N°d'ordre NNT : 2020LYSET011

THÈSE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LYON
opérée au sein de
L'École Nationale des Travaux Publics de l'État

École Doctorale 162
Mécanique, Energétique, Génie Civil, Acoustique (MEGA)

Spécialité de doctorat : **Génie Civil**

Soutenue publiquement le 01/10/2020, par :
Duc Thang TRAN

Endommagement des enrobés bitumineux soumis à des cycles de gel/dégel

---

Devant le jury composé de :

DJERAN-MAIGRE Irini	Professeure	INSA Lyon	Président
HAMMOUM Ferhat	DR MTES	Université Gustave Eiffel	Rapporteur
PERRATON Daniel	Professeur	ETS Montréal	Rapporteur
DONY Anne	Docteure	ESTP Paris	Examinatrice
POUTEAU Bertrand	Docteur	EUROVIA Mérignac	Examinateur
DI BENEDETTO Hervé	Professeur	ENTPE	Directeur de thèse
SAUZÉAT Cédric	Professeur	ENTPE	Co-directeur de thèse

SOMMAIRE

SOMMAIRE **3**
AVANT-PROPOS **9**
RÉSUMÉ **11**
ABSTRACT **13**
LISTE DES ABRÉVIATIONS **15**
LISTE DES TABLEAUX **17**
LISTE DES FIGURES **19**
INTRODUCTION **27**
1. Bibliographie **32**
1.1. Les enrobés bitumineux et leurs composants 32
1.1.1. Définition 32
1.1.2. Le bitume 32
1.1.3. Les granulats 33
1.1.4. Classification des enrobés bitumineux 33
1.1.4.1. Bétons bitumineux pour couche de surface 34
1.1.4.2. Enrobés bitumineux pour assise de chaussée 35
1.2. Sollicitation des couches routières en enrobés bitumineux 35
1.2.1. Effet du trafic 36
1.2.2. Effet des conditions climatique 36
1.2.2.1. Effet de la température 36
1.2.2.2. Effet de l'eau 37
1.2.2.3. Effet des cycles de gel/dégel 38
1.2.2.4. Effet du rayonnement ultraviolet (UV) 39
1.2.3. Effet de la saumure 39
1.3. Comportements des matériaux bitumineux 40
1.3.1. Grandes classes de comportement 40
1.3.2. Comportement viscoélastique linéaire (VEL) 41
1.3.2.1. Introduction 41
1.3.2.2. Caractérisation du comportement VEL 42
1.3.2.3. Modélisation du comportement VEL à l'aide des modèles rhéologiques 47
1.3.3. Comportement à la fatigue 51
1.3.3.1. Introduction 51
1.3.3.2. Caractérisation du comportement à la fatigue 51
1.3.3.3. Critères de fatigue 55
1.3.3.4. Phénomènes biaisants au cours de l'essai de fatigue 58

1.3.4. Comportement à basse température avec l'essai du retrait thermique empêché (TSRST).. 59
1.3.4.1. Introduction 59
1.3.4.2. Caractérisation du comportement à basse température avec l'essai TSRST 60
1.4. Influence des phénomènes climatiques sur les comportements des matériaux bitumineux 61
1.4.1. Introduction : Positionnement du problème 61
1.4.2. Micro-mécanismes expliquant les détériorations observées 61
1.4.2.1. Mécanismes de dégradation en présence d'eau 62
1.4.2.2. Mécanismes du vieillissement 65
1.4.3. Synthèse des résultats dans la littérature 65
1.4.3.1. Conditionnement avec l'eau 65
1.4.3.2. Conditionnement avec cycles de gel/dégel sans eau 68
1.4.3.3. Conditionnement avec cycles gel/dégel en présence d'eau 69
1.4.3.4. Oxydation due au vieillissement des matériaux 80
1.4.4. Conclusion 83
2. Campagnes expérimentales et matériau testé 86
2.1. Campagnes expérimentales 86
2.1.1. Campagne principale 86
2.1.1.1. Campagne principale avec des cycles de gel/dégel (cycles FT) 86
2.1.1.2. Campagne principale avec des cycles thermiques contenant un réchauffement (cycle HF et cycle HC) 88
2.1.1.3. Procédures des conditionnements appliqués 89
2.1.2. Campagne complémentaire sur l'évolution des éprouvettes lors du conditionnement avec les cycles de gel/dégel 91
2.2. Matériau et éprouvettes 93
2.2.1. Matériau 93
2.2.1.1. Caractéristiques du liant 93
2.2.1.2. Filler, granulats et composition de l'enrobé 93
2.2.1.3. Procédure du vieillissement appliquée avant compactage 94
2.2.2. Eprouvettes 95
2.2.2.1. Fabrication 95
2.2.2.2. Caractéristiques géométriques et teneur en vides 96
2.2.2.3. Nomenclature des éprouvettes 96
3. Description des essais thermomécaniques réalisés 100
3.1. Dispositifs expérimentaux 100
3.2. Essai de module complexe (E*) 101
3.2.1. Procédure de l'essai E* 101

3.2.2. Définition et calcul des paramètres mécaniques 102
3.2.3. Exemple de résultats pour l'essai de module complexe 103
3.3. Essai de fatigue 107
3.3.1. Procédure de l'essai de fatigue 107
3.3.2. Définition et calcul des paramètres mécaniques 107
3.3.3. Exemple de résultats pour l'essai de fatigue 108
3.4. Essai de retrait thermique empêché (TSRST) 110
3.4.1. Procédure de l'essai TSRST 110
3.4.2. Définition et calcul des paramètres mécaniques 111
3.4.3. Exemple de résultats pour l'essai TSRST 111
4. Résultats et analyses de la campagne complémentaire 116
4.1. Eprouvettes et conditionnement 116
4.2. Les mesures et traitement des résultats 116
4.2.1. Principe de calcul de teneur en vides et de degré de saturation à chaque mesure 116
4.2.2. Calcul d'incertitude 118
4.3. Evolution des éprouvettes lors du conditionnement 119
4.3.1. Evolution des éprouvettes lors des différents types de conditionnements 119
4.3.2. Etude de la phase de saturation 121
4.3.3. Etude de la phase des cycles de gel/dégel 123
4.3.4. Etude de la phase de séchage 125
5. Résultats et analyses des essais E* 130
5.1. Eprouvettes testées et conditionnements appliqués 130
5.2. Eprouvettes testées à l'état sec 132
5.2.1. Résultats expérimentaux 132
5.2.1.1. Matériau non-vieilli 132
5.2.1.2. Matériau vieilli 133
5.2.2. Courbes maitresses et modélisation des résultats expérimentaux à l'aide du modèle 2S2P1D.. 135
5.2.2.1. Courbes maitresses et modèle 2S2P1D pour le matériau non-vieilli 137
5.2.2.2. Courbes maitresse et modèle 2S2P1D pour le matériau vieilli 140
5.2.3. Module complexe normalisé E^*_{nor} 142
5.2.4. Effets de la teneur en vides des cycles thermiques et du vieillissement 145
5.2.4.1. Effets de la teneur en vides 145
5.2.4.2. Effets des cycles FT 146
5.2.4.3. Effets des cycles HF, HC et du vieillissement 147
5.3. Eprouvette testée en condition partiellement saturée (40%) 150
5.3.1. Résultats expérimentaux 151

5.3.2. Construction des courbes maitresses et modélisation des résultats expérimentaux à l'aide du modèle 2S2P1D 152
5.3.3. Effet de l'eau 154
6. Résultat et analyse des essais de fatigue 158
6.1. Eprouvettes et conditionnement 158
6.2. Résultats expérimentaux avec les critères différents 159
6.3. Courbes de Wöhler 163
6.4. Loi d'évolution de l'endommagement 165
6.4.1. Variable de l'endommagement du matériau bitumineux à la fatigue 165
6.4.2. Loi d'évolution de l'endommagement 167
6.4.2.1. Introduction de la loi d'évolution de l'endommagement 167
6.4.2.2. Détermination des constantes de la loi d'évolution de l'endommagement 168
6.4.2.3. Simulation des courbes de l'endommagement à partir du cycle 20000ème 169
7. Résultat et analyse des essais de retrait thermique (TSRST) et de retrait thermique libre (TUST) 174
7.1. Résultat at analyse des essais TSRST 174
7.1.1. Eprouvettes et conditionnement 174
7.1.2. Eprouvettes testées à l'état sec (lors de l'essai) 176
7.1.2.1. Résultats expérimentaux 176
7.1.2.2. Effet des cycles thermiques 178
7.1.2.3. Effet du vieillissement 180
7.1.3. Eprouvettes testées à l'état saturé (lors de l'essai) 181
7.1.3.1. Résultats expérimentaux 181
7.1.3.2. Effet de la saturation 183
7.1.4. Comparaison des résultats à la rupture 187
7.1.5. Répétabilité de l'essai TSRST 189
7.2. Résultat et analyse des essais complémentaires - (TUST-Thermal Unstressed Specimen Test)… 193
7.2.1. Présentation de l'essai 193
7.2.2. Résultat des essais TUST 193
7.2.2.1. Eprouvette testée et variation du degré de saturation après l'essai TUST 193
7.2.2.2. Courbes de température-temps, déformation axiale-température, déformation radiale- température 194
7.2.3. Effet de l'eau 196
7.2.3.1. Effet de l'eau sur la déformation axiale, radiale et volumique de l'éprouvette testée durant l'essai TUST 196
7.2.3.2. Quantification de l'eau effective 197
CONCLUSIONS 200

RÉFÉRENCES **203**
ANNEXES **213**

AVANT-PROPOS

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet national « Durée de Vie Des Chaussées » (DVDC) en collaboration avec l'entreprise EUROVIA et l'ENTPE. Je désire en avant-propos adresser mes remerciements à l'ensemble des personnes qui ont permis l'aboutissement de ce travail de thèse.

Tout d'abord, je souhaite exprimer de sincères et chaleureux remerciements à mon directeur de thèse, Monsieur le professeur Hervé Di Benedetto et à mon co-directeur de thèse, Monsieur le professeur Cédric Sauzéat. Ils m'ont proposé un sujet intéressant, m'ont donné des orientations de recherche indispensables et des instructions exceptionnelles. Leur rigueur scientifique ainsi que leur dynamisme ont été source de motivation.

Je remercie sincèrement Monsieur le docteur Bertrand Pouteau, membre examinateur du jury de thèse, pour son accueil dans l'entreprise EUROVIA. Il m'a suivi tout au long de cette thèse avec de nombreux échanges et des conseils scientifiques pertinents.

Je tiens à remercier de manière spéciale Monsieur le professeur Daniel Perraton ainsi que Monsieur le professeur Ferhat Hammoum d'avoir accepté la lourde tâche de rapporter cette thèse.

Mes remerciements vont également à Madame la professeure Irini Djeran-Maigre et Madame la docteure Anne Dony qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'être membre de jury.

Plus généralement, je voudrais remercier toutes les personnes que j'ai côtoyées au centre de recherche d'EUROVIA pour leur support durant mes séjours professionnels à Mérignac.

Merci également à l'ensemble de mes collègues à l'ENTPE, en particulier mes amis de l'équipe « Bitume » : Thomas Attia, Reuber Arrais Freire, Gabriel Orozco, Jean-Marie Roussel, Yasmina Mahmoudi, Salvatore Mangiafico, Jean-Claude Carret, Alvaro Pedraza, Cong Viet Phan. Les échanges avec vous, non seulement, enrichissent ma thèse, mais aussi me permettent de découvrir les cultures du monde. Je n'oublierai jamais nos moments merveilleux avec beaucoup de joie et de bonheur.

Enfin, je voudrais dédier cette thèse à ma famille, à mes parents et ma sœur pour leur soutien et leur confiance, et particulièrement à ma femme pour m'avoir accompagné et encouragé jusqu'à la fin de cette thèse. Du fond de mon cœur, je voudrais vous dire que je vous aime beaucoup. Sans vous, cette thèse ne pourrait pas être achevée. Merci !

RÉSUMÉ

Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'une collaboration entre l'École Nationale des Travaux Publics de l'État (ENTPE) et l'entreprise EUROVIA au sein du projet national DVDC. Elle contribue aux travaux du sous-thème 1.5, sur les dégradations hivernales, du thème 1 du projet national sur les mécanismes de dégradation des chaussées. Elle s'intéresse à l'endommagement des enrobés bitumineux à l'eau et au gel.

Une étude bibliographique sur l'endommagement des enrobés bitumineux à l'eau et au gel a d'abord été réalisée. Après cette étude, deux campagnes expérimentales ont été proposées puis réalisées : une campagne principale et une campagne complémentaire.

La campagne complémentaire étudie les évolutions des éprouvettes cylindriques lors des phases de conditionnement avec la saturation en eau, les cycles de gel/dégel et le séchage des éprouvettes sous vide.

La campagne principale étudie les effets de la saturation en eau, de cycles de gel/dégel (cycle Freezing/Thaw - FT), de cycles avec réchauffement (cycle Heating/Freezing-HF et cycle Heating /Cooling- HC) sur les matériaux bitumineux non-vieilli et vieilli, dans des domaines de comportement différents. Elle se concentre sur trois grands domaines de comportement : le comportement viscoélastique, le comportement à la fatigue et le couplage thermomécanique.

Pour le comportement viscoélastique linéaire (VEL), les éprouvettes soumises à des conditionnements différents ont été étudiées à l'aide de l'essai de module complexe. Le comportement VEL du matériau étudié a été ensuite simulé à l'aide du modèle 2S2P1D (2 Springs, 2 Parabolic elements, 1 Dashpot) développé à l'ENTPE.

Le comportement à la fatigue des enrobés bitumineux soumis à 50 cycles FT et à la saturation en eau a été étudié. L'essai de traction-compression en déformation à température contrôlée et à fréquence donnée a été utilisé. Les effets des cycles de gel/dégel et de l'eau ont été analysés en traçant des courbes de fatigue de Wöhler. Un modèle a été proposé pour décrire l'endommagement à la fatigue.

Dans le domaine de comportement à basse température, les éprouvettes ont été étudiées à l'aide de l'essai de retrait thermique empêché (TSRST) et de l'essai de retrait thermique libre (TUST). Des analyses ont été réalisées sur la température, la contrainte et aussi la déformation radiale à la rupture.

Les résultats obtenus montrent des effets non-significatifs des cycles de gel/dégel et de l'eau sur les enrobés bitumineux pour les domaines étudiés, surtout pour des sollicitations à faible déformation (moins de 120µm/m) et à température positive. Cependant, l'effet de l'eau devient dominant et significatif à basse température, en particulier dans l'essai TSRST. Pour un conditionnement avec des cycles intégrant une période de réchauffement (type HF et HC, où la température atteint 50°C), un vieillissement du bitume a été mis en évidence à l'aide des courbes du module complexe normalisé.

Mots-clés : *Enrobé bitumineux, eau, gel-dégel, réchauffement/gel, réchauffement/refroidissement, module complexe, fatigue, TSRST*.

ABSTRACT

This PhD thesis is part of a collaboration between “l’École Nationale des Travaux Publics de l’État” (ENTPE) and the research center of Eurovia within the national project DVDC. PhD works contribute to the sub-theme 1.5 dealing with winter degradations included in Theme 1 of the national project, on the mechanisms of pavement degradation. PhD thesis studies damages in bituminous mixtures, which might be caused by water and freeze/thaw cycles.

A literature review on the effect of water and frost on bituminous mixtures was carried out as a first part of the thesis. After the literature review, two experimental campaigns were proposed and realized: a main campaign and a complementary campaign.

The main campaign studies the effects of water saturation, freezing/thaw cycles (FT), thermal cycles with heating (Heating/Freezing-HF cycle and Heating/Cooling- HC cycle) on non-aged and aged bituminous mixtures. It focuses on three main behaviours of bituminous mixture: viscoelastic behaviour, fatigue behaviour and thermomechanical coupling.

In the domain of linear viscoelastic behaviour (VEL), the complex module test was performed on a bituminous mixture subjected to different conditions: water conditioning, FT cycles, HF cycles or HC cycles. The VEL behaviour of the tested material was then modeled using the 2S2P1D model (2 Springs, 2 Parabolic elements, 1 Dashpot) developed at ENTPE.

The fatigue behaviour of bituminous mixture subjected to 50 FT cycles and water saturation was studied. Sinusoidal loading in controlled axial strain mode was applied at 10 Hz and 10°C. The effects of water saturation and FT conditioning were then analyzed by using the Wöhler fatigue curves. A model was used to simulate the damage evolution.

In the low temperature behaviour domain, the specimens were studied by using the Thermal Stress Restrained Specimen Test (TSRST) and Thermal Unstressed Specimen Test (TUST). The temperature, the stress and the radial strain at failure were analyzed to investigate the conditioning effects.

The results show a non-significant effect of the FT cycles and water conditioning on the bituminous mixture behaviour, for small strain loading (less than 120µm/m) and at positive testing temperature. However, the effect of water conditioning becomes dominant and significant at low temperatures, especially in the TSRST. For the non-aged material conditioned with HF and HC cycles, the aging of the bitumen was observed by using the normalized curves of complex modulus.

Keywords: *Bituminous mixtures, water, freezing/thaw, heating/thaw, heating/cooling, complex modulus, fatigue, TSRST.*

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Symbole	Signification
ε_0	Amplitude de déformation
ε_i	Amplitude de la déformation mesurée par l'extensomètre i
ε_{i0}	Amplitude de la déformation mesurée par l'extensomètre i (au 60ème cycle dans l'essai de fatigue)
φ_i	Angle de phase de la déformation mesurée par l'extensomètre i
φ	Angle de phase de la déformation moyenne
φ_{ν^*}	Angle de phase du coefficient de Poisson complexe
φ_{E^*}	Angle de phase du module complexe
a_T	Coefficient de translation
ν^*	Coefficient de Poisson complexe
A	Constante de la fonction représentant la régression de la courbe Wöhler
k, h	Constantes du modèle 2S2P1D - Exposant des éléments paraboliques
δ, β	Constantes du modèle 2S2P1D sans dimension
E_{00}, ν_{00}	Constantes du modèle 2S2P1D - Module statique et coefficient de Poisson statique quand $\omega \rightarrow 0$
E_0, ν_0	Constantes du modèle 2S2P1D - Module vitreux et coefficient de Poisson vitreux quand $\omega \rightarrow \infty$
C_1, C_2	Constantes de la loi WLF
σ	Contrainte
σ_{rup}	Contrainte à la rupture de l'essai TSRST
$N_{f\text{-}Co}$	Critère de fatigue basé sur le changement de concavité de la courbe E*| vs N
$N_{f\text{-}\varphi max}$	Critère de fatigue basé sur la valeur maximale de φ_{E^*}
$N_{f\text{-}\Delta\varphi}$	Critère de fatigue basé sur les écarts d'angles de phase
$N_{f\text{-}\Delta\varepsilon i}$	Critère de fatigue basé sur les écarts relatifs des amplitudes des 3 extensomètres
$N_{f\text{-}50\%}$	Critère de fatigue classique (chute de module de 50% de la valeur initiale)
$N_{f\text{-}moy}$	Critère moyen de fatigue
ε	Déformation
ε_6	Amplitude de déformation admissible pour 10^6 cycles de sollicitation sinusoïdale
ε_{rup}	Déformation radiale à la rupture lors de l'essai TSRST
$\Delta\varepsilon i$	Variation relative de l'amplitude de la déformation mesurée par l'extensomètre i par rapport à l'amplitude initiale (essai de fatigue)
F(t)	Fonction de fluage
R(t)	Fonction de relaxation
f	Fréquence de sollicitation sinusoïdale (Hz)
b	Pente de la régression linéaire de la courbe Wöhler
ρ_a	Masse volumique des granulats
µdef	Micro déformation ou µm/m ou 10^{-6}m/m
E*	Module complexe
i	Nombre complexe $i^2=-1$
N	Nombre de cycles de sollicitation
|ν^*|	Norme du coefficient de Poisson complexe
|E*|	Norme du module complexe

ω	Pulsation de sollicitation sinusoïdale
α, θ, γ	Paramètres de la loi d'endommagement
$\tau_{0\nu}$	Temps caractéristique du coefficient de Poisson complexe
τ, τ_0	Temps caractéristique du module complexe
T	Température (°C)
T_{rup}	Température à la rupture de l'essai TSRST
T_{ref} , T_R	Température de référence
t	Temps
D	Variable de l'endommagement
η	Viscosité

Abréviation	**Signification**
TSRST	Essai de retrait thermique empêché (Thermal Stress Restrained Specimen Test)
TUST	Essai de retrait thermique libre (Thermal Unstressed Specimen Test)
GD	Gel/Dégel
FT	Gel/Dégel (Freezing-Thaw)
2S2P1D	Modèle rhéologique " Two Springs - Two Parabolic Elements - One Dashpot
DVDC	Abréviation du nom du projet national "Durée de Vie des Chaussées"
PETT	Principe d'équivalence temps-température
HF	Réchauffement-Gel (Heating - Freezing)
HC	Réchauffement- Refroidissement (Heating - Cooling)
TEV	Teneur en vides
WLF	Williams - Landel -Ferry

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1. Type de composants selon leur classe granulaire 33
Tableau 1-2. Principe de superposition de Boltzmann 42
Tableau 1-3. Principaux modèles à assemblages discrets de ressorts et d'amortisseurs 48
Tableau 1-4. Modèles à spectre continu 49
Tableau 1-5. Mécanismes de dégradation par la perte d'adhésivité 63
Tableau 1-6. Mécanismes de dégradation par la perte de cohésion 64
Tableau 1-7. Essais avec l'immersion dans l'eau 66
Tableau 1-8. Essais avec la saturation sous vide 66
Tableau 1-9. Essais utilisant des cycles gel/dégel avec l'eau 70
Tableau 1-10. Procédures de vieillissement pour les éprouvettes compactées 81
Tableau 1-11. Procédures de vieillissement pour les mélanges bitumineux 81
Tableau 2-1.Caractérisation du bitume 93
Tableau 2-2. Masse volumique réelle des granulats 93
Tableau 2-3. Composition du mélange 93
Tableau 3-1. Calcul de la norme et de l'angle de phase de E*et celles de ν* 103
Tableau 3-2. Nombre de cycles enregistrés en fonction du nombre de cycles appliqués durant l'essai… 108
Tableau 4-1. Eprouvettes utilisées pour la campagne X 116
Tableau 4-2. Quelleques valeurs mesurées pour les éprouvettes utilisées dans la campagne X 117
Tableau 4-3. Paramètres considérés lors de la campagne X 118
Tableau 4-4. Formules de calcul des incertitudes 119
Tableau 5-1. Bilan des essais E* réalisés : éprouvettes testées, conditionnements appliqués et teneurs en vides 131
Tableau 5-2. Constantes du modèle 2S2P1D calibrées pour chaque éprouvette (T_{ref}=15°C) 136
Tableau 5-3. Constantes (k, h, δ, β) du modèle 2S2P1D et vieillissement des éprouvettes testées 150
Tableau 6-1. Eprouvettes non-vieillies utilisées pour l'essai E* 158
Tableau 6-2. Critères de fatigue appliquées 160
Tableau 6-3. Résultats des essais de fatigue 162
Tableau 6-4. Valeurs des constantes A, b et ε_6 164
Tableau 6-5. Résultats de la calibration de la loi d'évolution de l'endommagement 169
Tableau 7-1. Eprouvettes utilisées pour l'essai TSRST 175
Tableau 7-2. Résultats à la rupture des essais TSRST 188
Tableau 7-3. Valeur de l'intégrale sous la courbe contrainte-température et celle sous la courbe déformation radiale-température 191

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Désordres dans une chaussée du nord-est de la France (a) Carotte de la structure de chaussée, (b) Chapelets de nids de poule pluri-décimétriques (Mauduit, et al., 2013) 27

Figure 2. Typologie climatique du territoire français en 8 classes (Joly, et al., 2010) 28

Figure 1-1. Schéma de l'essai de pénétrabilité (Corté & Di Benedetto, 2005) 32

Figure 1-2. Schéma de l'essai de bille-anneau (Corté & Di Benedetto, 2005) 33

Figure 1-3. Courbe granulométrique d'un mélange bitumineux composé de trois fractions granulaires (Corté & Di Benedetto, 2005) 33

Figure 1-4. Coupe typique d'une chaussée et terminologie pour les différentes couches (Di Benedetto & Corté, 2005) 34

Figure 1-5. Courbes granulométriques indicatives de différents mélanges bitumineux employés en couches de roulements (BBSG, BBM, BBTM, BBUM, BBDr) (Di Benedetto & Corté, 2005) 34

Figure 1-6. Schématisation des sollicitations induites par le trafic sous une roue 36

(Di Benedetto & Corté, 2005) 36

Figure 1-7. Schématisation des sollicitations induites par la température dans les structures routières 37

Figure 1-8. Circulation d'eau dans la plate-forme et la chaussée (Castaneda Pinzon, 2004) 37

Figure 1-9. Décollement des enrobés dû à des pertes d'adhésivité et de cohésion des composants . 38

(N. Kingros, 2008) 38

Figure 1-10. Relevé météorologique de janvier 2010 issu de la station de Météo France située au centre de la France tiré depuis (Mauduit, et al., 2013) 38

Figure 1-11. Relevés de température dans la couche de surface d'une chaussée à côté de Genève du 15/11/2017 au 28/11/2017 (données EUROVIA) 39

Figure 1-12. Choc thermique dû au salage d'une couche de verglas préexistant sur la chaussée selon (Boutonnet et Livret 1990) tiré depuis (Mauduit, et al., 2013) 40

Figure 1-13. Comportements des enrobés bitumineux à température fixée, (ε) déformation - (N) nombre de chargements (Di Benedetto & Corté, 2005) 41

Figure 1-14. Essai d'effacement à une température fixée: créneau de déformation imposée (a) et réponse type du matériau viscoélastique en contrainte (b) 42

Figure 1-15. Essai de fluage d'un matériau viscoélastique linéaire : sollicitation imposée en contrainte constante (a) et réponse en déformation (b) 42

Figure 1-16. Sollicitation à contrainte variable dans le temps 43

Figure 1-17. Essai de relaxation d'un matériau viscoélastique linéaire : sollicitation imposée en déformation constante (a) et réponse en contrainte (b) 44

Figure 1-18. Mesure de module complexe sur éprouvette cylindrique 45

Figure 1-19. Construction des courbes maîtresses d'un enrobé par la méthode des translations à la température de référence T_R = 11.1°C. À gauche : norme de E* ; à droite : angle de phase de E* (Nguyen, 2011) 46

Figure 1-20. Evolution du coefficient de translation a_T en fonction de la température (même essai que celui dans la Figure 1-19). T_R = 11.1°C. Valeurs C_1, C_2 obtenues par la loi WLF (Nguyen, 2011) .47

Figure 1-21. Représentation du modèle 2S2P1D (Olard & Di Benedetto, 2003).....50

Figure 1-22. Influence des paramètres du 2S2P1D, sur la courbe Cole-Cole des enrobés bitumineux…. 50

Figure 1-23. Allure des signaux des déformations longitudinale (a) et transversale (b) sous l'effet du passage d'un essieu simple (base de la couche bitumineuse, traction dans le sens positif) (Di Benedetto & Corté, 2005) 51

Figure 1-24. Courbe de Wöhler (Di Benedetto & Corté, 2005) 52

Figure 1-25. Les différents types d'essais de fatigue sur enrobés (Ashayer Soltani, 1998) 53

Figure 1-26. Chemins de sollicitation possibles (en haut) et courbes enveloppes des cycles de réponse obtenus (en bas) en déformation imposée (a & b) et contrainte imposée (c & d) (Di Benedetto & Corté, 2005) 54

Figure 1-27. Distinction des trois phases dans un essai de fatigue (adapté de (Di Benedetto, et al., 2004)).....55

Figure 1-28. Définition du critère classique de fatigue et détermination de la durée de vie $N_{f\text{-}50\%}$...55

Figure 1-29. Evolution de module complexe durant l'essai de fatigue et critère de fatigue $N_{f\text{-}Co}$ (Test - SG3B1(5.7)0FT).....56

Figure 1-30. Evolution de l'angle de phase du module complexe durant l'essai de fatigue et critère de fatigue $N_{f\text{-}\varphi max}$ (Test - SG3B1(5.7)0FT).....56

Figure 1-31. Critère basé sur les valeurs $\Delta\varepsilon i \geq 25\%$ (Test - SG3B1(5.7)0FT) 57

Figure 1-32. Critère basé sur les valeurs $\Delta\varphi i \geq 5°$ (Test - SG3B1(5.7)0FT) 58

Figure 1-33. Section transversale des chaussées subie une température négative, avec gradients de contrainte thermique et de température (adapté de (Jung & Vinson, 1994)).....59

Figure 1-34. La fissuration s'accentue et d'autres fissures apparaissent en surface (MTQ, 2008) ...59

Figure 1-35. Contrainte induite par le retrait thermique empêché en fonction de la température ((Pedraza, 2018) adapté de (Di Benedetto & Corté, 2005)).....60

Figure 1-36. Comparaison entre les essais de traction et TSRST sur l'enrobé au liant 50/70 (Olard, 2003) 61

Figure 1-37. Question: comment les effets étudiés influencent-ils les différents types de comportements des enrobés bitumineux ? 61

Figure 1-38. Schéma du principe de test selon la méthode "Duriez" tirée de (Ramirez Cardona, 2016)… 67

Figure 1-39. Courbes de fatigue de Wöhler de l'enrobé bitumineux (teneurs en vides de 3,5 à 4,5%), testé à deux états Sec (S) et Partiellement Saturé en Eau (PSE), à +10°C et 10Hz (Lamothe, 2014)…… 68

Figure 1-40. Réalisation des essais de module complexe qui incluent les séquences de cycles de gel et dégel (Lamothe, et al., 2017) (Freeze-Thaw Cycles - FTC, Thermal Test - TT, Complexe Modulus - E*).....68

Figure 1-41. Sollicitation d'un cycle de gel/dégel selon (Lamothe, et al., 2017) (Essai thermique – ET).. 69

Figure 1-42. Résultats des essais de module complexe sur une éprouvette sèche ayant subi 0, 1, 3, 10, 30 et 60 cycles de GD cumulés : (a) dans le plan Cole-Cole ; (b) dans l'espace de Black (Lamothe, 2014) 69

Figure 1-43. Résultats TSR sur enrobés saturés soumis à des cycles de gel/dégel, obtenus selon (Feng, et al., 2010)..... 73

Figure 1-44. Modules complexes dans le plan Cole-Cole d'une éprouvette saturée dans l'eau (Lamothe, 2014)..... 74

Figure 1-45. Évolutions du module vitreux E_0 et du module statique E_{00} des éprouvettes saturées selon le nombre de cycles GD subis (Lamothe, 2014) 74

Figure 1-46. Courbes maîtresse de la norme du module complexe d'une éprouvette saturée dans l'eau en fonction des cycles de GD à la température de référence T_R=-5.5°C (Lamothe, 2014) 74

Figure 1-47. Évolution du dommage de l'éprouvette saturée dans l'eau en fonction des cycles de GD (D_{XGD}) calculé à la température de référence T_R=-5.5°C (Lamothe, 2014)..... 75

Figure 1-48. Résultats de l'essai IRT – Evolutions de la norme de module complexe (déterminé à 20°C) selon le nombre des cycles sollicités (Lei, et al., 2016) 76

Figure 1-49. Courbes de Wöhler de fatigue de l'enrobé bitumineux GB3 (courbe discontinue- éprouvette conditionnée) (courbe continue - éprouvette non-conditionnée) (Ramirez Cardona, 2016)… 77

Figure 1-50. Courbes de Wöhler de fatigue de l'enrobé bitumineux GB4 (courbe discontinue- éprouvette conditionnée) (courbe continue - éprouvette non-conditionnée) (Ramirez Cardona, 2016)… 77

Figure 1-51. Evolution de la norme du module complexe E* en fonction du nombre de cycles appliqués N, lors d'essais de fatigue sur enrobé de type GB3 (courbe bleu- éprouvette conditionnée) (courbe rouge - éprouvette non-conditionnée) (Ramirez Cardona, 2016) 77

Figure 1-52. Evolution de la norme du module complexe |E*| en fonction du nombre de cycles appliqués N, lors d'essais de fatigue sur enrobé de type GB4 (courbe cyan- éprouvette conditionnée) (courbe verte - éprouvette non-conditionnée) (Ramirez Cardona, 2016) 78

Figure 1-53. Evolution de température à différents points de l'éprouvettes au cours des cycles GD (Mauduit, et al., 2010)..... 79

Figure 1-54. Evolution de déformation axial des éprouvettes en phase de gel du premier cycle thermique (Mauduit, et al., 2010) 79

Figure 1-55. Courbes maîtresses de la norme du module complexe à la température de référence T_R=5°C (Baek, et al., 2012) 82

Figure 1-56. Courbes maîtresses de l'angle de phase à la température de référence T_R=5°C (Baek, et al., 2012) 82

Figure 1-57. Courbes maîtresses de la norme du module complexe à la température de référence T_R=21.1°C (Yang, et al., 2016)..... 83

Figure 1-58. Comparaison des résultats E* des éprouvettes conditionnées selon (AASHTO T283, 2014) et celles non-conditionnés (Yang, et al., 2016) 83

Figure 2-1. Les 3 étapes de la campagne principale 86

Figure 2-2. Campagne principale avec des cycles FT : Conditionnement appliqué et essais réalisés……..... 87

Figure 2-3. Amplitude des différents cycles de température appliqués durant le conditionnement de la campagne principale....88
Figure 2-4. Campagne principale avec des cycles HF et des cycles HC....89
Figure 2-5. Système de saturation sous vide....89
Figure 2-6. Température de pilotage de l'enceinte thermique pour un cycle FT....90
Figure 2-7. Eprouvettes dans les sacs plastiques contenant 10cl d'eau sur un lit de sable (a) Eprouvettes mises dans une enceinte thermique programmable (b)....90
Figure 2-8. Commande de la température de l'enceinte thermique pour un cycle HF (courbe noire) et celle pour un cycle HC (courbe rouge)....91
Figure 2-9. Séchage sous vide en utilisant un dessiccateur avec du gel de silice....91
Figure 2-10. Campagne X des essais complémentaires....92
Figure 2-11. Courbe granulométrique du mélange....94
Figure 2-12. Résultats de l'essai PCG....94
Figure 2-13. Etapes de vieillissement des matériaux (Procédure RILEM) (N Partl , M.; U Bahia, H.; Canestrari, F.; Di Benedetto, H.; Piber, H.; Sybilski, D., 2012)....95
Figure 2-14. Plan A de sciage et de carottage d'une plaque d'enrobé....96
Figure 2-15. Nomenclature des éprouvettes....97
Figure 3-1. Disposition des capteurs....101
Figure 3-2. Chronologie des températures appliquées durant les essais de module complexe (a) et pour chaque température, chronologie des cycles à différentes fréquences et des périodes de repos (b)….....102
Figure 3-3.Mesures de déformation axiale, déformation radiale et contrainte axiale (points expérimentaux) et les régressions sinusoïdales (courbes continues) de l'essai SG4B10(8.2)D0FT à 5°C, 3Hz (le nombre de points expérimentaux tracé est réduit pour une bonne lisibilité).....103
Figure 3-4. Courbes isothermes de la norme et de l'angle de phase du module complexe, et du coefficient de Poisson complexe (Test SG4B10(8.2)D0FT)....104
Figure 3-5. Courbes isochrones de la norme et de l'angle de phase du module complexe et du coefficient de Poisson complexe (Test SG4B10(8.2)D0FT)....105
Figure 3-6. Module complexe et coefficient de Poisson complexe dans le plan de Cole-Cole et dans l'espace de Black (Test SG4B10(8.2)D0FT)....106
Figure 3-7. Courbes maitresses de la norme et de l'angle de phase du module complexe et du coefficient de Poisson complexe et coefficients de translation en fonction de la température (Test SG4B10(8.2)D0FT)....107
Figure 3-8. Schéma des cycles enregistrés lors d'un essai de fatigue (Mangiafico, 2014)....108
Figure 3-9. Evolution de la norme du module complexe et de l'angle de phase du module complexe en fonction du nombre de cycles de sollicitation (Test SG1A5(5.0)0FTsat)....109
Figure 3-10. Evolution de l'amplitude de la contrainte axiale en fonction du nombre de cycles de sollicitation (Test SG1A5(5.0)0FTsat)....109
Figure 3-11. Evolution de l'amplitude de la déformation axiale et de l'amplitude des déformations mesurées par les trois extensomètres en fonction du nombre de cycles de sollicitation (Test SG1A5(5.0)0FTsat)....110

Figure 3-12. Dérive thermique du système de mesure des déformations axiale et radiale mesurée au cours d'un essai de refroidissement (10°C/h) d'une éprouvette en Zérodur® 111

Figure 3-13. Évolution de la température mesurée dans l'air (courbe bleue) et à la surface (courbe orange) de l'éprouvette en fonction du temps (Test SG5C13(7.3)D0FT) 112

Figure 3-14. Variation de la déformation axiale avant et après la correction des dérivés thermiques des extensomètres 112

Figure 3-15. Evolution de le contrainte axiale (a) et de la déformation radiale (b) en fonction de la température mesurée à la surface de l'éprouvette lors de l'essai TSRST sur l'éprouvette SG5C13(7.3)D0FT 113

Figure 4-1. Composition de l'éprouvette et notations utilisées 117

Figure 4-2. Procédure de traitement des données de la campagne X 118

Figure 4-3. Déformation volumique (a) et Variation de teneur en vides (b) en fonction du temps au cours des différentes phases de conditionnement (le point 1 correspond à la mesure effectuée juste avant le début du conditionnement des éprouvettes) 120

Figure 4-4. Degré de saturation en fonction du temps (a) et Degré de saturation en fonction de la déformation volumique (b) au cours des différentes phases de conditionnement ((1) avant la saturation, (2) après de la saturation, (3) après des cycles GD, (3i) pendant le séchage) 121

Figure 4-5. Déformation volumique (a) et Variation de teneur en vides (b) en fonction du temps ((1) avant la saturation, (2) après de la saturation) 122

Figure 4-6. Degré de saturation en fonction du temps de saturation (a) et en fonction de la teneur en vides mesurée avant la saturation (TEV1) (b) ((1) avant la saturation, (2) après de la saturation) . 123

Figure 4-7. Variation de déformation volumique (a) et Variation de teneur en vides (b) en fonction du temps en phase de cycles GD ((2) après la saturation, (3) après des cycles GD) 124

Figure 4-8. Variation de degré de saturation en fonction de temps de saturation ((2) après la saturation, (3) après des cycles FT) 124

Figure 4-9. Variation de déformation volumique (a) et Variation de teneur en vides (b) en fonction du temps en phase de séchage ((3) après des cycles GD, (3i) pendant le séchage) 126

Figure 4-10. Degré de saturation en fonction du temps en phase de séchage sous vide 127

Figure 4-11. Résumé schématique de l'évolution des éprouvettes en phase de séchage 127

Figure 5-1. Module complexe E* dans le plan de Cole-Cole et l'espace de Black des éprouvettes non-vieillies 132

Figure 5-2. Coefficient complexe ν* dans le plan de Cole-Cole et l'espace de Black des éprouvettes non-vieillies 133

Figure 5-3. Module complexe E* dans le plan de Cole-Cole et l'espace de Black des éprouvettes vieillies 134

Figure 5-4. Coefficient complexe ν* dans le plan de Cole-Cole et l'espace de Black des éprouvettes vieillies 135

Figure 5-5. Coefficients de translation aT selon la température (à une température de référence Tref= 15°C). Les mêmes coefficients sont obtenus pour E* et ν* 136

Figure 5-6. Module complexe E*, coefficient ν* dans le plan Cole-Cole et dans l'espace de Black avec courbes simulées à l'aide du modèle 2S2P1D pour les éprouvettes 0FT.DRY, 10FT.DRY et 50FT.DRY (matériau non-vieilli) 138

Figure 5-7. Module complexe E*, coefficient ν* dans le plan Cole-Cole et dans l'espace de Black avec courbes simulées à l'aide du modèle 2S2P1D pour les éprouvettes 10HF.DRY et 10HC.DRY (matériau non-vieilli) 138

Figure 5-8. Courbes maîtresses de la norme et de l'angle de phase du module complexe E* et du coefficient de Poisson complexe ν* et courbes simulées avec le modèle 2S2P1D des éprouvettes testées à l'état sec pour le matériau non-vieilli 139

Figure 5-9. Module complexe E*, coefficient ν* dans le plan Cole-Cole et dans l'espace Black avec courbes simulées à l'aide du modèle 2S2P1D pour les éprouvettes vieilli de la plaque 1a et la plaque 3a (ayant subi A.0FT.DRY, A.0FT(sat).DRY et A.10HF.DRY) 140

Figure 5-10. Module complexe E*, coefficient ν* dans le plan Cole-Cole et dans l'espace Black avec courbes simulées à l'aide du modèle 2S2P1D pour les éprouvettes vieilli de la plaque 2a (ayant subi A.10HF et A.10HC) 141

Figure 5-11. Courbes maîtresses de la norme et de l'angle de phase du module complexe E* et du coefficient ν* des éprouvettes vieillies testées à l'état sec et courbes simulées avec le modèle 2S2P1D.. 142

Figure 5-12. Valeurs normalisées de la norme et de l'angle de phase du module complexe E* des éprouvettes 0FT.DRY, 10FT.DRY et 50FT.DRY (a) et celles des éprouvettes 10HF.DRY, 10HC.DRY (b) avec les courbes simulées à l'aide du modèle 2S2P1D 143

Figure 5-13 ; Valeurs normalisées de la norme et de l'angle de phase du module complexe E* des éprouvettes vieillies de la plaque 1a (a) et celles de la plaque 3a (b) avec les courbes simulées à l'aide du modèle 2S2P1D 144

Figure 5-14. Ensemble des valeurs normalisées de la norme et de l'angle de phase du module complexe E* avec les courbes simulées à l'aide du modèle 2S2P1D 145

Figure 5-15. Constantes E_0, E_{00}, ν_0, ν_{00} et τ_0 du modèle 2S2P1D en fonction de la teneur en vides déterminée en début d'essai E* (TEV) (Température de référence T_R=15°C) 146

Figure 5-16. Les constantes 2S2P1D en fonction du nombre de cycles gel/dégel (FT) 147

Figure 5-17. Ensemble des courbes de la norme et l'angle de phase du module complexe normalisé E^*_{nor} simulées à l'aide du modèle 2S2P1D, représentées dans le plan Cole-Cole et l'espace de Black (les flèches bleues indiquent l'évolution des courbes avec le vieillissement du bitume) 148

Figure 5-18. Ensemble les courbes maitresses de la norme et l'angle de phase du module complexe normalisé E^*_{nor} simulées à l'aide du modèle 2S2P1D (les flèches bleues indiquent l'évolution des courbes avec le vieillissement du bitume) 149

Figure 5-19. Evolution de k, h, δ et β en fonction du temps de vieillissement à température supérieure ou égale à 50°C (en supposant que : (1) l'effet des cycles HF et HC sur les éprouvettes vieillies est négligeable ; (2) les éprouvettes du groupe 4 ont subi 72h à 85°C en plus par rapport à celles du groupe 3) 150

Figure 5-20. Module complexe dans le plan Cole-Cole et l'espace de Black – essais sur éprouvette SG5C3(7.4) 151

Figure 5-21. Comparaison des coefficients de translation aT vs Température 152

Figure 5-22. Courbes maîtresses de la norme du module complexe avec les coefficients de translation $aT_{.E}$ 153

Figure 5-23. Courbes maîtresses de l'angle de phase du module complexe en utilisant les coefficients de translation aT.φE pour l'éprouvette testée saturée 153

Figure 5-24. Courbes maîtresses de la norme de l'angle de phase du coefficient Poisson complexe en utilisant les mêmes coefficients de translation aT que pour de E* (T_{ref}=15°C)..... 154

Figure 5-25. Différence relative entre la norme de E* (a) et différence de l'angle de phase de E* entre les essais réalisés à l'état sec et à l'état saturé (éprouvette SG5C3(7.4)) 155

Figure 6-1. Résultats de trois essais de fatigue des éprouvettes 0FT.SAT aux amplitudes de déformation différentes (avec l'abscisses à l'échelle logarithmique)..... 159

Figure 6-2. L'évolution des courbes $|E^*|/|E^*_0|$ vs N (avec l'abscisses à l'échelle logarithmique)... 160

Figure 6-3. Critères de fatigue basés sur les mesures globales (SG1A5(5.0)S0FTsat -80µm/m) ... 161

Figure 6-4. Critères de fatigue basés sur les mesures locales (SG1A5(5.0)S0FTsat -80µm/m) 161

Figure 6-5. Tous les critères de fatigue utilisés (SG1A5(5.0)S0FTsat -80µm/m)..... 162

Figure 6-6. Corrélation des critères $N_{f\text{-}50\%}$, $N_{f\text{-}Co}$, $N_{f\text{-}\varphi max}$, $N_{f\text{-}\Delta\varepsilon i}$, $N_{f\text{-}\Delta\varphi i}$ avec le critère $N_{f\text{-}Moyen}$..... 163

Figure 6-7. Les valeurs d'A, b et ε6 selon les critères de fatigue différents..... 164

Figure 6-8. Courbes de Wöhler des éprouvettes 0FT.DRY, 0FT.SAT et 50FT.DRY du matériau non-vieilli 165

Figure 6-9. Courbes d'évolution de l'endommagement D en fonction du nombre de cycle N (éprouvettes 50FT.DRY) 167

Figure 6-10. Evolution de l'endommagement en fonction du logarithme du nombre de cycles pour le matériau 50FT.DRY, à différentes amplitudes de sollicitation 168

Figure 6-11. Obtention des constantes de l'Eq. 6-7. La valeur de θ obtenue est 7,5 (Eprouvettes 50FT.DRY) 169

Figure 6-12. Simulations des courbes d'évolution de l'endommagement des éprouvettes 0FT.DRY, 0FT.SAT, 50FT.DRY aux amplitudes de sollicitation de 80, 100 et 120µm/m..... 170

Figure 7-1. Evolution de la température mesurée à la surface des éprouvettes lors des essais TSRST sur les éprouvettes testées sèches..... 177

Figure 7-2. Contrainte (a) et déformation radiale (b) vs Température mesurée à la surface des éprouvettes testées à l'état sec pour le matériau non-vieilli..... 177

Figure 7-3. Contrainte (a) et déformation radiale (b) vs Température mesurée à la surface des éprouvettes testées à l'état sec pour le matériau vieilli..... 178

Figure 7-4. Contrainte (a) et déformation radiale (b) vs Température mesurée à la surface des éprouvettes ayant subi des cycles 0FT, 10FT et 50FT, testées à l'état sec, pour le matériau non-vieilli… 179

Figure 7-5. Contrainte (a) et déformation radiale (b) vs Température mesurée à la surface des éprouvettes ayant subi des cycles 0FT, 10FT, 10HF et 10HC, testées à l'état sec, pour le matériau non-vieilli..... 180

Figure 7-6. Comparaison des courbes de contrainte (a) et déformation radiale (b) vs température mesurée à la surface des éprouvettes ayant subi des cycles 10HF et 10HC, pour le matériau non-vieilli et le matériau vieilli..... 181

Figure 7-7. Evolution de la température mesurée à la surface des éprouvettes lors des essais TSRST sur éprouvettes testées saturées (partiellement)..... 182

Figure 7-8. Contrainte (a) et déformation radiale (b) vs Température mesurée à la surface des éprouvettes testées à l'état saturé (lors de l'essai) pour le matériau non-vieilli 183

Figure 7-9. Comparaison de la température mesurée à la surface des éprouvettes (0FT.DRY et 0FT.SAT) 184

Figure 7-10. Comparaison des courbes de Contrainte (a) et Déformation radiale (b) vs Température mesurée à la surface des éprouvettes non-vieillies subies aucun cycle de gel/dégel testées à l'état sec (0FT.DRY) et celles testées à l'état saturé (0FT.SAT) 185

Figure 7-11. Comparaison de la température mesurée à la surface des éprouvettes (10FT.DRY et 10FT.SAT) 185

Figure 7-12. Comparaison des courbes de Contrainte (a) et Déformation radiale (b) vs Température mesurée à la surface des éprouvettes non-vieillies ayant subi 10 cycles de gel/dégel testées à l'état sec (10FT.DRY) et celles testées à l'état saturé (10FT.SAT) 186

Figure 7-13. Valeurs à la rupture de la contrainte, de la température et de la déformation radiale lors des essais TSRST (moyenne et écart type) 189

Figure 7-14. Courbe contrainte – température des éprouvettes non conditionnées (0FT.DRY) et zone de calcul de l'intégrale 190

Figure 7-15. Courbe déformation radiale– température des éprouvettes non conditionnées (0FT.DRY) et Zone de calcul de l'intégrale. 192

Figure 7-16. Ordre de la saturation et des essais TSUT réalisés. 193

Figure 7-17. Degré de saturation début et après l'essai TUST 194

Figure 7-18. Température mesurée dans l'air vs Temps (a) et Température mesurée à la surface de l'éprouvette vs Temps (b) 195

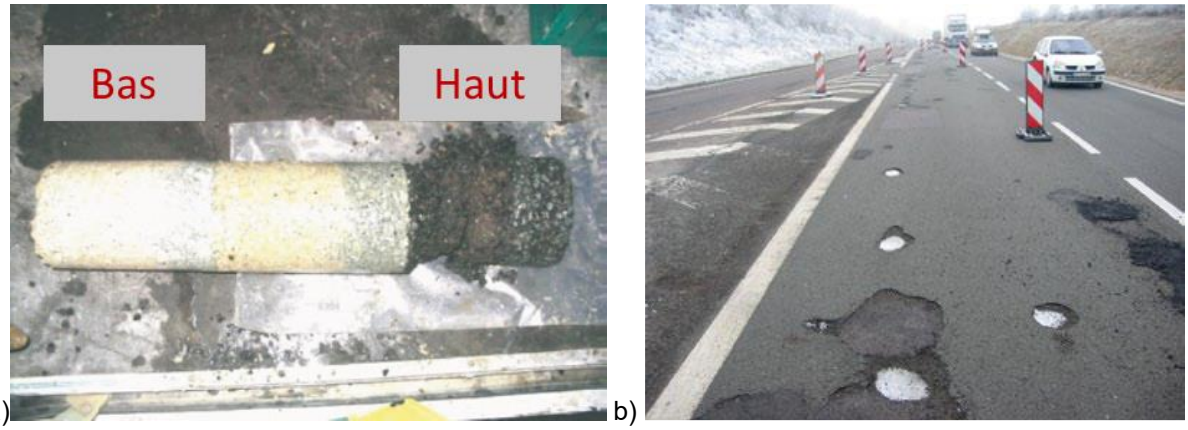
Figure 7-19. Déformation axiale et radiale en fonction de la température mesurée à la surface de l'éprouvette 196

Figure 7-20. Valeur des sauts de déformation axiale et de déformation radiale lors du gel de l'eau dans les essais TUST 197

Figure 7-21. Illustration des hypothèses utilisées pour calculer la quantité d'eau, qui crée une dilatation de l'éprouvette en gelant. 197

INTRODUCTION

La France possède un grand réseau routier de plus d'un million de kilomètres (URF, 2016). Il est principalement constitué de matériaux bitumineux choisis pour former des structures routières épaisses, semi-rigides ou mixtes. Soumis à des sollicitations telles que le trafic et le climat, ces structures routières subissent des dégradations affectant notamment les couches de roulement qui n'assurent alors plus des conditions de sécurité satisfaisante pour les véhicules. Ces couches peuvent être renouvelées plusieurs fois par remplacement ou par recouvrement. Depuis quelques années, des phénomènes de désenrobage apparaissent massivement dès la sortie de l'hiver et sont aggravés dans des régions soumises au gel telles que: les zones nordiques et de montagne en France (Mauduit, et al., 2007) (Corté & Garnier, 2010), les pays scandinaves, le Canada (Lamothe, 2014), la Chine (Feng, et al., 2010) ou les États-Unis (Robert A., et al., 1989). Ces dégradations prennent la forme de nids de poule, de « départs en plaque » ou « pelade » de la couche de roulement (Figure 1). La particularité de ces dégradations est d'apparaitre dans de brefs délais et sans signe avant-coureur spécifique (Mauduit, et al., 2013).



