ($\mu\text{m}/\text{m}$) ^C	46,3	
Échauffement moy. ($^{\circ}$ C)	0,0	
Module initial E_0 (MPa) ^D		
1A. Extrapolé à l'origine avec valeurs des cycles #100 à 300	1 387	
1B. Mesuré au 50 ^{ème} , 100 ^{ème} cycle ou selon les exigences	1 336	
Durées de vie selon les critères de rupture (N_f)		
1A. N_f _{50%} avec $ E_0 $ extrapolé à l'origine	24 197	
1B. N_f _{50%} avec $ E_0 $ au 50, 100 ^{ème} ou X cycle (critère classique)	24 197	
02. N_f _{WN}	(ratio d'énergie dissipée, RED)	24 197
03. N_f _{E^*-N}	(perte de rigidité, phase II-III)	24 197
04. N_f _{ϕ_{\max}-N}	(évolution de l'angle de phase, phase II-III)	24 197
05. N_f _{ϕ_{\max}-E*}	(évolution de l'angle de phase et E^* , phase II-III)	24 197
06. N_f _{$\Delta\phi$}	($\Delta\phi$ supérieur à 5°, homogénéité, phase II-III)	24 197
07. N_f _{$\Delta\varepsilon_{\text{ex}}$}	($\Delta\varepsilon$ supérieur à 25%, homogénéité, phase II-III)	24 197
08. N_f _{II-III}	(moyenne des durées de vie, phase II-III)	24 197
Rupture de l'éprouvette		
Rupture physique, complète, de l'éprouvette (oui ou non)		
Rupture de l'éprouvette provoquée (oui ou non)		
Endroit de la rupture dans l'axe longitudinal de l'éprouvette		
Rupture dans le mastic, les granulats ou à leur interface		
Prise de photo de la rupture (oui ou non, nombre)		
Remarques		
		
		
		
		

BIBLIOGRAPHIE

- Alam, Tahsina Binte, Magdy Abdelrahman, et Scott A. Schram. 2010. « Laboratory Characterisation of Recycled Asphalt Pavement as a Base Layer ». *International Journal of Pavement Engineering* 11 (2): 123-31.
<https://doi.org/10.1080/10298430902731362>.
- Al-Qadi, Imad L., Mostafa Elseifi, et Samuel H. Carpenter. 2007. « Reclaimed asphalt pavement—a literature review ». *FHWA-ICT-07-001*.
- Aravind, K., et Animesh Das. 2007. « Pavement Design with Central Plant Hot-Mix Recycled Asphalt Mixes ». *Construction and Building Materials* 21 (5): 928-36.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.004>.
- Ashayer Soltani, Mohammad Ali. 1998. « Comportement en fatigue des enrobés bitumeux ». These de doctorat, Lyon, INSA. <https://www.theses.fr/1998ISAL0040>.
- Ashmawy, A K, R Salgado, S Guha, et V P Drnevich. 1995. « Soil Damping and Its Use in Dynamic Analyses », 8.
- Asphalt Academy,. 2009. « Technical Guideline (TG2): Bitumen Stabilized Materials ». ASTM. 2020a. « Specification for Cationic Emulsified Asphalt ». ASTM International.
https://doi.org/10.1520/D2397_D2397M-20.
- ASTM, ASTM. 2020b. « Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-Mm] Cube Specimens) ». ASTM International.
https://doi.org/10.1520/C0109_C0109M-11A.
- Attia, Thomas. 2020. « Interfaces between pavement layers in bituminous mixtures : Interfaces entre couches de chaussée en enrobé bitumineux ». Lyon.
- Baaj, Hassan. 2002. « Comportement des matériaux granulaires traités aux liants hydrocarbonés ». L'institut national des sciences appliquées.
- Bocci, M., A. Grilli, F. Cardone, et A. Graziani. 2011. « A Study on the Mechanical Behaviour of Cement–Bitumen Treated Materials ». *Construction and Building Materials* 25 (2): 773-78. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.007>.

Brown, S., et D. Needham. 2000. « A study of cement modified bitumen emulsion mixtures ». *Asphalt Paving Technology* 69: 92-121.

Canadian Standards Association. 2013. « Cementitious materials compendium. CSA A3000-13. »

Cardone, Fabrizio, Andrea Grilli, Maurizio Bocci, et Andrea Graziani. 2015. « Curing and Temperature Sensitivity of Cement–Bitumen Treated Materials ». *International Journal of Pavement Engineering* 16 (10): 868-80. <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.966710>.