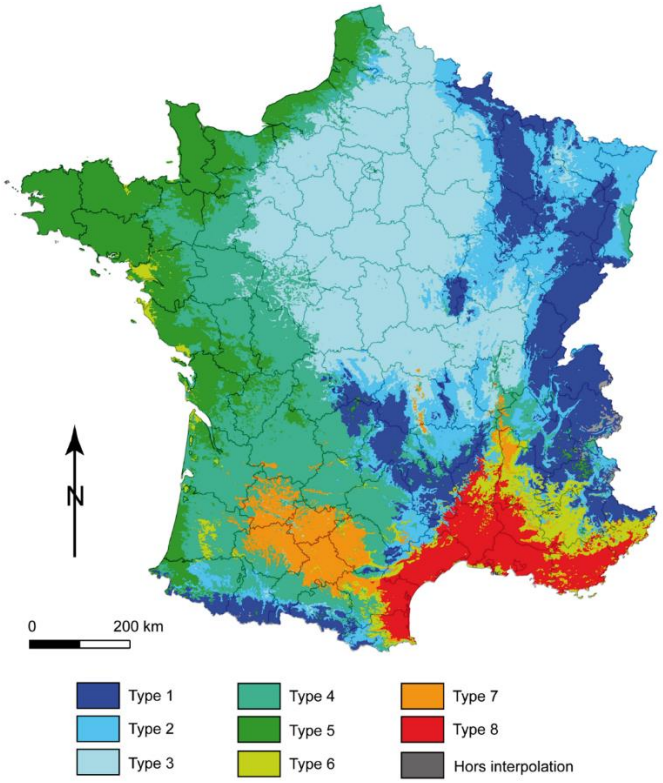
a) b)

Figure 1. Désordres dans une chaussée du nord-est de la France (a) Carotte de la structure de chaussée, (b) Chapelets de nids de poule pluri-décimétriques (Mauduit, et al., 2013)

Un problème se pose : « Comment éviter les dégradations hivernales des réseaux routiers? ». Pour répondre à cette question, beaucoup de recherches ont été réalisées aux États-Unis sur le comportement des enrobés bitumineux, en présence d'humidité, soumis à des conditions de températures variables (chaud/froid) dès le début des années 2000 ((Hicks, et al., 2003), (Solaimanian, et al., 2003), (Mercado, 2007), (Caro S., 2009), etc.). Pourtant, les études sur ce sujet restent encore limitées en France. Les travaux menés dans le cadre de l'opération de recherche de l'IFSTTAR « FondePhy » de 2006 à 2009 ont permis d'investiguer en détail quelques cas de terrain et d'apporter des pistes de réponse à la question posée ((Mauduit, et al., 2007), (Mauduit, et al., 2010) (Mauduit, et al., 2013)). Ce problème est de plus en plus étudié en Chine depuis une dizaine années, comme en témoigne le nombre d'articles d'auteurs chinois publiés sur ce sujet ((Feng, et al., 2010), (Xu, et al., 2015), (Lei, et al., 2016), (Yang, et al., 2016), etc.).

Malgré les résultats obtenus, les phénomènes à l'origine des dégradations observées in-situ demeurent mal connus ou peu expliqués. Il convient de souligner en outre, qu'une grande partie de la France est soumise à un climat de montagnes ou un climat nordique (Figure 2). Pour ces deux types de climat, plus de 25 jours par an, la température minimale est inférieure à -5°C et moins de 4 jours par an la température maximale dépasse 30°C, avec un cumul de précipitation annuelle de moins de 700mm. C'est la raison pour laquelle les études sur les dégradations hivernales intéressent particulièrement

notre pays et justifie que le projet national « Durée de Vie des Chaussées » (DVDC) y dédie une partie des travaux.



Type 1 : climat de montagne

Type 2 : climat semi-continental et climat des marges montagnardes

Type 3 : climat océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord

Type 4 : climat océanique altéré

Type 5 : climat océanique franc

Type 6 : climat méditerranéen altéré

Type 7 : climat du Bassin du Sud-Ouest

Type 8 : climat méditerranéen franc

Figure 2. Typologie climatique du territoire français en 8 classes (Joly, et al., 2010)

Cofinancée par le projet national « Durée de Vie des Chaussées » (DVDC) et l'entreprise EUROVIA, cette thèse contribue aux travaux sur les dégradations hivernales (sous-thème 1.5), du thème 1 du projet national sur les mécanismes de dégradation des chaussées. Elle s'intéresse à l'endommagement des enrobés bitumineux à l'eau et à des cycles de gel/dégel.

Outre cette introduction et une conclusion générale, ce mémoire de thèse se compose de 7 chapitres.

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique. Il introduit les généralités sur les enrobés bitumineux, les diverses sollicitations auxquelles sont soumises les chaussées, en lien avec les conditions hivernales (le trafic, le climat et la saumure utilisée lors des opérations de déverglaçage). Il présente aussi le comportement des matériaux bitumineux et s'intéresse à l'effet de l'eau et des cycles de gel/dégel sur leur comportement, à travers les différentes études menées dans la littérature.

Le deuxième chapitre donne une vue globale sur les campagnes expérimentales réalisées (séparées en une campagne principale regroupant les essais thermomécaniques et une campagne complémentaire) et le matériau testé pendant la thèse. Les paramètres étudiés, les conditionnements appliqués ainsi que la fabrication des éprouvettes sont présentés.

Le troisième chapitre est consacré à la description des essais qui sont introduits dans les campagnes présentées à la deuxième partie. Trois grands types d'essais permettant d'étudier des propriétés différentes de l'enrobé bitumineux sont considérés : essai de module complexe (E*) en traction – compression pour le comportement viscoélastique (VEL) ; essai de fatigue en traction – compression

à amplitude de déformation constante pour le comportement à la fatigue et essai de retrait thermique empêché (TSRST) pour le couplage thermomécanique à basse température. Des essais complémentaires évaluant les changements caractéristiques des éprouvettes au cours du conditionnement sont aussi présentés dans cette partie.

Le quatrième chapitre présente les mesures et les analyses des résultats de la campagne complémentaire X sur le changement de la teneur en vides, du degré de saturation et de la déformation volumique des éprouvettes lors des phases du conditionnement appliqué.

Le cinquième chapitre introduit les résultats des essais de module complexe sur les enrobés bitumineux soumis à différents conditionnements. Le modèle analogique 2S2P1D développé au laboratoire LTDS – ENTPE est ensuite introduit pour la modélisation du comportement tri-dimensionnel (3D) viscoélastique linéaire (VEL). Les effets des cycles thermiques lors du conditionnement et de la présence d'eau durant l'essai sont analysés à l'aide des paramètres du modèle 2S2P1D.

Le sixième chapitre présente une étude du comportement en fatigue des enrobés bitumineux. Les effets de l'eau et des cycles de gel/dégel sont étudiés à l'aide des courbes de fatigue de Wöhler. Ce chapitre est complété par l'introduction d'une loi d'évolution de l'endommagement.

Le septième et dernier chapitre avant la conclusion générale présente les résultats des essais de retrait thermique empêché (« Thermal Stress Restrained Specimen Test », TSRST), et retrait thermique libre (« Thermal Unrestrained Specimen Test », TUST). Les effets des cycles thermiques de conditionnement, et en particulier l'effet de l'eau lors de l'essai sont révélés par des analyses détaillées.

Le mémoire est complété par des annexes présentant en détail les caractéristiques des matériaux testés et l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus.

Chapitre I

BIBLIOGRAPHIE

1. Bibliographie

1.1. Les enrobés bitumineux et leurs composants

1.1.1. Définition

L'enrobé bitumineux est un mélange de granulats (graves, sables, fines) et d'un liant hydrocarboné (bitume, en général 5 à 7% en masse et éventuellement des additifs). Dans l'enrobé bitumineux, le liant est principalement responsable de la cohésion du mélange tandis que le squelette granulaire assure la rigidité de l'ensemble (Corté & Di Benedetto, 2005).

1.1.2. Le bitume

Le bitume est un terme générique regroupant tout mélange d'hydrocarbures lourds. Il est généralement obtenu par raffinage des produits pétroliers bruts. Dans les techniques routières, le bitume est souvent utilisé sous forme d'enrobé.

Malgré des concentrations souvent inférieures à 7% en poids de bitume dans l'enrobé, ses caractéristiques déterminent principalement la rigidité du mélange bitumineux (Corté & Di Benedetto, 2005).

Plusieurs méthodes ont été élaborées dans la littérature pour la caractérisation du bitume. Dans ce but, deux essais très utilisés en raison de leur simplicité et de leur rapidité sont l'essai de pénétrabilité et l'essai de bille-anneau. Ces essais sont décrits par la suite.

a) Essai de pénétrabilité (NF EN 1426, 2007)

La pénétrabilité (*pen*) du bitume représente la mesure de la pénétration (exprimée en 0,1mm) dans un échantillon de bitume à 25°C, d'une aiguille dont le poids avec son support est de 100g pendant 5 secondes (cf. Figure 1-1). La pénétrabilité est utilisée pour distinguer des différentes classes de bitume. Plus le bitume est mou et plus la valeur de la pénétrabilité est grande.

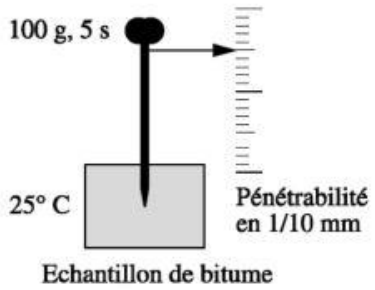


Figure 1-1. Schéma de l'essai de pénétrabilité (Corté & Di Benedetto, 2005)

b) Essai de bille-anneau (NF EN 1427, 2007)

Cet essai est réalisé dans des conditions normalisées d'élévation de température. Il consiste à déterminer la température pour laquelle un anneau rempli du bitume supportant une bille d'acier, se déforme en s'allongeant jusqu'à atteindre un repère situé à une distance prédéterminée (cf. Figure 1-2) . Cette température est définie comme la température de ramollissement bille et anneau (TBA).

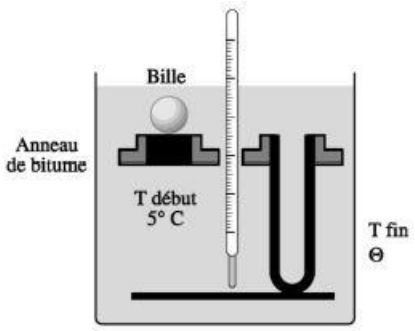


Figure 1-2. Schéma de l'essai de bille-anneau (Corté & Di Benedetto, 2005)

1.1.3. Les granulats

Les granulats désignent dans ce mémoire, l'ensemble des sables, gravillons ou pierres concassées dont la dimension comprend entre 0 et 80 mm. Ces matériaux granulaires constituent environ 95% de la masse de l'enrobé (80-85% du volume).

La taille des éléments constituant un mélange de granulats définit sa granularité et est déterminante pour sa classification. On quantifie une classe granulaire par la taille du plus petit d et du plus gros grain D. En considérant la granularité, on peut distinguer plusieurs types de composants minéraux destiné à la fabrication des mélanges bitumineux, comme représenté dans le Tableau 1-1

Tableau 1-1. Type de composants selon leur classe granulaire

Classes de composants	Dimensions (mm)
Fines	0/D où D ≤ 0,080
Sables	0/D où D ≤ 6,30
Gravillons	d/D où d ≥ 2,00 et D ≤ 31,50
Cailloux	d/D où d ≥ 20,00 et D ≤ 80,00
Graves	0/D où 6,30 ≤ D ≤ 6,30

En principe, une classe ne doit pas être trop large et pour ce faire le rapport D/d est limité en général à une valeur de 1,4. La Figure 1-3 présente un exemplaire d'un mélange bitumineux composé de trois classes granulaires différentes.

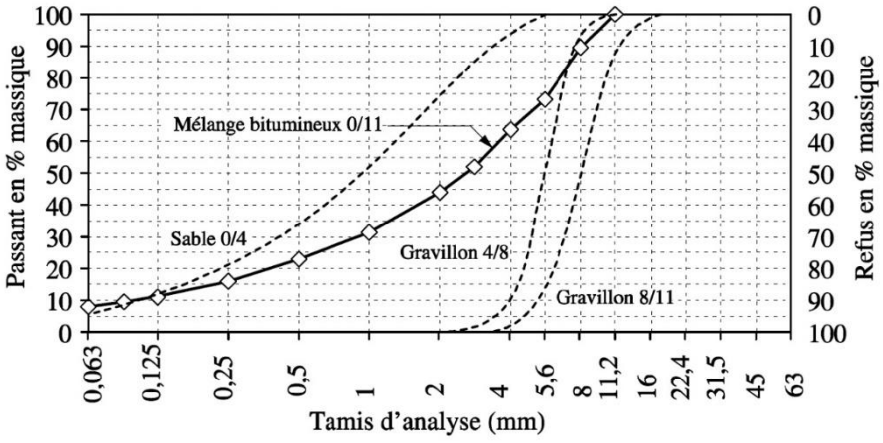


Figure 1-3. Courbe granulométrique d'un mélange bitumineux composé de trois fractions granulaires (Corté & Di Benedetto, 2005)

1.1.4. Classification des enrobés bitumineux

Cette partie présente la classification des enrobés bitumineux qui sont couramment utilisés pour le revêtement routier. Les revêtements bitumineux sont appliqués pour la confection de différentes couches de chaussées, notamment les couches de surface et d'assise. Selon (Corté & Di Benedetto, 2005), on peut distinguer les différentes couches (Figure 1-4).

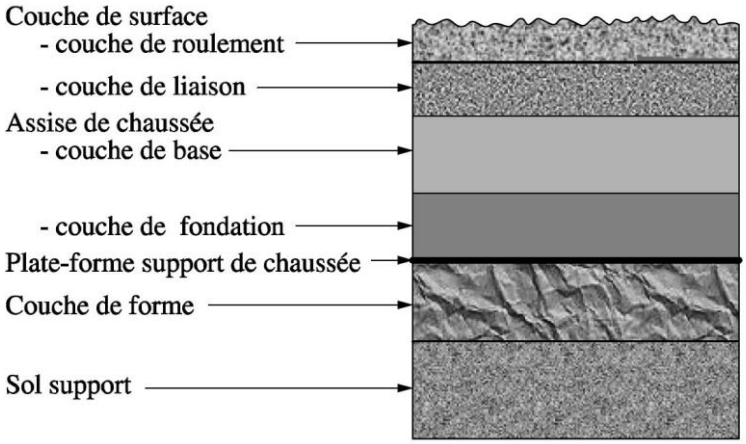


Figure 1-4. Coupe typique d'une chaussée et terminologie pour les différentes couches (Di Benedetto & Corté, 2005)

1.1.4.1. Bétons bitumineux pour couche de surface

Les bétons bitumineux sont des enrobés avec une teneur en bitume élevée (entre 5 et 8%). Ils sont couramment appliqués aux couches de surface, en particulier à celle de roulement. Il existe différents types de béton bitumineux, distingués en fonction de leur granulométrie (Figure 1-5), de l'épaisseur des couches auxquelles ils sont appliqués et de leurs usages :

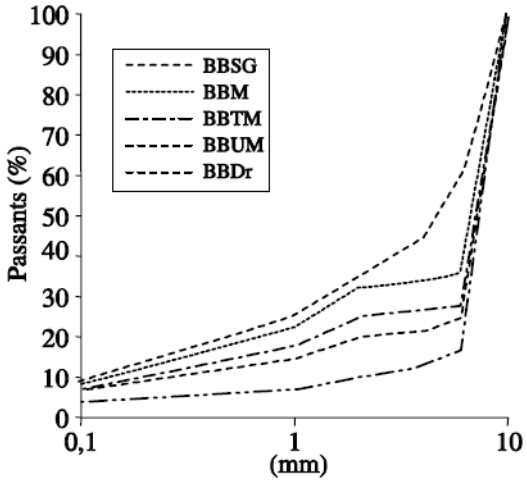


Figure 1-5. Courbes granulométriques indicatives de différents mélanges bitumineux employés en couches de roulements (BBSG, BBM, BBTM, BBUM, BBDr) (Di Benedetto & Corté, 2005)

- Les bétons bitumineux semi-grenus (BBSG)

La courbe granulométrique est généralement continue. La dimension D est de 10mm ou 14mm, le passant au tamis de 2mm est compris entre 25% et 40% et le refus au tamis de 6mm entre 25% et 50%. Les bitumes utilisés sont souvent 35/50 ou 50/70. La teneur en bitume est comprise entre 5% et 6,5%. La teneur en filler est voisine de 6,8%. En couche de roulement, ils sont appliqués entre 5cm et 9cm d'épaisseur.

- Les bétons bitumineux minces (BBM)

La courbe granulométrique est discontinue. La dimension D est de 10mm ou 14mm, le passant au tamis de 2mm est compris entre 25% et 35%. La teneur en bitume est comprise entre 5% et 6%. Ils possèdent des performances moyennes. L'épaisseur de couche en BBM varie généralement entre 3cm et 5cm.

- Les bétons bitumineux très minces (BBTM)

La courbe granulométrique est fortement discontinue. La dimension D est de 10mm. Le mélange se compose d'environ 25 à 30% de sable 0/2, 70 à 72% de gravillons 6/10 et 2 à 5% de fines d'apport. La teneur en bitume est comprise entre 4,5% et 6%. L'épaisseur de couche en BBTM varie généralement entre 2cm et 3cm. Leur faible épaisseur permet d'obtenir de la valeur qualité/prix très compétitive et leur développement est tel qu'ils représentent aujourd'hui plus de 50% du linéaire des autoroutes à péage (Faure, 1998).

- Les bétons bitumineux ultra-minces (BBUM)

La courbe granulométrique est proche de celles des BBTM. La dimension D est de 6mm ou 10mm. La teneur en bitume est comprise entre 5% et 5,7% pour le mélange 0/10 ou entre 5,7% et 6,2% pour le mélange 0/6. L'épaisseur de couche en BBUM est inférieure de 2cm.

- Les bétons bitumineux drainants (BBDr)

La courbe granulométrique est fortement discontinue. De granulométrie 0/10 au 0/14, le mélange ne comporte que 10 à 12% de sable 0/2. La teneur en bitume est faible environ de 4,5 à 4,8 %. Les BBDr sont généralement appliqués à la couche de roulement dont l'épaisseur est environ de 4cm. La teneur en vides de cette couche est très élevée et comprise entre 20 et 25%.

1.1.4.2. Enrobés bitumineux pour assise de chaussée

- Graves bitume (GB) sont des enrobés à chaud mise au point début des années 70. La stabilité est obtenue par l'utilisation de bitume relativement dur (35/50) à un teneur relativement faible (environ 4%) et avec l'utilisation de granulats entièrement concassées. L'épaisseur de couche d'assise utilisant GB varie entre 12 et 18cm.
- Enrobés à module élevé (EME) sont des enrobés à chaud dont la granulométrie est proche de celles des GB. Cependant, les EME utilisent les bitumes plus durs (10/20 ou 20/30) à un dosage plus élevé (5 à 6%) que celui de GB. L'utilisation de EME permet de diminuer l'épaisseur de couche mise en œuvre (entre 8 et 12cm) en assurant à la fois la rigidité et aussi un bon comportement en fatigue de chaussée.
- Sables bitume (SB) est un mélange de sable naturel, de sable concassé et de bitume très dur (20/30) à un teneur relativement faible (environ 4%). Le SB a été utilisé avec succès en couche de fondation pour la construction de certaines sections d'autoroute comme A10-Paris/Poitiers et A11-Pais/Le Mans. (Faure, 1998)

1.2.Sollicitation des couches routières en enrobés bitumineux

Les structures routières sont soumises à diverses sollicitations mécaniques, thermiques et chimiques. Durant la vie des chaussées, ces sollicitations peuvent se combiner et causer des détériorations dans les couches routières. Elles sont liées aux contraintes mécaniques générées par le passage des véhicules (effet du trafic), aux effets créés par les changements du climat (effets climatiques) et aux actions de l'entretien hivernal des chaussées (effet de la saumure). Dans les paragraphes suivants, ces effets sont présentés indépendamment et de façon couplée.

1.2.1. Effet du trafic

Les couches de chaussées subissent des écrasements et des flexions sous l'effet du trafic (Figure 1-6). La répétition des chargements dus au trafic peut aboutir à des microfissures qui s'accumulent et entrainer le développement de fissures à travers le matériau, puis à travers les couches de chaussées. En particulier, la fissuration à la surface de la chaussée favorise les infiltrations d'eau. Ces dernières peuvent conduire à la réduction de portance du support, au décollement des couches et à une accélération de la dégradation des matériaux (Di Benedetto & Corté, 2005).

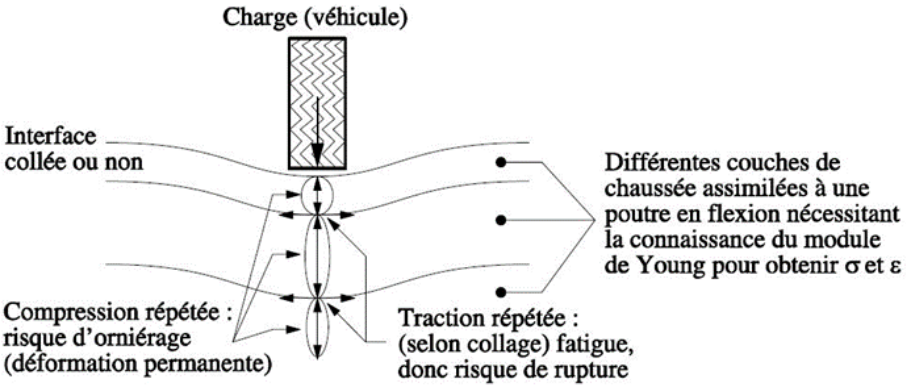


Figure 1-6. Schématisation des sollicitations induites par le trafic sous une roue (Di Benedetto & Corté, 2005)

Les compressions répétées sous l'effet des charges créent également des déformations permanentes qui induisent parfois un orniérage à la surface de la chaussée. Cet orniérage peut être dû aux déformations des couches d'enrobés bitumineux mais également aux tassements différentiels des couches non liées inférieures éventuelles.

1.2.2. Effet des conditions climatique

1.2.2.1. Effet de la température

La température a deux effets mécaniques principaux :

1. Changement de rigidité (module) du matériau. Un enrobé bitumineux que l'on chauffe devient plus « mou », par contre à basse température il présente les caractéristiques d'un matériau plus « durs ».
2. Création de contraintes et déformations dues aux dilatations-contractions thermiques différées de chacune des couches lors des changements de température (Figure 1-7).

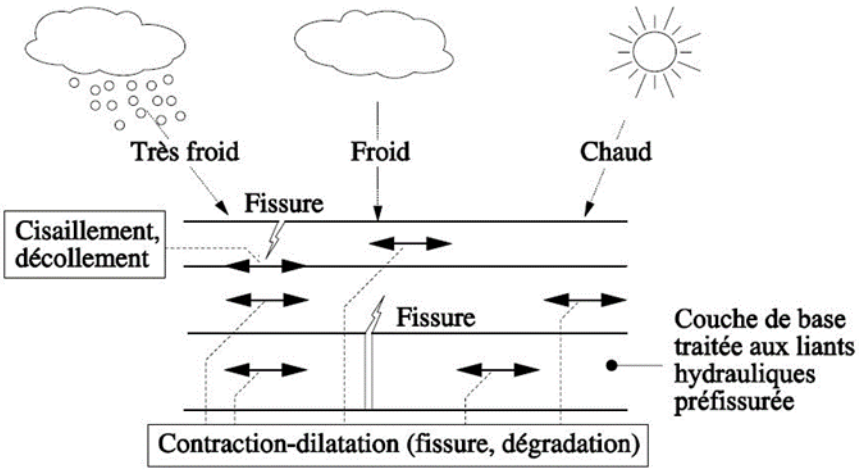


Figure 1-7. Schématisation des sollicitations induites par la température dans les structures routières (Di Benedetto & Corté, 2005)

1.2.2.2. Effet de l'eau

La présence d'eau au sein des matériaux des revêtements routiers s'explique par les trois modes d'apparition suivants : 1) infiltration des pluies, formation de neige et écoulement de l'eau ; 2) remontée d'eau en raison des forces capillaires ou du phénomène de pompage généré par le trafic ; 3) pénétration et condensation de la vapeur d'eau (Castaneda Pinzon, 2004).

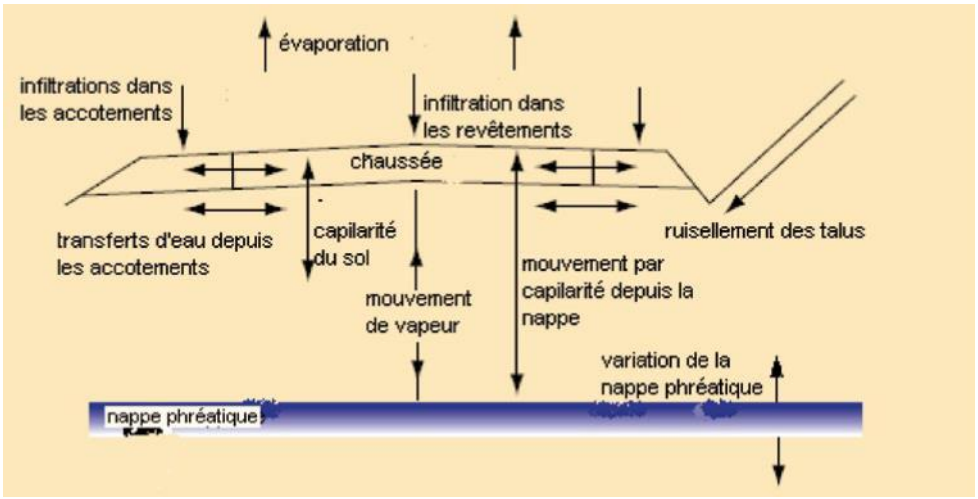


Figure 1-8. Circulation d'eau dans la plate-forme et la chaussée (Castaneda Pinzon, 2004)

La présence d'eau cause des dégradations au sein des enrobés bitumineux. L'eau est à l'origine de plusieurs effets néfastes : la perte d'adhésivité entre le bitume et les granulats, la perte de cohésion du film bitumineux et/ou la rupture des agrégats, en particulier lorsqu'ils sont soumis au gel (Terrel & Al-Swailmi, 1994), (Bagampadde, et al., 2004), (N. Kingros, 2008), (Caro S., 2009) (Mehrara & Khodaii, 2013).

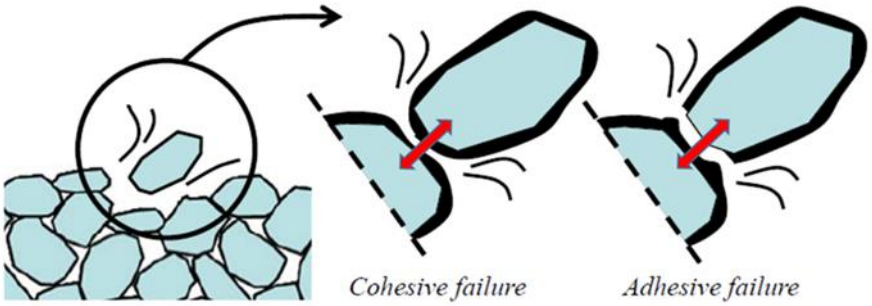


Figure 1-9. Décollement des enrobés dû à des pertes d'adhésivité et de cohésion des composants (N. Kingros, 2008)

1.2.2.3. Effet des cycles de gel/dégel

Selon (Corté & Garnier, 2010) et (Mauduit, et al., 2013), il est estimé qu'un revêtement routier subit de 500 à 1200 cycles de gel/dégel (GD) pendant sa durée de vie de 12 à 15 ans (les données utilisées ont été mesurées sur la route nationale 57 dans les Vosges). Comme le montre la Figure 1-10 (Mauduit, et al., 2013), plus d'une dizaine de cycles de GD ont été enregistrés au mois de janvier 2010 au centre de la France. Cela signifie que les chaussées dans cette zone ont subi 10 à 15 cycles de GD pendant ce mois d'hiver.

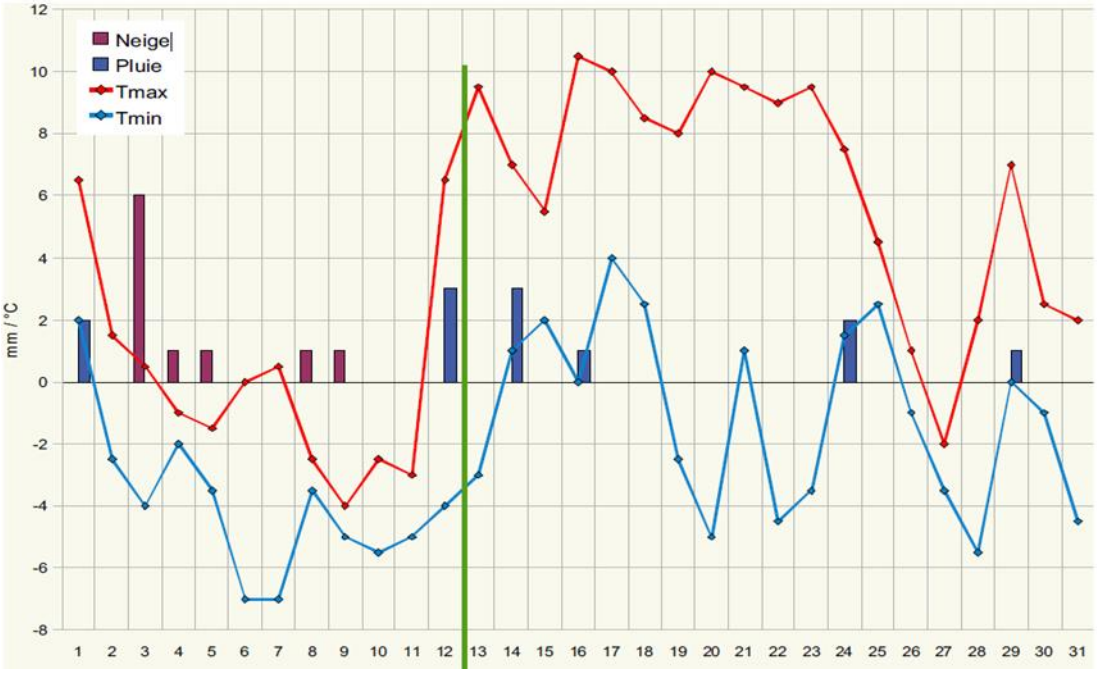


Figure 1-10. Relevé météorologique de janvier 2010 issu de la station de Météo France située au centre de la France tiré depuis (Mauduit, et al., 2013)

De plus, de nombreux cycles quotidiens de gel/dégel rencontrés sur le terrain sont accompagnés par des précipitations (AIPCR , 2012). Ces cycles de GD, qui apparaissent en hiver au centre de la France ou dans les régions montagneuses, ont généralement des amplitudes de température variant entre -10°C et 15°C (Figure 1-11). D'après (Mauduit, et al., 2007), une température basse peut facilement engendrer la solidification de l'eau stockée dans les vides des couches de chaussées après les périodes de pluie ou de neige. Sous des cycles de GD, ce phénomène peut induire des contraintes élevées (1 à 3MPa) et répétées qui causent un endommagement des enrobés bitumineux. Ce phénomène peut donc

générer une chute irréversible de rigidité ou accélérer l'endommagement des revêtements routiers qui sont à l'origine des dégradations hivernales telles que les nids de poule (Robert A., et al., 1989).

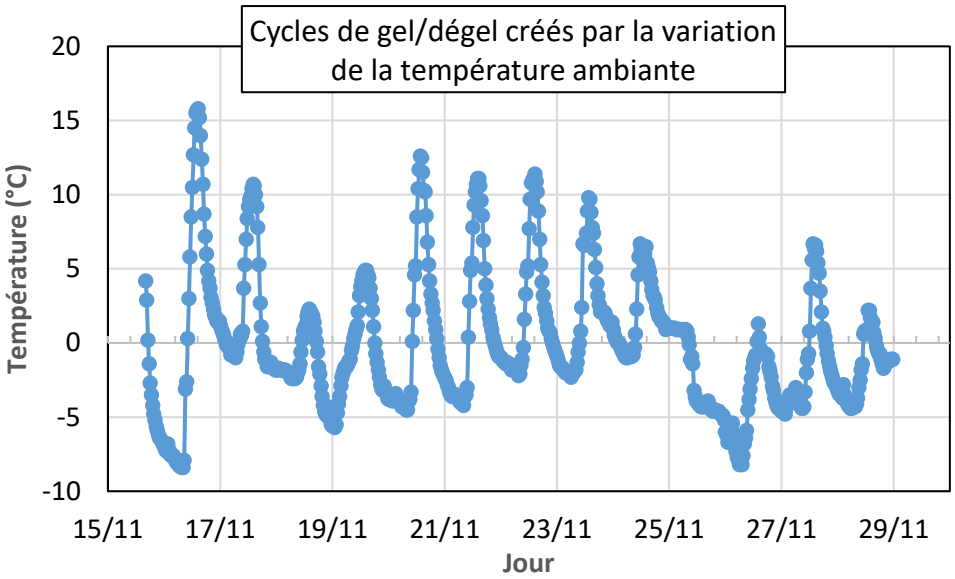


Figure 1-11. Relevés de température dans la couche de surface d'une chaussée à côté de Genève du 15/11/2017 au 28/11/2017 (données EUROVIA)

1.2.2.4. Effet du rayonnement ultraviolet (UV)

Un autre aspect important est le vieillissement des matériaux bitumineux. Au cours du temps, le bitume s'oxyde. Ce phénomène est accéléré par des températures élevées, ou l'action du rayonnement ultraviolet. Le vieillissement a comme effet un durcissement des matériaux. Il existe toujours un gradient de vieillissement diminuant avec la profondeur de la structure routière. Celui-ci est dû au fait que les matériaux situés à différentes profondeurs dans les chaussées ne sont pas soumis au même niveau d'exposition à l'oxygène et au rayonnement ultraviolet à long terme.

En fait, les dégradations dues à l'humidité et le vieillissement se produisent simultanément pendant la durée de vie d'une structure de chaussée et les deux phénomènes interagissent entre eux. Le durcissement combiné avec le gradient de vieillissement accélère les mécanismes d'endommagement lié à l'humidité, et contribue à affaiblir les liens cohésifs et adhésifs du mastic et du bitume avec l'agrégat (Das, 2014).

1.2.3. Effet de la saumure

En hiver, l'utilisation de produits de déverglaçage est nécessaire pour l'entretien routier. L'ajout de produits de déverglaçage permet d'abaisser le point de congélation de l'eau et diminue donc l'effet de solidification de l'eau qui est une des causes de dégradation hivernale. En France, on utilise différents produits de déverglaçage tels que : les chlorures, les alcools, des sels de l'acide acétique, l'urée ou les formiates. Parmi eux, les sels chlorures comme $NaCl_2$, $CaCl_2$ ou $MgCl_2$ sont largement utilisés en raison de leur disponibilité, leur coût et leur efficacité. Cependant, l'utilisation des sels peut avoir des effets néfastes comme : le choc thermique ou l'effet du gradient de concentration du sel.

Le choc thermique est provoqué par l'usage des sels directement sur les couches de glace et de verglas, donc seulement lors d'un traitement curatif. La réaction endothermique entre le sel et la glace peut causer une diminution brutale de la température d'environ 3 degrés pendant quelques minutes selon (Mauduit, et al., 2013). La Figure 1-12 montre un exemple de la variation thermique mesurée à

la surface et à différentes profondeurs, -2cm, -4cm et -6cm d'une plaque testée suite à un salage de 40g/m^2 sur une épaisseur de verglas de 2mm.

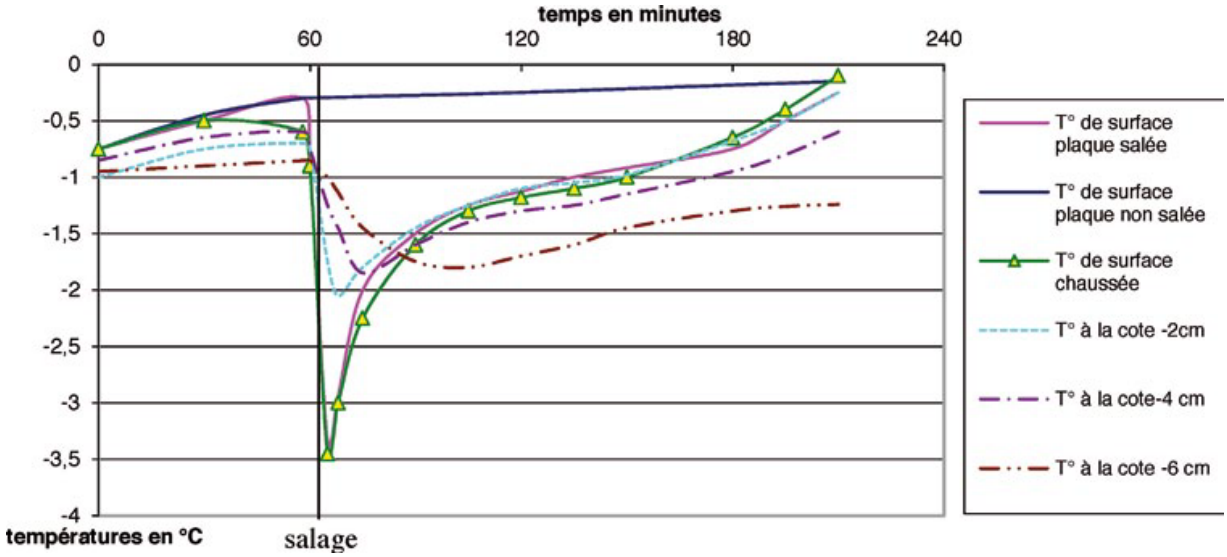


Figure 1-12. Choc thermique dû au salage d'une couche de verglas préexistant sur la chaussée selon (Boutonnet et Livret 1990) tiré depuis (Mauduit, et al., 2013)

L'autre effet causé par l'application de sel est l'effet de gradient de concentration en sel lorsque la saumure pénètre de façon non-homogène dans la chaussée. La forte concentration se trouve normalement au fond et diminue au fur à mesure vers la surface de la chaussée. Selon (Doré, et al., 1997), ce phénomène entraine la formation non-homogène de glace au sein de la structure routière soumise à des cycles de gel/dégel et peut accélérer la fissuration des chaussées.

1.3.Comportements des matériaux bitumineux

1.3.1. Grandes classes de comportement

Le comportement des enrobés bitumineux est complexe. Ils présentent différents types de comportement en fonction des sollicitations imposées. Malgré le comportement complexe des enrobés, il est possible d'identifier généralement quatre grandes types de comportements principaux en considérant l'amplitude de la déformation (ε) et le nombre de cycles de chargement appliqué (N) (pour une température fixée) :

- Pour des chargements comprenant quelques centaines de cycles et des déformations de « faibles amplitudes » ($\varepsilon < 10^{-4}$ m/m) le comportement est considéré, en première approximation, viscoélastique linéaire (VEL).
- Pour un faible nombre de chargements et des déformations de quelques pourcents, on observe un comportement fortement non-linéaire.
- Lors de chargements de plusieurs milliers de cycles sous faibles déformations, des phénomènes d'endommagement apparaissent, le matériau se fatigue.
- Lorsque des cycles déviatoires en contraintes sont appliqués à partir d'une contrainte nulle, des déformations irréversibles non négligeables se produisent pour des amplitudes de déformation « proches » de la rupture. Leur accumulation crée de l'orniérage.

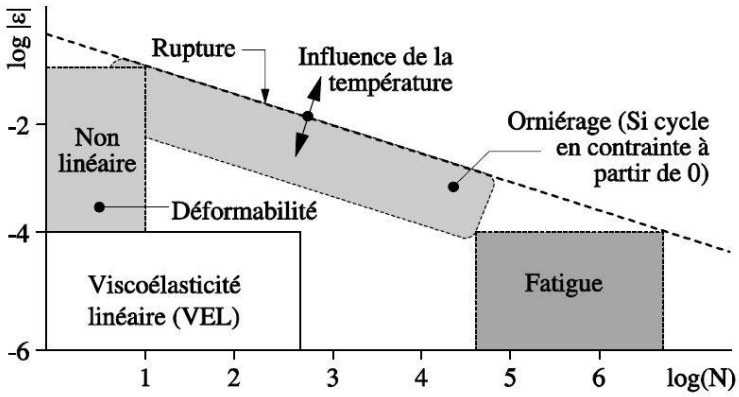


Figure 1-13. Comportements des enrobés bitumineux à température fixée, (ε) déformation - (N) nombre de chargements (Di Benedetto & Corté, 2005)

La Figure 1-13 fournit un ordre de grandeur des différents domaines de comportement type pour une température fixée. Les frontières indiquées, pour les différents comportements, sont des ordres de grandeur qui peuvent varier sensiblement selon le matériau, la température et la direction du chemin de sollicitation (compression, cisaillement, etc).

Pour l'application au dimensionnement des chaussées, les quatre propriétés mécaniques des enrobés bitumineux sont tenues en compte (Di Benedetto & Corté, 2005) :

- la rigidité ou le module (comportement viscoélastique linéaire - VEL) (cf. 1.3.2)
- le comportement en fatigue (cf. 1.3.3)
- le comportement à l'orniérage qui correspond à l'accumulation de déformations permanentes
- la fissuration et la propagation de fissures au travers de la structure de chaussée, en particulier à basse température. (cf. 1.3.4)

1.3.2. Comportement viscoélastique linéaire (VEL)

1.3.2.1. Introduction

Un matériau solide se comporte élastique linéaire si son comportement se conforme à la loi de Hooke, en petites déformations, la contrainte est proportionnelle à la déformation mais indépendante de la vitesse de déformation.

Un fluide visqueux se conforme à loi Newton si la contrainte est proportionnelle au taux de déformation mais indépendante de la déformation elle-même.

Un matériau ***viscoélastique*** se présente les caractéristiques à la fois élastique et visqueux lorsqu'il est soumis à une sollicitation mécanique externe telles qu'une déformation ou une contrainte. Le comportement viscoélastique est un comportement dépendant du temps. La Figure 1-14 présente une réponse type en contrainte d'une éprouvette viscoélastique soumis à un créneau de déformation déterminé pour un essai d'effacement:

- Initialement, aucune déformation n'est appliquée à l'éprouvette, le champ de contraintes est zéro
- À un instant t_0, une déformation ε_0 est « instantanément » appliquée, une réponse « instantanée » en contrainte est aussi obtenue
- De l'instant t_0 à l'instant t_1, la déformation est maintenue constante à ε_0, le niveau de contrainte diminue progressivement du fait de la viscosité du matériau

- À l'instant t_1, la déformation est brusquement amenée à zéro. La contrainte développée instantanément dans le matériau est plus supérieure que la contrainte résiduelle (à t_1^-), ceci entraîne une contrainte totale (à t_1^+) ayant une signe opposé par rapport à celle avant déchargement
- À partir de l'instant t_1, la déformation est maintenue à zéro, et la contrainte diminue progressivement jusqu'à une récupération complète σ_∞ Si la contrainte σ_∞ s'annule pour un t suffisamment grand ou lorsque t → ∞, l'effacement de contrainte est total.

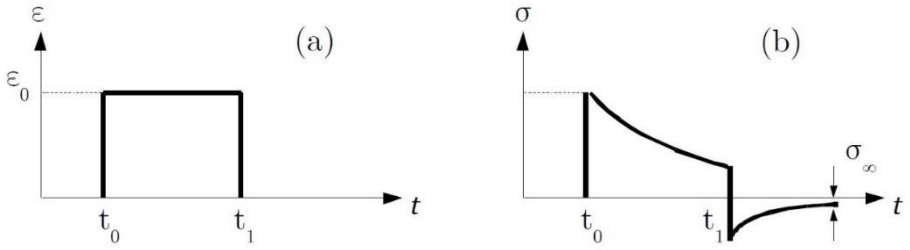


Figure 1-14. Essai d'effacement à une température fixée: créneau de déformation imposée (a) et réponse type du matériau viscoélastique en contrainte (b)

Un matériau a un comportement ***viscoélastique linéaire*** si sa réponse à une sollicitation composée est la somme des réponses à chacune des sollicitations élémentaires (Salençon, 2009). On dit alors que le matériau obéit au principe de superposition de Boltzmann (Tableau 1-2).

Tableau 1-2. Principe de superposition de Boltzmann

Sollicitation	Réponse
$\varepsilon_1(t)$ $\varepsilon_2(t)$ $\lambda\varepsilon_1(t) + \mu\varepsilon_2(t)$	$\sigma_1(t)$ $\sigma_2(t)$ $\lambda\sigma_1(t) + \mu\sigma_2(t)\ \forall\ (\lambda,\mu) \in\ \mathbb{R}^2$

1.3.2.2. Caractérisation du comportement VEL

1.3.2.2.1. Fonction de fluage

Le fluage est l'accroissement de la déformation d'un matériau en fonction du temps sous l'action de sollicitations en contrainte constante. On détermine la fonction de fluage d'un matériau viscoélastique en imposant, à température constante, une contrainte σ_0 à partir d'un moment noté t_0 (Figure 1-15).

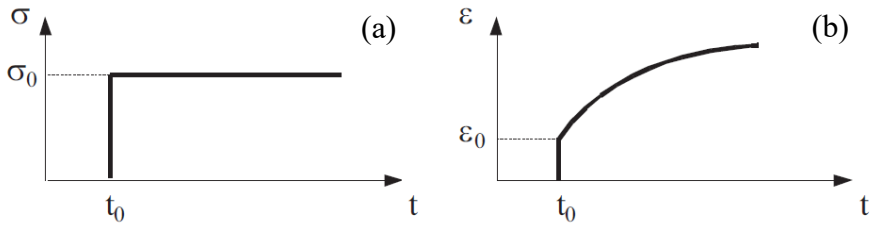


Figure 1-15. Essai de fluage d'un matériau viscoélastique linéaire : sollicitation imposée en contrainte constante (a) et réponse en déformation (b)

La contrainte imposée est donnée par l'équation suivante :

$$\sigma(t) = \sigma_0 H(t - t_0) \quad \text{Eq. 1-1}$$

où $H(t - t_0)$ est la fonction de Heaviside

$$\begin{cases} H(t - t_0) = 0 \text{ si } t < t_0 \\ H(t - t_0) = 1 \text{ si } t \geq t_0 \end{cases}$$

La réponse en déformation est :

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 F(t_0, t) \quad \text{Eq. 1-2}$$

où $F(t_0, t)$ est la fonction de fluage ou de retard.

$$\begin{cases} F(t_0, t) = 0 \text{ si } t < t_0 \\ F(t_0, t) \text{ croissante pour } t \geq t_0 \end{cases}$$

Pour une contrainte qui varie dans le temps on utilise la notation incrémentale (Figure 1-16). La réponse, à l'instant t, à l'incrément de contrainte $d\sigma(\tau)$ appliqué à l'instant τ vaut :

$$d\varepsilon(t) = F(\tau, t) d\sigma(\tau) \quad \text{Eq. 1-3}$$

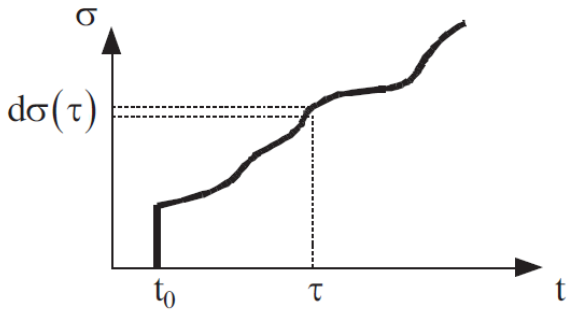


Figure 1-16. Sollicitation à contrainte variable dans le temps

En appliquant le principe de superposition de Boltzmann, la déformation $\varepsilon(t)$ est déterminée selon l'équation suivante (Salençon, 2009):

$$\varepsilon(t) = \int_{-\infty}^{t} F(\tau, t) d\sigma(\tau) = \sigma(t) F(t, t) - \int_{t_0}^{t} \sigma(\tau) \frac{\partial F(\tau, t)}{\partial \tau} d\tau \quad \text{Eq. 1-4}$$

Pour un matériau non vieillissant dont les propriétés physiques n'évoluent pas au cours de sollicitation, l'équation Eq. 1-4 devient :

$$\varepsilon(t) = \sigma(t) F(0) + \int_{t_0}^{t} \sigma(\tau) \frac{\partial F(t - \tau)}{\partial \tau} d\tau \quad \text{Eq. 1-5}$$

ou sous la forme d'une intégrale de Stieltjes (Salençon, 2009) :

$$\varepsilon(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \sigma(\tau)\ F'(t - \tau) \quad \text{Eq. 1-6}$$

- Le premier terme dans l'équation Eq. 1-5 désigne la réponse instantanée à l'instant t et à la sollicitation $\sigma(t)$
- Le second terme dans l'équation Eq. 1-5 représente l'intégrale de mémoire de toute l'histoire antérieur à t ($\tau \leq t$). Il représente le résultat du comportement différé du matériau.

1.3.2.2.2. Fonction de relaxation

La relaxation est le phénomène de diminution des contraintes en fonction du temps d'un matériau soumis à une déformation constante dans le temps. On détermine la fonction de relaxation d'un matériau viscoélastique en imposant, à température constante, une déformation ε_0 à partir d'un moment noté t_0 (Figure 1-17).

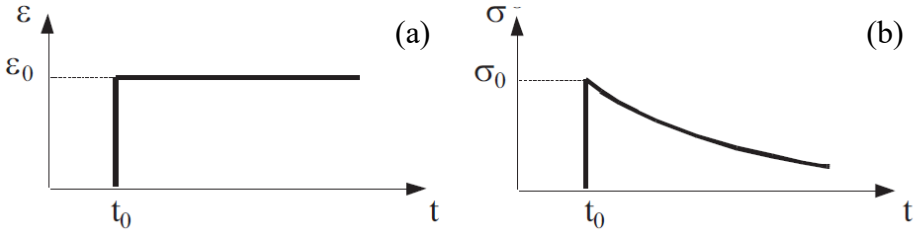


Figure 1-17. Essai de relaxation d'un matériau viscoélastique linéaire : sollicitation imposée en déformation constante (a) et réponse en contrainte (b)

La déformation imposée est donnée par l'équation suivante :

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 H(t - t_0) \qquad \text{Eq. 1-7}$$

La réponse en contrainte est :

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 R(t_0, t) \qquad \text{Eq. 1-8}$$

où $R(t_0, t)$ est la fonction de relaxation.

$$\begin{cases} R(t_0, t) = 0 \text{ si } t < t_0 \\ R(t_0, t) \text{ décroissante pour } t \geq t_0 \end{cases}$$

En appliquant le principe de superposition de Boltzmann pour une déformation qui varie dans le temps, la contrainte $\sigma(t)$ est déterminée selon l'équation suivante (Salençon, 2009):

$$\sigma(t) = \int_{-\infty}^{t} R(\tau, t) d\varepsilon(\tau) = \varepsilon(t) R(t, t) - \int_{t_0}^{t} \varepsilon(\tau) \frac{\partial R(\tau, t)}{\partial \tau} d\tau \qquad \text{Eq. 1-9}$$

Si le matériau est non vieillissant, l'équation Eq. 1-9 devient :

$$\sigma(t) = \varepsilon(t) R(0) + \int_{t_0}^{t} \varepsilon(\tau) \frac{\partial R(t-\tau)}{\partial \tau} d(\tau) \qquad \text{Eq. 1-10}$$

ou sous la forme d'une intégrale de Stieltjes (Salençon, 2009) :

$$\sigma(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varepsilon(\tau)\ R'(t - \tau) \qquad \text{Eq. 1-11}$$

Dans l'équation Eq. 1-10, le premier terme Eq. 1-5 est la réponse instantanée et le second terme est la réponse différée.

1.3.2.2.1. Calcul opérationnel – Transformation de Laplace-Carson

Dans le but de simplifier le calcul des équations intégro-différentielles liant la contrainte et la déformation, la transformation de Laplace-Carson est utilisée. La transformation de Carson d'une fonction $g(t)$ quelconque dépendant du temps t est définie par l'équation Eq. 1-12

$$\tilde{g}(p) = p \int_0^{\infty} g(t) e^{-pt} d(t) \qquad \text{Eq. 1-12}$$

En appliquant cette transformation, les équations Eq. 1-6 et Eq. 1-11 deviennent respectivement les équations Eq. 1-13 et Eq. 1-14.

$$\tilde{\varepsilon}(p) = \tilde{F}(p) \tilde{\sigma}(p) \qquad \text{Eq. 1-13}$$

$$\tilde{\sigma}(p) = \tilde{R}(p) \tilde{\varepsilon}(p) \qquad \text{Eq. 1-14}$$

$\tilde{\varepsilon}, \tilde{\sigma}, \tilde{F}, \tilde{R}$ sont respectivement les transformées de Carson de la déformation, de la contrainte, de la fonction de fluage et de la fonction de relaxation. Par ailleurs, le produit des transformées de Carson de la fonction de fluage et de la fonction de relaxation est l'unité (Eq. 1-15)

$$\tilde{F} \times \tilde{R} = 1 \qquad \text{Eq. 1-15}$$

1.3.2.2.2. Module complexe et coefficient de Poisson complexe

Si on applique une déformation sinusoïdale à une éprouvette viscoélastique linéaire dans la direction axiale (direction I) $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t)$, la réponse en contrainte axiale dans cette direction est sinusoïdale en régime établi de la forme $\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t + \varphi_E)$. La réponse en déformation radiale

(direction II, III) est de la forme $\varepsilon_r(t) = \varepsilon_{r0}\sin(\omega t + \pi + \varphi_v)$(cf. Figure 1-18) ($\varphi_E$ et $\pi + \varphi_v$ sont les angles de déphasage entre les signaux mesurés).

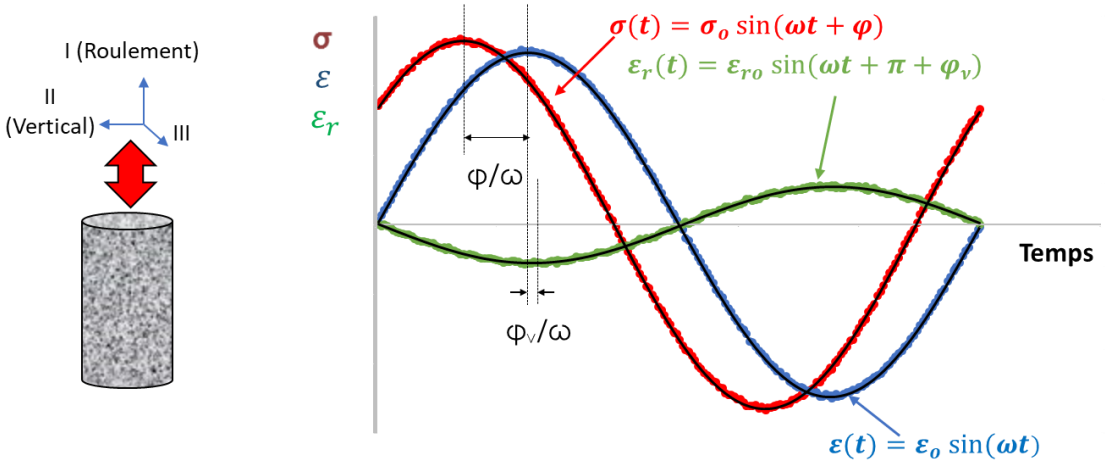


Figure 1-18. Mesure de module complexe sur éprouvette cylindrique

En utilisant les notations complexes, on obtient $\sigma^*(\omega t + \varphi_E) = \sigma_0 e^{i(\omega t + \varphi_E)}$, $\varepsilon^*(\omega t) = \varepsilon_0 e^{i\omega t}$ et $\varepsilon_r^*(\omega t + \pi + \varphi_v) = \varepsilon_{r0} e^{i(\omega t + \pi + \varphi_v)}$.

Dans le but de déterminer le module de rigidité du matériau, on réécrit l'équation Eq. 1-14 comme suivante :

$$\sigma^*(t) = \tilde{R}(i\omega)\varepsilon^*(t) \qquad \text{Eq. 1-16}$$

La transformée de Carson de la fonction de fluage $\tilde{R}(i\omega)$ est aussi appelée par le module complexe E* et définie par l'équation Eq. 1-17.

$$E^* = \tilde{R}(i\omega) = \frac{\sigma^*(t)}{\varepsilon^*(t)} = \frac{\sigma_0 e^{i(\omega t + \varphi_E)}}{\varepsilon_0 e^{i\omega t}} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} e^{i\varphi_E} = |E^*| e^{i\varphi_E} \qquad \text{Eq. 1-17}$$

On peut aussi décomposer E* en deux parties comme suite :

$$E^* = E_1 + iE_2 \qquad \text{Eq. 1-18}$$

où la partie réelle $E_1 = |E^*|\cos\varphi_E$ est appelée module d'élasticité dynamique, la partie imaginaire $E_2 = |E^*|\sin\varphi_E$ est appelée module de perte.

Le coefficient de Poisson complexe est calculé par l'équation Eq. 1-19

$$\nu^* = -\frac{\varepsilon_r^*(t)}{\varepsilon^*(t)} = -\frac{\varepsilon_{r0} e^{i(\omega t + \pi + \varphi_v)}}{\varepsilon_0 e^{i\omega t}} = -\frac{\varepsilon_{r0}}{\varepsilon_0} e^{i(\pi + \varphi_v)} = |\nu^*| e^{i\varphi_v} = \nu_1 + i\nu_2 \qquad \text{Eq. 1-19}$$

Dans la littérature, le coefficient de Poisson complexe est généralement considéré comme réel et il est pris égal à 0,35 pour les enrobés bitumineux dans le dimensionnement des chaussées (LCPC & SETRA, 1994). Cependant, les études récentes ((Nguyen, 2009), (Tapsoba, 2012), (Pham, 2014), (Ramirez Cardona, 2016), (Phan, 2016), (Pedraza, 2018)) ont montré que, comme le module, le coefficient de Poisson d'un enrobé bitumineux est de nature complexe et varie entre 0,2 à 0,5 avec la fréquence et la température.

1.3.2.2.3. Principe de superposition temps-température (PSTT)

Dans l'hypothèse que le comportement d'un matériau non - vieillissant est viscoélastique linéaire, son module complexe E* est une fonction des deux variables indépendantes : fréquence f (ou

pulsation ω) et température (T). Dans un essai de module complexe, pour plusieurs couples (f, T) différentes, on peut obtenir une même valeur de module, i.e. (Eq. 1-20)

$$E^*(f_1, T_1) = E^*(f_2, T_2) \quad \text{avec } (f_1, T_1) \neq (f_2, T_2) \qquad \text{Eq. 1-20}$$

Cette propriété est appelée principe de superposition temps température (PSTT)((William, et al., 1955) (John, 1980)). Lorsque le matériau obéit au PSTT, les points expérimentaux de l'essai de module complexe permettent de définir une courbe unique dans le plan Cole-Cole ou dans l'espace de Black ((Di Benedetto & Corté, 2005), (Nguyen, et al., 2009)).

L'utilisation de l'équivalence fréquence température permet de réécrire la variation du module à une seule variable comme dans l'équation Eq. 1-21 :

$$E^*(f, T) = E^*\big(f \times h(T)\big) = E^*(g(f) \times T) \qquad \text{Eq. 1-21}$$

avec $h(T)$ et $g(f)$ sont les valeurs caractéristiques correspondantes respectivement à température T et à fréquence f. On peut aussi réécrire l'équation Eq. 1-21 comme suivante :

$$E^*\big(f_1 \times h(T_1)\big) = E^*\big(f_2 \times h(T_2)\big) \quad \text{avec } f_1 \times h(T_1) = f_2 \times h(T_2) \qquad \text{Eq. 1-22}$$

Il est possible, en appliquant cette propriété, de construire une courbe unique dans le plan (log|E*|, log(f)) (ou dans le plan (φ_{E^*}, log(f))) pour une température de référence T_R choisie arbitrairement. La courbe obtenue est appelée courbe maîtresse. Elle permet d'obtenir des valeurs de module (ou d'angle de phase) pour des fréquences inaccessibles par l'expérimentation. Cette courbe est construite par translation parallèle à l'axe des abscisses (en logarithme) de chaque isotherme T par rapport à l'isotherme T_R en utilisant un coefficient de translation a_T (cf. Figure 1-19). Pour une couple de (T, T_R) déterminée, ce coefficient est unique et calculé par l'équation suivante :

$$a_T = \frac{h(T)}{h(T_R)} \text{ et } a_{T_R} = 1 \qquad \text{Eq. 1-23}$$

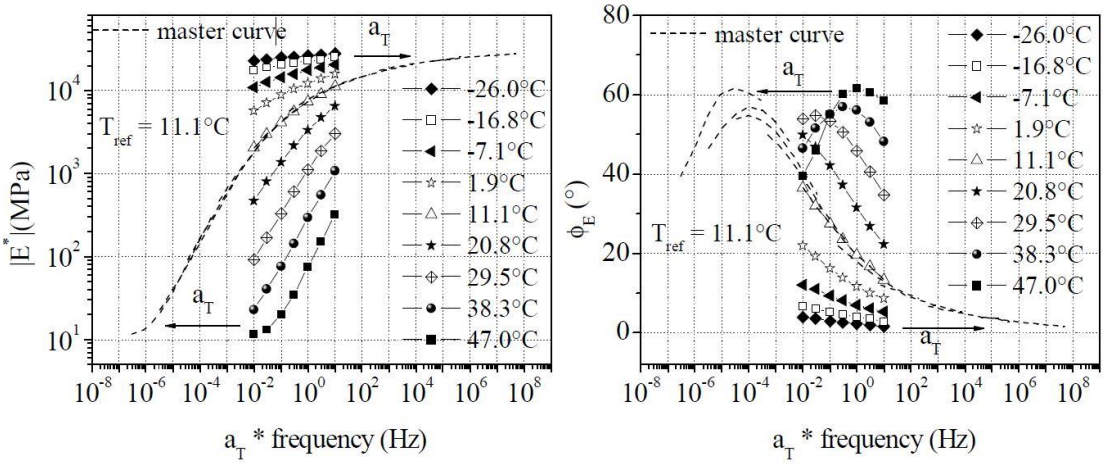


Figure 1-19. Construction des courbes maîtresses d'un enrobé par la méthode des translations à la température de référence T_R = 11.1°C. À gauche : norme de E* ; à droite : angle de phase de E* (Nguyen, 2011)

Les valeurs du coefficient de translation a_T peuvent être tracées en fonction de la température (Figure 1-20). Pour les matériaux bitumineux, la formule analytique la plus utilisée pour le calcul de translation $\log(a_T)$ par rapport à la température de référence T_R est la formule de Williams, Landel et Ferry (WLF) (William, et al., 1955) :

$$log(a_T) = \frac{-C_1(T - T_R)}{(T - T_R) + C_2} \qquad \text{Eq. 1-24}$$

où C_1, C_2 sont des constantes déterminées à partir des résultats d'essai et dépendant du choix de la température de référence (T_R).

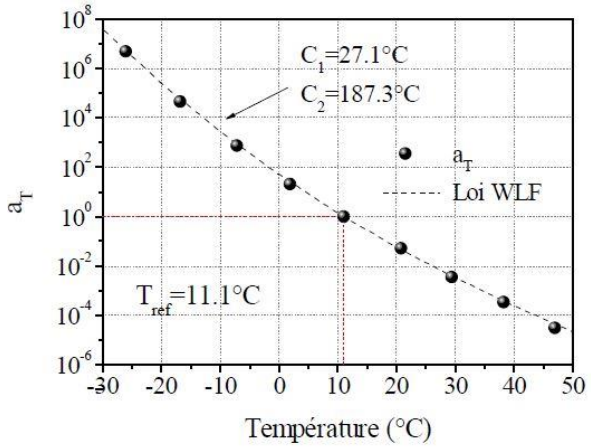


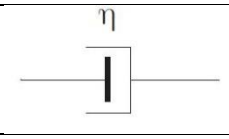
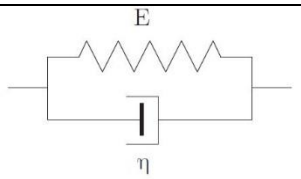
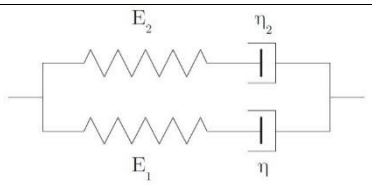
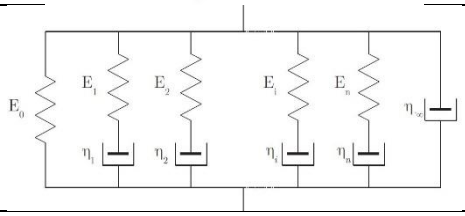
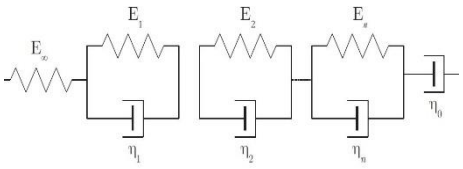
Figure 1-20. Evolution du coefficient de translation a_T en fonction de la température (même essai que celui dans la Figure 1-19). T_R = 11.1°C. Valeurs C_1, C_2 obtenues par la loi WLF (Nguyen, 2011)

1.3.2.3. Modélisation du comportement VEL à l'aide des modèles rhéologiques

1.3.2.3.1. Assemblages discrets de ressorts et d'amortisseurs – spectre discret

La modélisation du comportement VEL est possible en combinant des ressorts (éléments élastiques) et des amortisseurs linéaires (éléments visqueux Newtonien). Le Tableau 1-3 résume les différents types d'assemblages discrets de ressorts et d'amortisseurs pour décrire le comportement VEL des enrobés bitumineux.

Tableau 1-3. Principaux modèles à assemblages discrets de ressorts et d'amortisseurs

Nom du modèle	Schéma	Fonctions	Module complexe
Ressort (Elément élastique linéaire)		$F(t) = \frac{1}{E}$ $R(t) = E$	Module de rigidité $E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon}$
Amortisseur (Elément visqueux linéaire)		$F(t) = \frac{t}{\eta}$ $R(t) = \eta\delta(t)$	$E^* = i\omega\eta$
Maxwell		$F(t) = \frac{1}{E} + \frac{t}{\eta}$ $R(t) = Ee^{-\frac{t}{\tau}}$	$E^* = E\frac{i\omega\tau}{1+i\omega\tau}$
Kelvin-Voigt		$F(t) = \frac{1}{E}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$ $R(t) = E + \eta\delta$	$E^* = E + i\omega\eta$
Burgers		$R(t) = E_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + E_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}}$	$E^* = \frac{E_1}{1+(i\omega\tau_1)^{-1}} + \frac{E_2}{1+(i\omega\tau_2)^{-1}}$
Maxwell généralisé		$R(t) = E_0 + \eta_\infty\delta(t) + \sum_{i=1}^{n} E_i e^{-\frac{t}{\tau_i}}$	$E^* = E_0 + i\omega\eta_\infty + \sum_{i=1}^{n} E\frac{i\omega\tau_i}{1+i\omega\tau_i}$
Kelvin-Voigt généralisé		$F(t) = \frac{1}{E_\infty} + \frac{t}{\eta_0} + \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{E_i}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}\right)$	$E^* = \left(\frac{1}{E_\infty} + \frac{1}{i\omega\eta_0} + \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{E_i(1+i\omega\eta_i)}\right)^{-1}$

où :

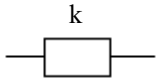
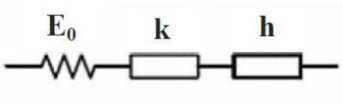
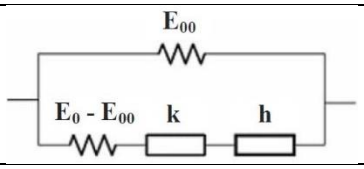
$F(t), R(t), \delta(t)$: respectivement la fonction de fluage, de relaxation et de Dirac
i : nombre complexe défini par $i^2 = -1$,
ω : la pulsation
E_i : la rigidité de i^{ème} ressort
η_i : la viscosité de i^{ème} amortisseur
$\tau_i = \frac{\eta_i}{E_i}$: le i^{ème} temps caractéristique.

1.3.2.3.2. Assemblages à spectres continus

Les modèles analogiques à spectres discrets tels que le modèle Maxwell généralisé et le Kelvin-Voigt généralisé permettent de décrire tout type de comportement viscoélastique linéaire lorsque le nombre d'éléments tend vers l'infini. Toutefois, la modélisation devient lourde et fastidieuse. (Huet, 1963) a proposé un modèle à spectre continu. Le modèle d'Huet est un modèle analogique à 3 éléments qui associe en série un ressort de raideur E_0 et deux éléments paraboliques. Bien que ce modèle permette

une bonne modélisation des résultats de modules complexes dans le plan Cole-Cole, sa précision laisse à désirer pour les faibles modules (hautes températures et/ou basses fréquences). Pour pallier à cela, (Sayegh, 1965) a adapté le modèle de Huet en y ajoutant un élément ressort de très faible rigidité (E_∞) en parallèle à la série d'éléments proposés par Huet.

Tableau 1-4. Modèles à spectre continu

Modèle	Schéma	Fonction	Module complexe
Élément parabolique		$F(t) = \zeta\left(\frac{t}{\tau}\right)^k$ $R(t) = \frac{i\omega(\tau)^k}{\zeta}$	$E^*(i\omega) = \frac{(i\omega\tau)^k}{\zeta\Gamma(k+1)}$
Modèle d'Huet		$F(t) = \frac{1}{E_0}\left(1 + \zeta\frac{(t/\tau)^k}{\Gamma(k+1)} + \frac{(t/\tau)^h}{\Gamma(h+1)}\right)$	$E^*(i\omega) = \frac{E_0}{1+\zeta(i\omega\tau)^{-k}+(i\omega\tau)^{-h}}$
Modèle de Huet-Sayegh		$R(t) = \frac{E_0 - E_{00}}{1+\zeta i\omega\tau^k + i\omega\tau^h} + E_{00}$	$E^*(i\omega) = E_{00} + \frac{E_0 - E_{00}}{1+\zeta(i\omega\tau)^{-k}+(i\omega\tau)^{-h}}$

Où

E_0 : module vitreux (limite du module complexe) quand $\omega \to \infty$,
E_{00} : module statique quand $\omega \to 0$,
h, k : exposant des éléments paraboliques $1 > h > k > 0$,
ζ : constante sans dimension,
τ : temps caractéristique,
Γ : Fonction gamma $\Gamma(n) = \int_0^\infty t^{n-1}e^{-t}dt$ avec n>0.

1.3.2.3.3. Modèle 2S2P1D (2 Springs, 2 Parabolic elements, 1 Dashpot)

(Olard & Di Benedetto, 2003) a introduit le modèle 2S2P1D en généralisant le modèle de Huet-Sayegh. Un amortisseur linéaire est ajouté en série avec les éléments paraboliques pour prendre en compte le comportement purement visqueux (newtonien) des bitumes purs à haute température (basse fréquence). Le modèle 2S2P1D permet ainsi de modéliser le comportement viscoélastique linéaire de la plupart des matériaux bitumineux, du liant à l'enrobé bitumineux ((Olard & Di Benedetto, 2004), (Di Benedetto, et al., 2004), (Delaporte, et al., 2007), (Mangiafico, 2014), (Pham, et al., 2015)). Ce modèle est représenté dans la Figure 1-21.

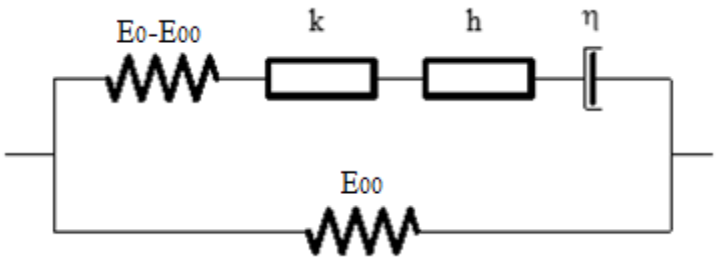


Figure 1-21. Représentation du modèle 2S2P1D (Olard & Di Benedetto, 2003)

Le module complexe et le coefficient de Poisson complexe du système s'expriment à partir des constantes du modèle sous la forme suivante :

$$E^* = E_{00} + \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}} \quad \text{Eq. 1-25}$$

$$\nu^* = \nu_{00} + \frac{\nu_0 - \nu_{00}}{1 + \delta(i\omega\tau_\nu)^{-k} + (i\omega\tau_\nu)^{-h} + (i\omega\beta\tau_\nu)^{-1}} \quad \text{Eq. 1-26}$$

Où

E_0, ν_0	: module vitreux et coefficient de Poisson vitreux quand $\omega \to \infty$
E_{00}, ν_{00}	: module statique et coefficient de Poisson vitreux quand $\omega \to 0$
$\eta = \beta\tau(E_0 - E_{00})$	: viscosité de l'amortisseur
h, k	: exposants des éléments paraboliques $1 > h > k > 0$
δ, β	: constantes sans dimension
τ et τ_ν	: temps caractéristiques du module complexe et du coefficient de Poisson complexe dont la valeur varie avec la température $\tau(T) = a_T\tau_0$ et $\tau_\nu(T) = a_T\tau_{0\nu}$
a_T	: coefficient de translation
τ_0 et $\tau_{0\nu}$	: temps caractéristiques du module complexe et du coefficient de Poisson complexe déterminés à la température de référence T_R

Seuls 10 paramètres $(E_{00}, E_0, \delta, k, h, \beta, \nu_{00}, \nu_0, \tau_0, \tau_{0\nu})$ sont alors nécessaires pour caractériser complètement les propriétés viscoélastiques linéaires tridimensionnelles (en tenant compte de l'hypothèse d'isotropie) du matériau à une température donnée. L'influence de ces paramètres sur le module complexe peut être représentée dans le plan de Cole-Cole comme dans la Figure 1-22.

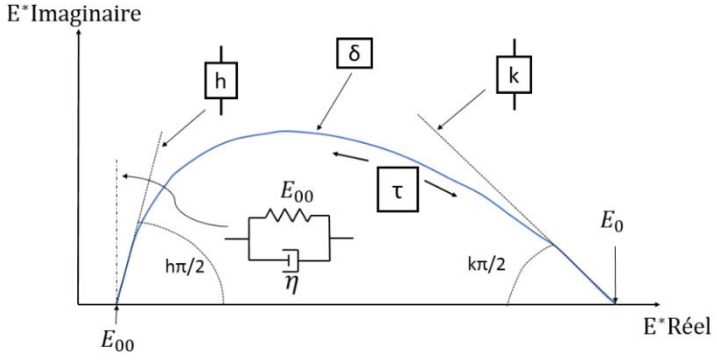


Figure 1-22. Influence des paramètres du 2S2P1D, sur la courbe Cole-Cole des enrobés bitumineux

1.3.3. Comportement à la fatigue

1.3.3.1. Introduction

Les enrobés bitumineux sont soumis, sur la route, à des sollicitations de courte durée à chaque passage d'un véhicule lourd (cf. Figure 1-23). Ainsi, la chaussée, qui se comporte comme un matériau rigide reposant sur un support déformable, est soumise à des efforts de flexion. Des contraintes de traction apparaissent alors à la base du revêtement et sont répétées à chaque passage de roues. Dans le cas de passage d'un grand nombre de véhicules, les fissures seront amorcées à la base de la chaussée due au phénomène de fatigue (Di Benedetto & Corté, 2005).

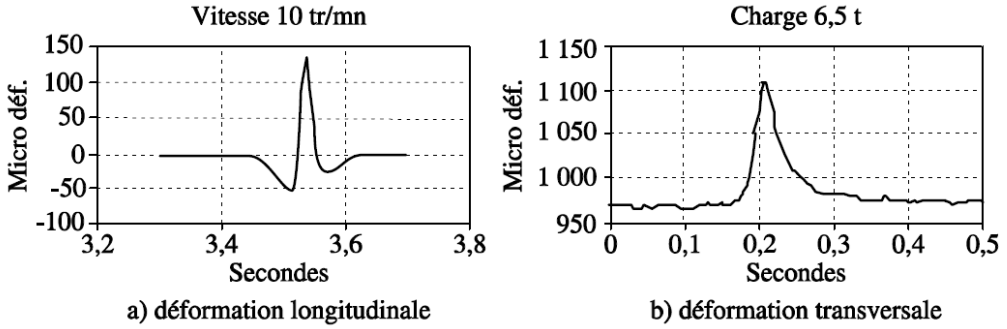


Figure 1-23. Allure des signaux des déformations longitudinale (a) et transversale (b) sous l'effet du passage d'un essieu simple (base de la couche bitumineuse, traction dans le sens positif) (Di Benedetto & Corté, 2005)

1.3.3.2. Caractérisation du comportement à la fatigue

Le phénomène de fatigue d'un matériau se caractérise par sa rupture après application répétée d'un grand nombre de sollicitations cycles) dont l'amplitude est inférieure à celle conduisant à la rupture au premier chargement.

L'essai classique, permettant de caractériser le phénomène de fatigue consiste à soumettre une éprouvette de matériau étudié à des sollicitations répétées et à noter le nombre de cycles (N) entraînant la rupture de l'éprouvette. La résistance à la fatigue pour N cycles de sollicitation est considérée comme la durée de vie de l'éprouvette testée.

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

$$\varepsilon = A.N^b \qquad \text{Eq. 1-27}$$

La courbe devient donc une droite en coordonnées logarithmiques (cf. Figure 1-24) . Le constante A et la pente b sont déterminés par une régression linéaire sur les résultats expérimentaux en logarithmes.

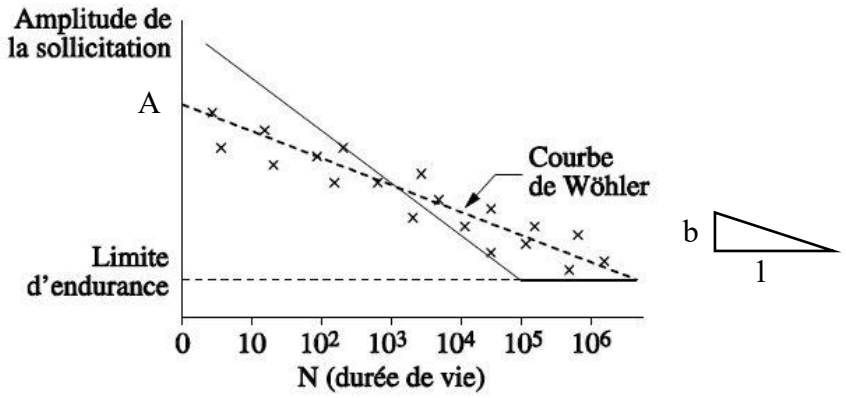


Figure 1-24. Courbe de Wöhler (Di Benedetto & Corté, 2005)

Pour certains matériaux, au-dessous d'un certain seuil de sollicitation, on peut appliquer la sollicitation un nombre infini de fois ou expérimentalement très grand, sans observer de rupture de l'éprouvette. Cette valeur limite de l'amplitude de sollicitation est appelée limite de fatigue ou limite d'endurance du matériau. Pour les matériaux bitumineux, aucune limite d'endurance ne semble avoir été mise en évidence à ce jour (Di Benedetto & Corté, 2005).

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

1.3.3.2.1. Types d'essais

Les essais de fatigue au laboratoire caractérisant la fatigue des enrobés bitumineux peuvent être regroupés en trois grands types:

- les essais de flexion (2, 3 et 4 points) ;
- les essais de traction-compression (directe et indirecte) ;
- les essais de cisaillement.

Les essais de flexion visent à représenter les efforts répétés de traction par flexion provoqués dans la chaussée par le passage de véhicules. Les essais de traction ont pour but de représenter directement les efforts de traction engendrés à la base de la chaussée par ces flexions. Enfin, les essais de cisaillement ont été mis au point pour prendre en compte les efforts de cisaillement engendrés dans les couches de surface.

Les différents types d'essais existant sont regroupés sur le schéma de la Figure 1-25.

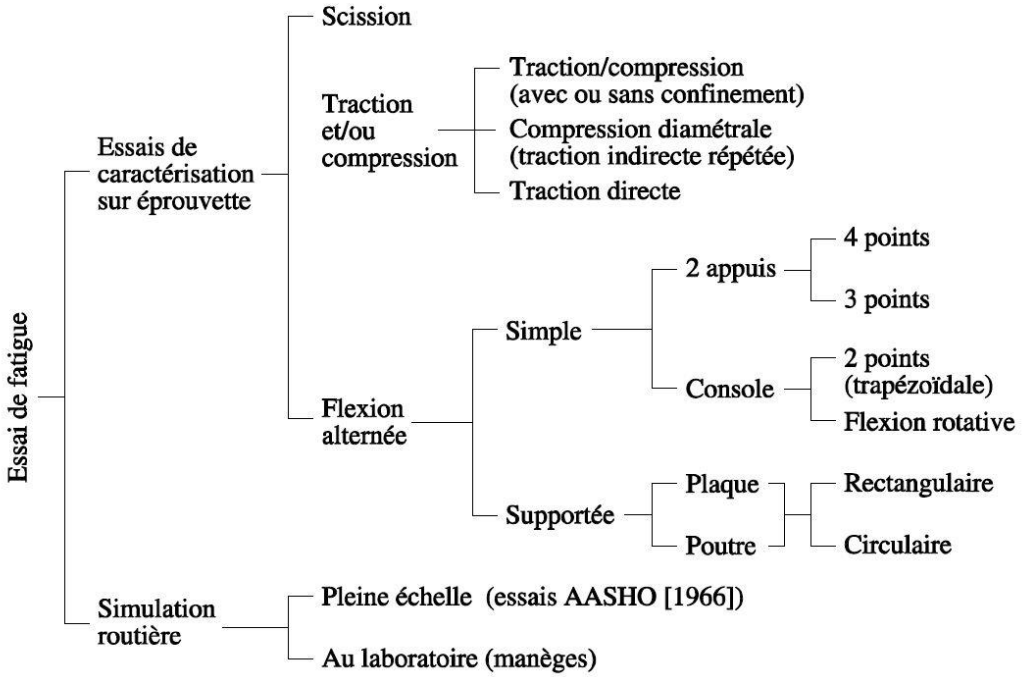


Figure 1-25. Les différents types d'essais de fatigue sur enrobés (Ashayer Soltani, 1998)

1.3.3.2.2. Types de chargement

L'essai de fatigue est généralement réalisé suivant deux modes de sollicitations :

1. Sollicitation en déplacement : le signal de sollicitation appliquée à l'éprouvette est un signal de déplacement avec une amplitude et une fréquence constantes. La force évolue au cours de l'essai. Si le champ de déformation de l'éprouvette est homogène, le mode de l'essai est alors à « *déformation imposée* » (la déformation est identique en chaque point de l'éprouvette).
2. Sollicitation en force : l'essai est piloté en force et ce sont l'amplitude et la fréquence de ce signal qui restent constantes pendant l'essai. Le déplacement évolue au cours de l'essai. Si le champ de contrainte dans l'éprouvette est homogène, le mode de l'essai est alors à « *contrainte imposée* » (la contrainte est identique en chaque point de l'éprouvette).

La plupart du temps, dans la littérature, les essais de fatigue sont abusivement dénommés « à contrainte imposée » ou « à déformation imposée » même dans le cas d'essais non homogènes.

La Figure 1-26 résume les types de chargement envisageables lors des essais de fatigue. Il est à noter que le chemin (d) introduit des déformations permanentes qui masquent la fatigue. La rupture est atteinte par l'accumulation des déformations permanentes et non par le phénomène de fatigue du matériau.

En réalité, les sollicitations appliquées aux chaussées dépendent de l'épaisseur des couches et de leurs rigidités relatives. Selon (Doan, 1977) (tiré depuis (Di Benedetto & Corté, 2005), on considère que :

- une chaussée mince (< 6cm) est sollicitée à déformation constante ;
- une chaussée bitumineuse épaisse (> 15cm) est sollicitée à contrainte constante ;
- une chaussée d'épaisseur moyenne est sollicitée selon un mode intermédiaire.

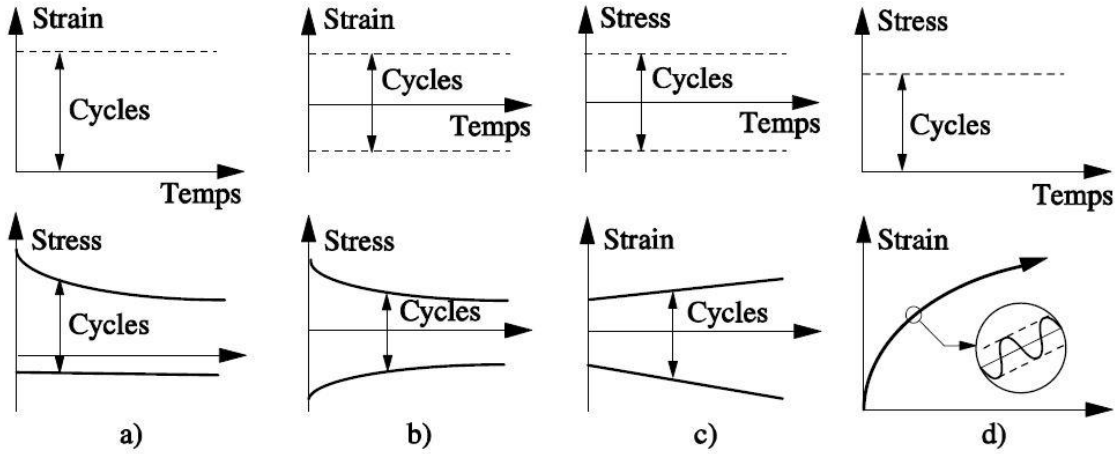


Figure 1-26. Chemins de sollicitation possibles (en haut) et courbes enveloppes des cycles de réponse obtenus (en bas) en déformation imposée (a & b) et contrainte imposée (c & d) (Di Benedetto & Corté, 2005)

1.3.3.2.3. Evolution du module de rigidité durant l'essai de fatigue en traction-compression

Selon (Olard, 2003), l'essai de fatigue en traction-compression présente moins de dispersion et fourni également l'accès direct aux propriétés intrinsèques du matériau tels que : module complexe (E*) et son angle de phase (φ_E). Ces avantages permettent de réduire le nombre de tests pour un même niveau de sollicitation, donc diminuer le temps et le coût de la caractérisation de fatigue.

Dans un essai de fatigue, quelle que soit la sollicitation imposée, on distingue trois phases dans l'évolution du module de rigidité en fonction du temps ou de nombre de cycles de chargement :

- Phase I (phase d'adaptation), est marquée par une chute rapide du module à vitesse décroissante au début de l'essai. Cette décroissance n'est pas considérée exclusivement comme de la fatigue. Les effets biaisants jouent des rôles importants. La perte de module liée à ces phénomènes est quasiment réversible lorsque l'essai de fatigue est arrêté.
- Phase II (phase quasi-stationnaire), est caractérisée par une décroissance du module plus modérée et quasi linéaire. Le rôle de la fatigue sur la chute de module est alors prédominant. Bien que l'influence des phénomènes biaisant soit faible pendant cette phase, ils doivent être considérés.
- Phase III (phase de rupture), le module présente une diminution accélérée liée à une concentration brutale des contraintes dans le voisinage des zones endommagées. Durant cette phase, le développement rapide des fissures est important. L'apparition de macro-fissures par accumulation des micro-fissures lors des phases I et II mène à la rupture de l'éprouvette. Dans cette phase, les contraintes et les déformations ne sont plus homogènes au sein de l'éprouvette et l'analyse en terme de milieux continus ne vérifie plus les hypothèses de son cadre d'application.

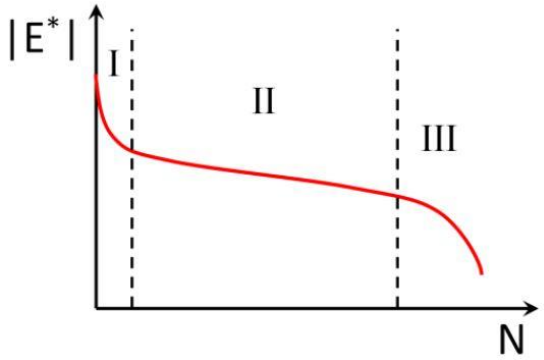


Figure 1-27. Distinction des trois phases dans un essai de fatigue (adapté de (Di Benedetto, et al., 2004))

La Figure 1-27 représente l'évolution type de la norme du module complexe |E*| en fonction du nombre de cycles dans un essai de fatigue.

1.3.3.3. Critères de fatigue

La fatigue des enrobés bitumineux est déterminée, non seulement par la rupture physique des éprouvettes, mais aussi par des critères de fatigue basés sur les valeurs mesurées au cours de l'essai. On peut classer ces critères en deux grands types: (1) Critères basées sur les mesures globales et, (2) Critères basées sur les mesures locales. On présente dans la suite la description détaillée des critères de fatigue utilisées dans cette thèse.

1.3.3.3.1. Critères sur les mesures globales

a) Critère classique: $N_{f\text{-}50\%}$

C'est le critère le plus simple pour déterminer la durée de vie en fatigue du matériau testé. Il est détaillé dans la Norme européenne (NF EN 12697-24, 2012) pour les enrobés bitumineux. Il consiste à déterminer le nombre de cycles où la norme de module complexe de l'éprouvette testée réduit de 50% par rapport à sa valeur initiale $|E_0^*|$(cf. Figure 1-28).

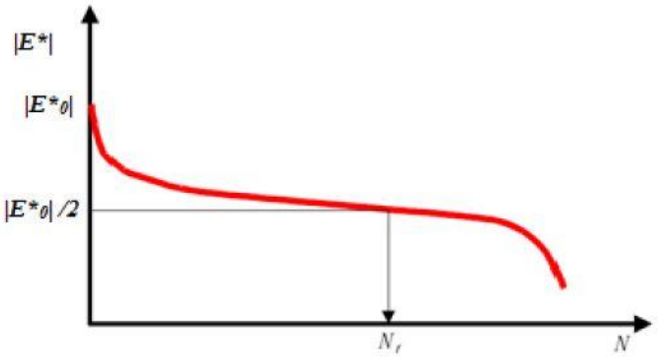


Figure 1-28. Définition du critère classique de fatigue et détermination de la durée de vie $N_{f\text{-}50\%}$

Pour les essais à force constante, la rupture se produit très rapidement après l'initiation de la fissuration dans le matériau car la phase de propagation de fissures dans l'éprouvette est très rapide. Par contre, dans les essais à déplacement imposé, l'initiation de la fissuration est suivie par une longue phase de propagation. (Di Benedetto, et al., 2004) ont montré qu'il n'y a pas de corrélation entre les $N_{f\text{-}50\%}$ de deux modes de sollicitation.

Malgré les limitations et faiblesses de l'approche classique, ce critère est encore très utilisé. La durée de vie déterminée avec ce critère est ensuite utilisée pour le dimensionnement des chaussées en France.

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

Ce critère est basé sur le changement de concavité de la courbe de fatigue (|E*| vs N) (cf. Figure 1-29). Ce point marque la fin de la deuxième phase du test de fatigue où les macro-fissures apparaissent. A partir de ce point, les champs de déformation et de contrainte ne sont plus homogènes et l'éprouvette est considérée comme fatiguée. Le nombre de cycles de ce moment correspond $N_{f\text{-}Co}$.

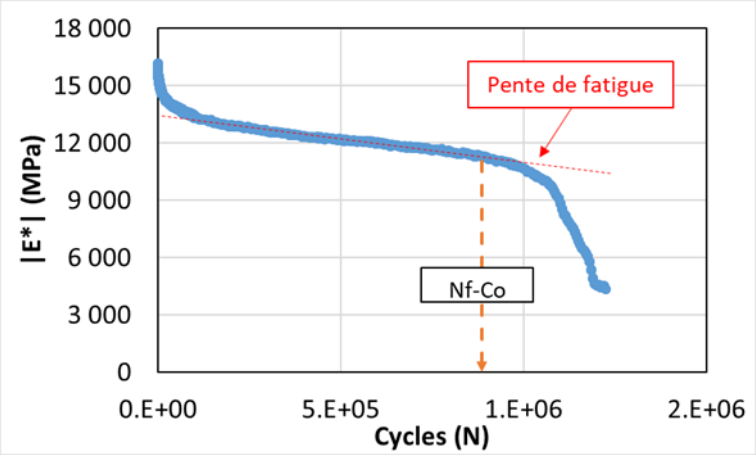


Figure 1-29. Evolution de module complexe durant l'essai de fatigue et critère de fatigue $N_{f\text{-}Co}$ (Test - SG3B1(5.7)0FT)

c) Critère basé sur l'angle de phase $N_{f\text{-}\varphi max}$

Ce critère, proposé par (Kim, et al., 2003) et utilisé dans les travaux de (Mangiafico, 2014) (Ramirez Cardona, 2016), consiste à identifier deux points d'inflexion sur la courbe |E*|-N. Le deuxième point d'inflexion (SIP – Second Inflexion Point) correspond à la valeur maximale de l'angle de phase du module complexe (cf. Figure 1-30). Il est lié étroitement à un changement du comportement mécanique du matériau, en raison de l'accumulation de dommages par fatigue. Pour cette raison, le nombre de cycles correspondant au SIP est considéré comme la durée de vie en fatigue $N_{f\text{-}\varphi max}$.

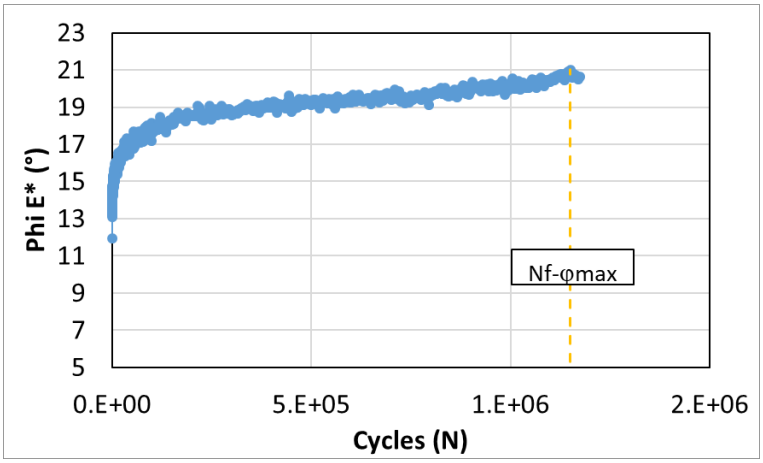


Figure 1-30. Evolution de l'angle de phase du module complexe durant l'essai de fatigue et critère de fatigue $N_{f\text{-}\varphi max}$ (Test - SG3B1(5.7)0FT)

1.3.3.3.2. Critères sur les mesures locales

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

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

Le premier considère les écarts relative ($\Delta\varepsilon_i$) (cf. Eq. 1-28) entre l'amplitude de déformation d'un l'extensomètre (ε_i) au cycle considéré et sa valeur initiale (ε_{i0}) au cycle 60ème. Lorsqu'un des extensomètres présente une valeur $\Delta\varepsilon_i$ supérieure à 25% (en valeur absolue), le champ de déformation est considéré comme hétérogène et la rupture de l'éprouvette atteint. Le nombre de cycles de ce moment correspond $N_{f\text{-}\Delta\varepsilon i}$ (cf. Figure 1-31) .

$$\Delta_{\varepsilon i} = \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i0}}{\varepsilon_{i0}} \qquad \text{Eq. 1-28}$$

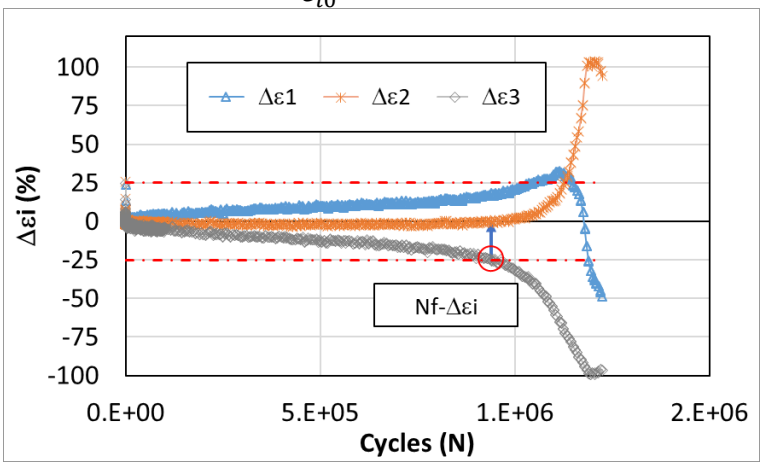


Figure 1-31. Critère basé sur les valeurs $|\Delta\varepsilon i| \geq 25\%$ (Test - SG3B1(5.7)0FT)

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

Ce critère tient en compte de l'évolution de l'angle de phase du signal de déformation de chaque extensomètre. Quand la différence ($\Delta\varphi_i$) (cf. Eq. 1-29) entre l'angle de phase mesurée par extensomètre (φ_i) et celle de la déformation moyenne (φ) est supérieure à 5 ° (en valeur absolue), la rupture de l'éprouvette atteint. Le nombre de cycles de ce moment correspond $N_{f\text{-}\Delta\varphi}$ (cf. Figure 1-32).

$$\Delta_{\varphi i} = \varphi_i - \varphi$$ Eq. 1-29

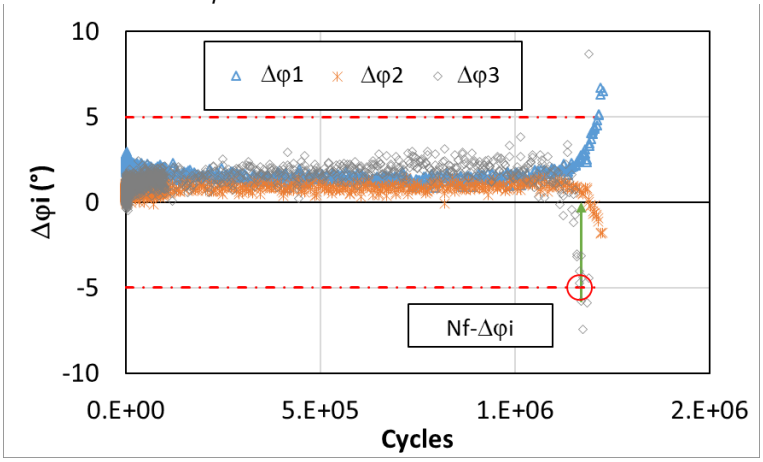


Figure 1-32. Critère basé sur les valeurs |Δφi| ≥ 5° (Test - SG3B1(5.7)0FT)

1.3.3.4. Phénomènes biaisants au cours de l'essai de fatigue

Au cours de l'essai de fatigue, la rigidité de l'éprouvette diminue avec le nombre de cycles. Plusieurs phénomènes autre que la fatigue (l'endommagement) se manifestent et exercent des influences significatives sur la chute du module du matériau. Lorsque les effets de ces phénomènes sont importants, la rupture de l'éprouvette à la fin de l'essai ne peut pas être expliquée par le seul endommagement. Dans ce paragraphe, quelques phénomènes sont présentés.

1.3.3.4.1. Echauffement

Lors des cycles de fatigue, l'énergie de déformation injectée dans le matériau est dissipée, principalement sous forme de chaleur, du fait de l'existence d'une composante visqueuse dans le comportement mécanique des matériaux bitumineux ((Ashayer Soltani, 1998), (Di Benedetto, et al., 2004), (Di Benedetto, et al., 2011)). L'effet de ce phénomène entraine l'augmentation de la température de l'éprouvette testée et manifeste par une perte de raideur de l'éprouvette qui n'est pas en lien avec la fatigue.

1.3.3.4.2. Thixotropie

La thixotropie est la propriété réversible que possèdent certains matériaux qui se fluidifient lorsqu'ils sont soumis à une sollicitation mécanique. Les matériaux bitumineux semblent présenter cette particularité: sous l'effet du chargement, un réarrangement de la structure du matériau semble se produire principalement au début de l'essai, d'où une chute de la rigidité de l'éprouvette, qui n'est pas due à la fatigue. Quelques publications font référence à cette propriété des matériaux bitumineux ((Di Benedetto & Des Croix, 1996), (Ashayer Soltani & Anderson, 2005), (Di Benedetto, et al., 2011)). Ashayer Soltani et Anderson ont observé sur l'enrobé bitumineux que les phénomènes non liés à la fatigue dominent pendant 300 000 cycles d'un test de fatigue à 10Hz et à 10°C et la majorité de la chute de module est due à la thixotropie.

1.3.3.4.3. Non linéarité

Lors de la plupart des essais de fatigue effectués sur enrobés ou liants bitumineux, les amplitudes des sollicitations appliquées sont en dehors du domaine de linéarité des matériaux. Leur comportement est donc généralement non linéaire, ce qui a une influence sur leur réponse qui n'est pas directement liée au phénomène de fatigue. Cela est notamment évoqué dans les travaux de ((Di Benedetto & Des Croix, 1996), (Di Benedetto, et al., 2011), (Nguyen, 2011), (Mangiafico, et al., 2017), (Babadopulos, et al., 2019)). Ces derniers démontrent que l'effet des non linéarités est spécifique et ne peut

s'assimiler à un changement de température ou de fréquence en traçant les mesures de module effectués par un balayage d'amplitude dans l'espace de Black où figure la courbe maîtresse du matériau considéré. Ils montrent en revanche, que l'effet des non linéarités est identique à celui de l'accumulation des cycles et que la phase I des essais de fatigue, représenté dans le même espace est parallèle à la courbe issue du balayage d'amplitude, ce qui atteste de l'influence des non linéarités pendant les essais de fatigue.

1.3.4. Comportement à basse température avec l'essai du retrait thermique empêché (TSRST)

1.3.4.1. Introduction

L'enrobé bitumineux est un matériau très sensible à la température. Lorsqu'il est soumis à une variation de température, il subit des déformations thermiques. Si celle-ci sont empêchées, les variations de température entrainent des contraintes appelées contraintes thermiques.

Les chaussées soumises à un gradient thermique sont un exemple où les déformations sont restreintes. En moyennes températures, les enrobés sont des corps viscoélastiques. Lorsque la température augmente les contraintes thermiques créées, qui sont des contraintes de compression, se dissipent par relaxation. A basse température, l'enrobé se comporte comme un corps élastique rigide. Lorsque la température baisse, des contraintes de tension se créent sans pouvoir se dissiper. Lorsque ces contraintes atteignent la limite de résistance du matériau, des fissures apparaissent (cf. Figure 1-33). En France, la température en hiver à moins -10°C apparait fréquemment. Cela peut causer des endommages significatifs, tels que des fissures transversales ou des bris apparaissant en surface des chaussées (cf. Figure 1-34).

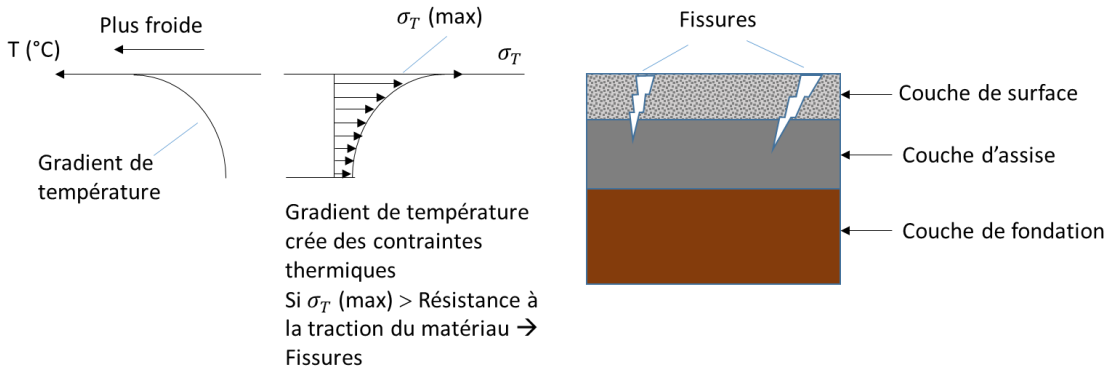


Figure 1-33. Section transversale des chaussées subie une température négative, avec gradients de contrainte thermique et de température (adapté de (Jung & Vinson, 1994))



Figure 1-34. La fissuration s'accentue et d'autres fissures apparaissent en surface (MTQ, 2008)

1.3.4.2. Caractérisation du comportement à basse température avec l'essai TSRST

L'essai de retrait thermique empêché (Thermal Stress Restrained Specimen Test - TSRST) est un essai mettant en jeu un couplage thermique et mécanique. L'intérêt d'un tel essai s'explique par la similitude entre les sollicitations appliquées et celles qui sont à l'origine de la fissuration apparaissant à basse température dans chaussée. Ce type de fissuration qui est transversale, s'observe très fréquemment dans les régions à hivers rigoureux.

Il consiste à appliquer une diminution de température à une éprouvette dont la hauteur est maintenue constante. Comme la contraction thermique est empêchée, une contrainte de traction se développe. Lorsque la limite de résistance en traction du matériau est atteinte, une rupture se produit (Di Benedetto & Corté, 2005).

La vitesse de variation de la température doit être faible pour éviter les gradients trop importants au sein de l'éprouvette. Les vitesses choisies sont, en général, égales ou inférieures à -10 °C par heure. Cette limite supérieure est en général plus élevée que les valeurs observées sur chaussées.