Cardone, Fabrizio, Amedeo Virgili, et Andrea Graziani. 2018. « Evaluation of Bonding between Reclaimed Asphalt Aggregate and Bitumen Emulsion Composites ». *Construction and Building Materials* 184 (septembre): 565-74. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.016>.

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*. Vol. 10.

Chesner, Warren H., Christopher W. Stein, Henry G. Justus, Edward R. Kearney, et Stephen A. Cross. 2011. « Evaluation of Factors Affecting Long-Term Performance of Cold In-Place Recycled Pavements in New York State ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2227 (1): 13-22. <https://doi.org/10.3141/2227-02>.

Chomicz-Kowalska, Anna, et Krzysztof Maciejewski. 2020. « Performance and Viscoelastic Assessment of High-Recycle Rate Cold Foamed Bitumen Mixtures Produced with Different Penetration Binders for Rehabilitation of Deteriorated Pavements ». *Journal of Cleaner Production* 258 (juin): 120517. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120517>.

Cross, Stephen A., Warren H. Chesner, Henry G. Justus, et Edward R. Kearney. 2011. « Life-Cycle Environmental Analysis for Evaluation of Pavement Rehabilitation Options ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2227 (1): 43-52. <https://doi.org/10.3141/2227-05>.

Delaporte, Brice, Hervé Di Benedetto, Pierre Chaverot, et Gilles Gauthier. 2007. « Linear viscoelastic properties of bituminous materials: from binders to mastics (with discussion) ». *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* 76.

- Delaporte, Brice, Hervé Di Benedetto, Pierre Chaverot, et Gilles Gauthier. 2009. « Linear Viscoelastic Properties of Bituminous Materials Including New Products Made with Ultrafine Particles ». *Road Materials and Pavement Design* 10 (1): 7-38. <https://doi.org/10.1080/14680629.2009.9690180>.
- Di Benedetto, H., M. N. Partl, L. Francken, et C. De La Roche Saint-André. 2001. « Stiffness Testing for Bituminous Mixtures ». *Materials and Structures* 34 (2): 66-70. <https://doi.org/10.1007/BF02481553>.
- Di Benedetto, H., Manfred N. Partl, L. Francken, et C. De La Roche Saint-André. 2001. « Stiffness testing for bituminous mixtures ». *Materials and Structures* 34 (2): 66-70.
- Di Benedetto, Hervé, A. Ashayer Soltani, et Pierre Chaverot. 1996. « Fatigue damage for bituminous mixtures: a pertinent approach ». *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* 65.
- Di Benedetto, Hervé, et Jean-François Corté. 2005. « Matériaux routiers bitumineux 2: constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges, 1ère éd ». Coll.«Mécanique et Ingénierie des Matériaux». Paris: Hermès Science.
- Di Benedetto, Hervé, Neifar Mondher, Cédric Sauzéat, et François Olard. 2007. « Three-Dimensional Thermo-Viscoplastic Behaviour of Bituminous Materials: The DBN Model ». *Road Materials and Pavement Design* 8 (2): 285-315. <https://doi.org/10.1080/14680629.2007.9690076>.
- Di Benedetto, Hervé, François Olard, Cédric Sauzéat, et Brice Delaporte. 2004. « Linear Viscoelastic Behaviour of Bituminous Materials: From Binders to Mixes ». *Road Materials and Pavement Design* 5 (sup1): 163-202. <https://doi.org/10.1080/14680629.2004.9689992>.
- Di Benedetto, Hervé, Fumio Tatsuoka, et Masanori Ishihara. 2002. « Time-Dependent Shear Deformation Characteristics of Sand and Their Constitutive Modelling ». *Soils and Foundations* 42 (2): 1-22. https://doi.org/10.3208/sandf.42.2_1.
- Dolzycki, Bohdan, Mariusz Jaczewski, et Cezary Szydłowski. 2017. « The Long-Term Properties of Mineral-Cement-Emulsion Mixtures ». *Construction and Building Materials* 156 (décembre): 799-808. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.032>.

Du, Shaowen. 2014. « Interaction Mechanism of Cement and Asphalt Emulsion in Asphalt Emulsion Mixtures ». *Materials and Structures* 47 (7): 1149-59.
<https://doi.org/10.1617/s11527-013-0118-1>.

EN 1097-6. 2013. « Test for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption ».