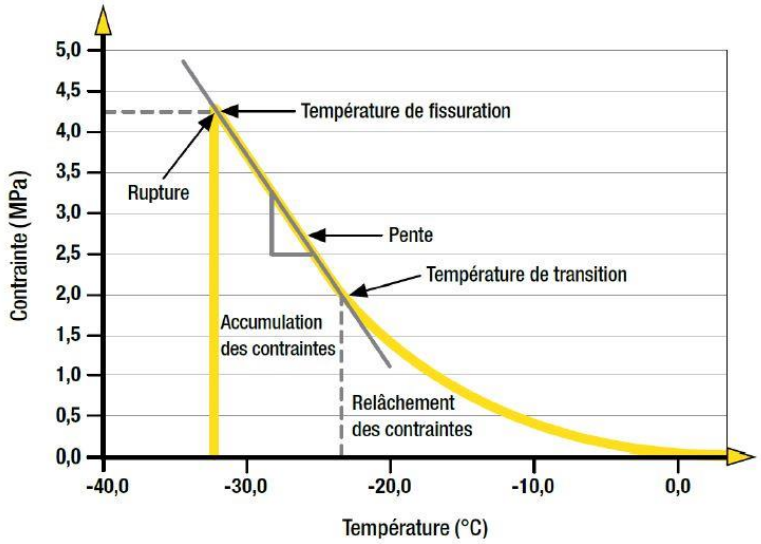


Figure 1-35. Contrainte induite par le retrait thermique empêché en fonction de la température ((Pedraza, 2018) adapté de (Di Benedetto & Corté, 2005))

La Figure 1-35 présente un exemple de résultats obtenus lors d'un essai TSRST. Les paramètres les plus couramment déduits de cet essai sont :

- la température de rupture,
- la contrainte de rupture,
- la pente d'évolution de la contrainte en phase linéaire
- la température de transition qui délimite une zone linéaire à basse température.

L'essai de retrait thermique empêché est parfois associé à des essais de traction réalisés à température et vitesse de déformation axiale constantes. Des études (Olard, 2003) ont montré que l'on retrouve approximativement la même valeur pour la contrainte de rupture, à condition que la vitesse de déformation imposée dans l'essai de traction compatible avec celle de retrait thermique empêché (cf. Figure 1-36). Par exemple, pour un essai de retrait thermique empêché réalisé à une vitesse de –10°C/h sur un enrobé ayant un coefficient de dilatation thermique de 30.10^{-6}/°C, il convient d'appliquer une vitesse de déformation axiale de 30.10^{-5} par heure dans l'essai de traction.

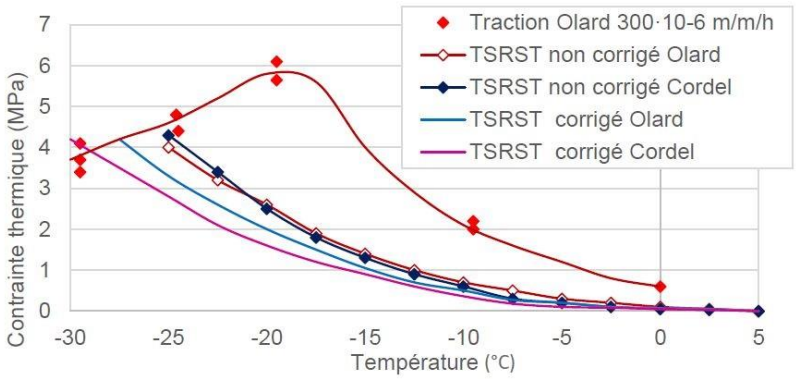


Figure 1-36. Comparaison entre les essais de traction et TSRST sur l'enrobé au liant 50/70 (Olard, 2003)

1.4. Influence des phénomènes climatiques sur les comportements des matériaux bitumineux

1.4.1. Introduction : Positionnement du problème

Les conditions climatiques peuvent avoir des effets néfastes sur le comportement des matériaux bitumineux. Par exemple, la présence d'eau peut diminuer fortement la résistance et la durée de vie des revêtements bitumineux du fait de la perte d'adhésivité et de cohésion au sein des matériaux. Ces dégradations sont parfois accélérées par l'effet du vieillissement et des cycles de gel/dégel.

Différents essais ont été développés afin d'évaluer l'aptitude des matériaux bitumineux à résister à ce type de dégradations. Après différents conditionnements, les matériaux sont testés, par exemple, en utilisant l'essai Marshall, l'essai de Lottman, l'essai Duriez etc. qui utilisent la traction indirecte ou la compression simple. Ces essais sont uniquement relatifs à la rupture en sollicitation monotone tandis que les comportements viscoélastiques et celui à la fatigue sont peu testés pour évaluer leur évolution avec ce type de dégradations. C'est la raison pour laquelle les évolutions des différents types de comportements des matériaux bitumineux sous les effets de l'eau, des cycles de GD et du vieillissement sont encore peu connues (Figure 1-37).

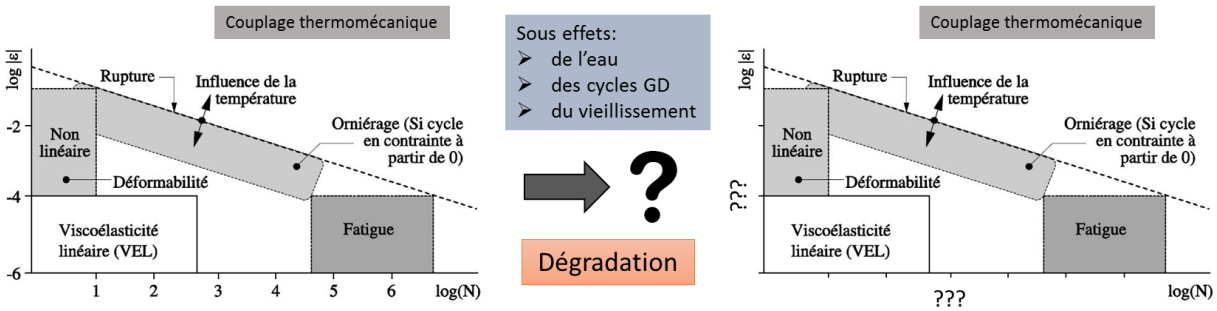


Figure 1-37. Question: comment les effets étudiés influencent-ils les différents types de comportements des enrobés bitumineux ?

Une revue bibliographique est présentée dans les parties suivantes afin de clarifier, l'influence des effets étudiés sur les comportements mécaniques des enrobés bitumineux.

1.4.2. Micro-mécanismes expliquant les détériorations observées

Cette section a pour but de présenter des mécanismes expliquant les détériorations des enrobés bitumineux en présence d'eau (avec ou sans période de gel) et dues au vieillissement.

1.4.2.1. Mécanismes de dégradation en présence d'eau

La dégradation en présence d'eau des enrobés bitumineux a été étudiée depuis les années 1920 (Solaimanian, et al., 2003). Selon (Mehrara & Khodaii, 2013), (Kakar, et al., 2015), il y a deux grands mécanismes expliquant les dégradations des revêtements bitumineux: (a) la perte d'adhésivité entre le bitume et les granulats ; (b) la perte de cohésion au sein des composants.

a) Mécanismes de perte d'adhésivité

L'adhésivité caractérise la capacité collante du bitume aux granulats. 4 phénomènes complémentaires, à l'origine des 4 théories présentées ci-dessous, sont avancés pour expliquer l'adhésion entre le bitume et les granulats :

- Théorie mécanique : L'adhésion d'un bitume à un granulat est premièrement créée par une interaction de nature mécanique : liaison mécanique du bitume qui s'insère dans le relief du granulat. Elle dépend fortement des caractéristiques physiques des granulats.
- Théorie chimique : Une réaction chimique se produit entre les fractions du bitume adsorbé par le granulat et les constituants du granulat. Le bitume possédant des composants plutôt à caractère acide (par exemple, on note la présence d'acides naphténiques), il se lie chimiquement plus facilement avec des granulats de nature basique, donc à haute teneur en carbonate de calcium, tels que le marbre et le calcaire, plutôt qu'avec des granulats à caractère acide comme le quartz, le granite, les grès et les porphyres qui sont composés de silicates (Lamothe, 2014).
- Orientation moléculaire : Les molécules du bitume, notamment les groupes polaires, s'orientent de manière à satisfaire les besoins énergétiques de la surface du granulat. L'orientation des molécules est possible lorsque le bitume est chaud. La majorité des groupes fonctionnels du bitume sont composés de charges négatives. En conséquent, l'orientation des molécules entre les composants est favorisée lorsque des granulats chargés positivement sont utilisés. Alors, l'interaction électrostatique entre les deux surfaces est générée par l'attraction des charges électriques opposées : forces de type polaires, liaisons hydrogène ou interactions de Van der Waals.
- Théorie thermodynamique : L'énergie de surface constitue le facteur prédominant au niveau de l'adhésivité. L'adhésivité résulte des forces intermoléculaires qui sont reliées à l'énergie libre de surface en présence des matériaux suivants : bitume, granulat, eau et air. Grâce à la comparaison entre l'énergie d'adhésion et l'énergie de cohésion des composants, on peut évaluer le mouillage du bitume sur les granulats qui joue un rôle essentiel à la performance de l'enrobé bitumineux (Corté & Di Benedetto, 2005).

En se basant sur ces théories, de nombreuses recherches ont été réalisées afin de mieux comprendre le phénomène de perte d'adhésivité des enrobés bitumineux en présence d'eau. Selon les revues bibliographies de (Bagampadde, et al., 2004), (Caro S., 2009), (Feng, et al., 2010), (Mehrara & Khodaii, 2013), (Lamothe, 2014), (Xu, et al., 2015), il existe différents mécanismes de dégradations, qui sont présentés dans le Tableau 1-5.

b) Mécanismes de perte de cohésion

La cohésion est définie comme l'ensemble des forces qui unissent les molécules d'un même corps. La perte de cohésion des enrobés bitumineux est associée à une détérioration au sein des composants. Deux niveaux de perte de cohésion ont été observés : au niveau du bitume ou du mastic qui est le plus fréquemment observé, et au niveau des granulats. Le Tableau 1-6 tiré de (Lamothe, 2014) résume les mécanismes de perte de cohésion observés.

Tableau 1-5. Mécanismes de dégradation par la perte d'adhésivité

Mécanisme	Phénomène	Causes
Décollement	Séparation microscopique du film de bitume de la surface du granulat par un film d'eau, sans dommage apparent au film de bitume.	- Granulat poussiéreux ; - Granulat qui n'a pas été suffisamment séché avant l'enrobage, l'eau dans les pores interstitiels se vaporise et condense à la surface du granulat emprisonné sous le film de bitume ; - Gradient de concentration de part et d'autre du film de bitume qui provoque le déplacement de l'eau vers la surface du granulat. Ce phénomène génère le désenrobage ; - Réaction chimique et électrostatique.
Déplacement	Perte du bitume de la surface des granulats par une rupture du film de bitume et/ou une séparation du granulat/mastic	- Enrobage incomplet lors du malaxage ; - Granulat très angulaire : usure ou film de bitume très mince aux arrêtes ; - Granulat très fragmenté après le compactage ; - Présence de poussières à la surface du granulat ; - Cycles de gel et dégel fréquents ; - Faible énergie de surface d'adhésivité ; - Composant chimique hydrophile du bitume ; - Composition minéralogique globale hydrophile ; - Incompatibilité entre le bitume et le granulat qui mène à la solubilité d'un composant par l'eau ; - pH élevé de l'eau.
Désorption	Lavage du liant ou mastic par un écoulement d'eau qui peut être accentué par le trafic.	- Perméabilité élevée de l'enrobé bitumineux ou du film de bitume ; - Passages de véhicules.
Émulsion spontanée	L'eau et le bitume se combinent pour former une émulsion inverse, le bitume forme la phase continue et l'eau la phase discontinue. Le mécanisme est réversible lorsque l'eau s'évapore, toutefois il peut s'amplifier avec le trafic et peut conduire au décollement total du film de bitume s'il atteint la surface du granulat.	- Immersion prolongée dans l'eau ; - Présence de certains produits anti-désenrobage ; - Composant chimique hydrophile du bitume ; - Présence de certains fillers minéraux ; - Présence de minéraux de carbonate hydrophile ; - Présence de particules argileuses ; - Faible énergie de cohésion à l'interface ; - pH élevé de l'eau, qui affecte l'angle de contact, le mouillage et la tension de l'interface bitume-eau, et ainsi, l'adhérence du couple bitume-granulat.

Tableau 1-6. Mécanismes de dégradation par la perte de cohésion

Mécanisme	Phénomène	Causes	Niveau
Vaporisation et succion	Lors d'un réchauffement, l'évaporation de l'eau (vapeur) contenue dans les vides semi-effectifs accélère la diffusion de l'eau au sein de la microstructure du bitume et lors du refroidissement, il peut y avoir une succion d'eau au sein des vides s'il y a présence d'un film d'eau à l'embouchure en raison de l'existence d'un gradient de pression.	- Présence d'eau au sein de l'enrobé ; - Température ou ensoleillement élevés et refroidissement de l'enrobé.	Bitume, mastic (N. Partl, et al., 2018)
Dispersion	Perte de cohésion du bitume ou du mastic en raison d'une exposition prolongée à l'eau et une perte de matériau en raison d'un mouvement d'eau généré par le passage des véhicules.	- Présence prolongée d'eau ; - Écoulement d'eau ; - Énergie faible de cohésion à l'interface ; - Composant chimique hydrophile du bitume ; - Bitume vieilli ; - Film mince de bitume.	
Pression dans les pores	Le déplacement de l'eau dans les vides interconnectés de la microstructure de l'enrobé et le développement d'une pression interstitielle élevée de l'eau au sein des vides isolés saturés générés par le passage d'un véhicule provoque la rupture du film de bitume ou la propagation de microfissures au sein du mastic. Ces dommages vont faciliter l'infiltration d'eau dans le mastic et à l'interface bitume-granulat et conduire au désenrobage et à la désintégration complète de l'enrobé.	Ségrégation entre deux couches ou teneur élevée en vides permettant l'infiltration et la circulation d'eau ; - Densification de l'enrobé par le trafic emprisonnant l'eau dans des vides isolés, alors que le matériau est saturé non drainé ; - Trafic mettant sous pression l'eau au sein des vides isolés, sollicitant le matériau en traction et le liant entre les granulats au point de les désenrober.	
Rupture du film de bitume, microfissures	Rupture du film de bitume, de mastic ou de granulats générant une perte d'intégrité structurelle de l'enrobé et générant ainsi de nouvelles voies d'accès pour le transport de l'humidité. Le mécanisme se produit usuellement là où les arêtes sont vives, où le film de bitume est mince et où il y a de la poussière sur le granulat.	La rupture peut être accentuée par les : - opérations de fabrication, de mise en œuvre et de compactage ; - passages de véhicules ; - cycles de gel et dégel.	
Solidification de l'eau	La solidification de l'eau contenue dans les pores de l'enrobé peut générer des contraintes de 1 à 3 MPa et ainsi fragiliser le film de bitume, le granulat ou l'enrobé. Cette fragilisation se produit essentiellement à l'interface granulat-bitume.	- Présence d'eau au sein de l'enrobé ; - Température froide générant la formation de glace.	Granulat
Solubilité	La perte de cohésion au sein du granulat due à la solubilité de certains composés.	pH < 6 et > 8 de l'eau est favorable à la dissolution, respectivement, de minéraux carbonatés et siliceux.	

1.4.2.2. Mécanismes du vieillissement

Les mécanismes du vieillissement se classent selon trois types : type physique, type chimique et type cinétique (Dony & Ziyani, 2016):

D'un point de vue physique, la manifestation la plus notable du vieillissement est le durcissement du liant. Celui-ci est dû à une restructuration physique moléculaire lors du refroidissement de l'enrobé après sa mise en œuvre. Le vieillissement physique est également dû à une modification de la composition générique du liant: la fraction en asphaltènes augmente et les fractions huileuses légères du liant sont perdues par volatilité ou adsorption. Enfin, les paraffines peuvent cristalliser.

D'un point du vue chimique, l'oxydation est provoquée par l'exposition à l'oxygène de l'air. Le processus d'oxydation peut être décrit à travers trois phénomènes. Le premier est la fragmentation, au cours de laquelle les molécules de bitume se séparent en plus petits fragments générant des sous-produits volatils tels que H_2O, CO_2 et CH_4 qui se vaporisent à la fin du processus. Le deuxième phénomène est l'ajout d'oxygène dans le bitume lors du refroidissement de l'enrobé. Le troisième phénomène est la formation de molécules plus dense et plus lourde, appelée la condensation ou la carbonisation. La perte de molécules volatiles et l'association de grandes molécules augmentent la viscosité du bitume ce qui explique son durcissement (Petersen, 1993). Les particules minérales ou bien les fillers dans le mastic peuvent aussi agir comme un catalyseur du processus de vieillissement du bitume (Das, 2014).

D'un point de vue cinétique, la vitesse de formation des carbonyles est régie selon une loi exponentielle d'Arrhenius dépendant de la température, de la pression et du type de liant. Les études en laboratoire de (Lau, et al., 1992) et (Petersen, et al., 1993) ont montré qu'initialement, la vitesse de formation est rapide, puis diminue au cours du temps et atteint une valeur constante.

1.4.3. Synthèse des résultats dans la littérature

De nombreuses recherches ont été réalisées pour étudier l'impact des effets de l'eau sur les enrobés bitumineux selon des protocoles différents qui peuvent être regroupés comme suit : (1) conditionnement avec l'eau, (2) conditionnement avec l'eau et sous des cycles de gel/dégel, (3) conditionnement sans eau et sous des cycles de gel/dégel. Dans les paragraphes suivants, nous décrivons, tout d'abord, certains protocoles de conditionnement. Puis nous présentons les résultats obtenus en soulignant les impacts de ces protocoles sur les grandes classes de comportement des enrobés bitumineux, tel que la résistance à la rupture, la fatigue, la viscoélasticité et le comportement sous couplage thermomécanique.

1.4.3.1. Conditionnement avec l'eau

Plusieurs essais permettant d'évaluer la sensibilité à l'eau des enrobés bitumineux ont été développés. Ils sont généralement classés en 2 groupes : les essais sur le mélange bitumineux foisonnés et les essais sur des éprouvettes compactées (Solaimanian, et al., 2003). Malgré la diversité de ces essais, le conditionnement avec l'eau utilise principalement deux méthodes, soit l'éprouvette est immergée simplement dans l'eau, soit elle est saturée dans l'eau sous vide.

Le Tableau 1-7 présente des essais utilisant l'immersion directe dans l'eau.

Tableau 1-7. Essais avec l'immersion dans l'eau

Type d'échantillon	Essai	Conditionnement des éprouvettes	Paramètre obtenu
Mélange d'enrobé (Solaimanian, et al., 2003) (Bagampadde, et al., 2004)	Static immersion test	Mettre le mélange à 60°C pendant 2h et laisser refroidir à température ambiante ; puis immerger dans l'eau à 25°C pendant 16h à 18h	Pourcentage de la surface des agrégats encore revêtue par le bitume, estimé visuellement (ou à l'aide de photographies)
	Dynamic immersion test	Similaire au test précédent en ajoutant une agitation durant 4 heures quand le mélange est immergé dans l'eau	
	Texas boiling test	Immerger le mélange 10min dans l'eau bouillante	
	Rolling bottle test	Agiter le mélange dans une bouteille d'eau à la température ambiante	
Eprouvette compactée	Immersion-compression test (AASHTO T165, 2002)	Deux méthodes : (1) Immerger des éprouvettes dans l'eau à 60°C (140°F) pendant 24h, puis dans l'eau à 25°C pendant 2h (2) Immerger des éprouvettes dans l'eau à 49°C (120°F), puis à 25°C pendant 2h	Rapport des résistances à la compression des éprouvettes avec et sans conditionnement
	Marshall test (NF EN 12697-34, 2012)	Immerger des éprouvettes dans l'eau à 60°C pendant 40mins	Rapport des stabilités de Marshall des éprouvettes avec et sans conditionnement
	Moisture vapor susceptibility (California Test 307, 2000)	Mettre des éprouvettes couvertes dans un moule aluminium étanche équipé avec une mèche qui est suspendu au-dessus de l'eau dans une enceinte à 60°C pendant 75h.	Rapport des valeurs de « stabilometer de Hveem » des éprouvettes avec et sans conditionnement
	Hamburg wheel test (AASHTO T324, 2014)	Immerger des éprouvettes dans l'eau en appliquant des cycles de chargement d'un pneu afin d'obtenir la courbe déformation permanente - nombres des cycles, à une température choisie	Nombre de cycles correspondant au point d'intersection de la pente de la seconde et la troisième partie de la courbe de fluage (le point de décollement)

De plus, il existe des essais sur des éprouvettes compactées utilisant la saturation sous vide, comme illustré dans le Tableau 1-8.

Tableau 1-8. Essais avec la saturation sous vide

Type d'échantillon	Essai	Conditionnement des éprouvettes	Paramètre étudié
Eprouvette compactée	Sensibilité à l'eau (NF EN 12697-12, 2008)	Méthode A : Saturation sous vide de 6,7 kPa à 20 ± 5°C pendant 30min, attente de 30min minimum, puis immersion dans un bain d'eau à 40°C pendant 3 jours.	Rapport entre les résistances à la traction indirecte des éprouvettes avec et sans conditionnement
		Méthode B : Saturation sous vide de 47 kPa à 18°C pendant 2h, puis immersion dans un bain d'eau à 18°C pendant 7 jours.	Rapport entre les résistances à la compression des éprouvettes avec et sans conditionnement

Parmi ces essais, les tests sur les mélanges bitumineux foisonnés sont moins appliqués du fait de la faible corrélation observée avec les résultats obtenus à partir des essais sur les éprouvettes compactées. En France, la norme européenne (NF EN 12697-12, 2008) est généralement appliquée pour tester la sensibilité à l'eau des enrobés bitumineux. Selon cette norme, il est possible d'utiliser deux essais sur éprouvette compactée présentés dans le Tableau 1-8. Parmi eux, la Commission Technique Essais relatifs aux Chaussées (CTEC) recommande l'utilisation du test de compression, également appelé le test « Duriez » (Méthode B) (cf. Figure 1-38). L'essai utilise des éprouvettes cylindriques ayant un rapport hauteur sur diamètre d'au moins 0,5. Le rapport entre la résistance à la compression simple des éprouvettes conditionnées et celle des éprouvettes non-conditionnées est ensuite calculé (Eq. 1-30) et considéré pour estimer la sensibilité à l'humidité du matériau.

$$i/C = \frac{C_w}{C_d} \qquad \text{Eq. 1-30}$$

Où C_w et C_d sont les résistances moyennes (au moins 8 éprouvettes testées) à la compression respectivement des éprouvettes conditionnées et des éprouvettes non-conditionnées.

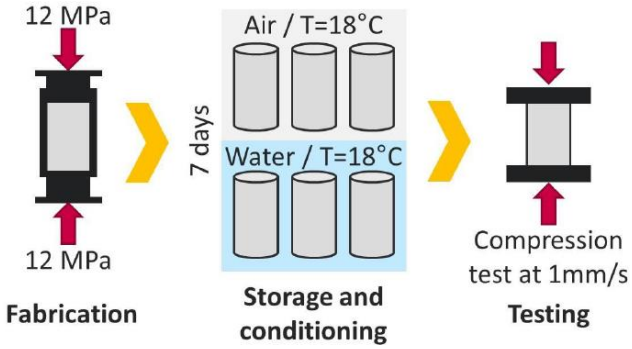


Figure 1-38. Schéma du principe de test selon la méthode "Duriez" tirée de (Ramirez Cardona, 2016)

Le matériau est considéré sensible à l'humidité quand le rapport i/C est inférieur à 70%, 80% ou 90% selon le matériau testé (NF EN 13108-1, 2007). D'après la norme (NF EN 12697-12, 2008), le test a été répété par 14 laboratoires différents sur un BBSG-EB10, la valeur moyenne de l'expérimentation a été de 73% avec une répétabilité et une reproductivité acceptables : 7,8% et 13,4% respectivement.

D'après notre étude bibliographique, aucun essai de module complexe sur des enrobés bitumineux ayant subi de tels conditionnements n'a été réalisé. Cependant, le comportement à la fatigue des enrobés bitumineux saturés en eau a été étudié par (Lamothe, 2014) lors de sa thèse de doctorat. Le matériau utilisé est un enrobé bitumineux de type EB 14 selon la norme du Québec avec 4,8% de teneur en bitume PG 70- 28. Des éprouvettes cylindriques 80x120mm (diamètre x hauteur) ayant 4,4% de vides en moyenne ont été carottées dans des plaques de 125x400x600 mm^3 obtenues au compacteur de type LPC, au moins 2 semaines après sa fabrication.

Deux lots d'éprouvettes, dont un lot sec et l'autre conditionné, ont été testés. Le système de saturation sous vide a été utilisé. Les éprouvettes conditionnées ont été saturées partiellement dans de l'eau dégazée sous une pression absolue inférieure à 4kPa, pendant une durée d'au moins 90 minutes. Après un délai maximal de 36 heures suite à la saturation, elles ont été testées à la fatigue en traction-compression à 10°C et 10Hz. La courbe de Wöhler obtenue est tracée dans la Figure 1-39.

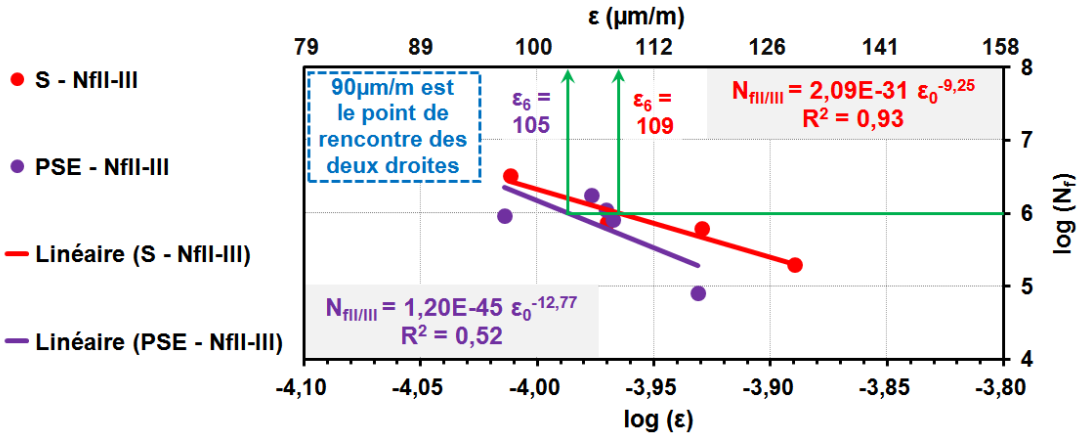


Figure 1-39. Courbes de fatigue de Wöhler de l'enrobé bitumineux (teneurs en vides de 3,5 à 4,5%), testé à deux états Sec (S) et Partiellement Saturé en Eau (PSE), à +10°C et 10Hz (Lamothe, 2014)

La présence d'eau au sein de l'enrobé génère une baisse de la valeur de la déformation ε_6 (105µm/m vs 109µm/m), et une hausse de la pente de la droite de fatigue (12,77 au lieu de 9,25). L'enrobé bitumineux testé, partiellement saturé en eau sous vide, présente cependant une très faible diminution de la résistance à la fatigue bien que le degré de saturation obtenu soit élevé (environ 90%). Cette faible diminution est peut-être due à la faible teneur en vides des éprouvettes.

1.4.3.2. Conditionnement avec cycles de gel/dégel sans eau

Lamothe ((Lamothe, 2014), (Lamothe, et al., 2017)) a également réalisé une étude sur des éprouvettes compactées soumises à des cycles de gel/dégel (GD) sans eau.

Une éprouvette de 4,8% de vides a été choisie pour tester l'impact des cycles de GD sur le comportement viscoélastique linéaire (VEL) de l'enrobé bitumineux. Six essais de module complexe (E*) ont été réalisés après 1, 3, 10, 30, et 60 cycles de GD sur l'éprouvette testée (Figure 1-40). La Figure 1-41 montre la sollicitation en température lors du conditionnement selon (Lamothe, et al., 2017). Les cycles de GD sont entre -18°C et 10°C.

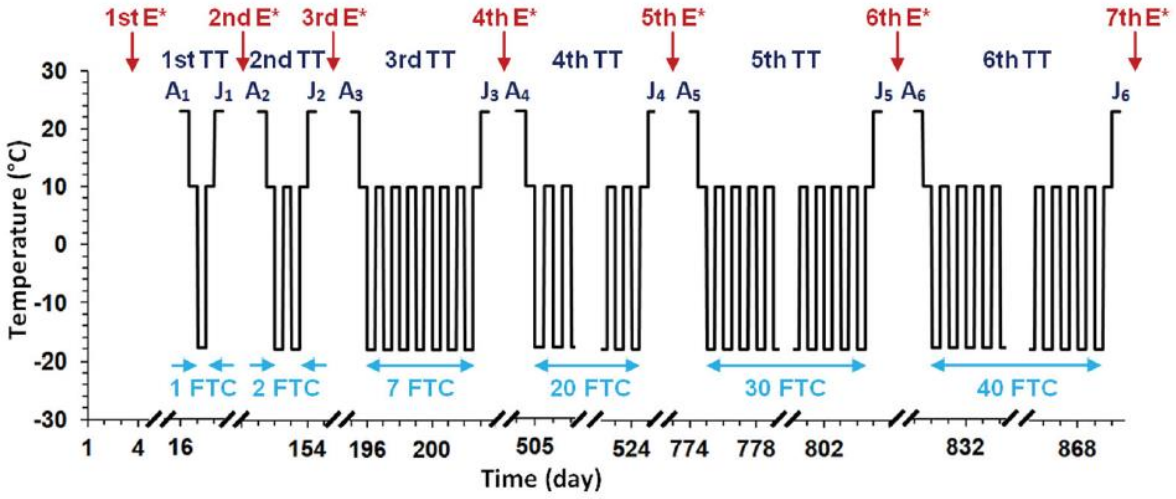


Figure 1-40. Réalisation des essais de module complexe qui incluent les séquences de cycles de gel et dégel (Lamothe, et al., 2017) (Freeze-Thaw Cycles - FTC, Thermal Test - TT, Complexe Modulus - E*)

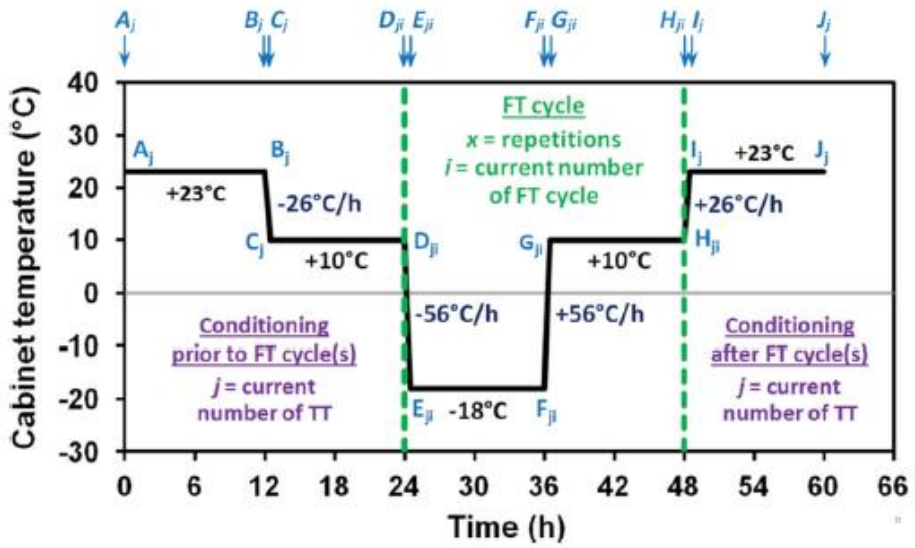


Figure 1-41. Sollicitation d'un cycle de gel/dégel selon (Lamothe, et al., 2017) (Essai thermique – ET)

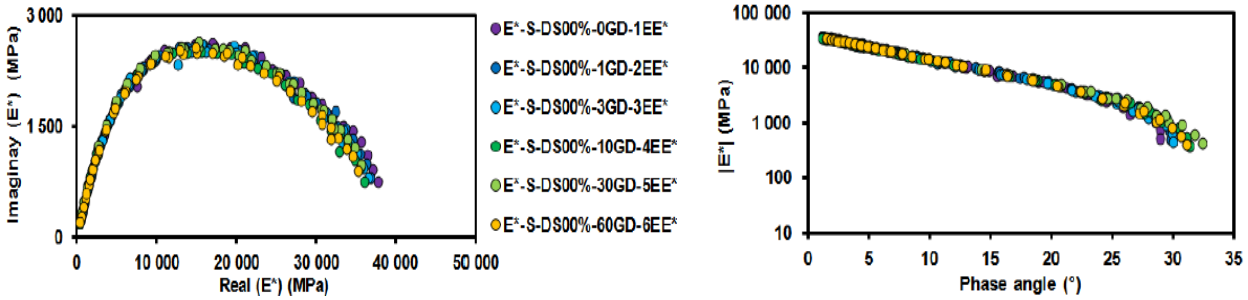


Figure 1-42. Résultats des essais de module complexe sur une éprouvette sèche ayant subi 0, 1, 3, 10, 30 et 60 cycles de GD cumulés : (a) dans le plan Cole-Cole ; (b) dans l'espace de Black (Lamothe, 2014)

Les données obtenues (Figure 1-42) ont montré une faible dégradation de l'enrobé utilisé soumis au conditionnement appliqué. Il semble que les cycles de GD sans eau n'ont pas eu d'influence significative sur le comportement VEL du matériau testé.

1.4.3.3. Conditionnement avec cycles gel/dégel en présence d'eau

Selon la littérature, la plupart des recherches traitent de l'endommagement des enrobés bitumineux causé par des cycles de GD en présence d'eau. Ce type de conditionnement a été d'abord développé par (Lottman, 1978). Il a proposé une procédure en deux étapes : l'éprouvette est d'abord saturée dans l'eau sous vide, puis elle subit un cycle de GD (cf. Tableau 1-9). Cette procédure a été modifiée plus tard, et normalisée sous le nom AASHTO-T283.

Aux Etats Unis, de nombreuses études utilisant cette procédure pour tester l'endommagement hivernal des enrobés bitumineux ont été menées à la fin du 20ème siècle et au début du 21ème siècle. Récemment, ce type de conditionnement est beaucoup utilisé par les chercheurs chinois. En France, des protocoles différents ont également été développés en se basant sur les conditions climatiques in-situ, pourtant aucun protocole n'est normalisé.

Le Tableau 1-9 présente des études appliquant la saturation de l'éprouvette dans l'eau suivie par des cycles de GD. Deux méthodes de saturation sont généralement utilisées après immersion dans l'eau : sans ou avec saturation sous vides. Selon la littérature, la saturation sous vide est plus souvent

appliquée du fait qu'on obtient un taux de saturation plus élevé dans une durée plus courte. Différentes amplitudes et durées sont considérées pour les cycles de GD dont le nombre est également variable.

Tableau 1-9. Essais utilisant des cycles gel/dégel avec l'eau

Source	Conditionnement des éprouvettes			Paramètre étudié
	Cycles de GD	Saturation (avant la sollicitation des cycles de GD)	Durée	
Test original de Lottman (Lottman, 1978)	Méthode 1 : Mettre les éprouvettes saturées dans un sac hermétique avec 10ml d'eau, puis gel à -18°C durant 15h, puis dégel pendant 24h dans un bain d'eau à 60°C. Ces procédures comptent pour 1 cycle de GD Méthode 2 : Sollicitation de 18 cycles de GD, gel pendant 4h à -18°C et dégel pendant 4h à 49°C (120°F).	Saturation sous vide de 67 kPa pendant 30mins, puis suivie par l'immersion de 30mins dans l'eau aux conditions ambiantes	-Méthode 1 : 40h (un cycle GD pendant 39h) -Méthode 2 : 140h (un cycle de GD pendant 8h)	Rapport entre les résistances à la traction indirecte des éprouvettes avant et après le conditionnement
Lottman modifié (AASHTO T283, 2014)	Avant d'utiliser la méthode 1 du test précèdent, le mélange bitumineux foisonné est refroidi à 25°C pendant 2h, puis vieilli à 60°C pendant 24h, ensuite réchauffé à la température de fabrication pour le compactage des éprouvettes	Saturation sous vide à température ambiante jusqu'à 70%-80% de saturation des éprouvettes	~ 66h (un cycle de GD pendant 39h)	
Tunnicliff–Root Test (ASTM D4867, 2004)	Comme méthode 1 du test original de Lottman		~ 40h (un cycle de GD pendant 39h)	
Freeze–Thaw Pedestal (tiré de (Solaimanian, et al., 2003))	L'enrobé chauffe à 150°C pendant 2h, puis refroidit à température ambiante, puis il est réchauffé à 150°C pour le compactage des éprouvettes. Eprouvettes immergées dans l'eau stockés dans une boite verre hermétique, puis lancer des cycles de GD ; gel à -12°C pendant 15h, dégel à 49°C pendant 9h	Immersion dans l'eau	Dépend du nombre des cycles de GD appliqués (un cycle de GD pendant 24h)	Nombre de cycles de GD à créer la 1ère fissure de l'éprouvette avant et après le conditionnement
(Nadkarni, et al., 2009)	Appliquer la procédure selon AASHTO T283			Module complexe et résistance à la traction indirecte des enrobés avec et sans conditionnement

(Mauduit, et al., 2010)	Sollicitation des cycles de GD consécutifs, gel à -10°C pendant 10h, dégel à 10°C pendant 10h. Vitesse de changement des températures 20°C/h	Saturation sous vide à deux différents niveaux 47 kPa et 86 kPa	7 jours au maximum (un cycle de GD pendant 22h)	Quantification de l'expansion induits par cycles de GD des éprouvettes partiellement saturés d'eau
(Feng, et al., 2010)	Soumis à 0, 2, 4, 6, 8 cycles de GD, gel à -20°C pendant 8h et dégel à 60°C pendant 4h	Saturation sous vide pendant 15mins	Dépend du nombre des cycles de GD appliqués (un cycle de GD pendant 12h)	Impact du sel et des cycles GD sur le comportement des EB en utilisant l'essai à la traction indirecte
(A. El-M. Behiry, 2012)	Conditionnement selon la procédure de AASHTO T283. Puis immersion des éprouvettes dans l'eau ou dans la saumure pendant 1, 3, 7, 14 jours.		Dépend du temps d'immersion des éprouvettes (15 jours au maximum)	Utilisation des tests Marshall (NF EN 12697-34, 2012) et la traction indirecte pour déterminer l'évolution de la résistance à l'humidité des EB selon la durée de conditionnement
(Jaskula, 2014)	Sollicitation de 1, 50 et 150 cycles de GD. Gel à -18°C pendant 4h, dégel à 20°C pendant 2h dans l'eau. Puis immerger toutes éprouvettes dans un bain d'eau à 60°C pendant 24h.	Comme AASTHO T283	38.5 jours au maximum (un cycle de GD pendant 6h)	Durée de vie des EB subis des conditionnement de GD
(Lamothe, 2014)	Sollicitation de 100 cycles consécutifs, gel -18°C pendant 11h30, dégel 10°C pendant 11h30, la vitesse de changement de température -56°C/h	Saturation sous vide de ≤4 kPa pendant 90mins	100 jours au maximum (un cycle de GD pendant 24h)	Influence des cycles de GD et de saumures sur le comportement de EB
(Lamothe, et al., 2015)	Saturation et sollicitation des cycles de GD même que (Lamothe, 2014)			Quantification des contraction et expansion des éprouvettes partiellement saturés soumises à des cycles de GD
(Xu, et al., 2015)	Sollicitation de 30 cycles de GD, gel sans eau à -18 °C pendant 16h, puis gel dans l'eau à -18°C pendant 16h ; dégel dans l'eau à 25°C pendant 12h	Saturation sous vide de 98 kPa pendant 15min	55 jours au maximum (un cycle de GD pendant 44h)	Evolution interne des pores des EB soumis à des cycles de GD par les rayons gammes et le méthode d'analyse d'image
(Lei, et al., 2016)	Sollicitation de 30 cycles de GD, gel à -18°C pendant 16h en utilisant sac hermétique contenant 10ml d'eau, dégel dans l'air à 25°C pendant 8h	Même que (Xu, et al., 2015)	30 jours au maximum (un cycle de GD pendant 24h)	Application de l'essai d'impact résonance pour évaluer la résistance à des cycles de GD des EB.

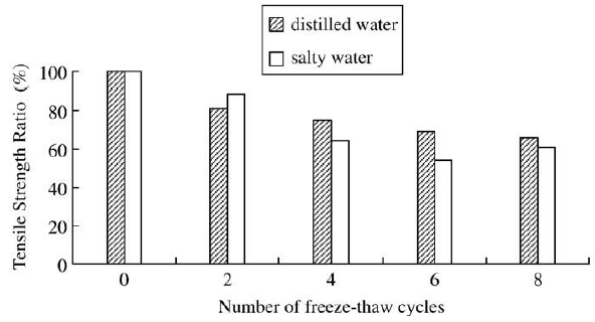
(Ramirez Cardona, 2016)	1 cycle de GD, gel à -18°C pendant 24h en utilisant le sac hermétique contenant 10ml d'eau, dégel dans l'air à 40°C pendant 30h	Immersion dans l'eau à 60°C pendant 7 jours	7.25 jours au maximum (un cycle de GD pendant 54h)	Caractérisation thermomécanique des EB
(VU, 2017)	Sollicitation des cycles de GD consécutifs, gel à -10°C pendant 10h, dégel à 10°C pendant 10h.	Saturation sous vide à 86 kPa pendant 3 heures	Dépend du nombre des cycles de GD appliqués (un cycle de GD pendant 20h)	Quantification la dilatation-contraction des EB au cours de gel/dégel

Selon la bibliographie, le rapport des résistances à la traction indirecte (TSR – Tensile Strength Ratio) calculé par Eq. 1-31 est considéré comme le critère le plus ancien et le plus utilisé pour évaluer l'endommagement de l'enrobé bitumineux :

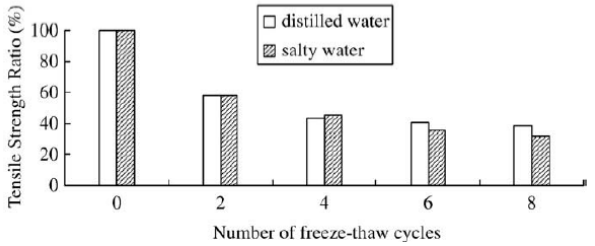
$$TSR = \frac{S_{t-w}}{S_{t-d}} \qquad \text{Eq. 1-31}$$

avec S_{t-w} la résistance des éprouvettes conditionnées et S_{t-d} la résistance des éprouvettes non conditionnées.

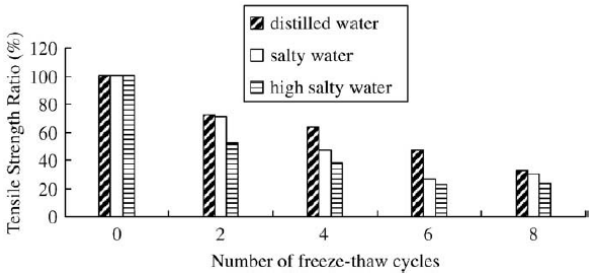
Kiggundu & Roberts (Kiggundu & Roberts, 1988) ont réalisé une série de test TSR sur 26 enrobés bitumineux différents utilisés aux Etats-Unis. Ils ont trouvé que les matériaux utilisés ayant une valeur $TSR \geq 70\%$ sont relativement non-sensibles à l'humidité. La précision de cette méthode atteint 67% comparée avec l'observation in-situ. La valeur de TSR de 70% est donc devenu le critère le plus appliqué jusqu'à aujourd'hui aux Etats-Unis. Beaucoup d'études sur la sensibilité à l'humidité des enrobés bitumineux ont été effectuées en se basant sur le conditionnement ASSTHO T283. Par exemple, Feng et al. (Feng, et al., 2010) a étudié l'impact des cycles de GD sur 3 types de matériaux souvent utilisés en Chine : AC - « Dense-graded », AM - « Semi-open-graded » , OGFC - « Open-graded » avec 6%, 12% et 18% respectivement de vides . Les éprouvettes cylindriques 101,6mm x 63,5mm (Hauteur x Diamètre) de type Marshall ont d'abord été saturées sous vide dans l'eau ou dans la saumure, puis testées (essai de traction indirecte (ITS – Indirect Tensile Strength test)) après 0, 2, 4, 6 et 8 cycles de GD (cf. Tableau 1-9). Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 1-43. Ils montrent que la teneur en vides a une grande influence sur la sensibilité aux cycles de GD. Plus le matériau est poreux plus la dégradation est importante.



(a) Résultats sur AC- 6% de vides



(b) Résultats sur AM- 12% de vides



(c) Résultats sur OGFC- 16% de vides

Figure 1-43. Résultats TSR sur enrobés saturés soumis à des cycles de gel/dégel, obtenus selon (Feng, et al., 2010)

Néanmoins, la valeur TSR ne fournit que la résistance à la rupture des enrobés bitumineux tandis que ses comportements VEL ou à la fatigue après des cycles de gel/dégel sont encore très peu connus.

Lamothe et al. (Lamothe, 2014) (Lamothe, et al., 2017) a réalisé une série d'essais de module complexe (E*) en traction-compression sur une éprouvette ayant 4,4% de vides soumise à des cycles de GD comme présentés dans la partie précédente (Figure 1-40). Le bitume utilisé est de type PG 70-28 selon la norme MTQ 4101 utilisée au Québec. Le degré de saturation de l'éprouvette testée était contrôlé avant chaque essai E* en s'assurant qu'il était toujours supérieur à 40%, sinon l'éprouvette était saturée sous-vide une nouvelle fois. Le test E* a été effectué sur une plage de température de -35°C à 35°C et à des fréquences comprises entre 0,03Hz et 10Hz. Les résultats des essais E* ont été analysés et modélisés à l'aide du modèle 2S2P1D développé par l'équipe de l'ENTPE (Olard & Di Benedetto, 2004) (Di Benedetto, et al., 2004) (cf. Figure 1-44 et Figure 1-46). Les variations des constantes du modèle ont été utilisées pour quantifier les dégradations dues à des cycles de GD. La Figure 1-45 montre les évolutions du module vitreux E_0 et du module statique E_{00} selon le nombre des cycles de GD. Le module E_0 diminue et le module E_{00} augmente avec le nombre de cycles de GD. Lamothe a introduit une variable caractérisant l'endommagement sur toute la gamme de fréquence et température définie par Eq. 1-32. La Figure 1-47 présente l'évolution de cette variable selon le nombre de cycles de GD appliqué.

$$D_{X.GD} = 1 - \frac{|E^*|_{X.GD}}{|E^*|_{0.GD}} \qquad \text{Eq. 1-32}$$

Où $|E^*|_{X.GD}$ et $|E^*|_{0.GD}$ sont respectivement la norme de module complexe après X cycles GD et celle à même fréquence équivalente de la même éprouvette ayant subie 0 cycle GD.

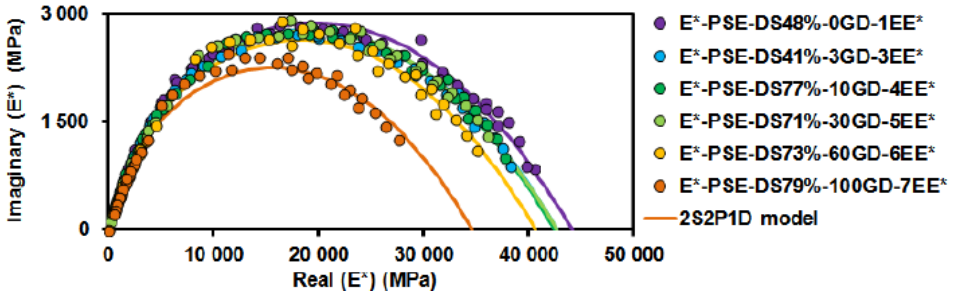


Figure 1-44. Modules complexes dans le plan Cole-Cole d'une éprouvette saturée dans l'eau (Lamothe, 2014)

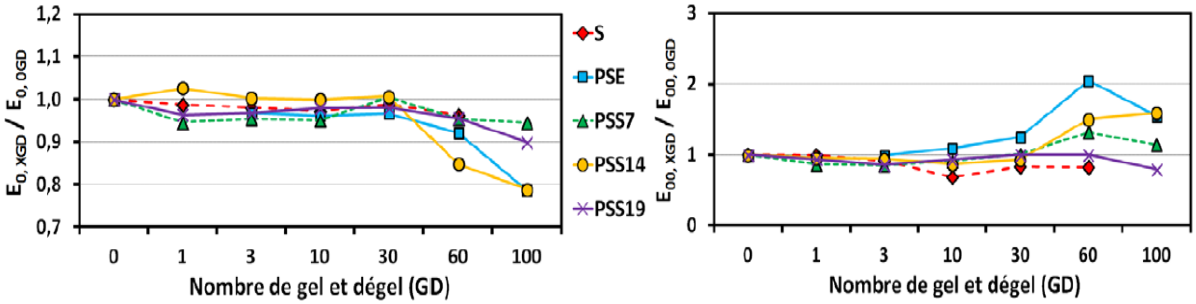


Figure 1-45. Évolutions du module vitreux E_0 et du module statique E_{00} des éprouvettes saturées selon le nombre de cycles GD subis (Lamothe, 2014)

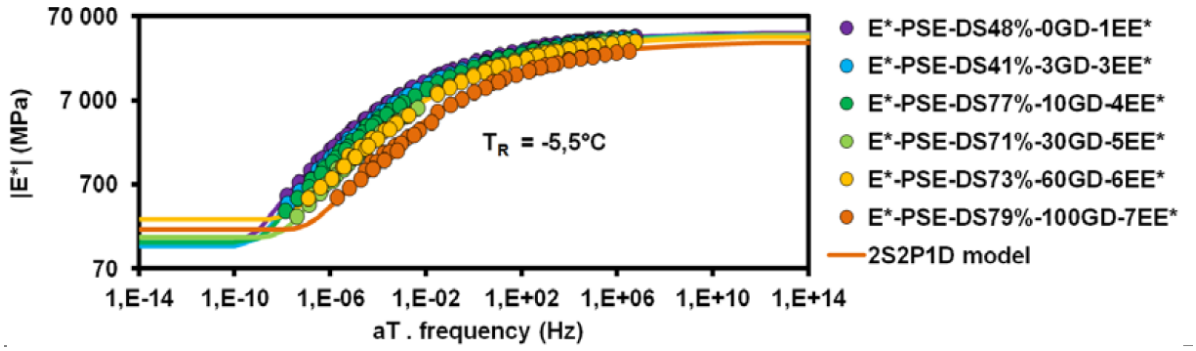


Figure 1-46. Courbes maîtresse de la norme du module complexe d'une éprouvette saturée dans l'eau en fonction des cycles de GD à la température de référence T_R=-5.5°C (Lamothe, 2014)

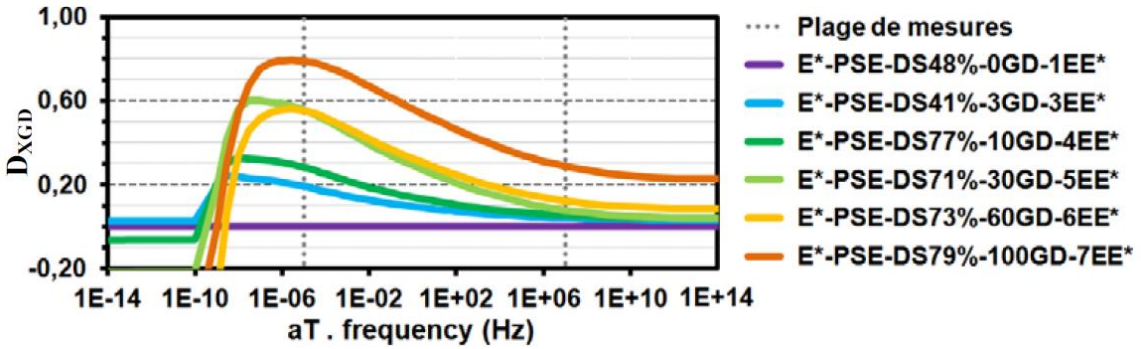


Figure 1-47. Évolution du dommage de l'éprouvette saturée dans l'eau en fonction des cycles de GD (D_{XGD}) calculé à la température de référence T_R=-5.5°C (Lamothe, 2014)

Après 100 cycles de GD, la chute de la norme E* peut atteindre 80% pour une température de test entre 20°C et 35°C. Les critères d'endommagement obtenus sont du même ordre de grandeur que ceux utilisant la méthode TSR. En fait, la comparaison entre les deux méthodes E* et ITS a été réalisée par (Nadkarni, et al., 2009). Son équipe a effectué des essais ITS et de module complexe (E*) sur des éprouvettes soumises au même conditionnement. Ces essais ont été réalisés à 25°C et aux fréquences suivantes : 25, 10, 5, 1, 0,5 et 0,1Hz. L'analyse des résultats obtenus indique qu'il n'y a pas de différence significative pour évaluer le niveau d'endommagement si l'on utilise le module complexe ou la résistance à la traction indirecte. Il a donc proposé de remplacer l'ITS par un essai E*, qui a l'avantage de permettre de tester la même éprouvette avant et après le conditionnement.