Enomoto, Tadao, Shohei Kawabe, Fumio Tatsuoka, Hervé Di Benedetto, Toshiro Hayashi, et Antoine Duttine. 2009. « Effects of Particle Characteristics on the Viscous Properties of Granular Materials in Shear ». *Soils and Foundations* 49 (1): 25-49.
<https://doi.org/10.3208/sandf.49.25>.

Epps, Jon A. 1990. *Cold-recycled bituminous concrete using bituminous materials*. 160. Transportation Research Board.

Fabrizio, Cardone, Andrea Grilli, Maurizio Bocci, et Andrea Graziani. 2015. « Curing and Temperature Sensitivity of Cement–Bitumen Treated Materials ». *International Journal of Pavement Engineering* 16 (10): 868-80.
<https://doi.org/10.1080/10298436.2014.966710>.

Fang, Xing, Alvaro Garcia, Frank Winnefeld, Manfred N. Partl, et Pietro Lura. 2016. « Impact of rapid-hardening cements on mechanical properties of cement bitumen emulsion asphalt ». *Materials and Structures* 49 (1): 487-98.

Ferry, John D. 1980. *Viscoelastic properties of polymers*. John Wiley & Sons.

Galobardes, Isaac, Sergio H. Cavalaro, Chris I. Goodier, Simon Austin, et Ángel Rueda. 2015. « Maturity method to predict the evolution of the properties of sprayed concrete ». *Construction and Building Materials* 79: 357-69.

Gandi, Apparao, Alan Carter, et Dharamveer Singh. 2017. « Rheological behavior of cold recycled asphalt materials with different contents of recycled asphalt pavements ». *Innovative Infrastructure Solutions* 2 (1): 1-9.

Gergesova, M., B. Zupančič, I. Saprunov, et I. Emri. 2011. « The Closed Form T-T-P Shifting (CFS) Algorithm ». *Journal of Rheology* 55 (1): 1-16.
<https://doi.org/10.1122/1.3503529>.

- Godenzoni, C., A. Graziani, et M. Bocci. 2015. « Influence of reclaimed asphalt content on the complex modulus of cement bitumen treated materials ». In *6th International conference bituminous mixtures and pavements, Thessaloniki (Greece)*, 589-96.
- Graziani, Andrea, Carlotta Godenzoni, Fabrizio Cardone, Edoardo Bocci, et Maurizio Bocci. 2017. « An application of the Michaelis–Menten model to analyze the curing process of cold recycled bituminous mixtures ». *International Journal of Pavement Research and Technology* 10 (1): 62-74.
- Graziani, Andrea, Christian Iafelice, Simone Raschia, Daniel Perraton, et Alan Carter. 2018. « A Procedure for Characterizing the Curing Process of Cold Recycled Bitumen Emulsion Mixtures ». *Construction and Building Materials* 173 (juin): 754-62. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.091>.
- Graziani, Andrea, Chiara Mignini, Edoardo Bocci, et Maurizio Bocci. 2020. « Complex Modulus Testing and Rheological Modeling of Cold-Recycled Mixtures ». *Journal of Testing and Evaluation* 48 (1): 20180905. <https://doi.org/10.1520/JTE20180905>.
- Graziani, Andrea, Amedeo Virgili, et Fabrizio Cardone. 2018. « Testing the bond strength between cold bitumen emulsion composites and aggregate substrate ». *Materials and Structures* 51 (1): 1-11.
- Gu, Fan, Wangyu Ma, Randy C. West, Adam J. Taylor, et Yuqing Zhang. 2019. « Structural Performance and Sustainability Assessment of Cold Central-Plant and in-Place Recycled Asphalt Pavements: A Case Study ». *Journal of Cleaner Production* 208 (janvier): 1513-23. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.222>.
- Guatimosim, F. V., K. Vasconcelos, A. K. Kuchiishi, et L. L. B. Bernucci. 2019. « Field Evaluation of High Level Roads with Foamed Bitumen Stabilized Base Layers », juillet, 549-59. <https://doi.org/10.1061/9780784482469.055>.
- Guy Bergeron, 2005, « Performance des techniques de retraitement en place et de recyclage à froid au Québec », Ministère des Transports du Québec Service des chaussées : 3-16
- Hafeez, I., M.A. Kamal, M.W. Mirza, Barkatullah, et S. Bilal. 2013. « Laboratory Fatigue Performance Evaluation of Different Field Laid Asphalt Mixtures ». *Construction and Building Materials* 44 (juillet): 792-97. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.083>.