D'autres recherches utilisent également des essais non-destructifs. (Lei, et al., 2016) ont utilisé des essais d'impact résonance (IRT – Impact Resonance Test) qui permettent de déterminer le module complexe par analyse inverse, pour caractériser la sensibilité hivernale des enrobés bitumineux. Des éprouvettes cylindriques de 100x20mm ou 100x40mm (Diamètre x Hauteur) possédant 4% de vides ont été fabriquées. Cinq matériaux, dénommés 70#, 90#, 70–28, 90–28 et 90–60 ont été utilisés. Les matériaux 70# et 90# utilisent des bitumes purs correspondant aux bitumes semi-durs de type 50/70 et 70/100 respectivement, tandis que les matériaux 70–28, 90–28 et 90–60 utilisent des bitumes modifiés avec des poudrettes de caoutchouc de tailles différentes (correspondant à 0,7mm et 0,25mm environ). Les éprouvettes ont d'abord été soumises à des cycles de GD (cf. Tableau 1-9). Les essais d'impact résonance ont été réalisés à 20°C, régulièrement après différents cycles de GD afin de suivre la dégradation des éprouvettes. Le rapport du module au cours des cycles $|E^*|_{con.}$ sur le module initial $|E^*|_{ini.}$ a été étudié. Il est dénommé « Dynamic Modulus Ratio », DMR et calculé par Eq. 1-33.

$$DMR = \frac{|E^*|_{con.}}{|E^*|_{ini.}} \qquad \text{Eq. 1-33}$$

La Figure 1-48 montre l'évolution de ce paramètre pour les matériaux testés. La norme du module complexe diminue progressivement avec le nombre de cycles de GD. Après 30 cycles de GD, le module des matériaux 70# et 90# chute d'environ 30% à 40%. Cette diminution est du même l'ordre que la dégradation observée par (Lamothe, 2014).

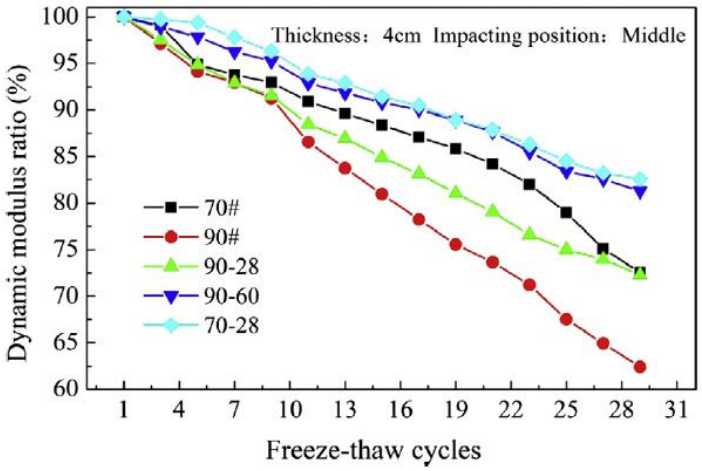


Figure 1-48. Résultats de l'essai IRT – Evolutions de la norme de module complexe (déterminé à 20°C) selon le nombre des cycles sollicités (Lei, et al., 2016)

(Ramirez Cardona, 2016) ont étudié l'influence des cycles de GD sur le comportement viscoélastique (module complexe et coefficient de Poisson) et à la fatigue d'enrobés bitumineux. Les matériaux, destinés à être utilisés dans les infrastructures de voie ferrée, étaient de type GB3 et GB4 à base d'un bitume 35/50, avec des teneurs en vides respectives de 8% pour GB3 et 4,5% pour GB4. Des éprouvettes de forme cylindrique de 75x140mm (Diamètre x Hauteur) ont été fabriquées. Elles ont été divisées en deux lots : un lot sec et l'autre conditionné selon le protocole, qui se compose de 3 étapes (cf. Tableau 1-9).

Les résultats obtenus montrent que le conditionnement utilisé ne modifie pas significativement le comportement VEL. Cela vient peut-être du fait que le conditionnement utilisé cause les faibles degrés de saturation des éprouvettes (environ 50% pour GB3 et 27% pour GB4) (Ramirez Cardona, et al., 2017). Cependant, il a une grande influence sur le comportement à la fatigue des matériaux. Les Figure 1-49 et Figure 1-50 présentent les courbes de Wöhler des résultats d'essais de fatigue en traction-compression, qui ont été réalisés à 10°C avec une sollicitation sinusoïdale en déformation aux amplitudes différentes de 60, 70, 90 et 110µm/m et une fréquence 10Hz. Selon les résultats obtenus (Figure 1-51), la durée de vie des éprouvettes conditionnées du type GB3 diminue fortement par rapport à celle des éprouvettes non-conditionnées. Ces dégradations sont vraiment remarquables et il faut en tenir compte dans le dimensionnement des structures routières (Ramirez Cardona, 2016). Cependant, l'influence de l'humidité sur les éprouvettes GB4 semble non-significatif. Cela peut venir du fait que le pourcentage de vides des éprouvettes GB4 testés est près de la moitié de celui des éprouvettes GB3. En plus, les résultats des éprouvettes GB4 sont plus dispersés que ceux des éprouvettes GB3. Il y a des éprouvettes très sensibles au conditionnement utilisé (Figure 1-52) tandis que les autres sont moins influencées. Il faut donc plus de résultats pour mieux comprendre ce phénomène.

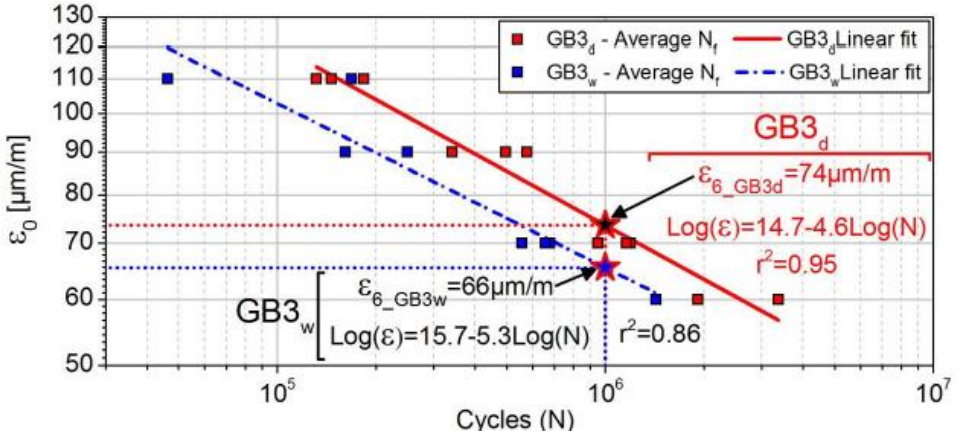


Figure 1-49. Courbes de Wöhler de fatigue de l'enrobé bitumineux GB3 (courbe discontinue- éprouvette conditionnée) (courbe continue - éprouvette non-conditionnée) (Ramirez Cardona, 2016)

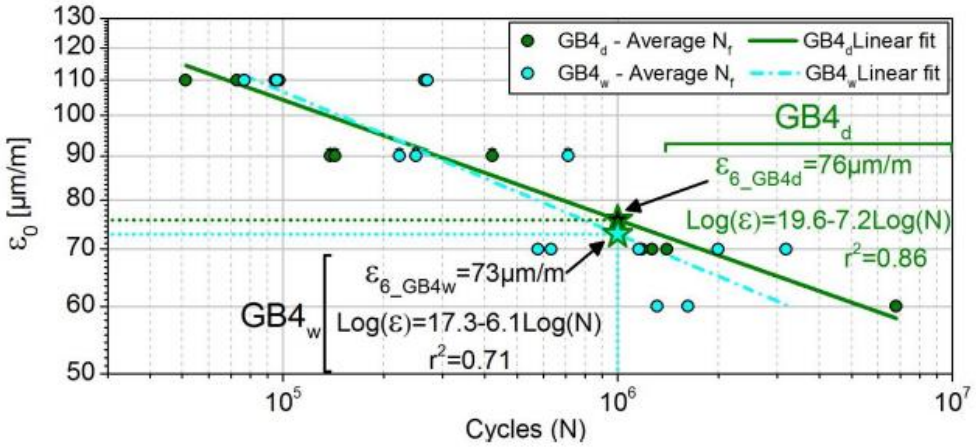


Figure 1-50. Courbes de Wöhler de fatigue de l'enrobé bitumineux GB4 (courbe discontinue- éprouvette conditionnée) (courbe continue - éprouvette non-conditionnée) (Ramirez Cardona, 2016)

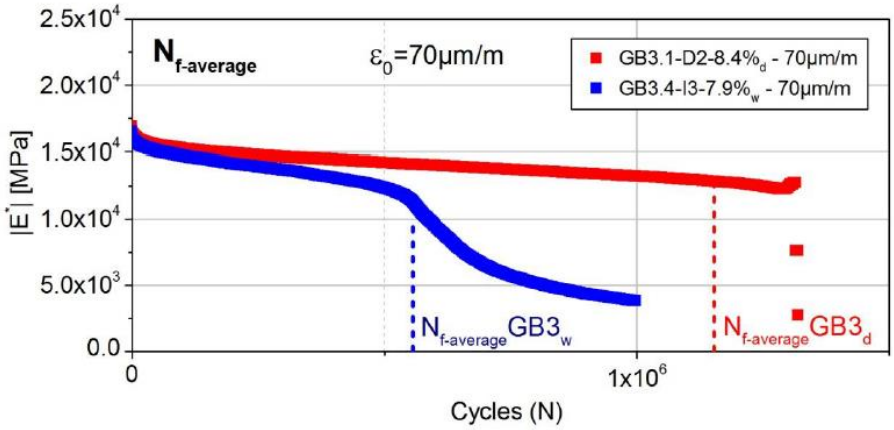


Figure 1-51. Evolution de la norme du module complexe $|E^*|$ en fonction du nombre de cycles appliqués N, lors d'essais de fatigue sur enrobé de type GB3 (courbe bleu- éprouvette conditionnée) (courbe rouge - éprouvette non-conditionnée) (Ramirez Cardona, 2016)

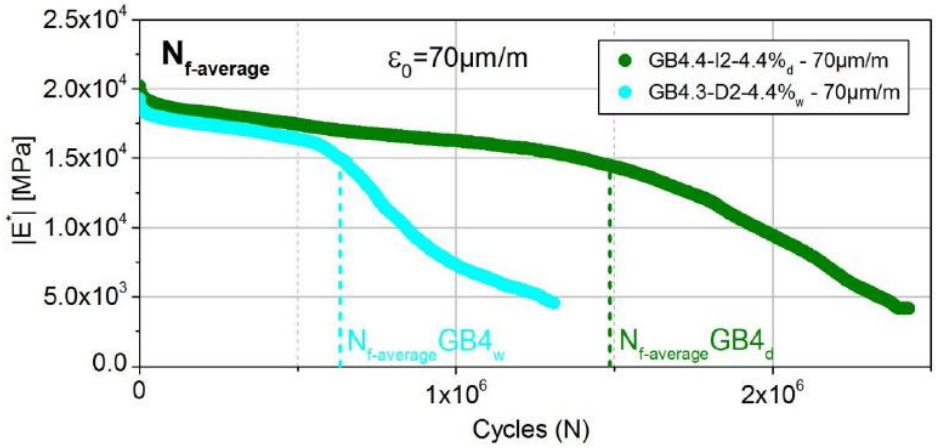


Figure 1-52. Evolution de la norme du module complexe |E*| en fonction du nombre de cycles appliqués N, lors d'essais de fatigue sur enrobé de type GB4 (courbe cyan- éprouvette conditionnée) (courbe verte - éprouvette non-conditionnée) (Ramirez Cardona, 2016)

D'autres travaux ont étudié le comportement des enrobés bitumineux durant les cycles de GD et notamment les phénomènes de « gonflement ». (Mauduit, et al., 2010) ont étudié un enrobé bitumineux classique EB 0/10 ayant environ 9% de vides . Trois éprouvettes cylindriques de 80x90mm (Diamètre x Hauteur) ont été saturées sous vide, pour atteindre trois degrés de saturation: 0%, 29% et 51%. Elles ont ensuite été soumises à une sollicitation thermique de gel/dégel (cf. Tableau 1-9) à une extrémité tandis que l'autre extrémité reste libre. L'évolution de la température à des points différents de l'éprouvettes (Figure 1-53) ainsi que sa contraction/expansion (Figure 1-54) ont été suivies au cours des cycles de GD.

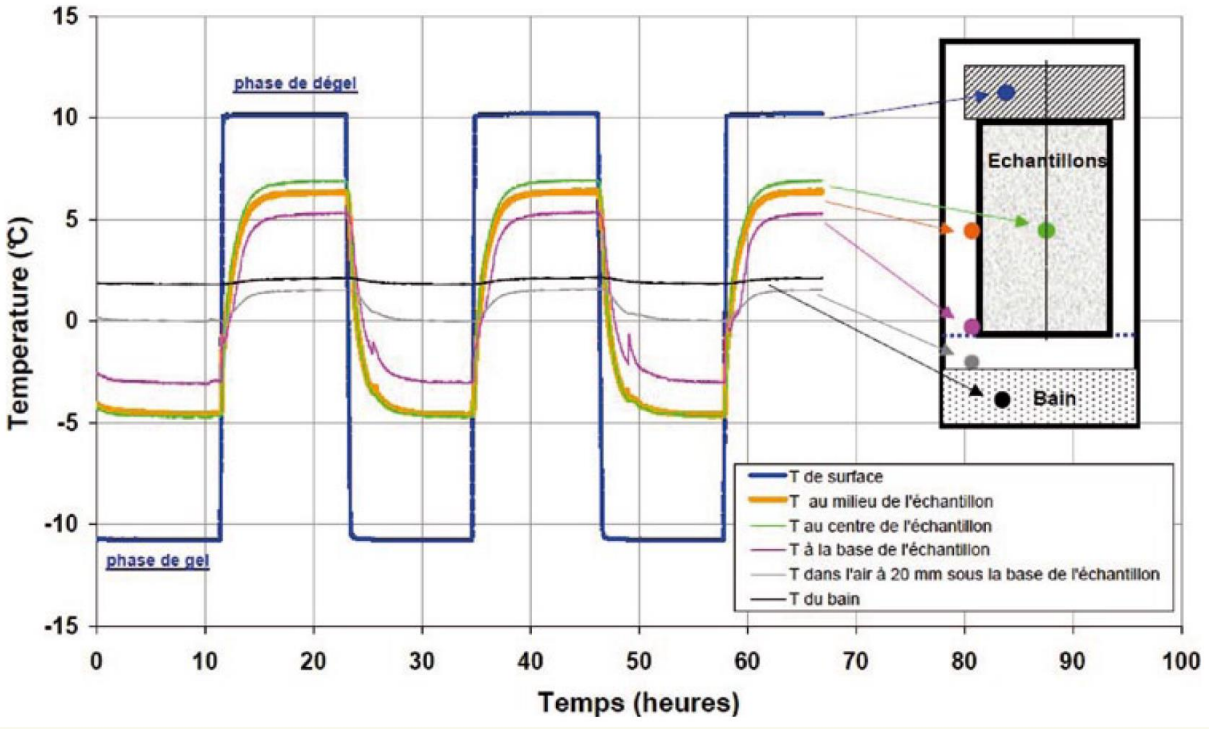


Figure 1-53. Evolution de température à différents points de l'éprouvettes au cours des cycles GD (Mauduit, et al., 2010)

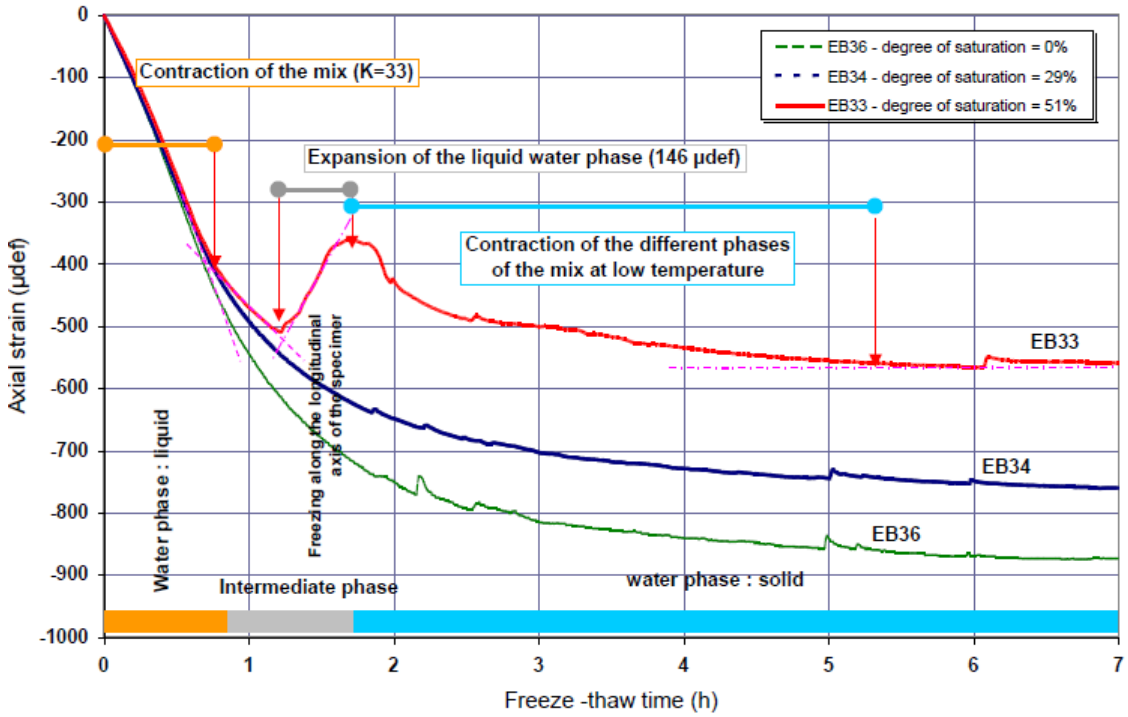


Figure 1-54. Evolution de déformation axial des éprouvettes en phase de gel du premier cycle thermique (Mauduit, et al., 2010)

La vitesse de propagation de la glace a également été déterminée à partir des mesures d'expansion de l'enrobé (combinant contraction thermique et expansion lié au développement de la glace) et du calcul de la contraction thermique de l'enrobé bitumineux. Les résultats montrent que la saturation diminue la contraction des éprouvettes lors des cycles de GD en raison de l'expansion de l'eau se transformant en glace. La même observation a été également obtenue par (Lamothe, et al., 2015). Dans le cas d'une structure multicouches, ce phénomène génère des contraintes internes qui peuvent décoller les

matériaux au niveau de leurs interfaces et diminuer évidemment la durabilité des chaussées (Mauduit, et al., 2010).

1.4.3.4. Oxydation due au vieillissement des matériaux

La majorité des études concernent des matériaux, non vieillis, qui sont représentatifs d'une chaussée neuve. Néanmoins, certaines études comprennent des périodes de vieillissement dans leurs procédures de conditionnement. Le vieillissement artificiel est réalisé sur des matériaux foisonnés ou compactés. Le moyen le plus courant d'accélérer le vieillissement des bitumes matériaux est de les soumettre à une température élevée pendant une période. En pratique, on distingue deux types de vieillissement :

1. Vieillissement à court terme: il se produit pendant des phases du chauffage, du mélange et de la pose des mélanges bitumineux lors de la construction d'une structure de chaussée.
2. Vieillissement à long terme: il se produit pendant la durée de vie des matériaux de chaussée. Il est ensuite influencé par les conditions en service de la structure.

Pour les bitumes, deux procédures de vieillissement existent, la méthode « Rolling Thin-Film Oven Test » - RTFOT (AASHTO T240, 2013) et la méthode « Pressurized Aging Vessel » - PAV (AASHTO R28, 2012) qui correspondent respectivement au vieillissement à court terme et celui à long terme du bitume.

- L'essai RTFOT est utilisé pour simuler le vieillissement à court terme, sous l'effet de la température et de l'air sur un film de liant bitumineux en mouvement. Ce film bitumineux est chauffé dans un four pendant 85 mins à 163°C, puis refroidi sur une grille pendant 60-180 mins. Les effets de ce traitement sont déterminés par le mesure des propriétés du liant bitumineux avant et après l'essai tels que la viscosité à 60°C et la ductilité à 15°C du bitume.
- L'essai PAV a pour but de simuler l'oxydation du bitume pour un service de 5 à 10 ans des enrobés bitumineux sur le terrain. La procédure PAV est basée sur le principe de superposition temps-température pour accélérer le vieillissement du bitume à travers l'exposition à de hautes températures et des conditions de pressions sévères. Les échantillons sont conditionnés d'abord selon le test RTFOT, ensuite soumises à la température d'oxydation pendant 20 heures dans un récipient sous une pression de 2,1 MPa.

Pour les enrobés, des procédures différentes de vieillissement sont également développées. Le Tableau 1-10 et Tableau 1-11 résument les procédures de vieillissement sur les matériaux compactés et celles sur les matériaux foisonnés selon (Kim, et al., 2013) (Dony & Ziyani, 2016).

Parmi ces méthodes, la procédure de RILEM est la plus appliquée dans les recherches récentes en raison de sa bonne corrélation avec les résultats sur le terrain. Selon (De la Roche et al., 2009), cette procédure simule un vieillissement de plus 10 ans des enrobés bitumineux in-situ.

Tableau 1-10. Procédures de vieillissement pour les éprouvettes compactées

Document	Procédures de vieillissement		Equipement
	Température	Durée totale	
(Hveem et al., 1963)	60 °C	1000 h	Dans un four
(Mugler, 1970)	163°C	5 h	
(Tia et al., 1988)	60°C	90 jours	
(Von Quintus et al., 1992)	2 jours à 60°C + 5 jours à 107°C	7 jours	
(AASHTO R30, 2002)	85°C	5 jours	
(Hayicha et al., 2003)	60°C	20 jours	
(Martin et al., 2003)	3 jours à 70°C + 4 jours à 80°C	7 jours	
(Collop et al., 2004)	85°C	65 h	Dans un four , éprouvette saturée et soumis à la pression 2.1 MPa
TRL (Nicholls, 2006)	60°C	48 h	Dans un four
(Van den Bergh, 2011)	110-120°C	16 h	

Tableau 1-11. Procédures de vieillissement pour les mélanges bitumineux

Document	Vieillissement à court terme		Vieillissement à long terme		Equipement
	Température	Durée	Température	Durée	
LCPC (Such et al., 1997)	135°C	4 h	100°C	24 h	Dans un four
Shell (Read and Whiteoak, 2003)	Non spécifié	2 h	80°C	7 jours	
BRRC (Piérard & Vanelstraete, 2009)	135°C	1.5 h	60°C	14 jours	
RILEM (De la Roche et al., 2009)	135°C	4 h	85°C	7-9 jours	
PAV (Mollenhauer & Mouillet, 2011)	135°C	4 h	90°C	20 h	Dans un récipient contrôlant la pression
(Van den Bergh, 2011)	135°C	4h	85°C	7 jours	Dans un four
Méthode UV	Comme BRRC		Comme BRRC + l'oxydation sous les rayons Ultraviolet (UV) + chauffage à 60°C		Dans un four

Baek (Baek, et al., 2012) a testé l'influence de vieillissement sur le comportement VEL des enrobés bitumineux à 4 niveaux différents : STA (Short-term aging) vieillissement du mélange à 135°C pendant 4 heures, LTA1 (Long-term aging level 1) vieillissement des éprouvettes compactées à 85°C pendant 2 jours après STA, LTA2 (Long-term aging level 2) vieillissement des éprouvettes compactées à 85°C pendant 4 jours après STA, LTA3 (Long-term aging level 3) vieillissement des éprouvettes compactées à 85°C pendant 8 jours après STA. Des éprouvettes de forme cylindrique 75x140mm (Diamètre x Hauteur) avec une teneur en vides entre 3,5% et 4,5% ont été utilisées pour réaliser des essais de module complexe E* en traction-compression. Ces essais ont été réalisés à des fréquences de 25, 10, 5, 1, 0,5, et 0,1 Hz et à des températures de -10, 5, 20, 40 et 54°C (AASHTO T342, 2014). Les Figure 1-55 et Figure 1-56 présentent les courbes maitresses de E* mesuré. Ces résultats montrent l'effet du vieillissement, qui rigidifie les enrobés pour une température et une fréquence donnée.

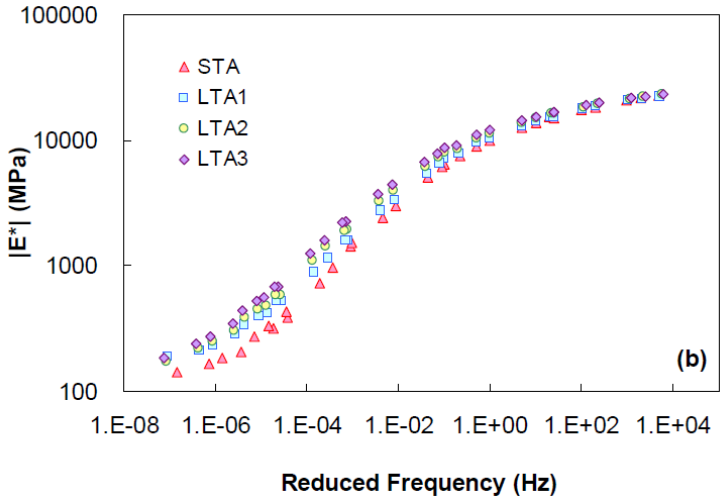


Figure 1-55. Courbes maîtresses de la norme du module complexe à la température de référence T_R=5°C (Baek, et al., 2012)

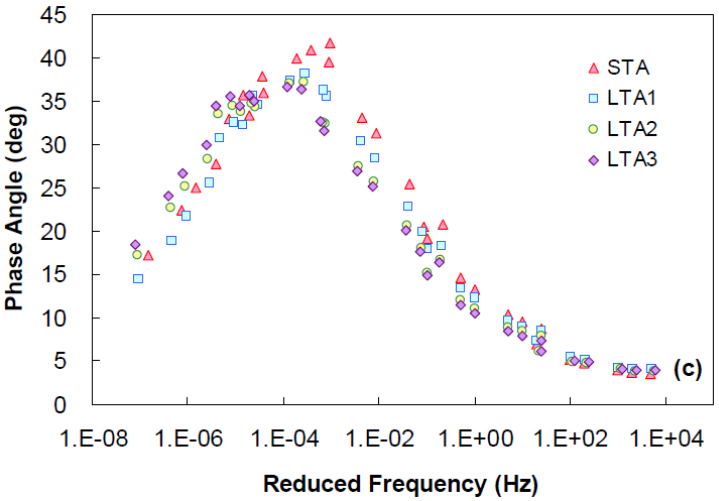


Figure 1-56. Courbes maîtresses de l'angle de phase à la température de référence T_R=5°C (Baek, et al., 2012)

(Yang, et al., 2016) ont étudié l'effet combiné du vieillissement et des cycles de GD sur le module complexe d'enrobé, à une teneur en vides de 4%. Les essais E* ont été réalisés selon la norme (AASHTO T342, 2014) avec des éprouvettes cylindriques de 100x150mm (Diamètre x Hauteur). Trois niveaux de vieillissement du matériau ont été étudiés : (HMA_2hr) vieillissement à court terme du mélange foisonné à température compactée pendant 2 heures, (HMA_4hr) vieillissement à court terme du mélange foisonné à 135°C pendant 4 heures, (HMA_5days) vieillissement à 85°C pendant 5 jours de l'éprouvette compactée qui était fabriquée après (HMA_4hr). Des éprouvettes en matériaux vieillis ont également subi des cycles de GD, en étant conditionnées selon la norme (AASHTO T283, 2014). La comparaison de la norme du module complexe de deux lots éprouvettes, conditionnées et non-conditionnées a été réalisée (Figure 1-57). La combinaison des deux effets, vieillissement et cycle de GD, a tendance à diminuer la rigidité du matériau (contrairement au seul effet du vieillissement) (Figure 1-58).

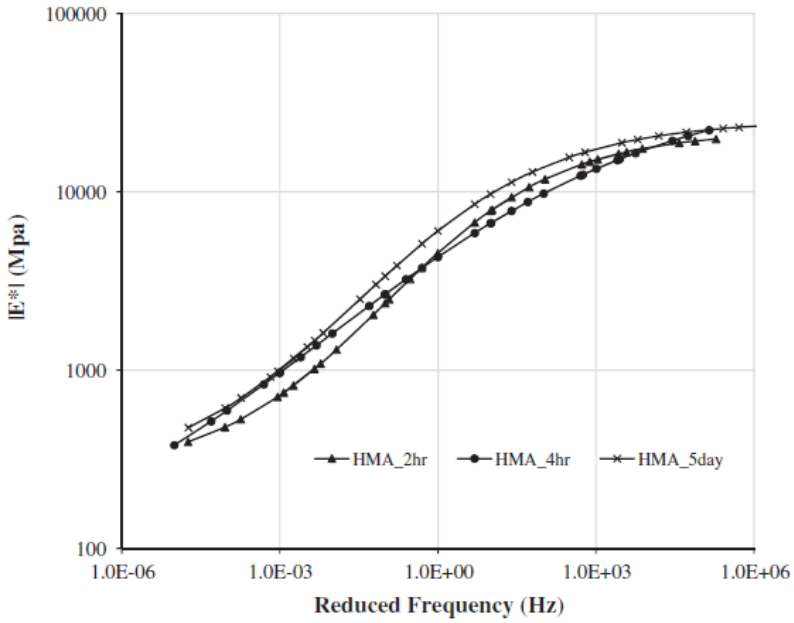


Figure 1-57. Courbes maîtresses de la norme du module complexe à la température de référence T_R=21.1°C (Yang, et al., 2016)

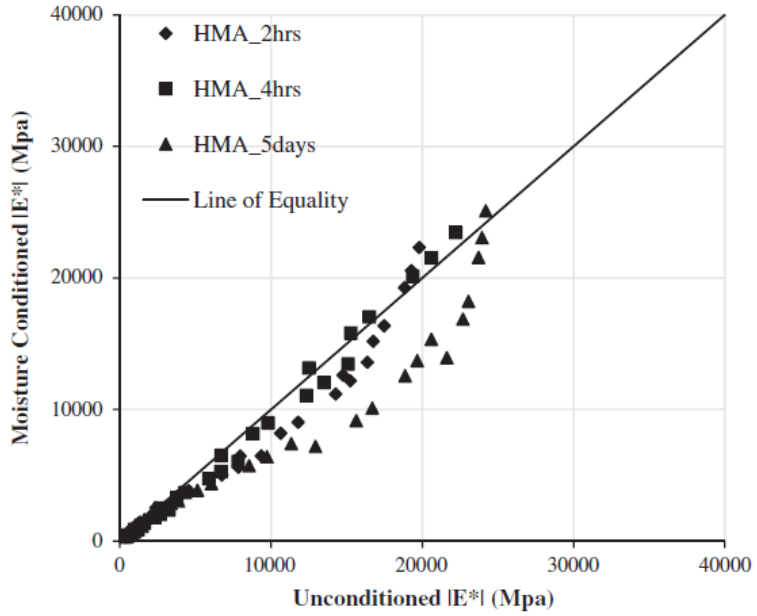


Figure 1-58. Comparaison des résultats E* des éprouvettes conditionnées selon (AASHTO T283, 2014) et celles non-conditionnés (Yang, et al., 2016)

1.4.4. Conclusion

Une étude bibliographie des protocoles de conditionnement et des méthodes d'essais pour l'évaluation de la sensibilité hivernale et le vieillissement des enrobés bitumineux a été réalisée.

Les méthodes de conditionnement pour tester la sensibilité hivernale peuvent être regroupées en 3 catégories : conditionnement uniquement avec l'eau, conditionnement avec des cycles de gel/dégel (GD) sans eau et conditionnement avec des cycles de GD avec l'eau. Selon la littérature, la présence d'eau cause forcément une perte de la résistance des enrobés bitumineux. La saturation des éprouvettes sous vide ou dans l'eau à une température élevée sont les méthodes les plus appliquées pour les recherches sur l'étude de la sensibilité à l'humidité des enrobés bitumineux. En outre, la méthode de saturation sous vide est une méthode permettant d'obtenir un degré de saturation plus

important par rapport à la méthode d'immersion statique des éprouvettes dans l'eau. Les cycles de GD sans eau causent de très faibles dégradations qui semblent non-significatives par rapport aux endommagements créés par les cycles de GD avec l'eau. La sollicitation des cycles de GD sur les éprouvettes saturées sous vide est donc recommandée pour l'étude de la sensibilité hivernale.

Selon la littérature, la saturation des éprouvettes sans cycle de GD et les cycles de GD sans eau n'ont qu'une très faible influence sur le comportement VEL des enrobés bitumineux. Lorsque ces deux conditionnements (eau et cycles de GD) sont combinés, une diminution du module complexe et une diminution de la résistance à la fatigue ont été observées et quantifiées pour des conditionnements différents. L'effet sur l'expansion/contraction des matériaux a également fait l'objet d'études particulières mais aucun résultat ne concerne le comportement à basse température des enrobés bitumineux après ce type de conditionnement (eau et cycles de GD).

L'effet du vieillissement sur les matériaux bitumineux a été largement étudié. Par contre, il n'existe que peu d'études combinant les effets du vieillissement et de l'eau. Une étude montre une chute de la rigidité de l'enrobé bitumineux si on combine ces deux effets. L'étude envisagée dans ces travaux de thèses permettra une meilleure connaissance de l'influence des cycles de GD sur le comportement des matériaux vieillis, et d'envisager une meilleure corrélation avec les sollicitations in-situ.

Concernant le comportement des matériaux, il convient de distinguer les différents essais réalisés. La plupart des essais utilisent des matériaux compactés et quelques-uns des matériaux foisonnés. La démarche utilisée pour quantifier les dégradations induites par l'eau et/ou les cycles de GD consiste à comparer les propriétés mécaniques des matériaux « conditionnés » à ceux « non-conditionnés ». Les propriétés évaluées sont principalement la perte de résistance ou la baisse de rigidité du matériau dues à l'endommagement causé par les procédures de conditionnement.

Pour l'évaluation des différentes propriétés, il convient de séparer deux types d'essais : les essais destructifs (compression, stabilité, résistance à la traction indirecte et fatigue) et les essais non-destructifs (module complexe, propagation d'ondes). Ces derniers permettent de suivre l'évolution des propriétés du matériau sur une même éprouvette au cours de son vieillissement.

Chapitre II

CAMPAGNES EXPÉRMENTALES ET MATÉRIAU TESTÉ

2. Campagnes expérimentales et matériau testé

L'objectif de la thèse est d'étudier les effets de l'eau, du gel et du vieillissement sur les propriétés thermomécaniques des enrobés bitumineux. Deux campagnes expérimentales ont été réalisées, une campagne principale et une campagne complémentaire, qui sont présentées dans les parties suivantes.

2.1.Campagnes expérimentales

2.1.1. Campagne principale

Le principe de la campagne expérimentale principale est de tester deux types d'éprouvettes différentes : une soumise à aucun conditionnement et l'autre étant conditionnée. Les essais avancés suivants : essai de module complexe (E*), essai de fatigue en traction-compression et essai de retrait thermique empêché (TSRST) ont été réalisés afin d'évaluer les effets des conditionnements sur le comportement des matériaux étudiés lors des phases de conditionnement.

La campagne se compose de 3 grandes étapes (cf. Figure 2-1) :

1. Fabrication et stockage des éprouvettes
2. Conditionnement des éprouvettes
3. Réalisation des essais

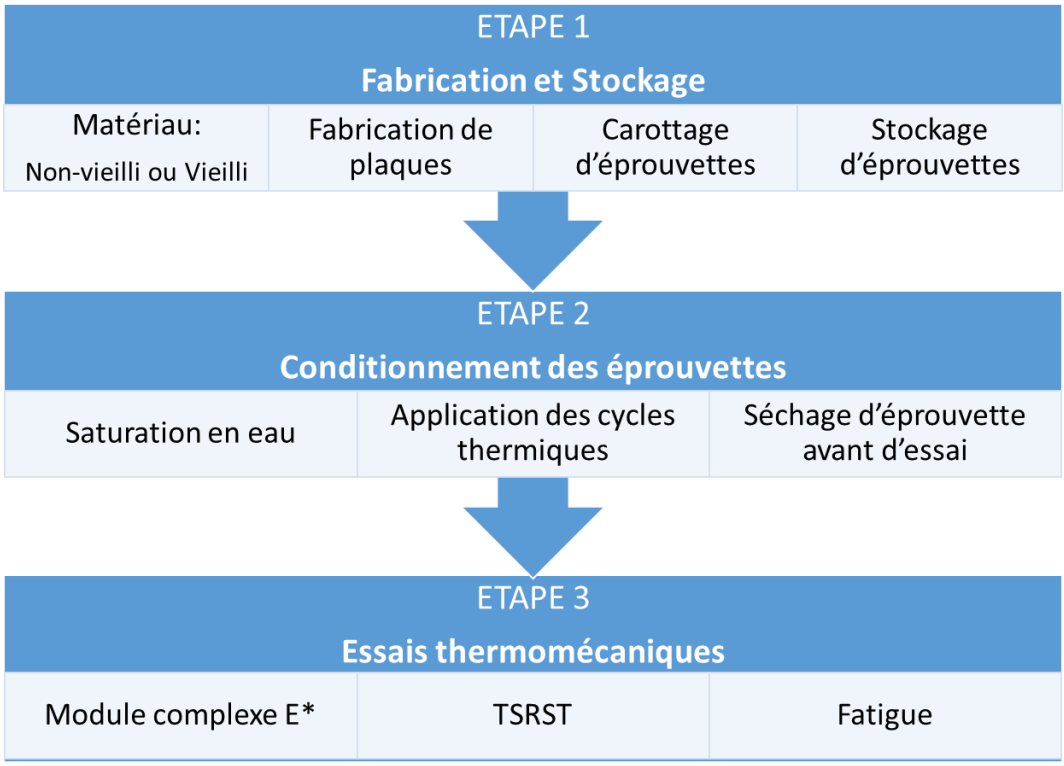


Figure 2-1. Les 3 étapes de la campagne principale

2.1.1.1. Campagne principale avec des cycles de gel/dégel (cycles FT)

Les paramètres suivants sont étudiés:

- Nombre de cycles FT appliqués

Le conditionnement des cycles FT (cf. 2.1.1.3.2) est couteux en temps (1 cycle dure environ 12 heures). Pour économiser le temps de conditionnement, il est préférable d'étudier le phénomène avec

un faible nombre des cycles FT. Le nombre de cycles appliqués, a été fixé à 10 et à 50, afin d'être représentatif du nombre de cycles FT auxquels les chaussées en France pourraient être soumises respectivement pendant un mois ou un hiver. L'amplitude de température d'un cycle varie entre -15°C (pendant 6h) et 10°C (pendant 6h).

- Effet d'une saturation en eau

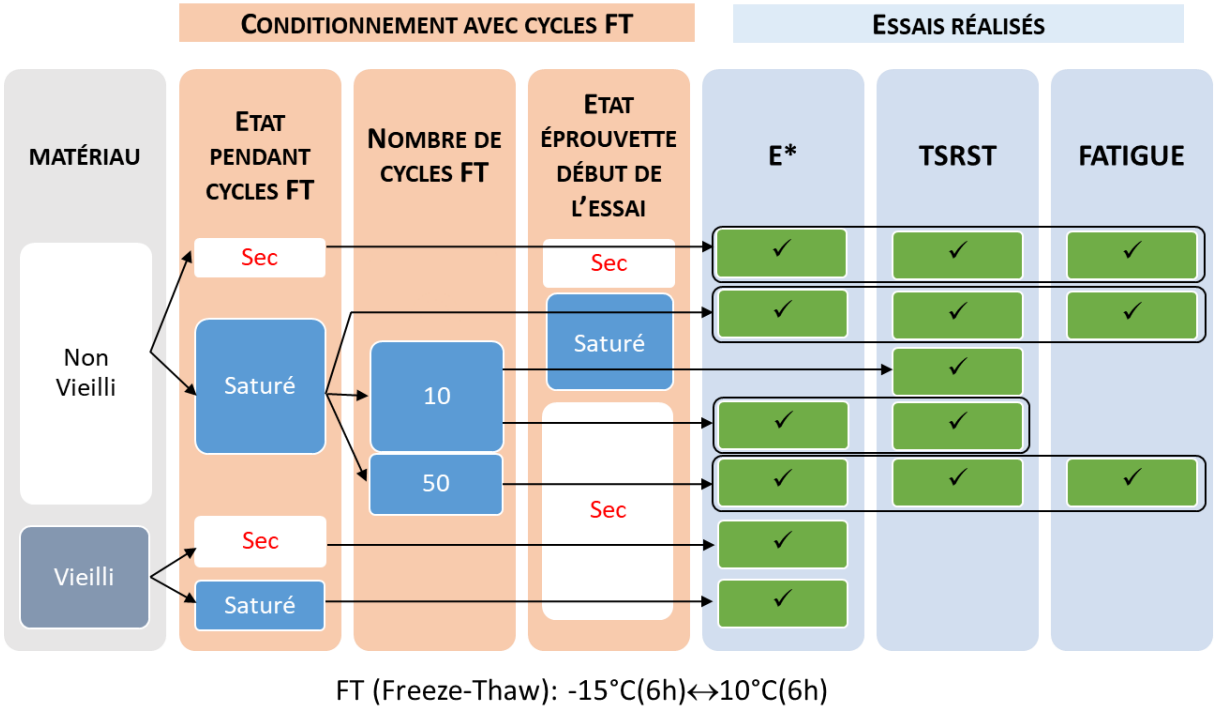
L'eau peut avoir une influence importante lorsqu'on applique des cycles de gel/dégel. Elle peut également avoir un impact sur le matériau lorsqu'elle est combinée avec des sollicitations mécaniques. Afin d'étudier ces effets, la saturation sous vide en eau est utilisée pour le conditionnements des éprouvettes (cf. 2.1.1.3.1).

- Effet du vieillissement

Pour étudier l'effet du vieillissement, deux types de matériaux sont testés : un enrobé « non-vieilli » classiquement fabriqué et le même enrobé (identique à celui non-vieilli) qui a été vieilli artificiellement, avant d'être compacté (cf. 2.2.1.3).

La Figure 2-2 présente les différents types de matériaux testés (différentes modalités de conditionnement) ainsi, que les essais réalisés pour chacun, lors de la campagne expérimentale principale avec des cycles FT. Les flèches permettent de suivre les différents conditionnements successifs auxquels ont été soumises les éprouvettes testées. Les dernières colonnes indiquent les essais qui ont été réalisés durant la thèse.

Dans cette campagne, le matériau non-vieilli ne subissant aucun conditionnement est utilisé comme la référence. Les effets des différentes modalités de conditionnement présentées ci-dessus sont étudiés en comparant les résultats des matériaux qui les subissent avec ceux du matériau de référence.



FT (Freeze-Thaw): -15°C(6h)↔10°C(6h)

Figure 2-2. Campagne principale avec des cycles FT : Conditionnement appliqué et essais réalisés

2.1.1.2. Campagne principale avec des cycles thermiques contenant un réchauffement (cycle HF et cycle HC)

L'analyse de la campagne principale avec des cycles de gel/dégel (FT) montre que le conditionnement appliqué a un effet négligeable sur les propriétés viscoélastiques linéaires des matériaux testés à sec, et aussi sur les valeurs à la rupture des essais TSRST (cf. chapitre V et chapitre VII). Un nombre de cycles FT inférieur à 50 semble insuffisant pour endommager les enrobés bitumineux. L'augmentation du nombre de cycles FT pose cependant le problème de la faisabilité des essais en laboratoire car elle serait trop couteuse en temps. Le choix généralement effectué dans les essais classiques est d'augmenter l'amplitude des cycles de température afin de rendre le conditionnement plus sévère. La question se pose alors de déterminer si l'endommagement qui semble apparaître est lié aux basses températures ou aux températures élevées.

Pour cela, deux nouvelles modalités de conditionnement ont été ajoutées. Le premier nouveau conditionnement consiste à utiliser des cycles de chauffe/gel (« Heating/Thaw », HF). La température d'un tel cycle varie entre 50°C (pendant 6h) et -15°C (pendant 6h). Le deuxième nouveau conditionnement utilise des cycles de chauffe/refroidissement (« Heating/Cooling », HC). Au cours de ces cycles, la température varie entre 50°C (pendant 6h) et 10°C (pendant 6h). Les cycles HF ont pour but de coupler les effets liés au réchauffement avec ceux liés au gel durant le conditionnement. Les cycles HC doivent permettre de dissocier les effets du réchauffement de ceux du gel.

L'amplitude des différents cycles de température utilisés lors des phases de conditionnement durant la campagne principale est comparée sur Figure 2-3.

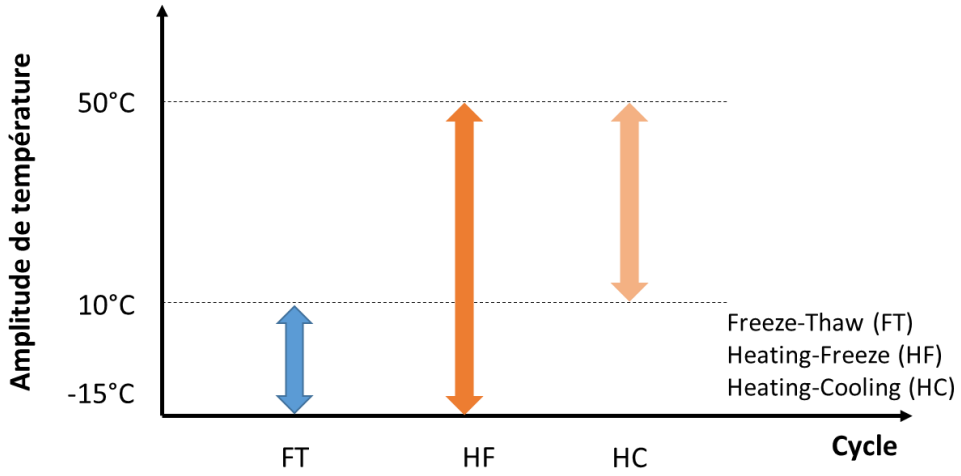


Figure 2-3. Amplitude des différents cycles de température appliqués durant le conditionnement de la campagne principale

La Figure 2-4 présente les essais réalisés avec les nouvelles modalités de conditionnement. Les essais E* et les essais TSRST sont réalisés sur des éprouvettes à l'état sec ayant subi 10 cycles HF ou 10 cycles HC.

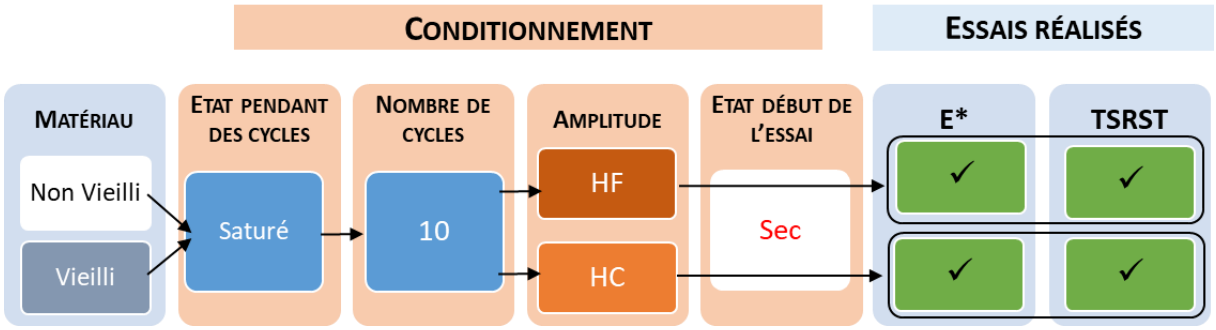


Figure 2-4. Campagne principale avec des cycles HF et des cycles HC

2.1.1.3. Procédures des conditionnements appliqués

Les procédures de conditionnement des éprouvettes (saturation, cycles thermiques et de conservation) sont décrites dans les parties suivantes.

2.1.1.3.1. Saturation sous vide

Le système de saturation développé est schématisé dans la Figure 2-5. Il se compose de deux dessiccateurs en série connectés à un venturi assurant le vide grâce à une valve V1. Au début du processus, le dessiccateur D1 contient les éprouvettes et le dessiccateur D2 contient une réserve d'eau. Deux manomètres M1 et M2 aident à mesurer les niveaux de pression dans les deux dessiccateurs.

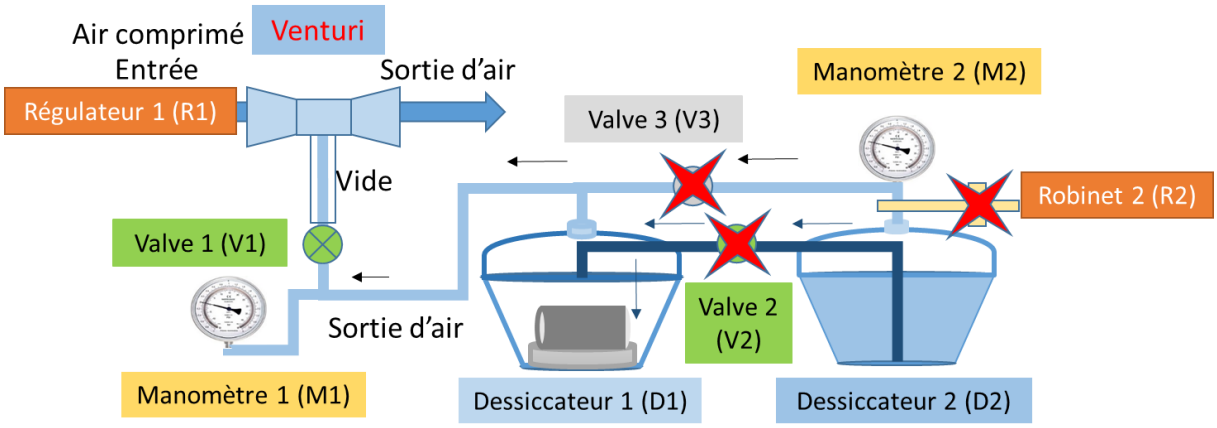


Figure 2-5. Système de saturation sous vide

La procédure de saturation sous vide se compose des 4 étapes suivantes :

1. Placer l'éprouvette dans le premier dessiccateur à température ambiante. Le deuxième dessiccateur est rempli d'eau. Ouvrir V1, R1, V3 ; fermer V2, R2. Faire le vide de 8kPa (pression absolue) afin de dégazer des bulles d'air dans l'éprouvette et l'eau.
2. Fermer V3 ; régler R2 tel que M2>M1 (2kPa). Ouvrir V2 afin que l'eau s'écoule automatiquement de D2 à D1 jusqu'au remplissage de D1.
3. Fermer V2, ouvrir V1. Maintenir le vide de 8kPa dans D1 pendant 90 min.
4. Remonter lentement à la pression atmosphérique et la maintenir dans le dessiccateur D1 pendant (30 ± 5) min.

Cette procédure permet d'obtenir un degré important de saturation qu'il n'est pas possible d'obtenir par trempage dans l'eau.

2.1.1.3.2. Cycles thermiques

a) Cycle de gel/dégel (FT)

Différentes procédures d'application des cycles FT existant dans la littérature ont été analysées et sont détaillées dans le chapitre 1. En se basant sur cette étude, la sollicitation thermique choisie pour appliquer les cycles FT est décrite ci-dessous :

- L'amplitude des cycles FT varie entre -15°C et 10°C. La durée totale pour un cycle est de 12h dont 5h30 de maintien de la température pour chaque étape gel et dégel, plus 1 heure de variation de température à la vitesse de 50°C/h (30 min de baisse et 30 min d'augmentation de la température) (cf. Figure 2-6).

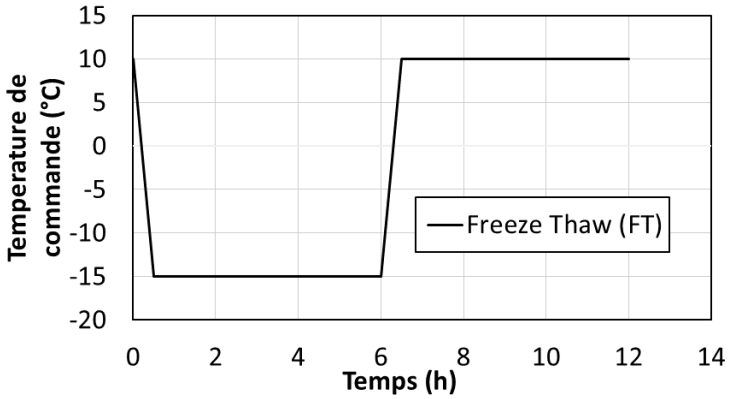


Figure 2-6. Température de pilotage de l'enceinte thermique pour un cycle FT

La procédure de conditionnement des éprouvettes durant l'application de ces cycles FT est la suivante :

1) Placer l'éprouvette dans un sac plastique hermétique immédiatement après la procédure de saturation, avec 10cl d'eau dans le sac, pour conserver au mieux le degré de saturation,
2) Mettre l'éprouvette sur un lit de sable et la placer dans l'enceinte thermique (Figure 2-7. a)
3) Appliquer les cycles FT (Figure 2-7. b)



(a) (b)

Figure 2-7. Eprouvettes dans les sacs plastiques contenant 10cl d'eau sur un lit de sable (a) Eprouvettes mises dans une enceinte thermique programmable (b)

b) Cycles de chauffe/gel (HF) et cycles chauffe/refroidissement (HC)

La procédure d'application des cycles HF et des cycles HC est similaire à celle des cycles FT. Cependant, l'amplitude des cycles est différente (cf. Figure 2-8):

- La température lors des cycles HF varie entre -15°C et 50°C. La durée totale pour un cycle est de 13h40 dont 5h30 de maintien de la température pour chaque étape gel et chauffe, plus 2h40 de variation de température à la vitesse de 50°C/h (environ 1h20 de baisse et 1h20 d'augmentation de la température).
- Pour les cycles HC, la température varie entre 10°C et 50°C. La durée totale pour un cycle est de 12h40 dont 5h30 de maintien de la température pour chaque étape chauffe et refroidissement, plus environ 1h40 de variation de température à la vitesse de 50°C/h (environ 50 min de baisse et 50 min d'augmentation de la température).

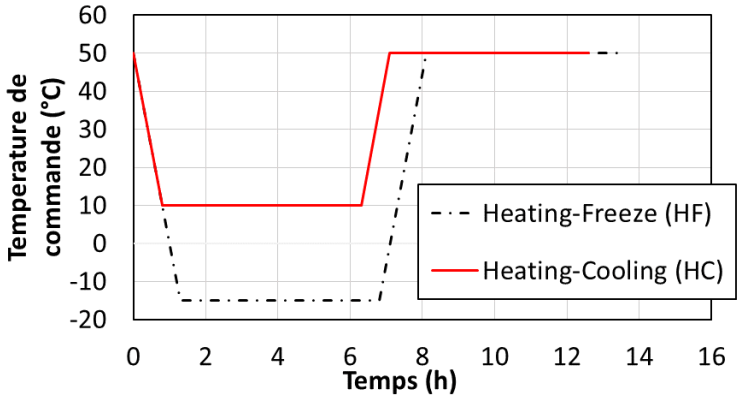


Figure 2-8. Commande de la température de l'enceinte thermique pour un cycle HF (courbe noire) et celle pour un cycle HC (courbe rouge)

2.1.1.3.3. Séchage sous vide

Les éprouvettes testées à l'état sec sont séchées dans un dessiccateur sous vide (8kPa de pression absolue) à la température ambiante variant entre 20°C et 25°C, en présence de gel de silice pendant une durée de 7 jours au minimum (cf. Figure 2-9).

Cette procédure a pour but de réduire le temps de séchage sans endommager les éprouvettes à tester.

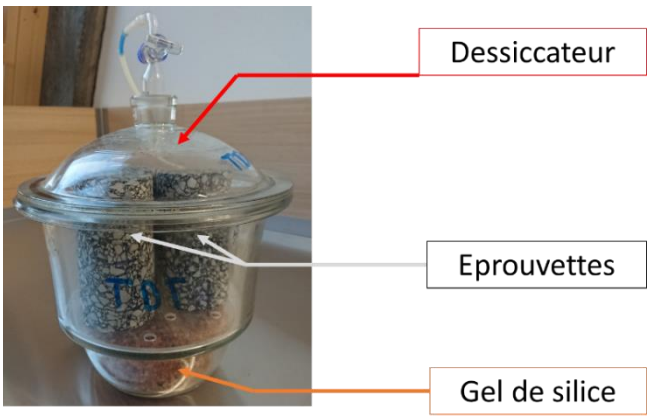


Figure 2-9. Séchage sous vide en utilisant un dessiccateur avec du gel de silice

2.1.2. Campagne complémentaire sur l'évolution des éprouvettes lors du conditionnement avec les cycles de gel/dégel

Une campagne complémentaire (Campagne X) a été réalisée afin d'évaluer comment le volume, le degré de saturation, et la teneur en vides des éprouvettes évoluent lors du conditionnement. La campagne X se compose de 5 sous-campagnes : X.a, X.b, X.c, X.d et X.e. (Figure 2-10).

Les sous-campagnes X.a et X.b donnent une information sur l'évolution des éprouvettes lors d'un conditionnement complet qui se compose de la saturation, des cycles FT et du séchage sous vide avec gel de silice.

Les sous campagnes X.c et X.e permettent d'étudier l'effet du vide durant la phase de séchage

La sous campagne X.d permet d'apprécier l'influence des cycles FT lors du conditionnement des éprouvettes, par comparaison des résultats avec ceux des sous-campagnes X.a et X.b.

Des mesures de volume par une méthode géométrique (V) et de masse (m) sont réalisées au cours des procédures de conditionnement. La première mesure notée m_0, V_0 est réalisée 2 à 3 semaines après le carottage sous eau des éprouvettes. Une mesure est réalisée avant la saturation sous vide (m_1, V_1); une mesure réalisée après de la saturation sous vide (m_2, V_2); une mesure réalisée à la fin de l'application des cycles FT (m_3, V_3); plusieurs mesures réalisées pendant la phase de séchage (m_{3i}, V_{3i})(i indiquant la i^{ème} mesure dans cette phase, i≥1). La dernière mesure m_{sec} est réalisée après séchage dans une étuve à 105 °C pendant 2h (Cf. Figure 2-10).

Il faut noter que :

- pour la sous-campagne X.d, aucun cycle FT n'est appliqué → $m_2 = m_3$ et $V_2 = V_3$
- pour la sous-campagne X.e, les éprouvettes ne sont pas saturées et ne subissent aucun cycle FT → $m_1 = m_2 = m_3$ et $V_1 = V_2 = V_3$

L'analyse des résultats de la campagne X est détaillée dans le chapitre V.

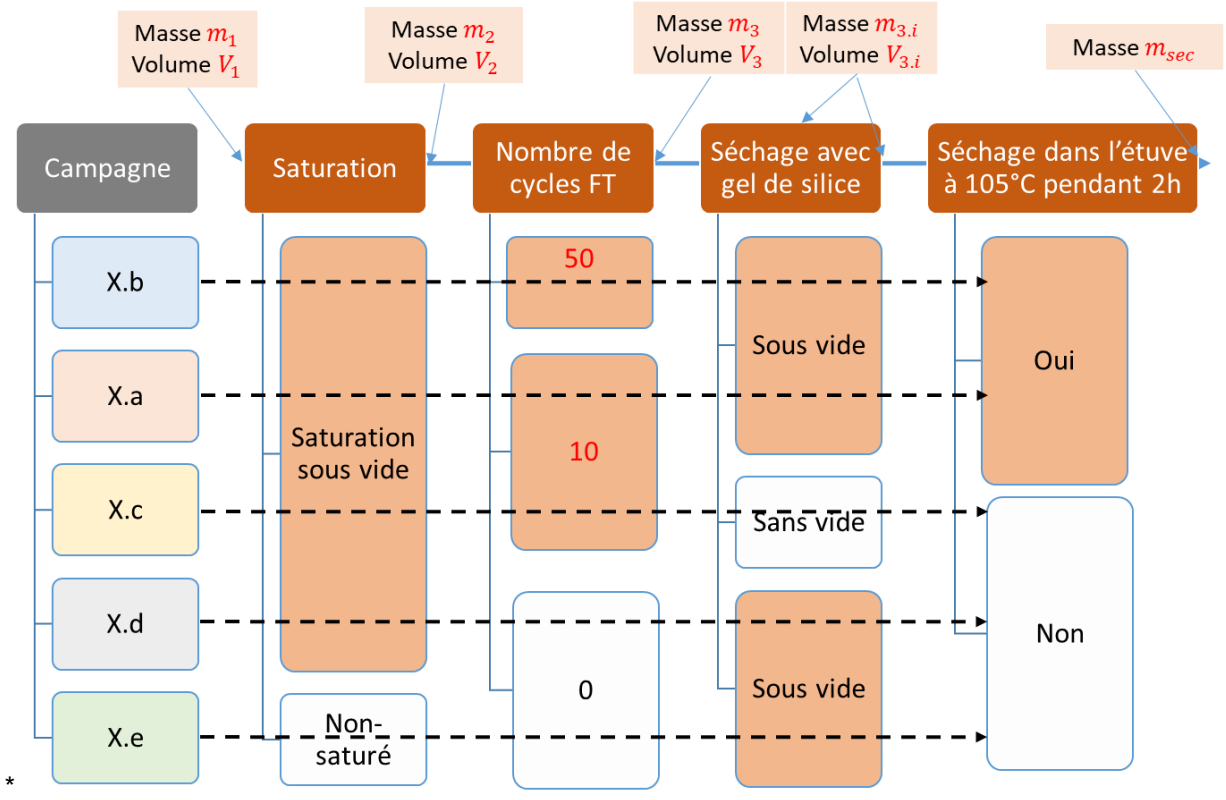


Figure 2-10. Campagne X des essais complémentaires

2.2.Matériau et éprouvettes

2.2.1. Matériau

Le matériau testé est un enrobé bitumineux de type BBSG 0/10 de classe 2 (NF EN 13108-1, 2007) fabriqué avec un bitume 50/70 et avec une teneur en vides visée de 8%.

2.2.1.1. Caractéristiques du liant

Le bitume utilisé dans le cadre de cette thèse a été caractérisé par des essais de pénétrabilité à l'aiguille (PEN) (NF EN 1426, 2007) et des essais de température de ramollissement bille et anneau (TBA) (NF EN 1427, 2007). Les résultats sont présentés dans le Tableau 2-1.

Tableau 2-1.Caractérisation du bitume

	Essai				
	PEN (1/10 mm)			**TBA (°C)**	
Numéro d'échantillons	1	2	3	1	2
Valeur expérimentale	56,5	55,0	55,8	48,4	48,8
Valeur moyenne	55,8			48,6	

2.2.1.2. Filler, granulats et composition de l'enrobé

Le filler utilisé est un filler calcaire dont les caractéristiques ont été déterminées par le fournisseur et vérifiées par le centre de recherche d'EUROVIA à Mérignac.

Les granulats utilisés se composent de 3 coupures granulométriques: 0/4, 4/6 et 6/10. Ils ont été caractérisés par des essais de granulométrie (NF EN 933-1, 2012) et par des essais de détermination de masse volumique réelle (MVR) (NF EN 1097-6, 2014) (Cf. Tableau 2-2).

Tableau 2-2. Masse volumique des granulats

Matériau	**ρ_a (kg/m3)**
Granulat 0/4	2650
Granulat 4/6	2660
Granulat 6/10	2630

La composition de l'enrobé bitumineux (BBSG 0/10) étudié est donnée dans le Tableau 2-3, et sa courbe granulométrique en Figure 2-11.

Tableau 2-3. Composition du mélange

Matériaux	**Granulat**			**Filler**	**Bitume**
	6/10	4/6	0/4		
Fraction en masse (%)	41,67	8,52	41,67	2,84	5,30
Total (%)	100				
MVR	2441 kg/m3				

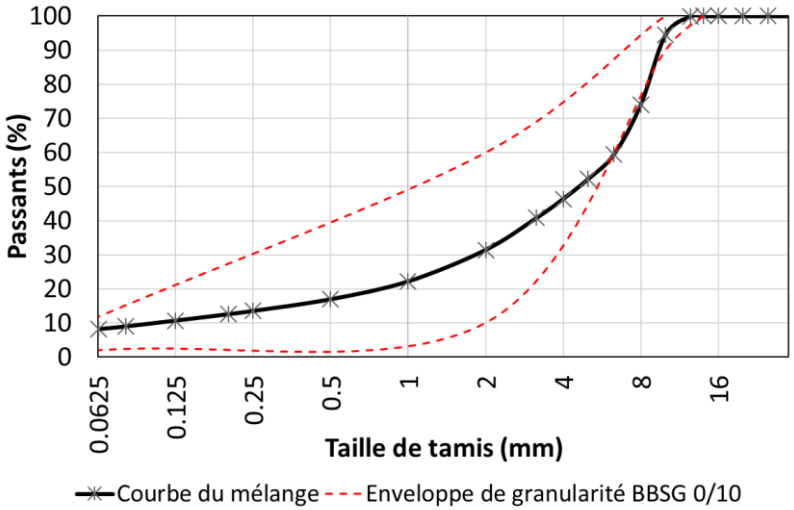


Figure 2-11. Courbe granulométrique du mélange

Sa formule a été vérifiée par des essais à la Presse à Cisaillement Giratoire (PCG) (NF EN 12697-31, 2007). Le résultat des essais PCG est présenté sur la Figure 2-12. La teneur en vides après 60 girations V60 est conforme à la norme (NF EN 13108-1, 2007).

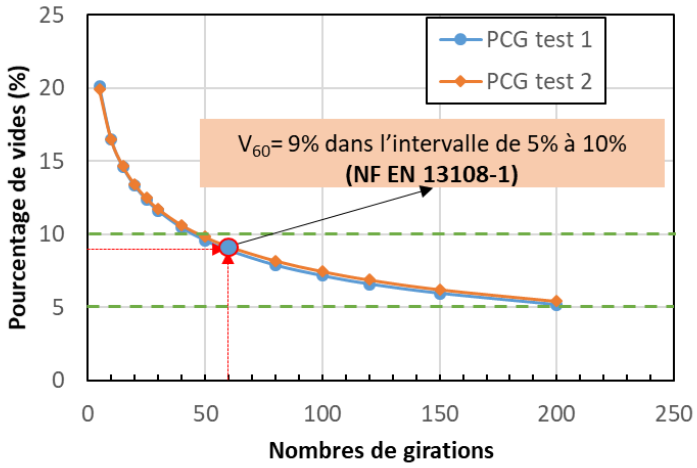


Figure 2-12. Résultats de l'essai PCG

2.2.1.3. Procédure du vieillissement appliquée avant compactage

Selon la bibliographie, plusieurs méthodes de vieillissement des enrobés bitumineux ont été développées. Parmi ces méthodes, la procédure développée dans le cadre de travaux de la RILEM (N Partl , M.; U Bahia, H.; Canestrari, F.; Di Benedetto, H.; Piber, H.; Sybilski, D., 2012) est la plus appliquée dans les recherches récentes en raison de sa bonne corrélation avec les résultats sur le terrain. La méthode RILEM a donc logiquement été utilisée pour le vieillissement de nos mélanges bitumineux. Cette méthode vise à reproduire le vieillissement à court terme et à long terme des enrobés en deux étapes (Cf. Figure 2-13):

1) Vieillissement à court terme : l'enrobé foisonné est placé dans un plateau avec une épaisseur de 5 à 6cm et mis dans une enceinte ventilée à 135 °C pendant 4 h.
2) Vieillissement à long terme : le matériau est ensuite placé foisonné en 5 (à 6) cm d'épaisseur dans un plateau à 85°C pendant 9 jours dans une enceinte ventilée.

Avant chaque étape et au cours de la deuxième étape (après 2, 5 ,7 et 9 jours), le matériau est homogénéisé par brassage manuel pendant une minute afin d'assurer un vieillissement homogène.

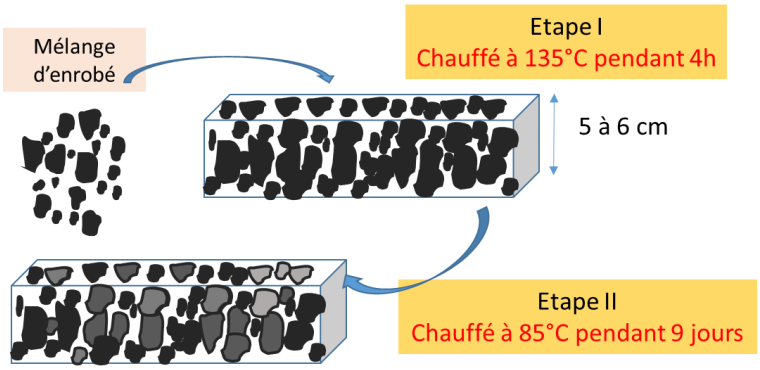


Figure 2-13. Etapes de vieillissement des matériaux (Procédure RILEM) (N Partl , M.; U Bahia, H.; Canestrari, F.; Di Benedetto, H.; Piber, H.; Sybilski, D., 2012)

2.2.2. Eprouvettes

2.2.2.1. Fabrication

Les plaques d'enrobé ont été fabriquées au compacteur à pneu type LPC au centre de recherche EUROVIA selon la norme (NF EN 12697-33, 2007). Les dimensions des plaques sont de 600mm en longueur, 400mm en largeur, 150mm (ou 120mm ou100 mm) en hauteur.

Ces plaques sont ensuite envoyées à l'ENTPE pour le sciage et le carottage des éprouvettes. Les dimensions des éprouvettes utilisées pour l'essai E* et l'essai de fatigue sont de 140mm en hauteur et 75mm en diamètre. Les dimensions des éprouvettes de type TSRST sont de 225mm en hauteur et 65mm en diamètre.

Après le carottage et le sciage, les éprouvettes sont stockées à la température de 20°C environ dans un bureau. Les éprouvettes sont posées verticalement dans des bacs en plastique.

Différents plans de carottage sont utilisés afin d'optimiser le nombre nécessaire d'éprouvettes pour la réalisation des essais (cf. Annexe). La Figure 2-14 présente le plan A de sciage et de carottage. D'autres plans de sciage et de carottage sont présentés dans l'annexe. Les axes I, II, III (I - direction de roulement, II – direction verticale de la charge du compactage, III – direction perpendiculaire au roulement de la roue du compactage) sont aussi indiquées. Ces directions sont également repérées sur les éprouvettes lors de leur carottage.

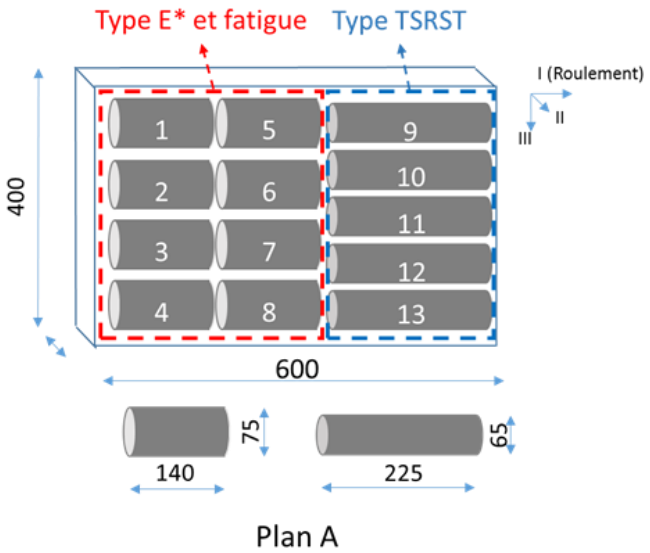


Figure 2-14. Plan A de sciage et de carottage d'une plaque d'enrobé

2.2.2.2. Caractéristiques géométriques et teneur en vides

Après 2 semaines de carottage et sciage, « TEV_0 » est la teneur en vides déterminée avec la première mesure de masse m_0 et de volume V_0 de l'éprouvette (par méthode géométrique (NF EN 12697-29, 2003)). Elle est calculée selon la formule suivante.

$$TEV_0 = \left(1 - \frac{MVA_0}{MVR}\right) \times 100\% \qquad \text{Eq. 2-1}$$

Où

$MVA_0 = \frac{m_0}{V_0}$: Masse Volumique Apparente à la première mesure après le sciage

$MVR = 2{,}441 g/cm^3$: Masse Volumique Réelle (calculée à partir de la formulation du mélange)

Il faut noter que la masse volumique apparente MVA_0 n'est a priori pas obtenu quand l'éprouvette est complètement sèche (degré de saturation égale 0%). Les valeurs de teneur en vides des éprouvettes 2 semaines après le carottage et le sciage sous eau (TEV_0) ne sont donc que des valeurs indicatives car la teneur en eau n'est pas connue.

8 plaques d'enrobé non-vieilli et 4 plaques d'enrobé vieilli ont été carottées. 136 éprouvettes ont été fabriquées au total. 60 éprouvettes non-vieillies et 36 éprouvettes vieillies de type E* et fatigue ainsi que 30 éprouvettes non-vieillies et 10 éprouvettes vieillies de type TSRST. La teneur en vides des éprouvettes varie de 4% à 9% (cf. Annexe). En accord avec la norme (NF EN 13108-1, 2007), toutes les éprouvettes de 5% à 8% de TEV_0 sont utilisées pour les essais E*, fatigue et TSRST. Les autres éprouvettes seront utilisées pour les essais complémentaires. Les caractéristiques des éprouvettes sont indiquées dans l'Annexe.

2.2.2.3. Nomenclature des éprouvettes

Le nom donné aux éprouvettes se compose de trois parties : une partie identifiant l'éprouvette, une autre indiquant le conditionnement appliqué et la dernière partie indiquant l'état de l'éprouvette pendant l'essai. La nomenclature mise en place est expliquée dans la Figure 2-15.

Par exemple, l'éprouvette nommée SG1A10(5.9)10FT provient de l'enrobé type BBSG (le seul considéré), est carottée depuis la plaque numéro 1 du matériau non-vieilli à la position numéro 10 selon le plan A de carottage. Sa teneur en vides mesurée 2 semaines après le carottage est de 5,9%.

Lors de la phase de conditionnement, cette éprouvette est saturée, puis soumise à 10 cycles de gel/dégel (FT), et enfin séchée sous vide dans le dessiccateur avant d'être testée à l'état sec.

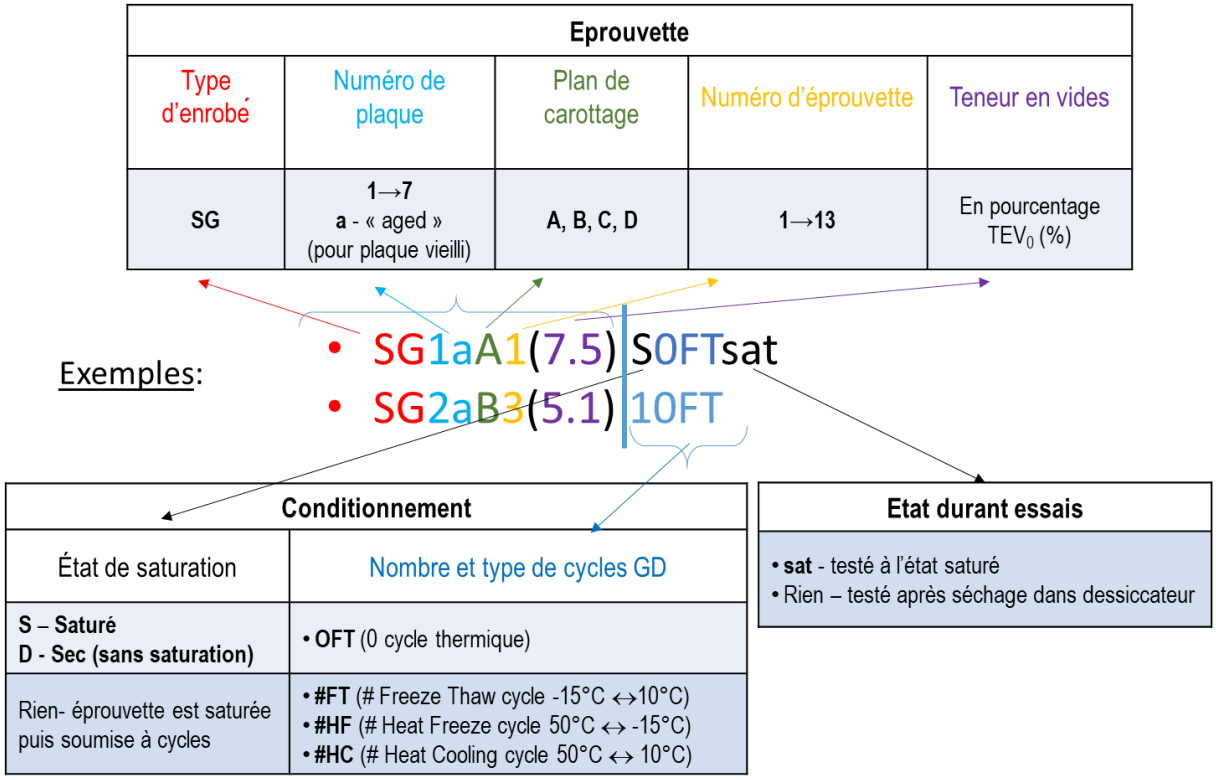


Figure 2-15. Nomenclature des éprouvettes

Chapitre III

DESCRIPTION DES ESSAIS THERMOMÉCANIQUES RÉALISÉS

3. Description des essais thermomécaniques réalisés

Ce chapitre est dédié à la description des dispositifs expérimentaux utilisés, des procédures suivies et des exemples de résultats obtenus lors des essais thermomécaniques réalisés.

3.1. Dispositifs expérimentaux

Des sollicitations cycliques de traction-compression sont appliquées pour les essais de module complexe et de fatigue sur les éprouvettes cylindriques de 140mmx75mm (hauteur x diamètre). Les essais de retrait thermique empêché (en anglais « Thermal Stress Restrained Specimen Test », TSRST) sont réalisés sur éprouvettes cylindriques de 225mmx65mm (hauteur x diamètre). Malgré la différence de dimensions des éprouvettes, ces essais partagent les mêmes dispositifs expérimentaux qui sont présentés ci-après.

Une presse hydraulique MTS LandMark 250kN, équipée d'une électronique de pilotage et d'acquisition a été utilisée pour la réalisation des essais. Le pilotage a été réalisé en contrainte ou sur la moyenne des déformations mesurées localement sur l'éprouvette à l'aide de 3 extensomètres.

Une cellule de force de 25kN mesure la charge appliquée (*F*) qui permet de calculer la contrainte verticale σ_z supposée homogène dans l'éprouvette (rapport entre la force mesurée et la section de l'éprouvette de diamètre *D*) selon Eq. 3-1.

$$\sigma_z = \frac{F}{\pi\left(\frac{D}{2}\right)^2} \qquad \text{Eq. 3-1}$$

La déformation verticale ε_z est mesurée à l'aide de 3 extensomètres placés à 120° autour de l'éprouvette (cf. Figure 3-1). La déformation verticale est calculée comme étant la moyenne des déformations mesurées par ces 3 extensomètres. L'amplitude de mesure des extensomètres est de ±1.5mm avec une précision de 0,2µm sur une longueur entre couteaux choisie égale à 75mm pour les essais de module complexe et de fatigue et 100mm pour les essais TSRST.

$$\varepsilon_z = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{3} \qquad \text{Eq. 3-2}$$

où ε_i avec (i=1, 2 ou 3) sont les déformations axiales mesurées par les 3 extensomètres

Les déplacements radiaux sont mesurés à l'aide de deux capteurs sans contact à courant de Foucault ayant une étendue de mesure de 500µm. Ces capteurs sont placés à mi-hauteur de l'éprouvette et sont diamétralement opposés (cf. Figure 3-1). Chaque capteur vise une cible en papier aluminium collée sur l'éprouvette. La déformation radiale est calculée selon

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta l_{r1} + \Delta l_{r2}}{D} \qquad \text{Eq. 3-3}$$

Où

- ε_r :la déformation radiale
- Δl_{ri} avec (i=1, 2) :les déplacements radiaux mesurés par les 2 capteurs sans-contact

Une enceinte thermique est utilisée pour réguler la température lors des essais. La gamme de température s'étend de -40°C à 70°C.

Une sonde PT100 mesure la température sur la surface de l'éprouvette. Pour les essais TSRST, 3 sondes de type thermocouple sont placées à côté des 3 extensomètres. Elles permettent de mesurer la

température de l'air à proximité des extensomètres. Ces capteurs de température permettent de mesurer de façon plus précise la température dans l'enceinte, qui peut varier par rapport à la consigne et suivant la position dans l'enceinte.

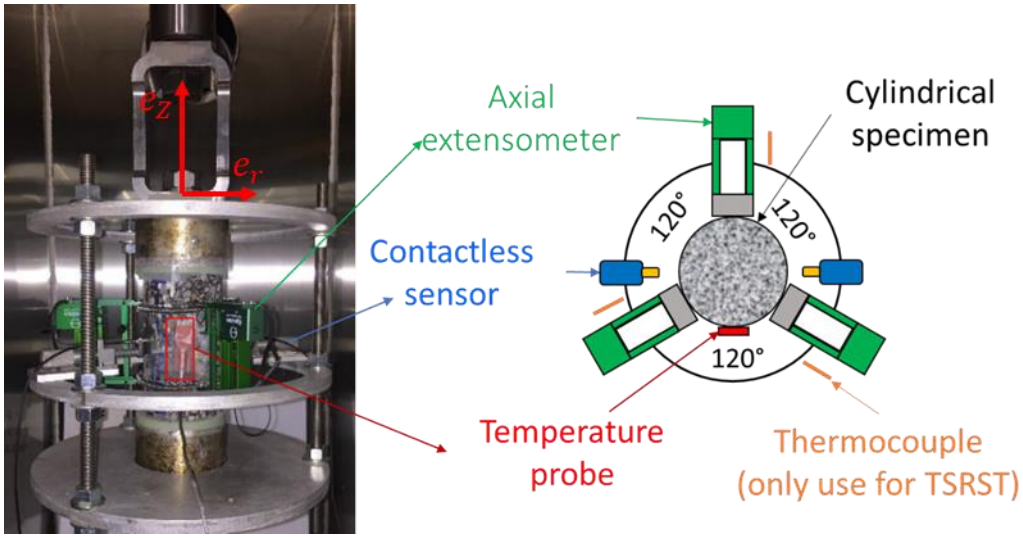


Figure 3-1. Disposition des capteurs

3.2. Essai de module complexe (E*)

3.2.1. Procédure de l'essai E*

L'essai de module complexe consiste à appliquer des sollicitations sinusoïdales axiales en déformation (ou en contrainte) à l'éprouvette cylindrique 140mm x 75mm (hauteur x diamètre) à différentes fréquences et à différentes températures.

L'essai est réalisé sur une large gamme de températures (de -25°C à 35°C pour le matériau non-vieilli et de -25°C à 45°C pour le matériau vieilli). L'ordre d'application des températures est le suivant : 15°C(1); -25°C; -15°C; -5°C; 5°C; 15°C(2); 25°C; 35°C; 45°C (pour le matériau vieilli); 15°C(3) (cf. Figure 3-2.a). Les trois passages à 15°C permettent de vérifier que l'éprouvette ne s'endommage pas au cours de l'essai. Il convient de noter que ces valeurs sont des températures visées, qui peuvent légèrement varier en fonction de la régulation de l'enceinte thermique. A chaque température, l'éprouvette est toujours sollicitée à 6 fréquences (0,03Hz, 0,1Hz, 0,3Hz, 1Hz, 3Hz, 10Hz). Une fréquence plus faible (0,01Hz) a été ajoutée aux températures élevée (35°C et 45°C), afin de déterminer les propriétés viscoélastiques des matériaux testés sur une gamme aussi large que possible (cf. Figure 3-2.b).

Les sollicitations cycliques sont réalisées en mode de pilotage de déformation. L'amplitude de la déformation axiale pendant les chargements cycliques est de $50x10^{-6}$m/m. Le nombre de cycles de chargement varie de 4 cycles à 0,01Hz jusqu'à 50 cycles à 10 Hz. Une période de repos de 300 secondes, durant laquelle la contrainte est maintenue nulle, est respectée entre deux périodes successives de chargement cyclique (c'est à dire, entre chaque changement de fréquence). Une période de conditionnement de 4 heures environ est appliquée pour chaque changement de température pour assurer une température homogène à l'intérieur de l'éprouvette. Pendant cette période, la contrainte axiale appliquée sur l'éprouvette est également maintenue à 0MPa.

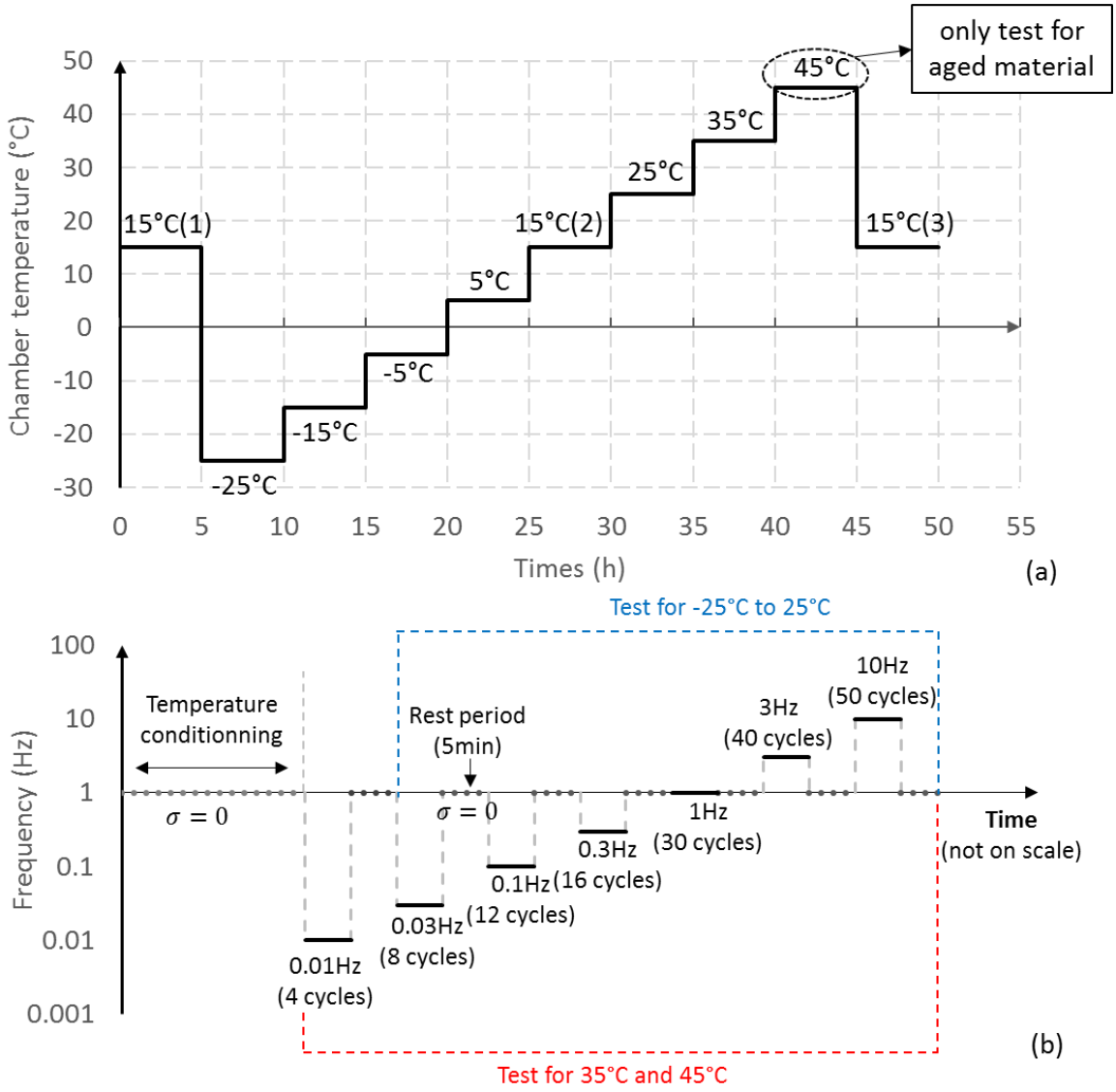


Figure 3-2. Chronologie des températures appliquées durant les essais de module complexe (a) et pour chaque température, chronologie des cycles à différentes fréquences et des périodes de repos (b)

3.2.2. Définition et calcul des paramètres mécaniques

Lors de l'essai E*, l'acquisition des données est réalisée en fonction de la fréquence de sollicitation afin d'obtenir 250 points par cycle. Chaque signal est ensuite approché pour chaque deux cycles par une fonction sinusoïdale à l'aide de la méthode des moindres carrés. Le choix de deux cycles permet un calcul plus précis de l'amplitude et du déphasage des signaux.

Les paramètres sont déterminés à partir des fonctions de régression pour 2 cycles consécutifs comme ci-dessous :

- Contrainte axiale

$$\sigma_z(t) = \sigma_0 sin(\omega t + \varphi_\sigma) + \sigma_{mi} \qquad \text{Eq. 3-4}$$

où $\sigma_0, \sigma_{mi}, \varphi_\sigma$ sont respectivement l'amplitude, la valeur centrée et l'angle de phase de la contrainte axiale.

- Déformation axiale

$$\varepsilon_z(t) = \varepsilon_0 sin(\omega t + \varphi_\varepsilon) + \varepsilon_{mi} \quad \text{Eq. 3-5}$$

où $\varepsilon_0, \varepsilon_{mi}, \varphi_\varepsilon$ sont respectivement l'amplitude, la valeur centrée et l'angle de phase de la déformation axiale. Dans le cas de sollicitation en déformation, la valeur de ε_{mi} est toujours proche de 0.

- Déformation radiale

$$\varepsilon_r(t) = \varepsilon_{r0} sin(\omega t + \varphi_{\varepsilon r}) + \varepsilon_{rmi} \quad \text{Eq. 3-6}$$

où $\varepsilon_{r0}, \varepsilon_{rmi}, \varphi_{\varepsilon r}$ sont respectivement l'amplitude, la valeur centrée et l'angle de phase de la déformation radiale.

La Figure 3-3 présente les mesures de la déformation axiale, la déformation radiale et la contrainte axiale ainsi que les courbes de régressions pour 2 cycles consécutifs.

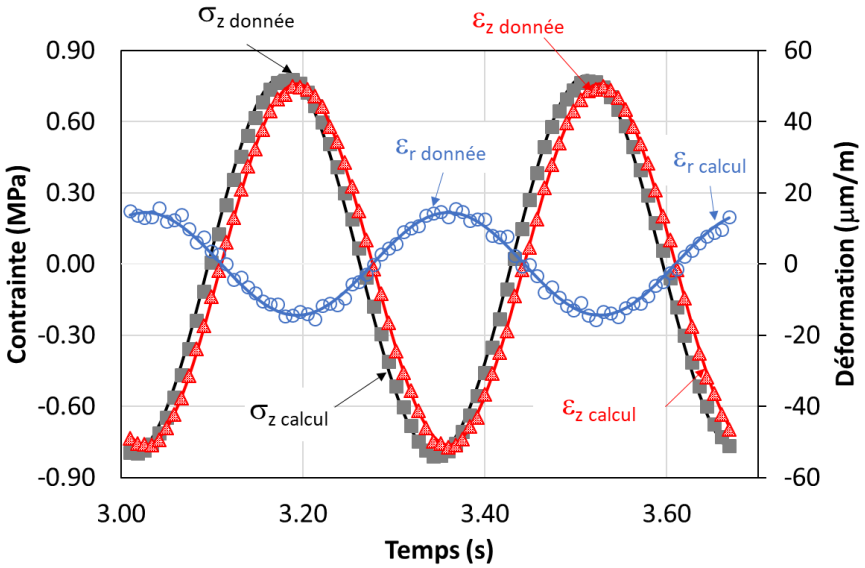


Figure 3-3.Mesures de déformation axiale, déformation radiale et contrainte axiale (points expérimentaux) et les régressions sinusoïdales (courbes continues) de l'essai SG4B10(8.2)D0FT à 5°C, 3Hz (le nombre de points expérimentaux tracé est réduit pour une bonne lisibilité).

La norme, l'angle de phase du module complexe E^* et celles du coefficient de Poisson complexe ν^* sont calculées par les relations suivantes :

Tableau 3-1. Calcul de la norme et de l'angle de phase de E^*et celles de ν^*

Norme	Angle de phase
$\lvert E^* \rvert = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}$	$\varphi_E = \varphi_\sigma - \varphi_\varepsilon$
$\lvert \nu^* \rvert = \frac{\varepsilon_{r0}}{\varepsilon_0}$	$\varphi_\nu = \varphi_{\varepsilon r} - \varphi_\varepsilon - \pi$

3.2.3. Exemple de résultats pour l'essai de module complexe

Cette partie a pour but de présenter, à titre d'exemple, les résultats de l'essai sur l'éprouvette SG4B10(8.2)D0FT.

La Figure 3-4 présente les courbes isothermes du module complexe (norme et angle de phase) ainsi que celles du coefficient de Poisson complexe.

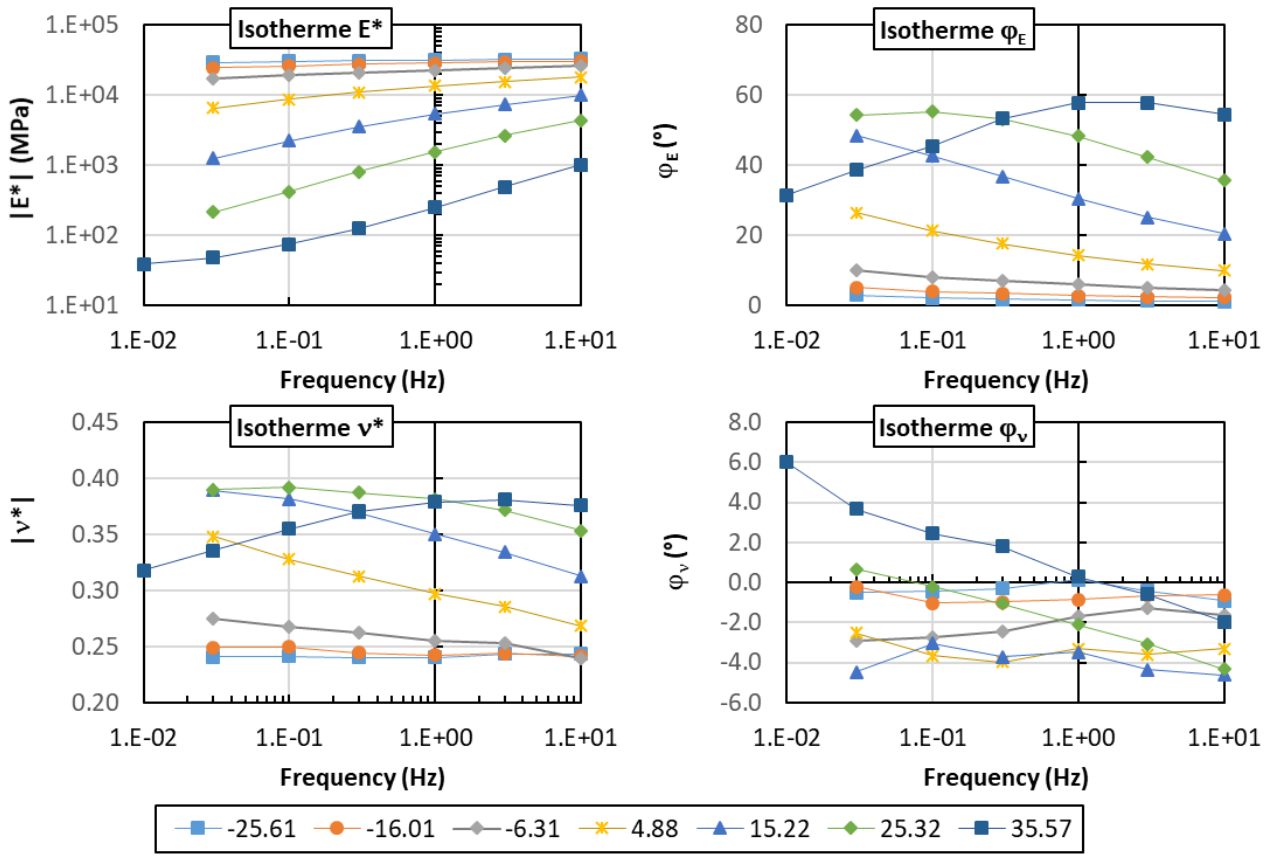


Figure 3-4. Courbes isothermes de la norme et de l'angle de phase du module complexe, et du coefficient de Poisson complexe (Test SG4B10(8.2)D0FT)

La Figure 3-5 présente les courbes isochrones du module complexe (norme et angle de phase) ainsi que celles du coefficient de Poisson complexe.

On peut observer des résultats classiques pour les enrobés bitumineux, à savoir que le module complexe et le coefficient de Poisson complexe ne sont pas des constantes. La norme du module complexe diminue lorsque la température augmente, et augmente lorsque la fréquence augmente. Au contraire, la norme du coefficient de Poisson augmente lorsque la température augmente, et diminue lorsque la fréquence augmente. Les angles de phase du module complexe et du coefficient de Poisson complexe passent par un pic. On constate aussi que l'angle de phase du coefficient de Poisson prend généralement la valeur négative (sauf à haute température et basse fréquence).

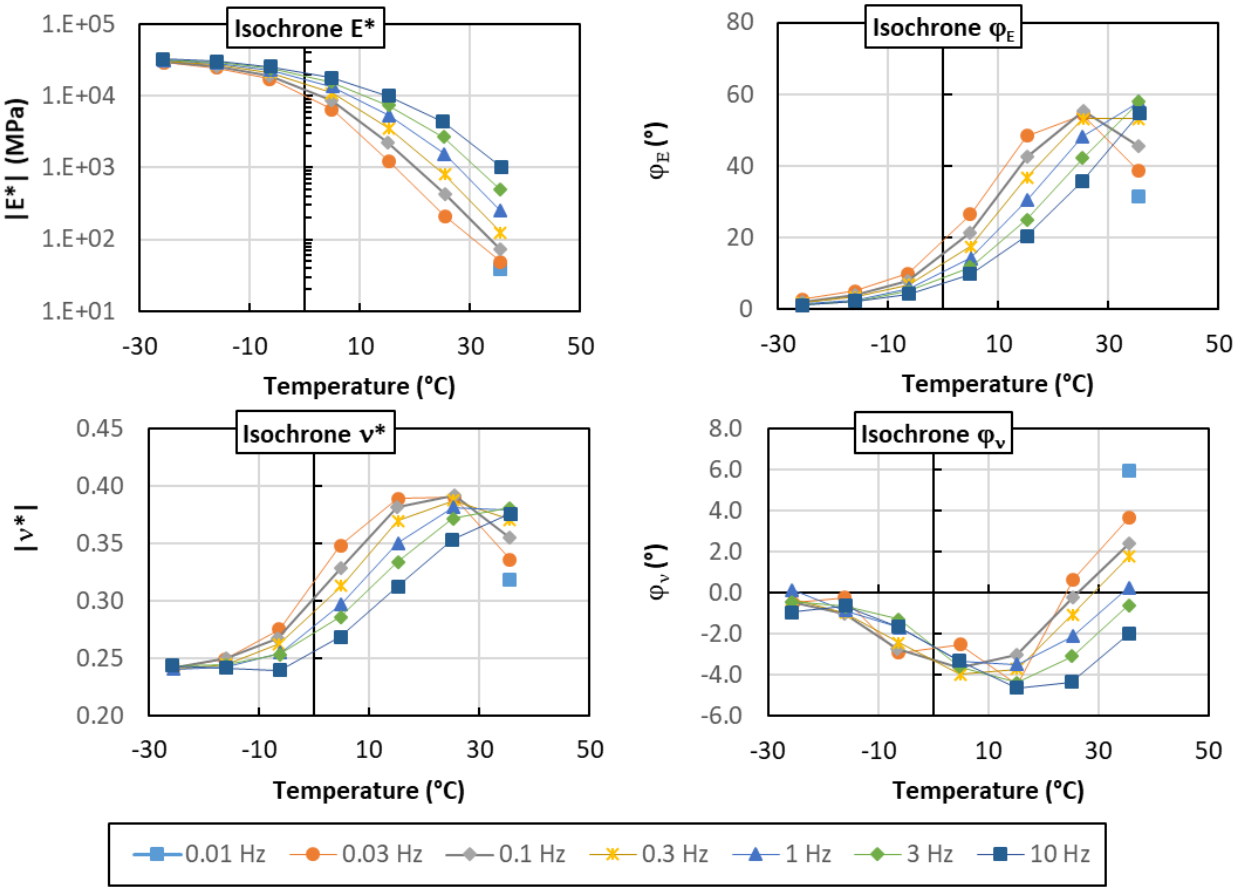


Figure 3-5. Courbes isochrones de la norme et de l'angle de phase du module complexe et du coefficient de Poisson complexe (Test SG4B10(8.2)D0FT)

La Figure 3-6 présente les résultats expérimentaux de l'essai SG4B10(8.2)D0FT dans le plan de Cole-Cole (partie réelle vs partie imaginaire) et dans l'espace de Black (angle de phase vs norme).

Les courbes obtenues dans le plan de Cole-Cole et dans l'espace de Black sont caractéristiques de l'enrobé étudié. Lorsque le matériau obéit au principe d'équivalence temps-température les points expérimentaux permettent de définir une courbe unique, caractéristique du matériau testé. Dans le cas de ce matériau, le principe d'équivalence temps-température est donc respecté, à la fois pour le module complexe et pour le coefficient de Poisson complexe.

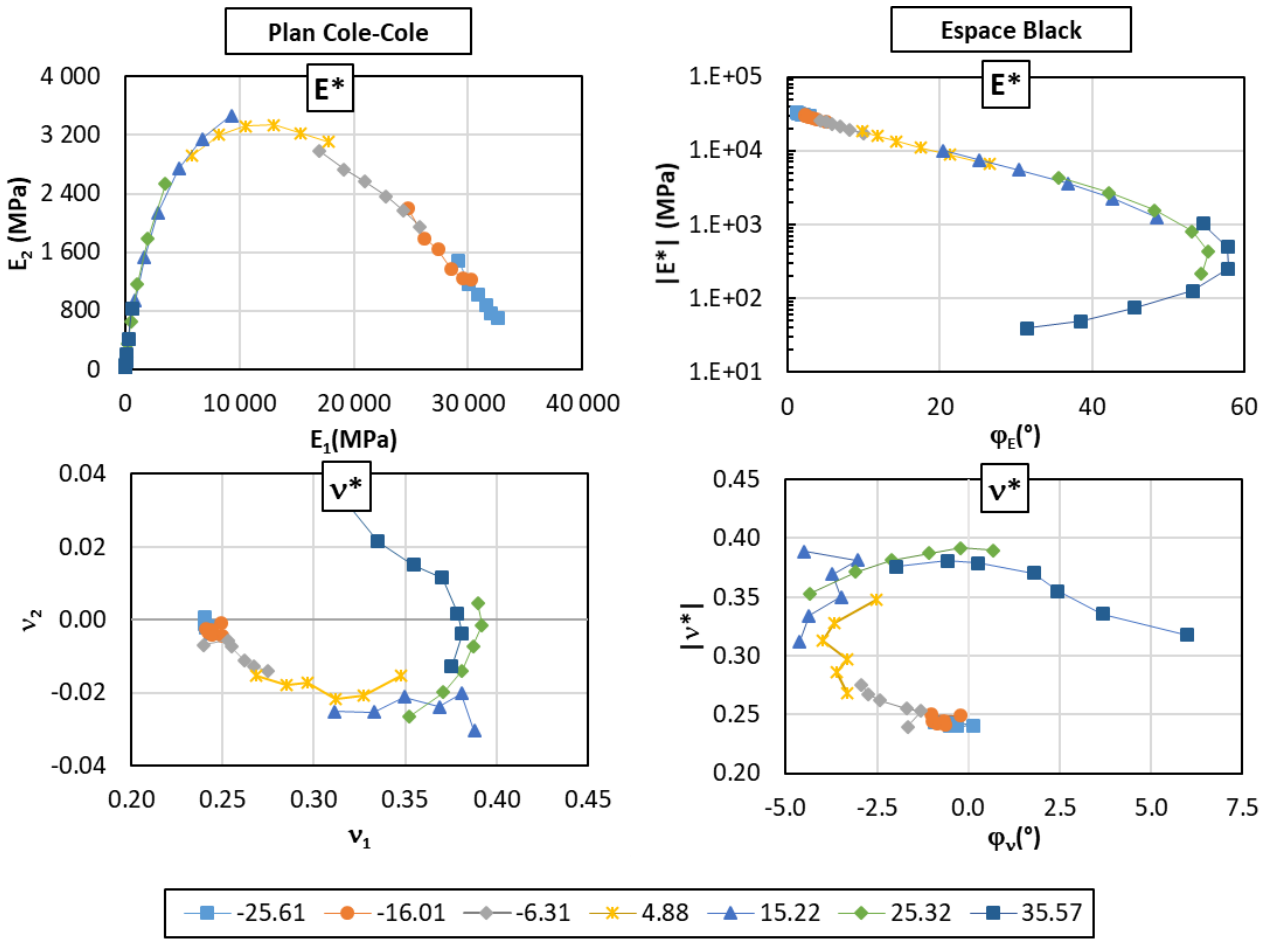


Figure 3-6. Module complexe et coefficient de Poisson complexe dans le plan de Cole-Cole et dans l'espace de Black (Test SG4B10(8.2)D0FT)

Le principe d'équivalence temps-température étant respecté, il est possible de construire une courbe maitresse pour chacun des paramètres, à l'aide de coefficients de translation a_T identiques. Ces courbes sont présentées sur la Figure 3-7.