Huang, Baoshan, Xiang Shu, et Dragon Vukosavljevic. 2011. « Laboratory investigation of cracking resistance of hot-mix asphalt field mixtures containing screened reclaimed asphalt pavement ». *Journal of Materials in Civil Engineering* 23 (11): 1535-43.

Huet, C. 1963. « Étude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux bitumineux ». PhD Thesis, Thèse de docteur-ingénieur, Université de Paris.

Jacobson, Torbjörn. 2002. « Cold recycling of asphalt pavement-mix in plant ». In *Seminar on Road Pavement Recycling*. Vol. 1.

Jenkins, K. J., L. J. Ebels, E. T. Mathaniya, RWC Kelfkens PK Moloto, et W. K. Mulusa. 2008. « Updating Bituminous Stabilized Materials Guidelines: Mix Design Report, Phase II ». *PaveEng report prepared for Sabita and GDPTRW*.

Jiang, Yingjun, Hongwei Lin, Zhanchuang Han, et Changqing Deng. 2019. « Fatigue properties of cold-recycled emulsified asphalt mixtures fabricated by different compaction methods ». *Sustainability* 11 (12): 3483.

Kim, Yongjoo, Soohyok Im, et Hosin “David” Lee. 2011. « Impacts of Curing Time and Moisture Content on Engineering Properties of Cold In-Place Recycling Mixtures Using Foamed or Emulsified Asphalt ». *Journal of Materials in Civil Engineering* 23 (5): 542-53. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000209](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000209).

La Roche, Chantal de. 1996. « Module de rigidité et comportement en fatigue des enrobés bitumineux : expérimentations et nouvelles perspectives d’analyse ». These de doctorat, Châtenay-Malabry, Ecole centrale de Paris.
<https://www.theses.fr/1996ECAP0580>.

Li, Wei, Xiaobin Zhu, Jinxiang Hong, Wei She, Penggang Wang, et Wenqiang Zuo. 2015. « Effect of Anionic Emulsifier on Cement Hydration and Its Interaction Mechanism ». *Construction and Building Materials* 93 (septembre): 1003-11.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.053>.

Lundström, Robert. 2002. « Rheological and fatigue characterisation of asphalt concrete mixtures using uniaxial testing ». PhD Thesis, Byggvetenskap.

Mangiafico, Salvatore, Hervé Di Benedetto, Cédric Sauzéat, François Olard, Simon Pouget, et Luc Planque. 2014. « New Method to Obtain Viscoelastic Properties of Bitumen Blends from Pure and Reclaimed Asphalt Pavement Binder Constituents ». *Road Materials and Pavement Design* 15 (2): 312-29.
<https://doi.org/10.1080/14680629.2013.870639>.

- Mannan, Umme Amina, Md Rashadul Islam, et Rafiqul A. Tarefder. 2015. « Effects of Recycled Asphalt Pavements on the Fatigue Life of Asphalt under Different Strain Levels and Loading Frequencies ». *International Journal of Fatigue* 78 (septembre): 72-80. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.04.004>.
- McDaniel, Rebecca S., Karol J. Kowalski, et Ayesha Shah. 2012. « Evaluation of reclaimed asphalt pavement for surface mixtures ».
- Mignini, Chiara, Fabrizio Cardone, et Andrea Graziani. 2018. « Experimental study of bitumen emulsion–cement mortars: mechanical behaviour and relation to mixtures ». *Materials and structures* 51 (6): 1-14.
- Miljković, Miomir, Martin Radenber, Xing Fang, et Pietro Lura. 2017. « Influence of emulsifier content on cement hydration and mechanical performance of bitumen emulsion mortar ». *Materials and Structures* 50 (3): 1-14.
- Miller, T., A. Greyling, H. Bahia, et K. Jenkins. 2010. « Development of a test method for determining emulsion bond strength using the bitumen bond strength (BBS) test: A South African perspective ». In *INTERNATIONAL SPRAYED SEALING CONFERENCE, 2ND, 2010, MELBOURNE, VICTORIA, AUSTRALIA*.
- Ministère de transport de Québec, MTQ. 2019. « Fabrication d'éprouvettes au compacteur LCPC ».
- Mollenhauer, K., M. Wistuba, et R. Rabe. 2009. « Loading frequency and fatigue: In situ conditions & impact on test results ». In *2nd Workshop on four point bending*, 24-25. University of Minho Guimarães, Portugal.
- Montepara, A., et F. Giuliani. 2001. « The role of cement in the recycling of asphalt pavement cold-stabilized with bituminous emulsions ».
- MTQ. 2010. « « Recueil des méthodes d'essai LC ». Ministère du transport du Québec. DÉTERMINATION DE LA TENEUR EN BITUME PAR IGNITION ».
- Murphy, Daniel T., et John J. Emery. 1996. « Modified Cold In-Place Asphalt Recycling ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1545 (1): 143-50. <https://doi.org/10.1177/0361198196154500119>.
- Needham, D. 1996. « Developments in bitumen emulsion mixtures for roads ». PhD Thesis, University of Nottingham Nottingham.