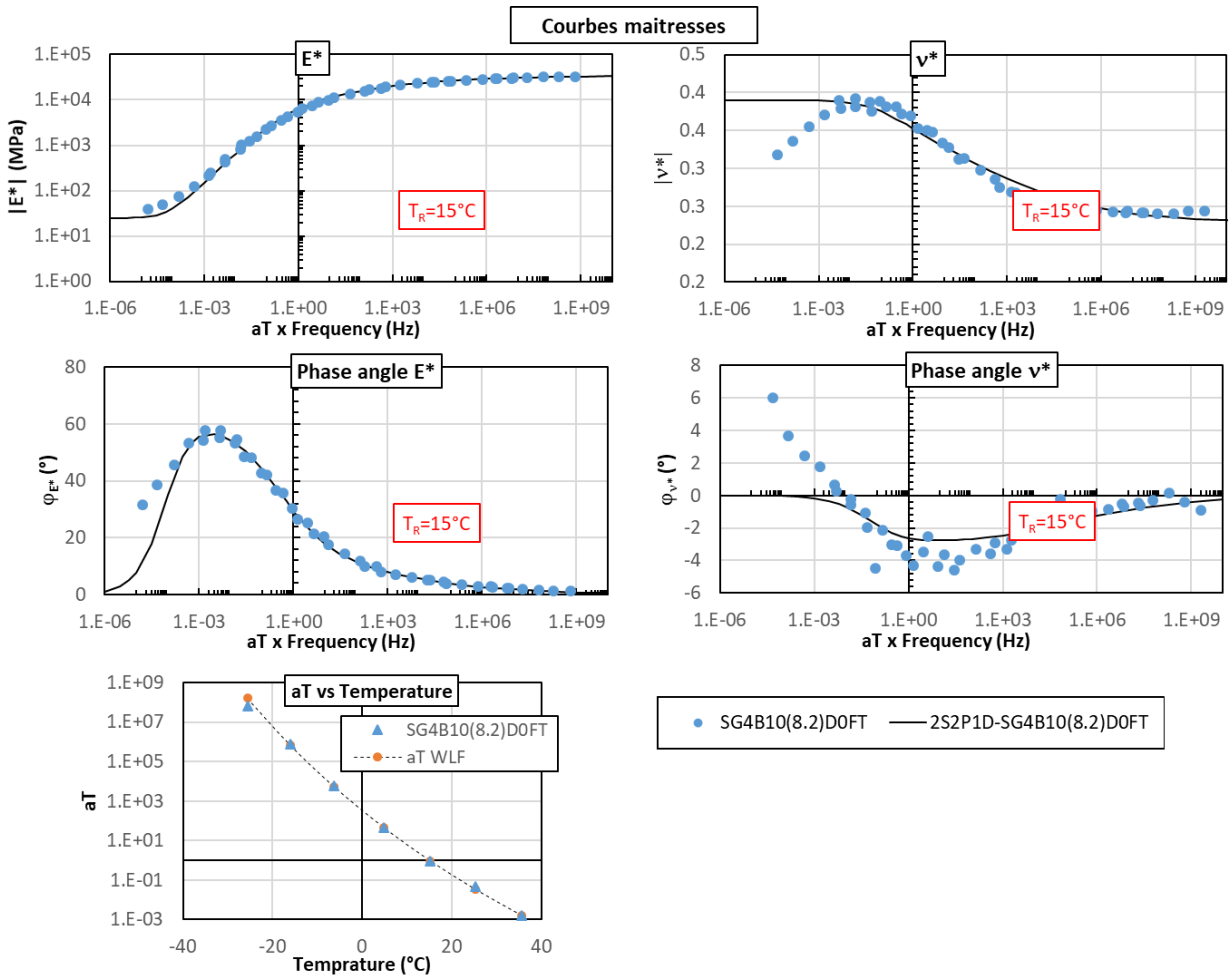


Figure 3-7. Courbes maitresses de la norme et de l'angle de phase du module complexe et du coefficient de Poisson complexe et coefficients de translation en fonction de la température (Test SG4B10(8.2)D0FT)

3.3. Essai de fatigue

3.3.1. Procédure de l'essai de fatigue

L'essai de fatigue est réalisé sur une éprouvette cylindrique (75mm de diamètre et 140mm de hauteur). La température et la fréquence des cycles de sollicitation sont fixes au cours de l'essai : T=10°C et f=10Hz. L'éprouvette est soumise à une sollicitation sinusoïdale en déformation centrée à zéro. Le pilotage s'effectue sur la moyenne des valeurs mesurées à l'aide des trois extensomètres disposés à 120° au tour de l'éprouvette. L'amplitude de déformation axiale est maintenue constante au cours de l'essai. Pour un matériau donné, les essais sont réalisés à différents niveaux d'amplitude : 80, 90, 100 et 120µm/m.

3.3.2. Définition et calcul des paramètres mécaniques

Lors de l'essai de fatigue, l'acquisition des données est réalisée à la fréquence d'échantillonnage de 2500Hz afin d'obtenir 250 points par cycle. Chaque acquisition consiste à enregistrer deux cycles consécutifs échantillonnés sur 500 points.

La sollicitation au cours de l'essai de fatigue peut atteindre des millions de cycles. Pour diminuer la quantité de données acquises tout en conservant l'essentiel de l'essai, le nombre de cycles enregistré est déterminé selon la règle présentée dans le Tableau 3-2.

Tableau 3-2. Nombre de cycles enregistrés en fonction du nombre de cycles appliqués durant l'essai

Numéro de cycles	Cycles enregistrés
De 1 à 1000	Tous les cycles
De 1000 à 10000	Deux cycles consécutifs enregistrés tous les 20 cycles
De 10000 à 100000	Deux cycles consécutifs enregistrés tous les 200 cycles
De 100000 à 1000000	Deux cycles consécutifs enregistrés tous les 2000 cycles
A partir de 1000000	Deux cycles consécutifs enregistrés tous les 5000 cycles

La Figure 3-8 présente les cycles enregistrés (numérotés depuis le début de l'essai)lors d'un essai de fatigue.

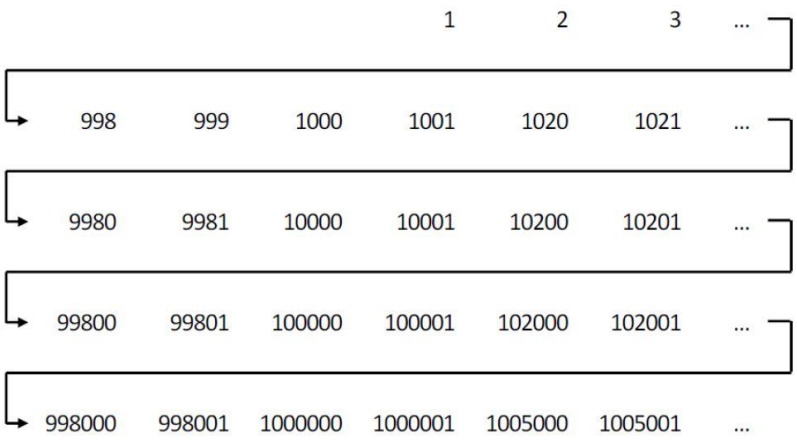


Figure 3-8. Schéma des cycles enregistrés lors d'un essai de fatigue (Mangiafico, 2014)

Les signaux sont ensuite traités afin d'obtenir l'évolution des paramètres suivants en fonction du nombre de cycles appliqués :

- Contrainte axiale : $\sigma_0, \sigma_{mi}, \varphi_\sigma$ (respectivement l'amplitude, la valeur centrée et l'angle de phase de la contrainte axiale)
- Déformation axiale :
  - $\varepsilon_0, \varepsilon_{mi}, \varphi_\varepsilon$ (Respectivement l'amplitude, la valeur centrée, proche de 0 compte tenu du pilotage appliqué et l'angle de phase de la déformation axiale)
  - $\varepsilon_{0i}, \varepsilon_{mi.i}, \varphi_{\varepsilon i}$ (Respectivement l'amplitude, la valeur centrée et l'angle de phase de la déformation axiale déterminée pour l'extensomètre i)

La norme et l'angle de phase du module complexe E^* est ensuite calculée à partir de ces paramètres selon les équations dans le Tableau 3-1.

3.3.3. Exemple de résultats pour l'essai de fatigue

Les résultats de l'essai de fatigue sur l'éprouvette SG1A5(5.0)0FTsat, dont l'amplitude de sollicitation en déformation est de 80 µm/m sont présentés dans ce paragraphe. Les analyses des essais en terme de durée de vie seront détaillées dans le chapitre 6.

La Figure 3-9 présente l'évolution de la norme et de l'angle de phase du module complexe E^*, en fonction du nombres de cycles de sollicitation. Dans cette figure, on distingue bien les 3 phases différentes, caractéristiques des essais de fatigue tel que décrites à la section 1.3.3.2.3:

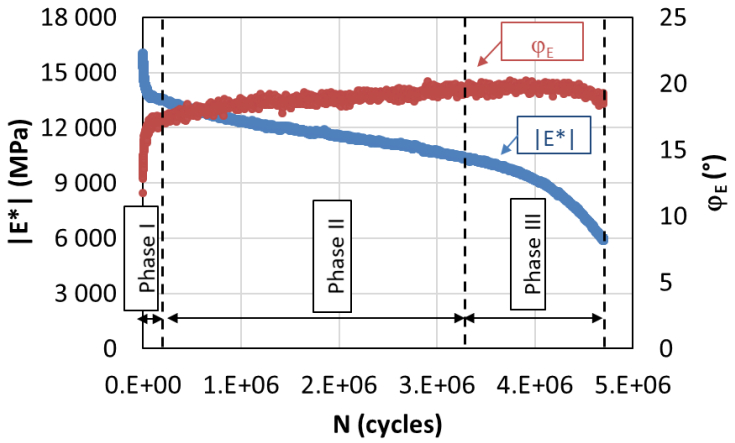


Figure 3-9. Evolution de la norme du module complexe et de l'angle de phase du module complexe en fonction du nombre de cycles de sollicitation (Test SG1A5(5.0)0FTsat)

L'évolution de l'amplitude de la contrainte durant l'essai est tracée dans la Figure 3-10. Cette évolution est identique à celle du module complexe qui est détaillé ci-dessus.

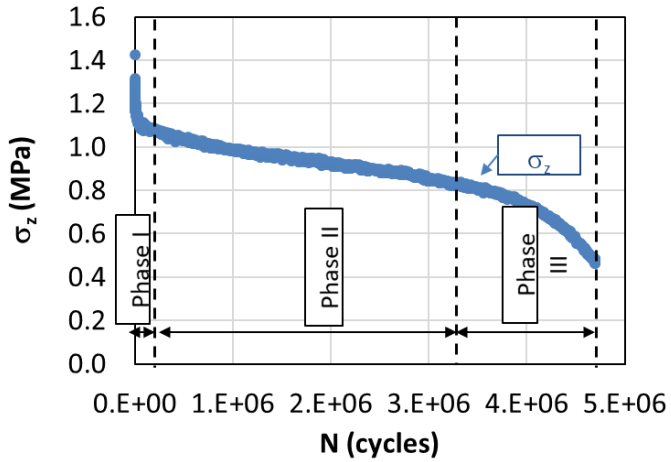


Figure 3-10. Evolution de l'amplitude de la contrainte axiale en fonction du nombre de cycles de sollicitation (Test SG1A5(5.0)0FTsat)

La Figure 3-11 présente l'évolution de l'amplitude de la déformation moyenne (80 µm/m visés pour cet essai) et de l'amplitude des déformations mesurées par les trois extensomètres en fonction du nombre de cycles de sollicitation. Grâce au dispositif électronique de pilotage de la presse MTS, l'amplitude visée de sollicitation a été atteinte rapidement et maintenue tout au long de l'essai malgré l'évolution des propriétés du matériau. Cependant, l'amplitude des déformations mesurées par les trois extensomètres évolue en cours d'essai et ne reste pas égale à la valeur de 80µm/m. Cette différence demeure faible jusqu'à a fin de la phase II. Par contre, l'augmentation rapide de cette différence au cours de la phase III, liée à l'apparition de fissures dans le matériau confirme que les contraintes et déformations ne sont plus homogènes au sein de l'éprouvette. D'autres effets peuvent également rendre l'essai non-homogène dans les premières phases, tels que : l'effet de flexion dû au montage de l'essai ou bien l'imperfection géométrique de l'éprouvette, etc.

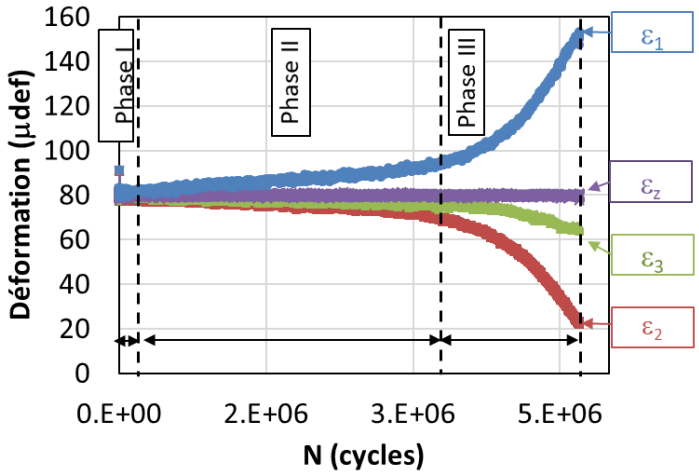


Figure 3-11. Evolution de l'amplitude de la déformation axiale et de l'amplitude des déformations mesurées par les trois extensomètres en fonction du nombre de cycles de sollicitation (Test SG1A5(5.0)0FTsat)

3.4. Essai de retrait thermique empêché (TSRST)

3.4.1. Procédure de l'essai TSRST

L'essai TSRST consiste à maintenir constante la longueur d'une éprouvette cylindrique d'enrobé 225mm x 65mm (hauteur x diamètre) alors que celui-ci est soumis à un taux de refroidissement constant (-10°C/h). L'essai se poursuit jusqu'à atteindre la rupture de l'éprouvette. La température de démarrage de l'essai est fixée à 5°C. Rappelons que cette température est de 20°C dans la norme (NF EN 12697-46, 2013). L'acquisition au cours d'un essai consiste à enregistrer les données toutes les secondes. Pour chaque matériau, au moins trois essais doivent être réalisés.

En raison de la sensibilité thermique du système de mesure des déformations (axiale et radiale), il est nécessaire d'étalonner ce système de mesure. Afin de corriger les dérives des capteurs dues à la température et les contractions thermiques de leurs supports, un essai de simulation est réalisé, dans les mêmes conditions qu'un essai TSRST (position des capteurs et vitesse de refroidissement identiques) avec une éprouvette non collée de Zérodur® (de même dimension que celles qui sont testées). Le coefficient de contraction thermique de ce matériau de synthèse est quasiment nul. Au cours de cet essai, des variations linéaires ont été enregistrées par le système de mesure des déformations tandis que l'éprouvette de Zérodur® ne s'est pas déformée. L'influence de la température sur le système de mesure de la déformation verticale se traduit par un coefficient de 23,26 µm/m/°C (qui est proche du coefficient de dilatation d'aluminium). Celle du système mesurant la déformation radiale donne une pente de – 50,92 µm/m/°C. Ces valeurs sont ensuite utilisées lors des essais sur les enrobés pour corriger en temps réel la mesure des déformations et s'assurer que la déformation axiale est maintenue nulle par le système de pilotage.

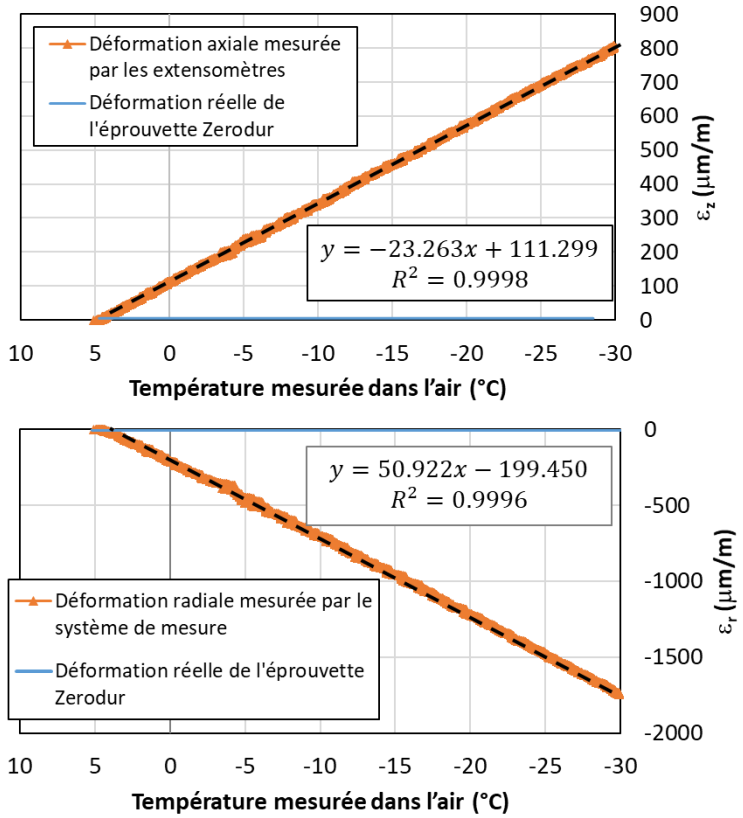


Figure 3-12. Dérive thermique du système de mesure des déformations axiale et radiale mesurée au cours d'un essai de refroidissement (10°C/h) d'une éprouvette en Zérodur®

3.4.2. Définition et calcul des paramètres mécaniques

Au cours de l'essai TSRST, la contrainte axiale, la déformation axiale, la déformation radiale (qui sert de consigne de pilotage) et la température à la surface de l'éprouvette sont enregistrées. L'évolution des paramètres mécaniques en fonction de la température à la surface de l'éprouvette est étudiée. Trois valeurs caractéristiques des résultats des essais TSRST sont exploitées pour définir la performance des enrobés :

- De manière classique, la température à la rupture : T_{rup}
- la contrainte axiale à la rupture : σ_{rup}
- la déformation radiale à la rupture : $\varepsilon_{z.rup}$

3.4.3. Exemple de résultats pour l'essai TSRST

Dans cette partie, les résultats de l'essais TSRST sur l'éprouvette SG5C13(7.3)D0FT sont présentés.

Au cours de l'essai, une vitesse visée de refroidissement de -10°C/h a été imposée. Afin de vérifier la vitesse de refroidissement réellement appliquée, l'évolution de la température à la surface de l'éprouvette et celle dans l'air ont été enregistrées et tracées dans la Figure 3-13.

On constate que la variation de la température de l'éprouvette à partir de 0°C est identique à celle mesurée dans l'air qui est de -0,0029°C/s (ou 10,44°C/h). L'enceinte thermique suit correctement la consigne de refroidissement demandée. Ainsi la sollicitation en température appliquée sur l'éprouvette est validée.

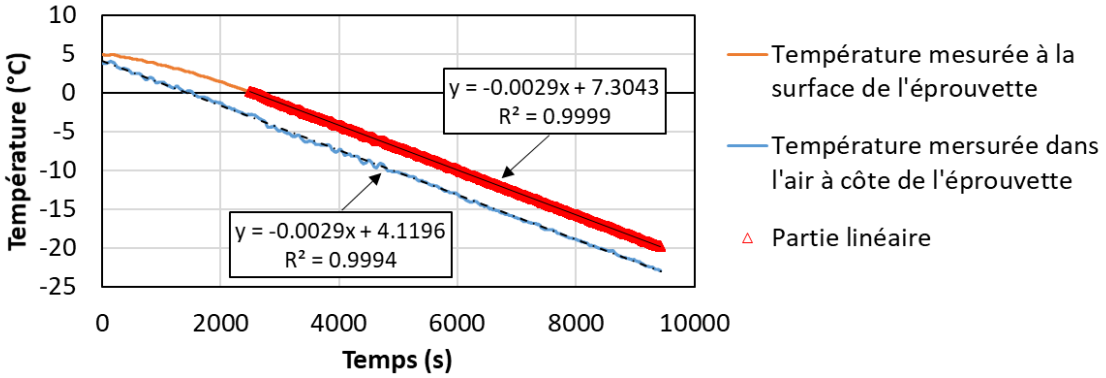


Figure 3-13. Évolution de la température mesurée dans l'air (courbe bleue) et à la surface (courbe orange) de l'éprouvette en fonction du temps (Test SG5C13(7.3)D0FT)

La Figure 3-14 présente la variation de la déformation axiale ε_z en fonction du temps. La courbe orange représente les données brutes issues du système de mesure sans correction tandis que la courbe bleue présente les valeurs corrigées. On constate que la déformation axiale de l'éprouvette reste quasiment nulle (inférieure à une dizaine de µm/m). Cela signifie que l'éprouvette a bien été empêchée en déformation axiale au cours de l'essai.

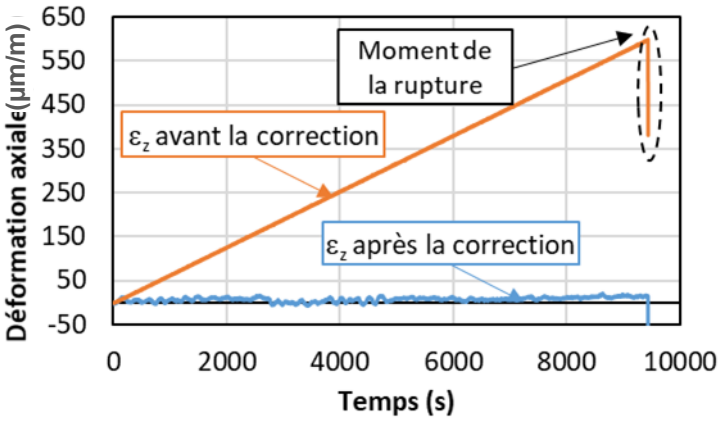


Figure 3-14. Variation de la déformation axiale avant et après la correction des dérivés thermiques des extensomètres

La Figure 3-15 présente les résultats types d'un essai TSRST. Il faut noter que la déformation radiale représentée correspond à la mesure corrigée des capteurs radiaux. Quand la température de l'éprouvette diminue, la contrainte axiale augmente tandis que la déformation radiale diminue quasi-linéairement jusqu'à la rupture physique de l'éprouvette testée. Ces figures permettent de définir les paramètres à la rupture qui seront étudiés pour chaque matériau, de manière détaillée dans le chapitre 7.

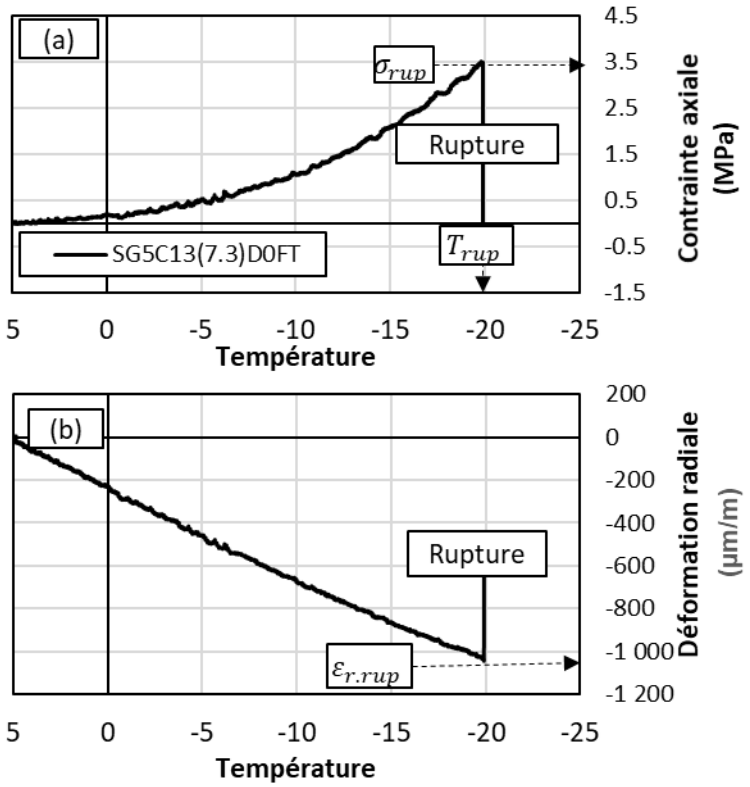


Figure 3-15. Evolution de le contrainte axiale (a) et de la déformation radiale (b) en fonction de la température mesurée à la surface de l'éprouvette lors de l'essai TSRST sur l'éprouvette SG5C13(7.3)D0FT

Chapitre IV

RÉSULTATS ET ANALYSES DE LA CAMPAGNE COMPLÉMENTAIRE

4. Résultats et analyses de la campagne complémentaire

4.1. Eprouvettes et conditionnement

7 éprouvettes ont été utilisées pour la campagne complémentaire (la campagne X). Les éprouvettes et les conditionnements appliqués sur chaque éprouvette sont présentés dans le Tableau 4-1.

Tableau 4-1. Eprouvettes utilisées pour la campagne X

Eprouvettes	Saturation	Cycles GD	Séchage sous vide (≥7 jours)	Séchage dans le four à 105°C pendant 2h	Campagne
SG1A7(4.6)	Oui	10	Oui	Oui	X.a
SG4B3(8.6)	Oui	10	Oui	Oui	
SG3B6(4.8)	Oui	50	Oui	Oui	X.b
SG4B4(8.9)	Oui	50	Oui	Oui	
SG4B2(8.6)	Oui	10	Non	Non	X.c
SG4B12(8.5)	Oui	0	Oui	Non	X.d
SG4B8(8.5)	Non	0	Oui	Non	X.e

Selon les procédures des essais de la campagne X (cf. Partie 2.1.2 page 91), les éprouvettes sont séchées à 105°C pendant 2h pour déterminer la masse m_{sec}. Ce chauffage provoque la destruction des éprouvettes. Les éprouvettes des campagnes X.c, X.d et X.e ne sont pas soumises à ce chauffage à 105°C car elles seront réutilisées pour les autres essais.

4.2. Les mesures et traitement des résultats

Pendant la campagne X, plusieurs mesures de masse et de volume sont réalisées afin de déterminer la variation de teneur en vides (TEV) ainsi que le degré de saturation (DS) des éprouvettes au cours des essais (cf. Figure 2-10, page 92).

4.2.1. Principe de calcul de teneur en vides et de degré de saturation à chaque mesure

L'objectif de cette partie est de présenter le principe de calcul de teneur en vides TEV_k et de degré de saturation DS_k à chaque mesure (ici noté par k^{ème} mesure). Pour cela, la masse volumique apparente qui est définie par la masse pour une unité du volume apparent, doit être déterminée.

Le volume apparent est le volume total occupé à la fois par la matière solide (granulats, bitume) et par les vides (air et eau). Une représentation schématique des différents volumes occupés par les composants de l'éprouvette est donnée par la Figure 4-1 avec les notations correspondantes.

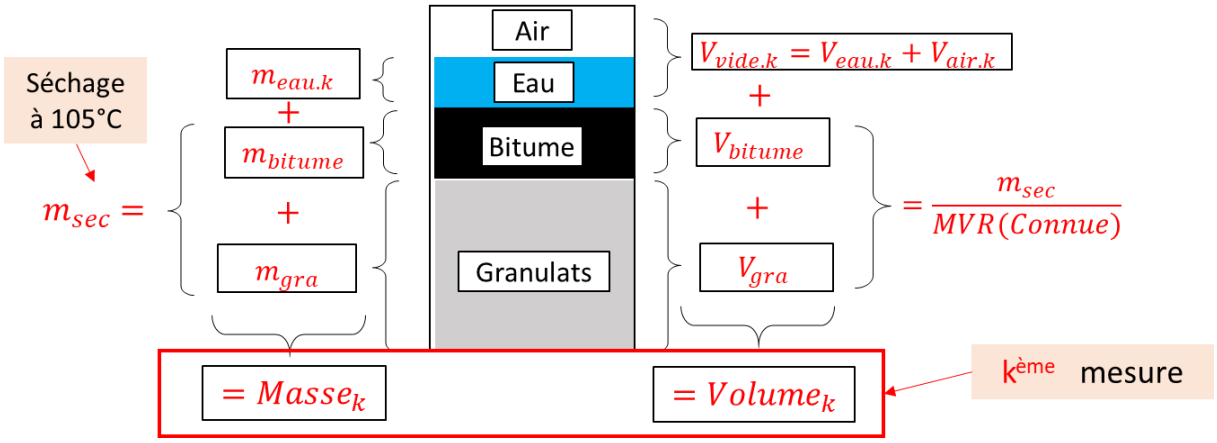


Figure 4-1. Composition de l'éprouvette et notations utilisées

Pour la k^{ème} mesure, on détermine la masse m_k (la masse de l'eau + du bitume + des granulats) et le volume apparent V_k (le volume des vides + du bitume + des granulats). Il faut noter que la masse m_{sec} , c'est-à-dire la masse de la matière solide (du bitume + des granulats), est seulement déterminée à la fin du processus quand l'éprouvette est séchée dans le four à 105°C pendant 2 heures.

Pour les éprouvettes dont la masse m_{sec} n'est pas déterminée, on suppose que la masse d'une éprouvette stockée plus de 6 mois dans un bureau est considérée sèche avant le début du conditionnement ($m_1 \approx m_{sec}$). Cette hypothèse a été vérifiée par le fait que la différence maximale entre les masses m_1 et les masses m_{sec} des éprouvettes des campagnes X.a et X.b est égale à 0,7g (cf. Tableau 4-2). Cet écart correspond environ à une d'erreur de 0,05% de teneur en vides et de 2% de degré de saturation (cf. Tableau 4-4). Cette erreur est acceptable par rapport aux incertitudes de mesure qui sont présentées dans la partie 4.2.2.

Tableau 4-2. Quelleques valeurs mesurées pour les éprouvettes utilisées dans la campagne X

Eprouvettes	**Campagne**	**Après au moins 6 mois dans bureau**		**Séchage dans le four à 105°C pendant 2h**	**Ecart**
		Volume V_1 (cm^3)	Masse m_1 (g)	Masse m_{sec} (g)	$m_1 - m_{sec}$ (g)
SG1A7(4.6)	X.a	635,4	1487,5	1487,1	0,4
SG4B3(8.6)	X.a	600,8	1335,4	1335,0	0,4
SG3B6(4.8)	X.b	632,4	1476,2	1475.6	0.6
SG4B4(8.9)	X.b	604,6	1344,6	1343.9	0.7
SG4B2(8.6)	X.c	591,7	1324,5	----------	----------
SG4B12(8.5)	X.d	625,5	1395,8	----------	----------
SG4B8(8.5)	X.e	587,8	1310,6	----------	----------

Une fois ces trois paramètres connus, les valeurs de TEV_k et DS_k sont calculées en suivant une procédure présentée dans la Figure 4-2.

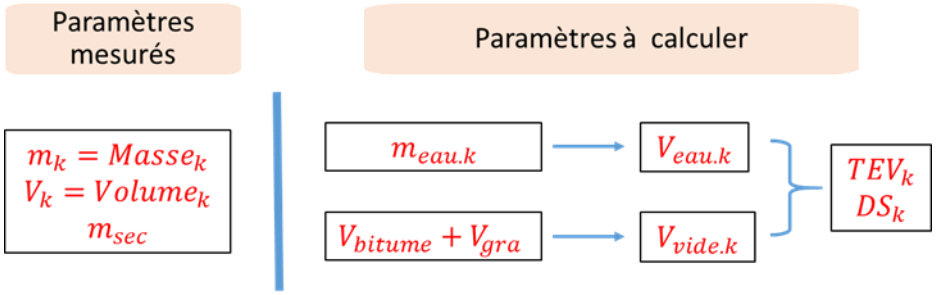


Figure 4-2. Procédure de traitement des données de la campagne X

Les formules de calcul des paramètres figurées dans la Figure 4-1 et la Figure 4-2, se trouvent dans Le Tableau 4-3.

Tableau 4-3. Paramètres considérés lors de la campagne X

Nom	Symbole	Détermination par	Formule
Masse de l'éprouvette à la k^{ème} mesure	$Masse_k$	Mesure	----------
Volume de l'éprouvette à la k^{ème} mesure	$Volume_k$ (ou $V_{total.k}$)	Mesure (4 mesures de la diamètre D et 6 mesures de la hauteur H) (NF EN 12697-29, 2003)	$V_{total.k} = \frac{\pi D^2 H}{4}$
Masse de l'éprouvette sans eau	m_{sec}	→ Soit mesurée après 2h dans le four à 105°C → Soit égale à la masse après le stockage de plus 6 mois dans un bureau (cette campagne X a permis de montrer qu'à ce stade les éprouvettes pouvaient être considérées comme sèches)	$m_{sec} = m_{bitume} + m_{granulats}$
Volume du bitume et des granulats	$V_{bitume} + V_{granulats}$	Calcul	$V_{bitume} + V_{granulats} = \frac{m_{sec}}{MVR}$
Masse de l'eau à la k^{ème} mesure	$m_{eau.k}$	Calcul	$m_{eau} = Masse_k - m_{sec}$
Volume d'eau à la k^{ème} mesure	$V_{eau.k}$	Calcul	$V_{eau.k} = \frac{m_{eau.k}}{\rho_{eau}}$
Volume de vides à la k^{ème} mesure	$V_{vide.k}$	Calcul	$V_{vide;k} = V_{total} - (V_{bitume} + V_{granulats})$
Masse volumique réelle	MVR	Calcul à partie de la formulation de l'enrobé bitumineux	$MVR = 2{,}441 g/cm^3$
Masse volumique apparente à la k^{ème} mesure	MVA_k	Calcul	$MVA_k = \frac{m_{sec}}{V_{total.k}}$
Teneur en vides à la k^{ème} mesure	TEV_k	Calcul	$TEV_k = \frac{V_{vide.k}}{V_{total.k}} \times 100\% = \left(1 - \frac{MVA_k}{MVR}\right) \times 100\%$
Degré de saturation à la k^{ème} mesure	DS_k	Calcul	$DS_k = \frac{V_{eau.k}}{V_{vide.k}} \times 100\%$

4.2.2. Calcul d'incertitude

Les mesures géométriques sont faites avec un pied à coulisse de précision $\pm\, 0{,}02mm$. Ces mesures peuvent donc varier avec une incertitude évaluée à $\pm\, 0{,}05mm$. En utilisant le développement de Taylor, on peut approximer les incertitudes de mesures par les formules suivantes

Tableau 4-4. Formules de calcul des incertitudes

Nom	Formule	Incertitude
Hauteur	H	$\Delta H = 0{,}05mm$
Déformation axiale	$\varepsilon_H = \frac{dH}{H}$	$\Delta\varepsilon_H = \frac{\Delta H}{H}$ (varie entre 300µm/m et 700µm/m)
Diamètre	D	$\Delta D = 0{,}05mm$
Déformation radiale	$\varepsilon_D = \frac{dD}{D}$	$\Delta\varepsilon_D = \frac{\Delta D}{D}$ (varie entre 300µm/m et 700µm/m)
Volume	$V = \frac{\pi D^2 H}{4}$	$\Delta V = \frac{\pi D^2}{4} \times \Delta H + \frac{\pi DH}{2} \times \Delta D \approx 1cm^3$
Volume de vides	V_{vide}	$\Delta V_{vide} = \Delta V$
Volume de l'eau	V_{eau}	$\Delta V_{eau} = \frac{0.02}{\rho_{eau}} \approx 0{,}02cm^3$ (0,02g est la précision de la balance)
Déformation volumique	$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V}$	$\Delta\varepsilon_v = \frac{\Delta H}{H} + 2\frac{\Delta D}{D}$ (varie entre 1300µm/m et 1700µm/m)
Degré de saturation	$DS = \frac{V_{eau}}{V_{vide}}$	$\Delta DS = \frac{1}{V_{vide}} \times \Delta V_{eau} - \frac{\Delta V_{vide}}{V_{vide}^2} \times V_{eau}$ (varie entre 0,1% et 3%)
Teneur en vides	$TEV = \frac{V_{vide}}{V_{total}}$	$\Delta TEV = \frac{1}{V_{total}} \times \Delta V_{vide} - \frac{\Delta V_{total}}{V_{total}^2} \times V_{vide} \approx 0{,}15\%$

Les incertitudes de mesure sont prises en compte et représentées par des barres d'erreur dans les figures ci-après.

4.3. Evolution des éprouvettes lors du conditionnement

La phase de conditionnement (saturation, cycles de gel/dégel et séchage) modifie les caractéristiques des éprouvettes. Trois paramètres principaux sont étudiés, la déformation volumique, la teneur en vides et le degré de saturation. Les résultats des essais sont présentés dans les parties suivantes.

Il faut noter que dans les figures de Figure 4-3 à Figure 4-9, les numéros cadrés (1, 2, 3 et 3i) marquent respectivement les mesures effectuées avant la saturation (1) , après de la saturation (2) , après des cycles FT (3), et pendant le séchage (3i).

4.3.1. Evolution des éprouvettes lors des différents types de conditionnements

Les Figure 4-3 et Figure 4-4 présentent les évolutions des éprouvettes lors des étapes de conditionnements différents.

Concernant la déformation volumique et la teneur en vides , le résultat montre que les éprouvettes séchées sous vide augmentent toujours de volume et donc de teneur en vides (cf. Figure 4-3). En particulier, la teneur en vides des éprouvettes de la campagne X.a et X.b augmente significativement environ de 2% par rapport à la teneur en vides mesurée au début du conditionnement des éprouvettes juste avant la saturation. Les analyses pour chaque étape du conditionnement sont détaillées dans les parties de 4.3.2 à 4.3.4.

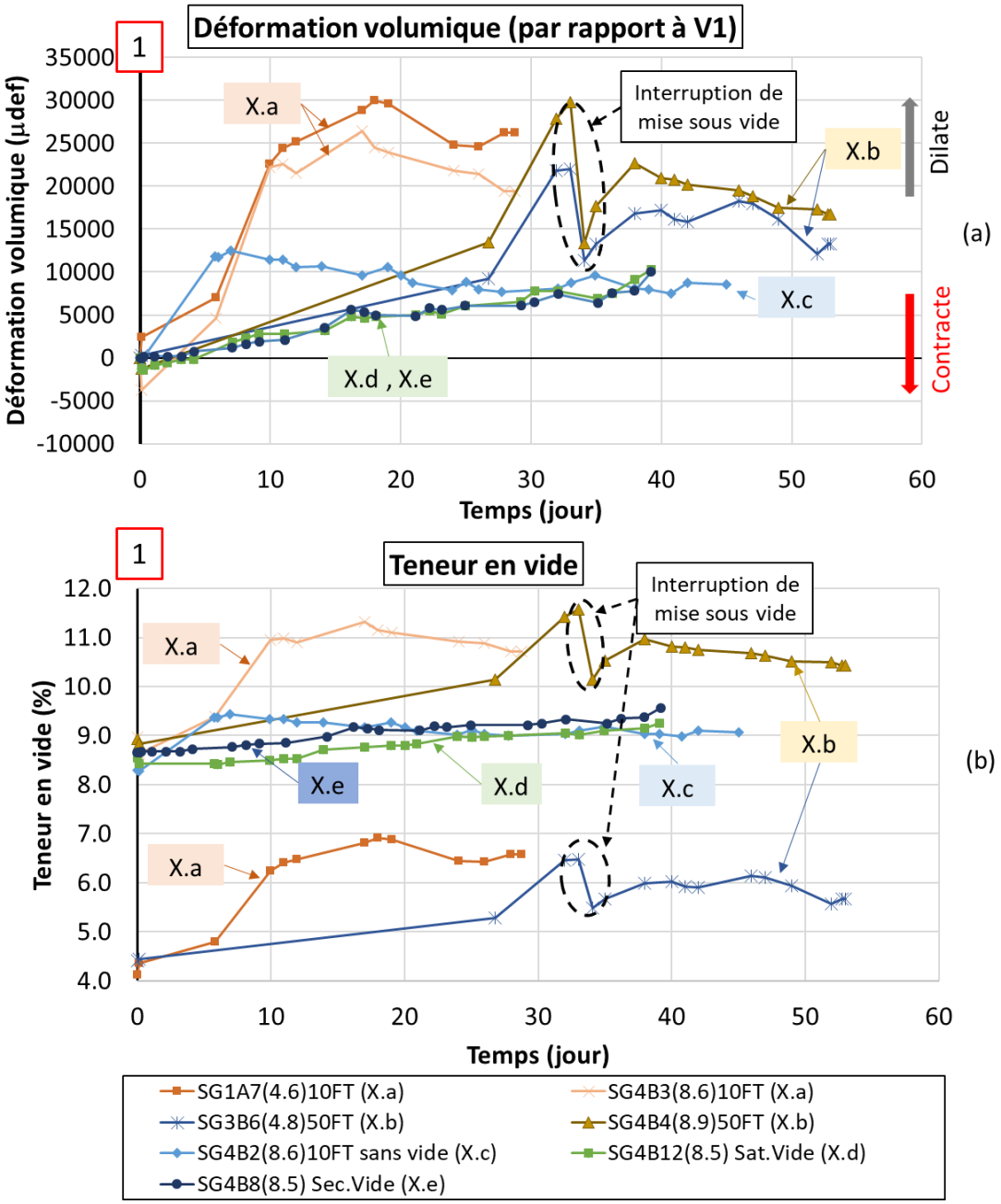


Figure 4-3. Déformation volumique (a) et Variation de teneur en vides (b) en fonction du temps au cours des différentes phases de conditionnement (le point 1 correspond à la mesure effectuée juste avant le début du conditionnement des éprouvettes)

Concernant le degré de saturation, selon les résultats obtenus, les éprouvettes sont dé-saturées plus rapidement sous vide que sans vide. Après une semaine de séchage sous vide avec gel de silice, le degré de saturation des éprouvettes est inférieur de 5%. Selon les résultats obtenus de la campagne X.e, l'éprouvette stockée 6 mois dans un bureau est considérée complètement sèche car le degré de saturation est proche de 0% durant la phase de séchage sous vide. Les résultats de la campagne X.e confirme encore une fois, l'hypothèse que la masse d'une éprouvette stockée plus de 6 mois dans un bureau peut être considérée comme sèche.

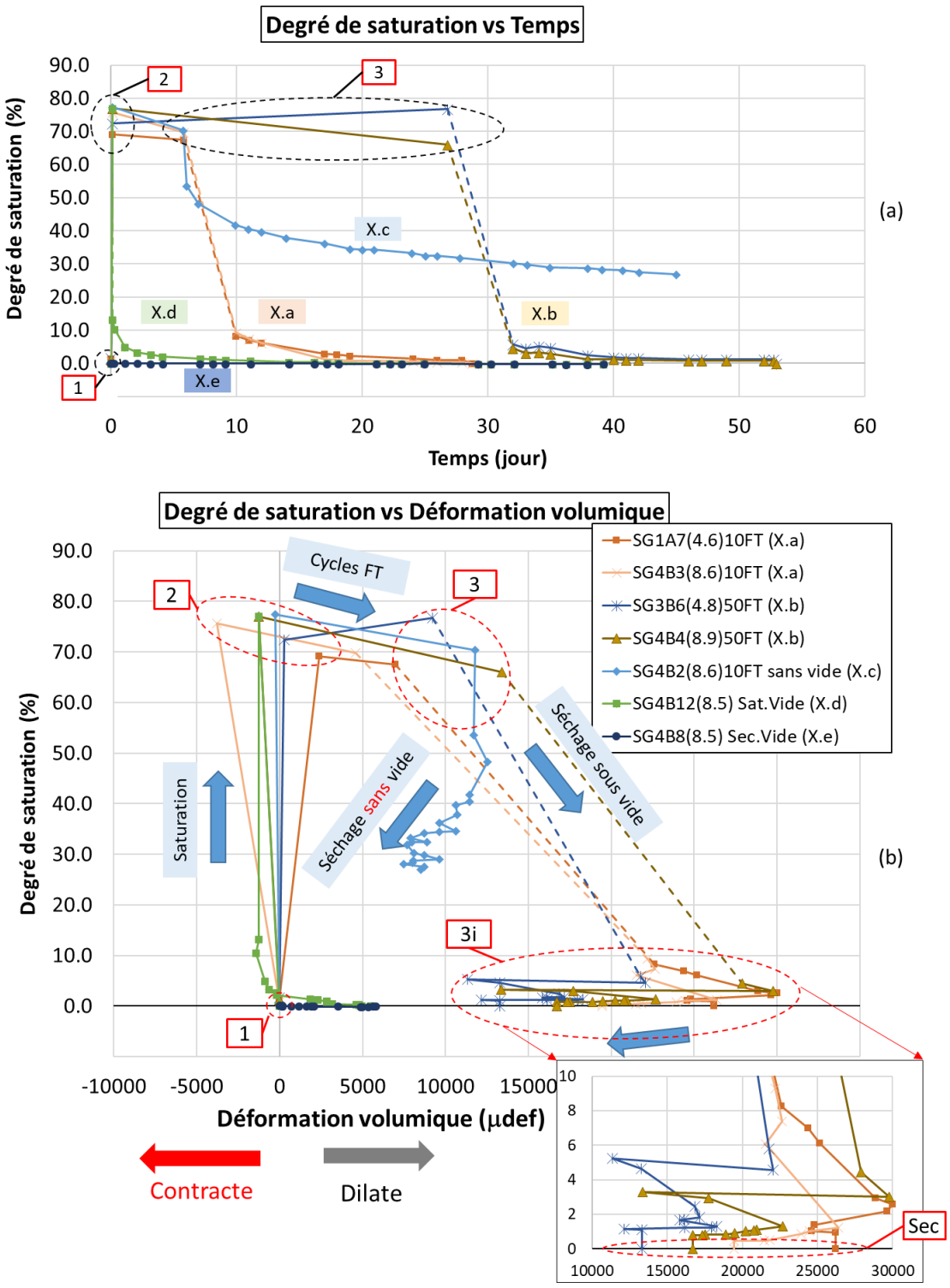


Figure 4-4. Degré de saturation en fonction du temps (a) et Degré de saturation en fonction de la déformation volumique (b) au cours des différentes phases de conditionnement ((1) avant la saturation, (2) après de la saturation, (3) après des cycles GD, (3i) pendant le séchage)

4.3.2. Etude de la phase de saturation

Pendant la phase de saturation, les éprouvettes ont été mises sous vide pendant 2h. L'évolution volumique des éprouvettes dans cette phase est très différente mais elle est toujours dans l'incertitude de mesure (cf. Figure 4-5). On peut donc conclure qu'il n'y a pas de changement volumique au cours de la saturation sous vide.

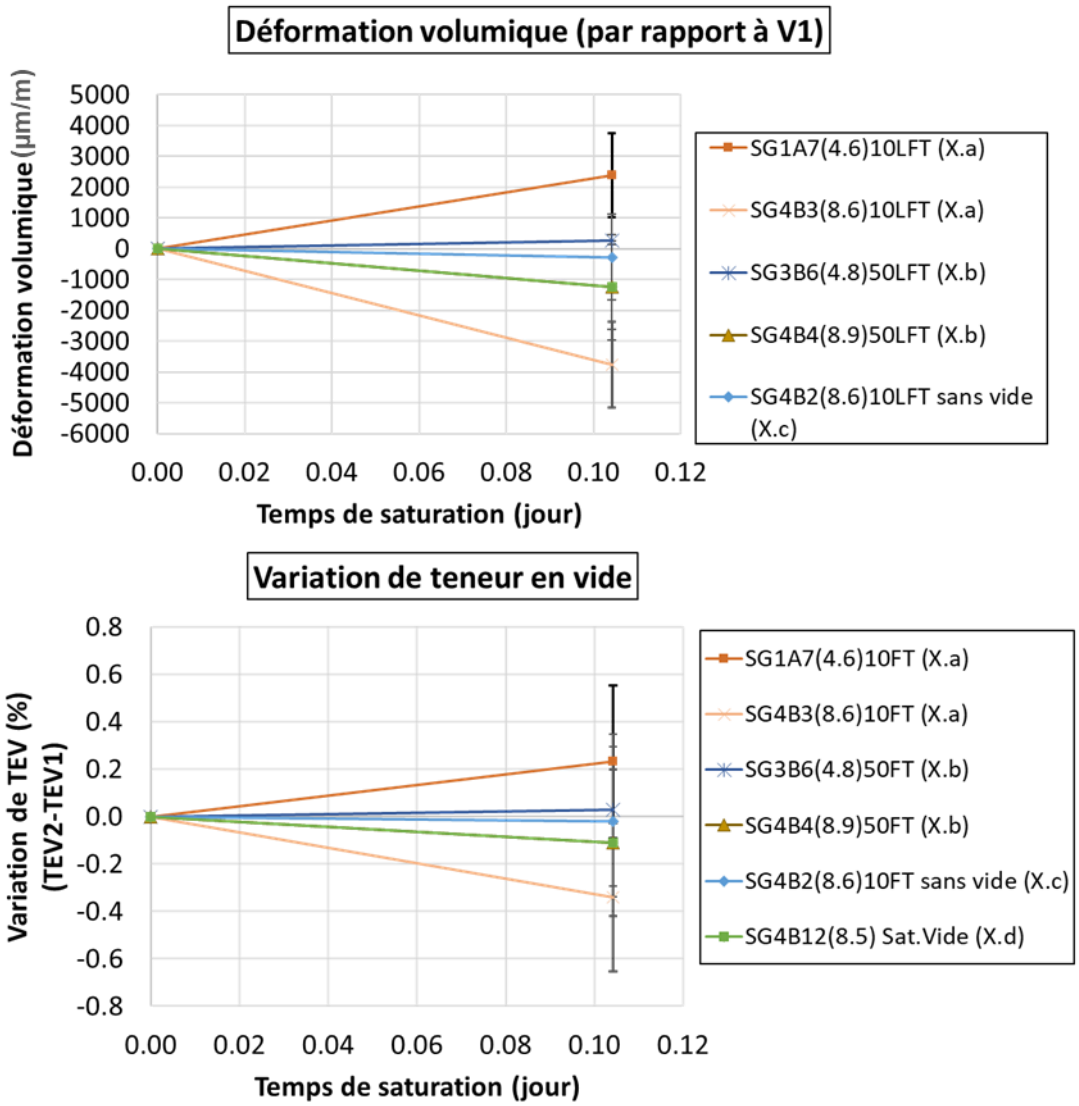


Figure 4-5. Déformation volumique (a) et Variation de teneur en vides (b) en fonction du temps ((1) avant la saturation, (2) après de la saturation)

La Figure 4-6 présente les résultats du degré de saturation. Après de 2 heures de saturation sous vide, le degré de saturation atteint environ 70%. Le degré de saturation est plus élevé pour les éprouvettes ayant une TEV plus élevée (cf. Figure 6 6.b). Ce qui est un résultat attendu.