- 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 ». *Road Materials and Pavement Design* 13 (1): 85-103. <https://doi.org/10.1080/14680629.2011.644082>.
- Olard, François, et Hervé Di Benedetto. 2003. « General “2S2P1D” Model and Relation Between the Linear Viscoelastic Behaviours of Bituminous Binders and Mixes ». *Road Materials and Pavement Design* 4 (2): 185-224. <https://doi.org/10.1080/14680629.2003.9689946>.
- Oruc, Seref, Fazil Celik, et M. Vefa Akpinar. 2007. « Effect of Cement on Emulsified Asphalt Mixtures ». *Journal of Materials Engineering and Performance* 16 (5): 578-83. <https://doi.org/10.1007/s11665-007-9095-2>.
- Ouyang, Jian, Lijun Hu, Hongyan Li, et Baoguo Han. 2018. « Effect of Cement on the Demulsifying Behavior of Over-Stabilized Asphalt Emulsion during Mixing ». *Construction and Building Materials* 177 (juillet): 252-60. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.141>.
- Pellinen, Terhi Kristiina. 2001. *Investigation of the use of dynamic modulus as an indicator of hot-mix asphalt performance*. Arizona State University.
- Perraton, D., G. Tebaldi, E. Dave, F. Bilodeau, G. Giacomello, A. Grilli, A. Graziani, M. Bocci, J. Grenfell, et P. Muraya. 2016. « Tests campaign analysis to evaluate the capability of fragmentation test to characterize recycled asphalt pavement (RAP) material ». In *8th RILEM international symposium on testing and characterization of sustainable and innovative bituminous materials*, 965-76. Springer.
- Powers, T. C. 1958. « Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste ». *Journal of the American Ceramic Society* 41 (1): 1-6. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1958.tb13494.x>.
- Pradyumna, T. Anil, Abhishek Mittal, et P.K. Jain. 2013. « Characterization of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) for Use in Bituminous Road Construction ». *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 104 (décembre): 1149-57. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.211>.
- Pronk, Adriaan C. 2006. « The Huet-Sayegh model: A simple and excellent rheological model for master curves of asphaltic mixes ». In *Asphalt Concrete: Simulation, Modeling, and Experimental Characterization*, 73-82.

- Raschia, Simone, Chiara Mignini, Andrea Graziani, Alan Carter, Daniel Perraton, et Michel Vaillancourt. 2019. « Effect of Gradation on Volumetric and Mechanical Properties of Cold Recycled Mixtures (CRM) ». *Road Materials and Pavement Design* 20 (sup2): S740-54. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1633754>.
- Raschia, Simone, Daniel Perraton, Hervé Di Benedetto, Sébastien Lamothe, Andrea Graziani, et Alan Carter. 2021. « Visco-Elasto-Plastic Characterization in the Small Strain Domain of Cement Bitumen-Treated Materials Produced at Low Temperatures ». *Journal of Materials in Civil Engineering* 33 (4): 04021039. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003653](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003653).
- Rebbechi, John, et M. Green. 2005. « Going green: innovations in recycling [asphalt] ». In *AAPA Pavements Industry Conference, 2005, Surfers Paradise, Queensland, Australia*.
- Salomon, Delmar R. 2006. *Asphalt emulsion technology*. Transportation research board.
- Sangiorgi, Cesare, Piergiorgio Tataranni, Andrea Simone, Valeria Vignali, Claudio Lantieri, et Giulio Dondi. 2017. « A Laboratory and Filed Evaluation of Cold Recycled Mixture for Base Layer Entirely Made with Reclaimed Asphalt Pavement ». *Construction and Building Materials* 138 (mai): 232-39. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.004>.
- Sebesta, Stephen. 2005. « Use of Microcracking to Reduce Shrinkage Cracking in Cement-Treated Bases ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1936 (1): 2-11. <https://doi.org/10.1177/0361198105193600101>.
- Serfass, J. -P., J. -E. Poirier, J. -P. Henrat, et X. Carbonneau. 2004. « Influence of Curing on Cold Mix Mechanical Performance ». *Materials and Structures* 37 (5): 365-68. <https://doi.org/10.1007/BF02481685>.
- Shaowen, Du. 2018. « Effect of Curing Conditions on Properties of Cement Asphalt Emulsion Mixture ». *Construction and Building Materials* 164 (mars): 84-93. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.179>.
- Stimilli, A., G. Ferrotti, A. Graziani, et F. Canestrari. 2013. « Performance Evaluation of a Cold-Recycled Mixture Containing High Percentage of Reclaimed Asphalt ». *Road Materials and Pavement Design* 14 (sup1): 149-61. <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.774752>.

Tan, Yiqiu, Jian Ouyang, Jianfu Lv, et Yunliang Li. 2013. « Effect of Emulsifier on Cement Hydration in Cement Asphalt Mortar ». *Construction and Building Materials* 47 (octobre): 159-64. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.044>.

Tayebali, Akhtarhusein A., Geoffrey M. Rowe, et Jorge B. Sousa. 1992. « Fatigue response of asphalt-aggregate mixtures (with discussion) ». *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* 61.

Tebaldi, Gabriele, Eshan Dave, Augusto Cannone Falchetto, Martin Hugener, Daniel Perraton, Andrea Grilli, Davide Lo Presti, Marco Pasetto, Andreas Loizos, et Kim Jenkins. 2019. « Recommendation of RILEM TC237-SIB on fragmentation test for recycled asphalt ». *Materials and Structures* 52 (4): 1-6.

Tebaldi, Gabriele, Eshan V. Dave, Paul Marsac, Patrick Muraya, Martin Hugener, Marco Pasetto, Andrea Graziani, et al. 2014. « Synthesis of Standards and Procedures for Specimen Preparation and In-Field Evaluation of Cold-Recycled Asphalt Mixtures ».

Thomas, Jeffrey J., et Hamlin M. Jennings. 2009. « Materials of cement science primer: The science of concrete ».

Timm, David H., Brian K. Diefenderfer, et Benjamin F. Bowers. 2018. « Cold Central Plant Recycled Asphalt Pavements in High Traffic Applications ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2672 (40): 291-303. <https://doi.org/10.1177/0361198118801347>.

Tiouajni, Samir, Hervé Di Benedetto, Cédric Sauzéat, et Simon Pouget. 2011. « Approximation of linear viscoelastic model in the 3 dimensional case with mechanical analogues of finite size: Application to bituminous materials ». *Road Materials and Pavement Design* 12 (4): 897-930.

Wang, Zhenjun, Qiong Wang, et Tao Ai. 2014. « Comparative Study on Effects of Binders and Curing Ages on Properties of Cement Emulsified Asphalt Mixture Using Gray Correlation Entropy Analysis ». *Construction and Building Materials* 54 (mars): 615-22. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.093>.

Widger, A., F. Skilnick, et E. Zabolotnii. 2012. « Utilization of Recycled Asphalt in Cold Mixes and Cold In-Place Recycling Processes-Guidelines ». *Engineer-In-Training Clifton Associated Ltd. Communities of Tomorrow, Leveraged Municipal Innovation Fund*.

Xiao, Feipeng, Shenglei Yao, Jingang Wang, Xinghai Li, et Serji Amirkhanian. 2018. « A Literature Review on Cold Recycling Technology of Asphalt Pavement ». *Construction and Building Materials* 180 (août): 579-604. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.006>.

Yan, Jinhai, Fujian Ni, Meikun Yang, et Jian Li. 2010. « An Experimental Study on Fatigue Properties of Emulsion and Foam Cold Recycled Mixes ». *Construction and Building Materials* 24 (11): 2151-56. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.044>.

Yan, Jinhai, Haoran Zhu, Zhixiang Zhang, Lei Gao, et Stephane Charmot. 2014. « The Theoretical Analysis of the RAP Aged Asphalt Influence on the Performance of Asphalt Emulsion Cold Recycled Mixes ». *Construction and Building Materials* 71 (novembre): 444-50. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.002>.