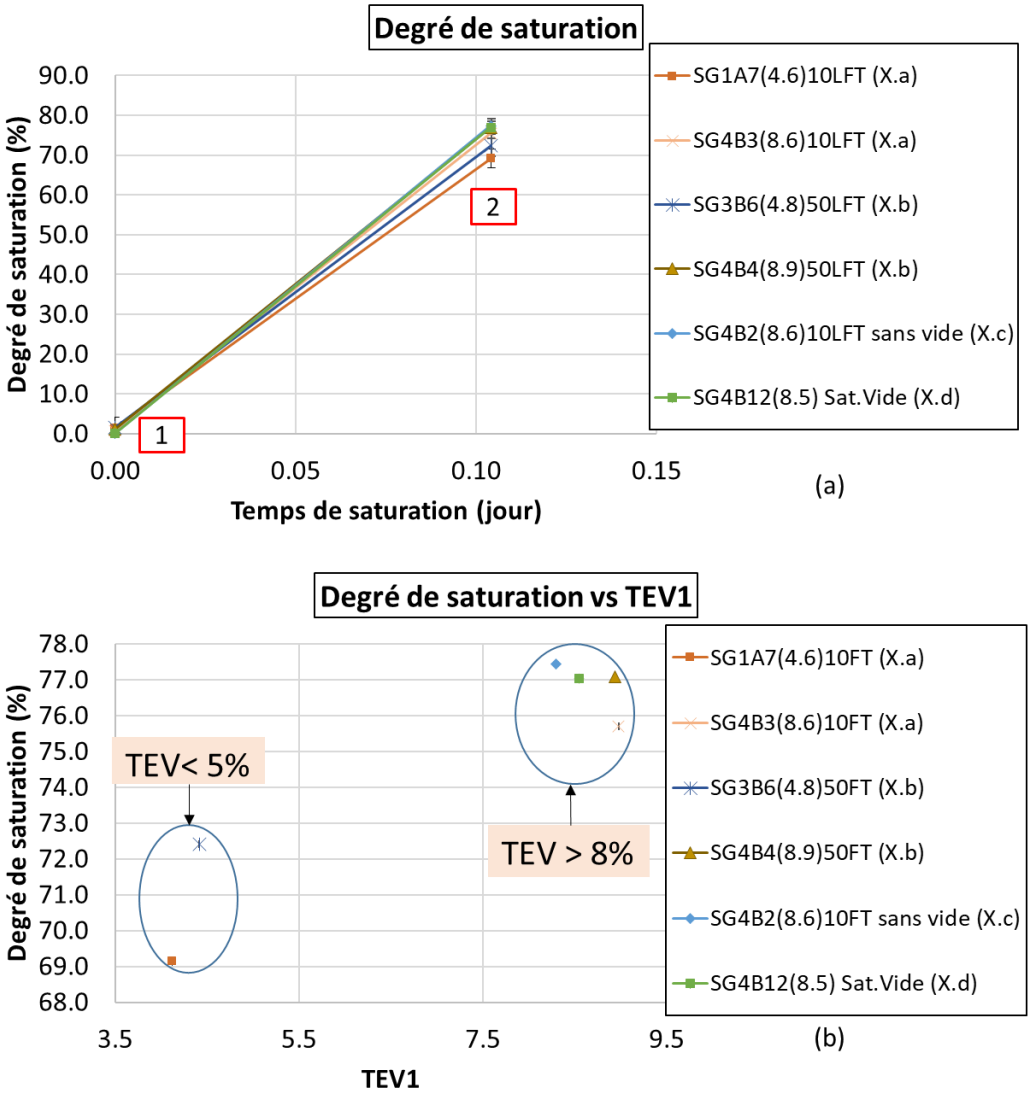


Figure 4-6. Degré de saturation en fonction du temps de saturation (a) et en fonction de la teneur en vides mesurée avant la saturation (TEV1) (b) ((1) avant la saturation, (2) après de la saturation)

4.3.3. Etude de la phase des cycles de gel/dégel

Les résultats obtenus sont présentés dans Figure 4-7 et Figure 4-8. Lors du conditionnent avec des cycles FT, on constate que :

→ Lors des cycles FT, la formation de gel dans les pores saturées ou partiellement saturées provoque un gonflement des pores existantes. La déformation volumique augmente d'environ 1% (10000µm/m). La teneur en vides augmente donc également d'environ 1%. L'évolution est plus importante pour les éprouvettes ayant une plus forte teneur en vides.

→ Le degré de saturation n'évolue pas significativement. Rappelons que durant cette phase les éprouvettes sont placées dans des sacs plastiques fermés contenant d'environ 10cl d'eau.

On trouve aussi que la déformation volumique des éprouvettes ayant subies des 50 cycles FT semble à priori légèrement supérieure à celle des éprouvettes ayant subies de 10 cycles FT. Cependant, ces différentes sont non-significatives et négligeables en tenant compte des erreurs de mesure.

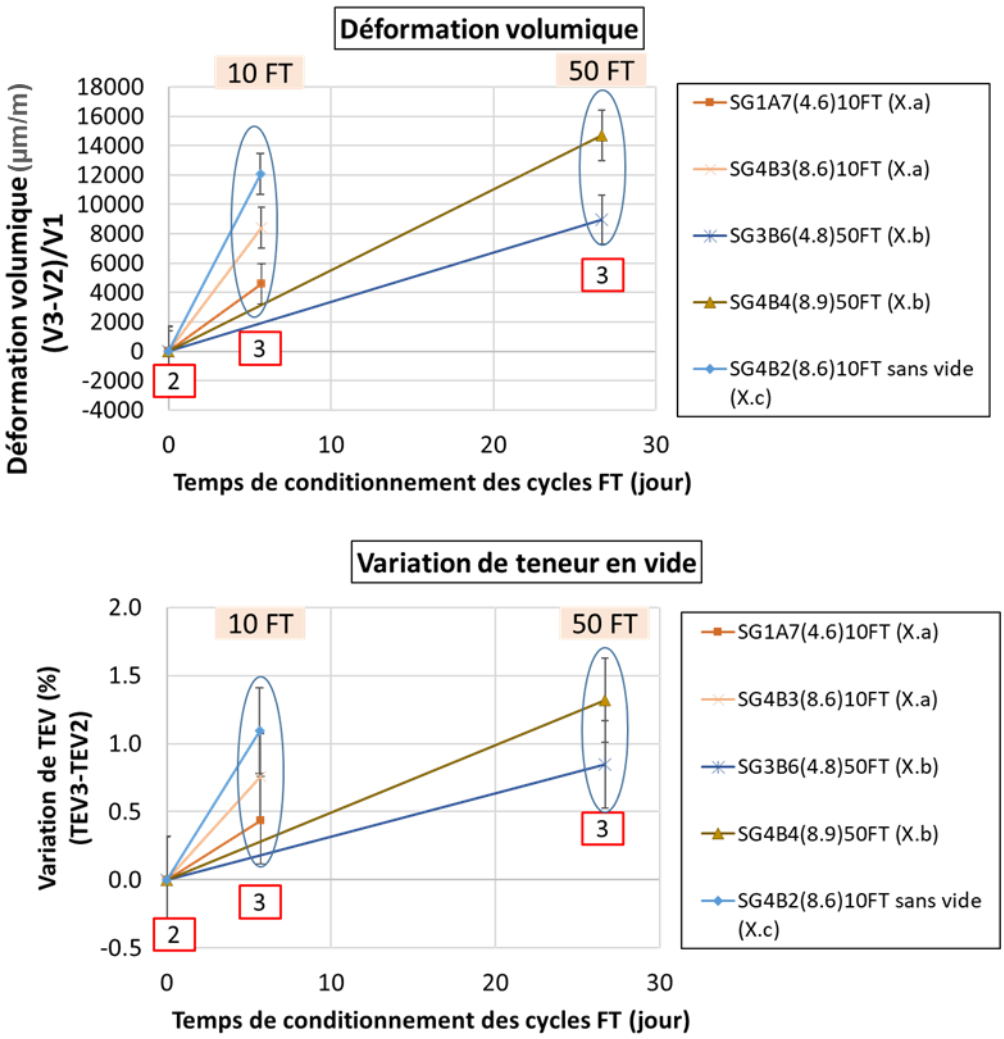


Figure 4-7. Variation de déformation volumique (a) et Variation de teneur en vides (b) en fonction du temps en phase de cycles GD ((2) après la saturation, (3) après des cycles GD)

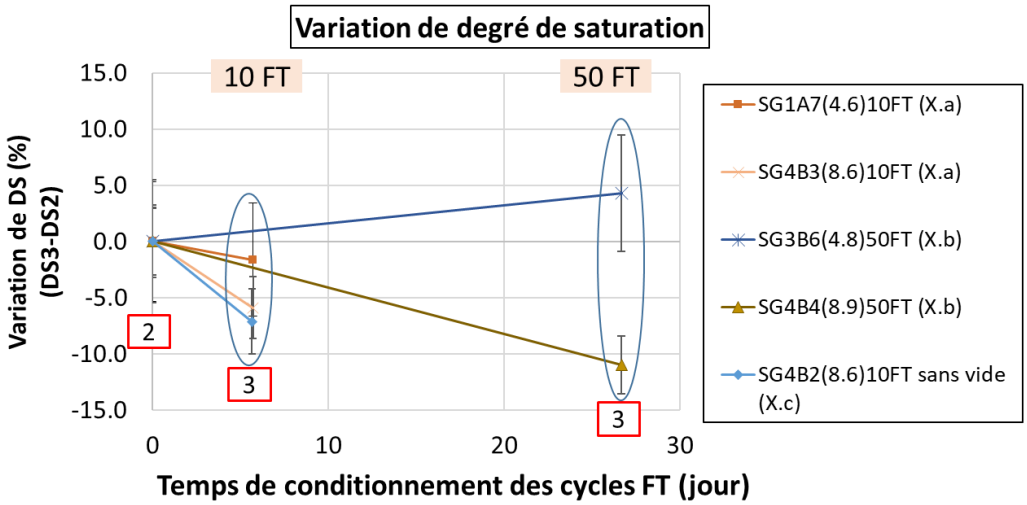


Figure 4-8. Variation de degré de saturation en fonction de temps de saturation ((2) après la saturation, (3) après des cycles FT)

4.3.4. Etude de la phase de séchage

Les résultats obtenus dans la phase de séchage sont présentés dans la Figure 4-9 et la Figure 4-10. Ils permettent de formuler les constations suivantes:

- Si le séchage a lieu sous vide :
  - Il y a toujours dilatation si l'éprouvette n'a pas subi de cycle FT, aussi bien pour l'éprouvette saturée que pour l'éprouvette non-saturée qui est quasi sèche (saturation inférieure à 0,5% car restée 6 mois dans un bureau).
  - On observe une dilatation puis une contraction pour les éprouvettes saturées avec cycles FT. La dilation initiale (durant environ 10 jours) est beaucoup plus rapide que pour les éprouvettes sans cycle FT. Après 10 jours environ les éprouvettes contractent avec une pente d'évolution proche de celles séchées sans vide. Le bilan global est une augmentation de volume. Il semble y avoir une même asymptote (à t infini et dans le sens de la dilatation) de la déformation volumique ε_v pour toutes les éprouvettes (initialement sèches ou saturées avec ou sans cycle FT) qui sont maintenues dans le dessiccateur sous vide. Une représentation schématique des résultats est donnée (cf. Figure 4-11)
  - La désaturation est bien plus rapide sous vide. Le degré de saturation est inférieur à de 5% après 7 jours sous vide dans dessiccateur avec gel de silice (cf. Figure 4-10)

On constate aussi que l'évolution volumique des éprouvettes ayant subies des 50 cycles FT est fortement influencée par le vide. Suite à l'interruption imprévue de mise sous vide, une chute de la déformation volumique d'environ 15000 µm/m (dans le sens de la contraction) a été observée. Cela conduit à une diminution de la teneur en vides d'environ 1.5%.

- Si le séchage avec gel de silice est effectué sans vide (après 10 cycles FT), l'éprouvette contracte toujours due au fluage de l'enrobé bitumineux soumis à son poids propre. Cependant, la vitesse de contraction est lente et environ de 125µm/m/jour. Le séchage sans vide de l'éprouvette est long, le degré de saturation diminue seulement à 27% après d'environ 40 jours de séchage à température de 25°C avec gel de silice. Il n'est donc pas recommandé d'utiliser cette méthode.

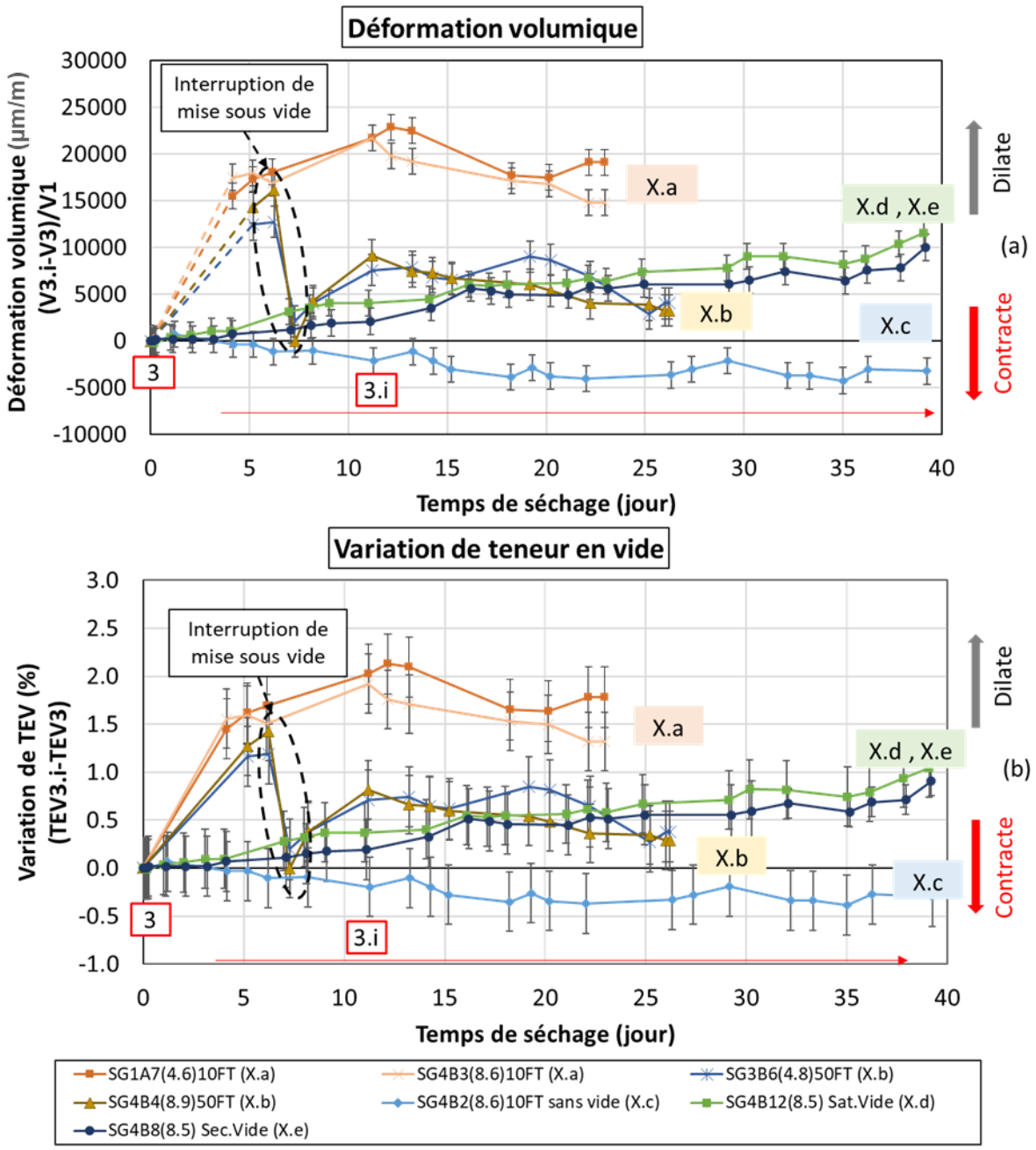


Figure 4-9. Variation de déformation volumique (a) et Variation de teneur en vides (b) en fonction du temps en phase de séchage ((3) après des cycles GD, (3i) pendant le séchage)

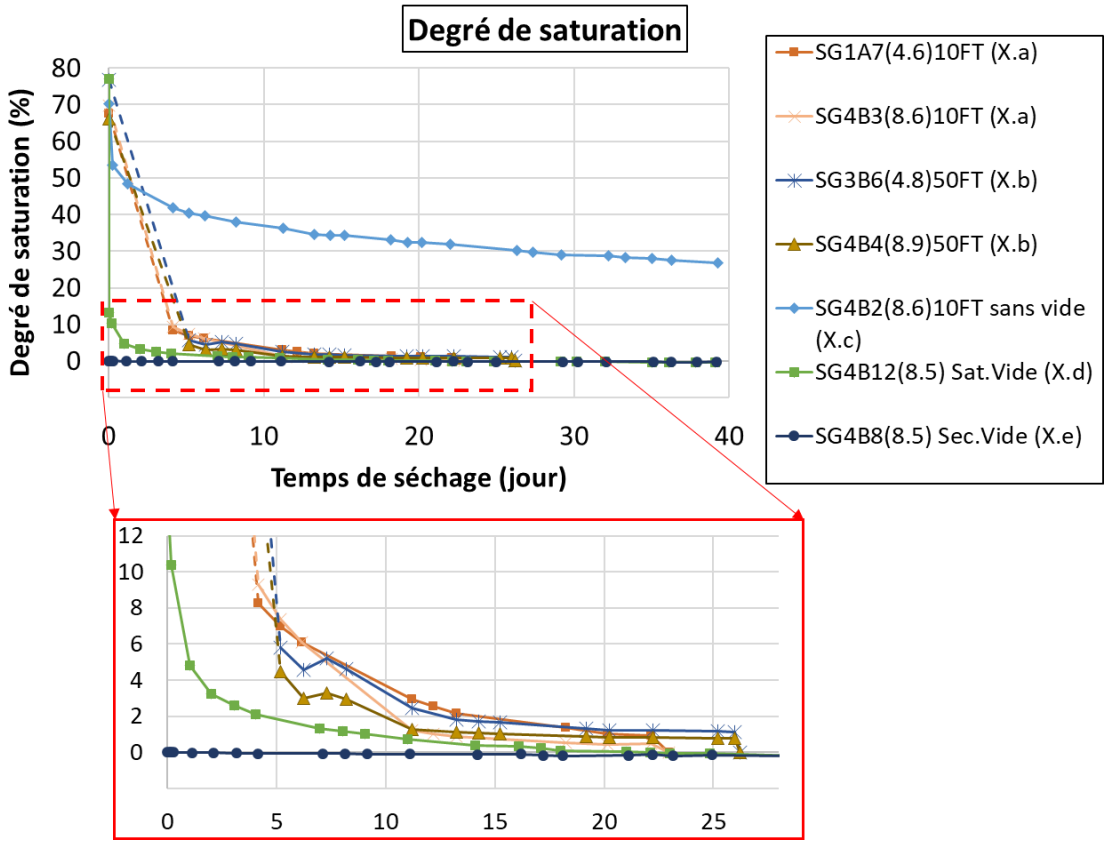


Figure 4-10. Degré de saturation en fonction du temps en phase de séchage sous vide

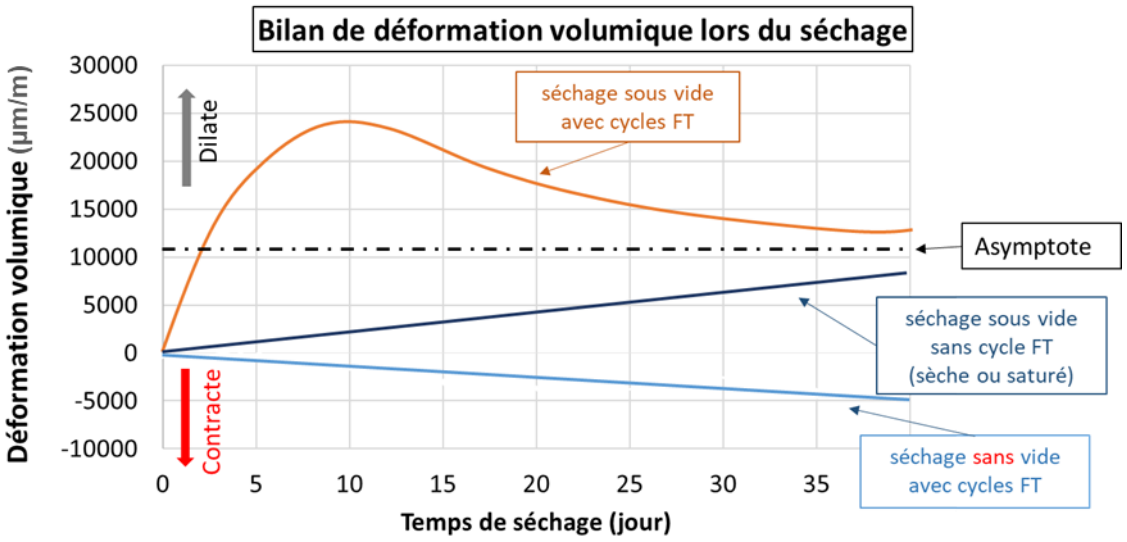


Figure 4-11. Résumé schématique de l'évolution des éprouvettes en phase de séchage

Chapitre V

RÉSULTATS ET ANALYSES DES ESSAIS DE MODULE COMPLEXE

5. Résultats et analyses des essais E*

5.1. Eprouvettes testées et conditionnements appliqués

20 essais de module complexe ont été réalisés sur 19 éprouvettes, parmi lesquelles 11 éprouvettes sont constituées du matériau non-vieilli et 8 éprouvettes du matériau vieilli. L'éprouvette SG5C3(7.4) a été testée deux fois, d'abord à l'état sec puis à l'état saturé.

Il faut rappeler que toutes les éprouvettes ayant subi des cycles thermiques (FT, HF ou HC) ont été séchées sous vide avec du gel de silice avant l'essai E*. Selon les résultats de la campagne X, les conditionnements appliqués provoquent un changement de la teneur en vides des éprouvettes.

Avant chaque essai E*, la teneur en vides de l'éprouvette est donc remesurée. Les valeurs sont présentées dans le Tableau 5-1. Toutefois, cette mesure n'a pas été réalisée pour les éprouvettes ayant subi 10 cycles FT et 50 cycles FT. La teneur en vides initiale de ces éprouvettes TEV_0, mesurée juste après le carottage, a donc été majorée de 2%. Cette correction est directement issue des résultats de la campagne complémentaire (cf. chapitre IV).

Le Tableau 5-1 présente le bilan des essais de module complexe réalisés, avec les éprouvettes utilisées, les conditionnements qu'elles ont subi et leur teneur en vides avant essai.

Tableau 5-1. Bilan des essais E* réalisés : éprouvettes testées, conditionnements appliqués et teneurs en vides

Matériau	Type de conditionnement	Eprouvettes	Saturation (DS %)	Cycles de conditionnement	Séchage sous vide	TEV en début d'essai (%)	Etat pendant d'essai
Non-vieilli	0FT.DRY	SG2A1(7.7)	Non	0FT	Non	7,7	Sec
		SG4B10(8.2)	Non	0FT	Non	8,2	Sec
		SG6B4(7.1)	Non	0FT	Non	7,1	Sec
		SG5C3(7.4)(*)	Non	0FT	Non	7,4	Sec
	0FT.SAT	SG5C3(7.4)(*)	Oui (72.7%)	0FT	Non	7,4	Saturé (40%)
	10FT.DRY	SG2A4(8)	Oui (72.0%)	10FT	Oui	10(**)	Sec
		SG6B10(6.8)	Oui (74.2%)	10FT	Oui	8,8(**)	Sec
	50FT.DRY	SG6B9(7.4)	Oui (73.9%)	50FT	Oui	9,4(**)	Sec
		SG6B12(7.4)	Oui (72.9%)	50FT	Oui	9,4(**)	Sec
	10HF.DRY	SG1A4(6.6)	Oui (82.6%)	10HF	Oui	7,5	Sec
		SG6B3(6.3)	Oui (82.6%)	10HF	Oui	7,2	Sec
	10HC.DRY	SG3B3(5.1)	Oui (81.2%)	10HC	Oui	7,7	Sec
Vieilli	A.0FT.DRY	SG1aB7(4.5)	Non	0FT	Non	4,5	Sec
		SG3aB1(6)	Non	0FT	Non	6	Sec
	A.0FT(sat).DRY	SG1aB9(5.4)	Oui (59.8%)	0FT	Oui	5,4	Sec
		SG3aB10(5.5)	Oui (66.3%)	0FT	Oui	5,5	Sec
	A.10HF.DRY	SG3aB4(5.8)	Oui (64.7%)	10HF	Oui	6,6	Sec
		SG2aB3(6.6)	Oui (70.4%)	10HF	Oui	6,8	Sec
	A.10HC.DRY	SG2aB5(6.7)	Oui (70.8%)	10HC	Oui	6,7	Sec
		SG2aB12(6.6)	Oui (72.4%)	10HC	Oui	6,6	Sec

(*) Eprouvette SG5C3(7.4) d'abord testée à l'état sec puis testée à l'état saturé

(**) TEV calculée à partir de TEV_0 en appliquant une correction de 2% (selon les résultats obtenus de la campagne X)

5.2. Eprouvettes testées à l'état sec

5.2.1. Résultats expérimentaux

5.2.1.1. Matériau non-vieilli

11 éprouvettes du matériau non-vieilli ont été testées à l'état sec. 4 éprouvettes n'ont pas subi de conditionnement, 2 éprouvettes ont été conditionnées avec 10 cycles FT, 2 éprouvettes avec 50 cycles FT, deux autres conditionnées avec 10 cycles HF et la dernière éprouvette conditionnée avec 10 cycles HC.

Pour chaque éprouvette, les résultats tracés dans le plan Cole-Cole et dans l'espace de Black (Figure 5-1 pour E*, et Figure 5-2 pour ν*), se situent sur une courbe continue et unique. Le principe d'équivalence temps-température (PETT) est donc vérifié. Il permet de construire les courbes maîtresses de la norme et de l'angle de phase du module complexe ainsi que celles du coefficient de Poisson complexe. Ces courbes maitresses sont présentées dans la partie 5.2.2.

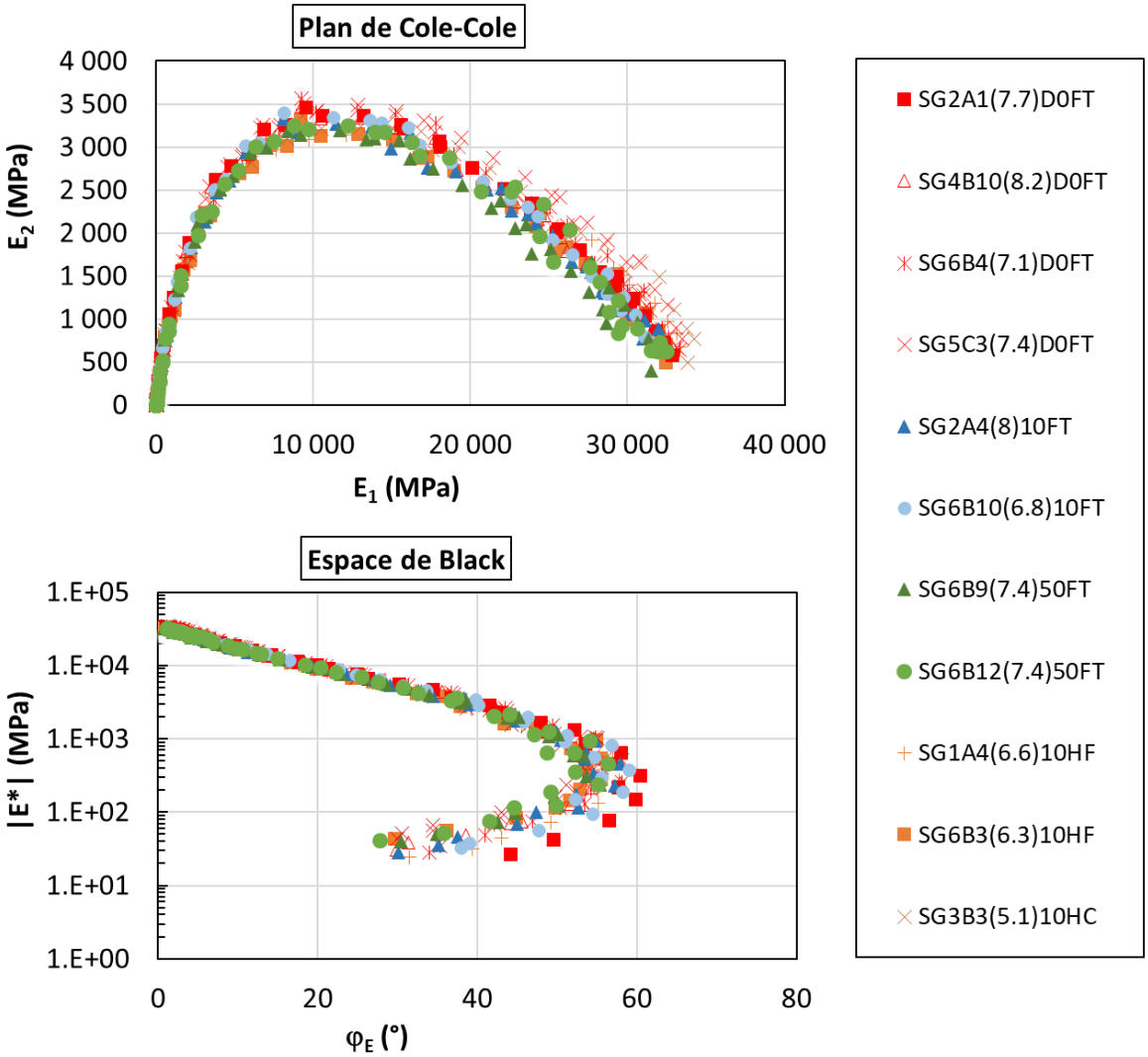


Figure 5-1. Module complexe E* dans le plan de Cole-Cole et l'espace de Black des éprouvettes non-vieillies

Les résultats montrent que, dans le plan Cole-Cole, le module E* à basse température et à haute fréquence des éprouvettes ayant subies des cycles 10HF et 10HC est plus élevé que celui des éprouvettes ayant subies des cycles FT. Dans l'espace de Black, aucune différence significative n'apparait pour le du module complexe.

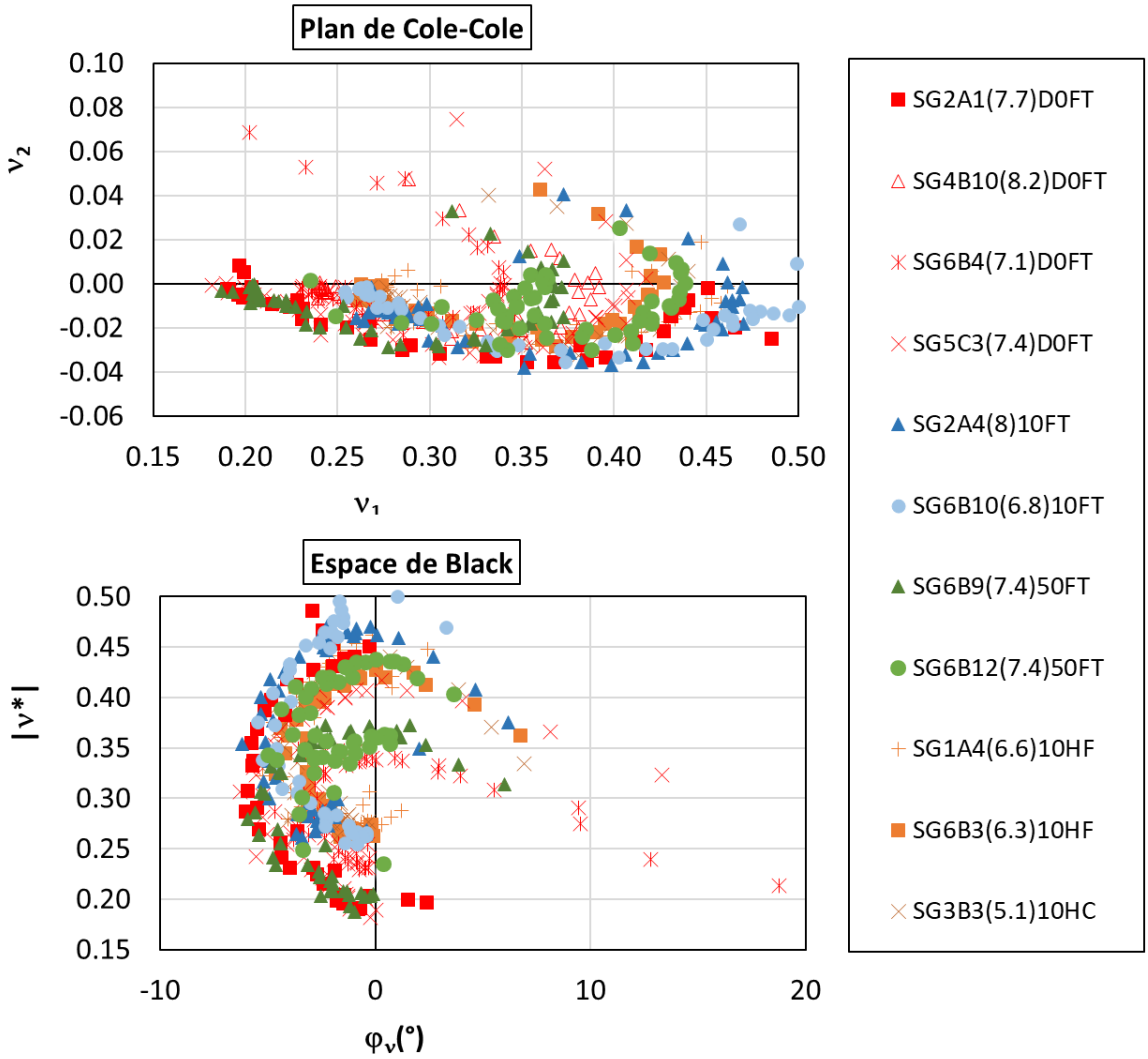


Figure 5-2. Coefficient complexe ν^* dans le plan de Cole-Cole et l'espace de Black des éprouvettes non-vieillies

On constate que les résultats du coefficient de Poisson complexe sont plus dispersés que les résultats du module complexe. Une des raisons principales est que l'amplitude des déplacements radiaux est faible. En outre, le système de mesure des déplacements radiaux est très sensible et fortement influencé par des faibles vibrations durant l'essai. Cela rend la mesure du coefficient de Poisson complexe.

5.2.1.2. Matériau vieilli

8 éprouvettes constituées de matériau vieilli ont été testées à l'état sec. 2 éprouvettes n'ont subi aucun conditionnement, 2 éprouvettes ont été saturées puis séchées pour être testées, 2 éprouvettes ont été conditionnées avec 10 cycles HF et deux autres avec 10 cycles HC.

Pour chaque éprouvette, les résultats tracés dans le plan Cole-Cole et dans l'espace de Black (Figure 5-3 pour E*, et Figure 5-4 pour ν*), se situent aussi sur une courbe continue et unique. Le principe d'équivalence temps-température (PETT) est donc vérifié. Les courbes maîtresses de la norme et de l'angle de phase du module complexe ainsi que celles du coefficient de Poisson complexe ont donc été construites. Ces courbes maitresses sont présentées dans la partie 5.2.2

Les résultats pour les éprouvettes constituées du matériau vieilli sont plus dispersés par rapport à ceux pour le matériau non-vieilli; Cela peut s'expliquer par la différence de teneur en vides des éprouvettes

et par le fait que les éprouvettes ont été carottées dans des plaques pour lesquels l'enrobé a pu être vieilli différemment au cours de la fabrication.

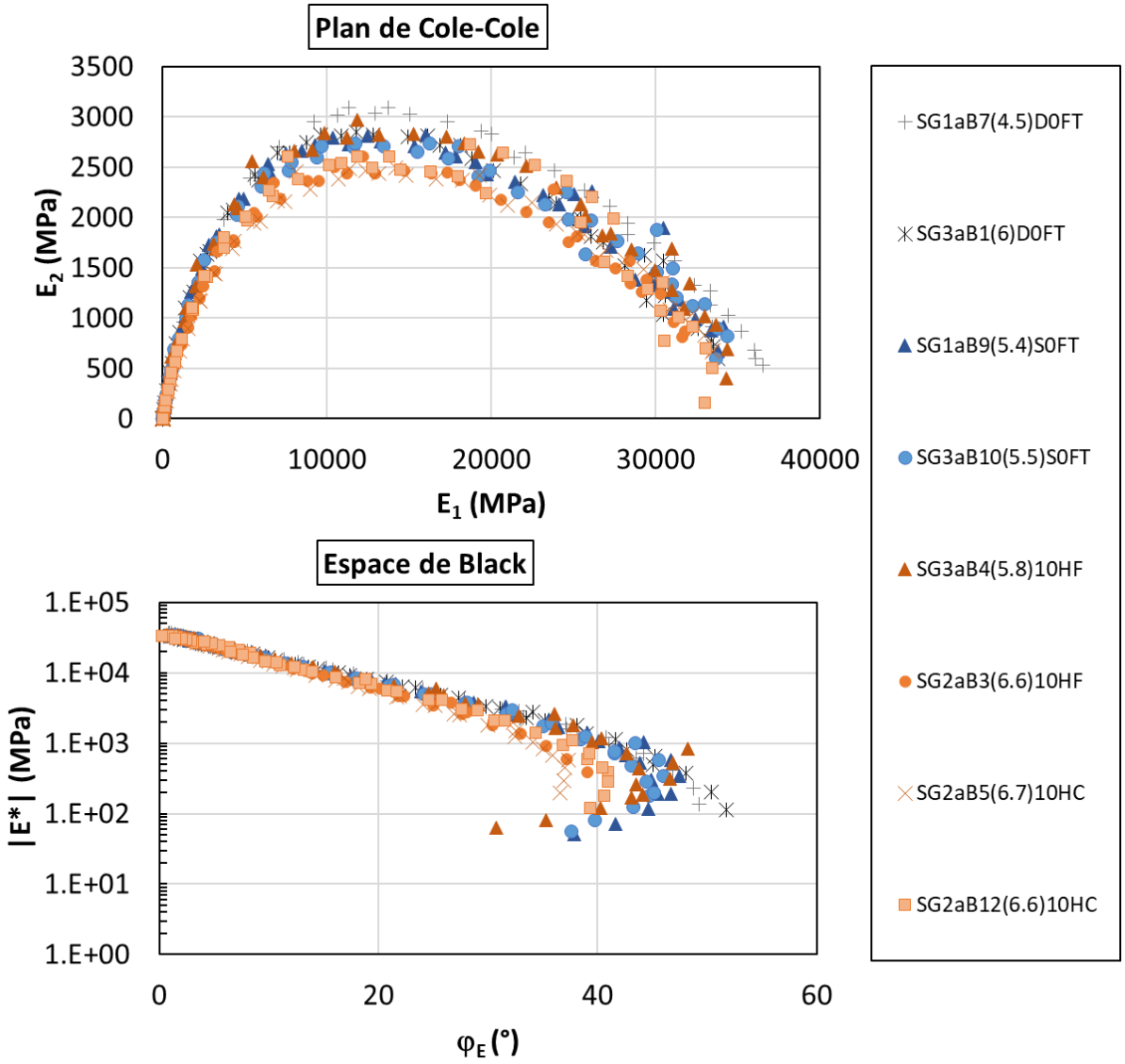


Figure 5-3. Module complexe E* dans le plan de Cole-Cole et l'espace de Black des éprouvettes vieillies

D'après les résultats expérimentaux, les éprouvettes de même plaque ont quasiment les mêmes valeurs pour le module complexe E* et le coefficient complexe ν* malgré les différents conditionnements appliqués. En particulier, les valeurs de E*, ν* des éprouvettes de la plaque 1a et 3a sont presque superposées dans le plan de Cole-Cole, et aussi dans l'espace de Black.

Dans la Figure 5-4, les résultats du coefficient de Poisson complexe apparaissent à nouveau plus dispersés que ceux du module complexe.

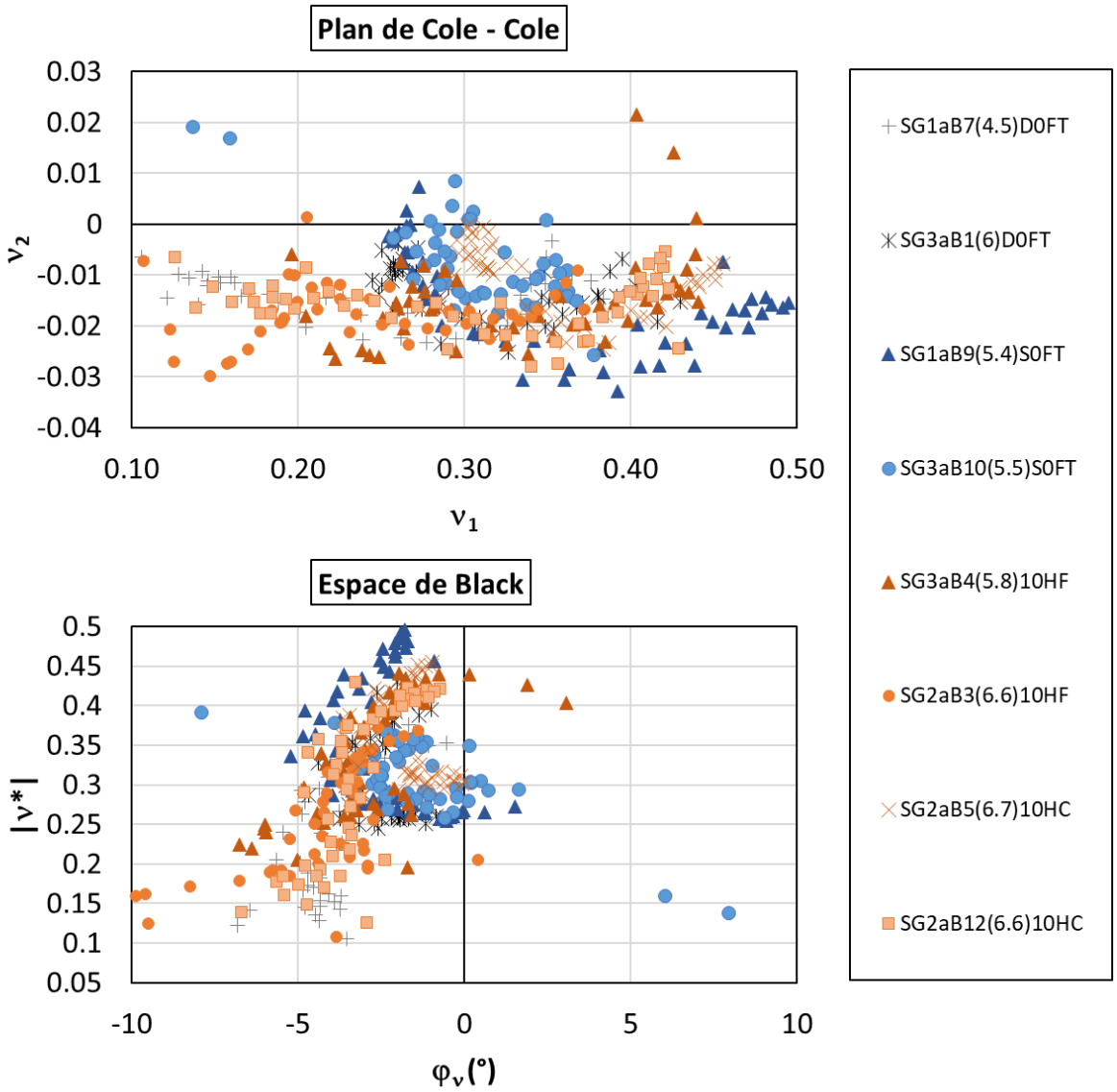


Figure 5-4. Coefficient complexe ν* dans le plan de Cole-Cole et l'espace de Black des éprouvettes vieillies

5.2.2. Courbes maitresses et modélisation des résultats expérimentaux à l'aide du modèle 2S2P1D

Cette partie présente les courbes maitresses et la modélisation des résultats des essais E* à l'aide du modèle 2S2P1D.

La Figure 5-5 présente les coefficients de translation a_T utilisés pour construire les courbes maîtresses des 19 essais de module complexe. Ces coefficients qui sont non seulement identiques pour la construction des courbes maîtresses E* et ν* de chaque éprouvette, sont aussi quasiment identiques pour toutes les éprouvettes testées. La variation des a_T en fonction de la température est modélisée par la loi WLF qui dépend des coefficients C_1 et C_2. On constate qu'un seul couple (C_1, C_2) est utilisé pour toutes éprouvettes testées à l'état sec quels que soient les conditionnements appliqués.

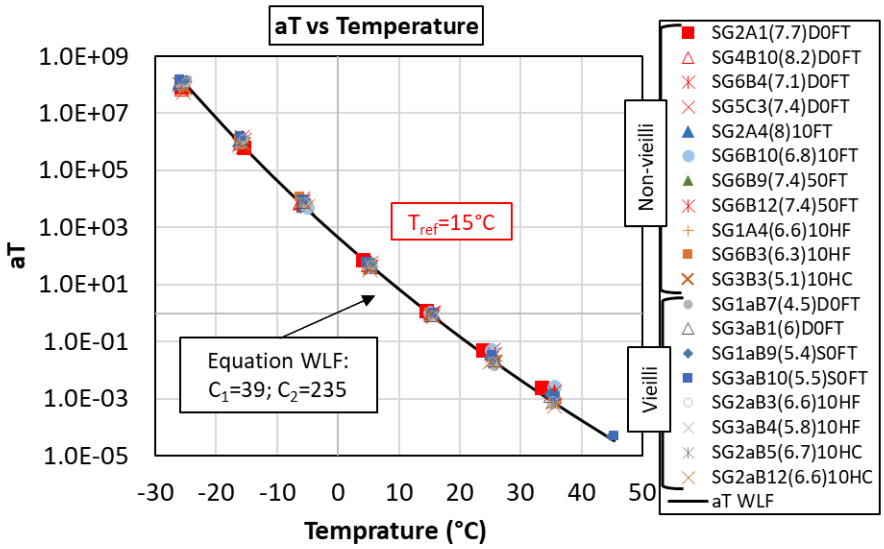


Figure 5-5. Coefficients de translation aT selon la température (à une température de référence Tref= 15°C). Les mêmes coefficients sont obtenus pour E* et ν*

Tableau 5-2. Constantes du modèle 2S2P1D calibrées pour chaque éprouvette (T_{ref}=15°C)

Matériau	Type de conditionnement	Eprouvette	E_{00} (MPa)	E_0 (MPa)	k	h	δ	β	τ_0 (s)	ν_{00}	ν_0	γ ($\tau_0/\tau_{0\nu}$)	$\tau_{0\nu}$ (s)	C_1	C_2
Non-Vieilli	0FT.DRY	SG2A1(7.7)D0FT	14	34240	0.20	0.63	2.25	30	0.05	0.46	0.17	0.40	0.12	39	235
		SG4B10(8.2)D0FT	25	34000					0.05	0.40	0.20		0.13		
		SG6B4(7.1)D0FT	23	34920					0.05	0.35	0.22		0.13		
		SG5C3(7.4)D0FT	33	35600					0.04	0.41	0.18		0.10		
	10FT.DRY	SG2A4(8)10FT	24	33300					0.05	0.47	0.22		0.11		
		SG6B10(6.8)10FT	20	33800					0.04	0.49	0.22		0.10		
	50FT.DRY	SG6B9(7.4)50FT	31	33000					0.05	0.37	0.18		0.12		
		SG6B12(7.4)50FT	32	33700					0.05	0.45	0.20	0.36	0.14		
	10HF.DRY	SG1A4(6.6)10HF	16	35500	0.19	0.60	2.40	60	0.05	0.45	0.20	0.20	0.24		
		SG6B3(6.3)10HF	28	34500					0.06	0.43	0.24		0.28		
	10HC.DRY	SG3B3(5.1)10HC	33	36500					0.06	0.45	0.22		0.32		
Vieilli	A.0FT.DRY	SG1aB7(4.5)D0FT	29	38400	0.17	0.50	2.40	300	0.27	0.38	0.13	0.17	1.60		
		SG3aB1(6)D0FT	18	36000					0.17	0.40	0.21		1.02		
	A.0FT(sat).DRY	SG1aB9(5.4)S0FT	25	35700					0.27	0.49	0.23		1.60		
		SG3aB10(5.5)S0FT	24	35500					0.27	0.38	0.24		1.60		
	A.10HF.DRY	SG3aB4(5.8)10HF	39	36500					0.25	0.44	0.20		1.49		
		SG2aB3(6.6)10HF	65	36000	0.15	0.45	2.60	700	0.57	0.38	0.11	0.15	3.77		
	A.10HC.DRY	SG2aB5(6.7)10HC	75	36700					1.55	0.46	0.23		10.51		
		SG2aB12(6.6)10HC	55	37000					1.50	0.44	0.16		10.18		

Les résultats expérimentaux ont été modélisés à l'aide du modèle viscoélastique linéaire (VEL) 2S2P1D (cf. chapitre I). Les constantes de calibration et les coefficients de la loi WLF sont donnés dans le Tableau 5-2. Il y a 4 groupes ayant chacun des valeurs identiques des constantes (k, h, δ, β).

5.2.2.1. Courbes maitresses et modèle 2S2P1D pour le matériau non-vieilli

Les courbes obtenues à l'aide du modèle 2S2P1D pour le matériau non-vieilli sont superposées aux données des essais dans la Figure 5-6 et la Figure 5-7. Ces figures présentent les résultats obtenus dans le plan de Cole-Cole et dans l'espace de Black, pour la norme et l'angle de phase de E* et ν*. On constate que le modèle simule correctement les valeurs expérimentales du module complexe E* ainsi que celles du coefficient de Poisson complexe ν*.

Pour une meilleure lisibilité, les résultats des éprouvettes sans cycle FT avec les résultats de celles ayant subi des cycles FT (0FT.DRY, 10FT.DRY et 50FT.DRY), et les résultats de celles ayant subi des cycles avec échauffement (10HF.DRY et 10HC.DRY) sont séparés et tracés dans la Figure 5-6 d'une part, et dans la Figure 5-7, d'autre part. Dans ces deux figures, les écarts entre les courbes sont relativement faibles malgré les différents conditionnements des éprouvettes.

La Figure 5-8 présente l'ensemble des courbes maîtresses de la norme et de l'angle de phase de E* et de ν* des éprouvettes du matériau non-vieilli. Les courbes maitresses simulées avec le modèle 2S2P1D sont aussi présentées dans la même figure. On constate que le modèle décrit correctement les résultats obtenus sur toute la gamme des fréquences et températures. Les valeurs de la norme du module complexe augmentent avec la fréquence équivalente tandis que celles du coefficient de Poisson complexe diminuent et sont pour la plupart comprises entre 0,2 et 0,5.

Pour la température de référence de 15°C, les courbes maitresses de E* et φ_E sont presque superposées aux fréquences supérieures à 1Hz ; et l'écart entre ces courbes augmente quand la fréquence équivalente diminue. Cependant, cet écart reste faible malgré les conditionnements différents appliqués.

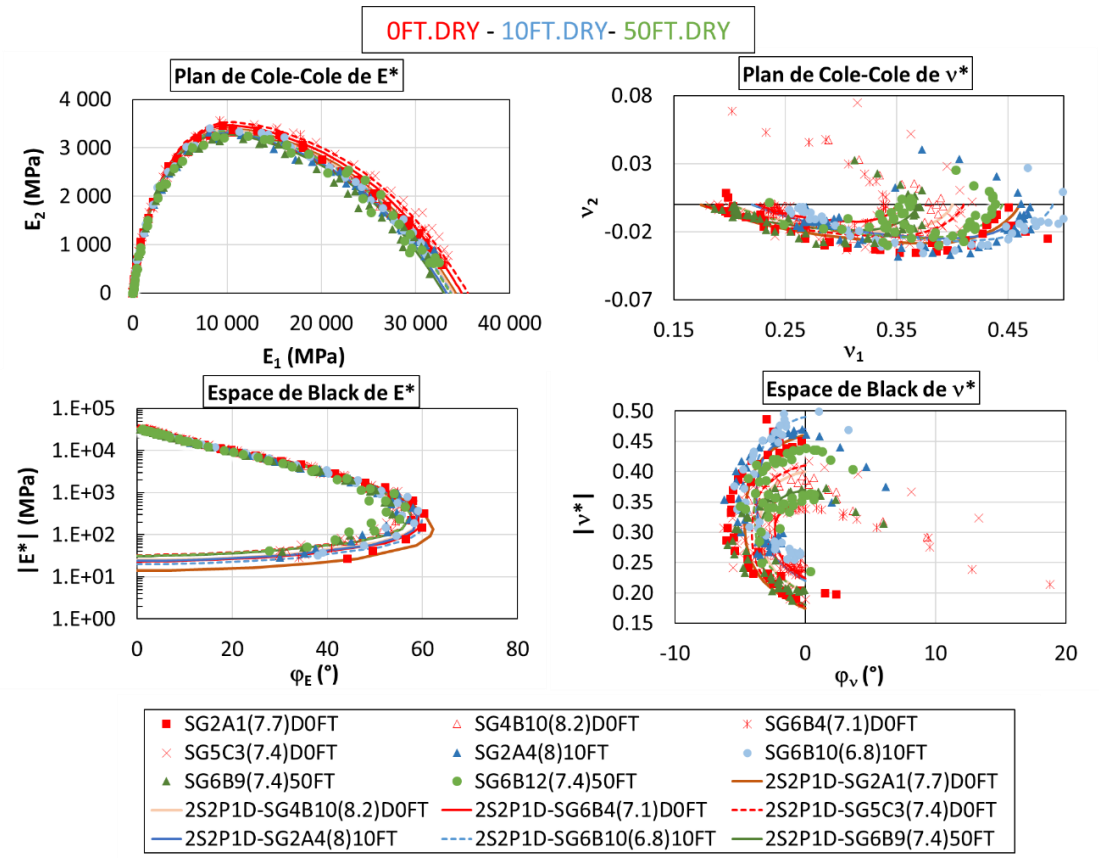


Figure 5-6. Module complexe E*, coefficient ν* dans le plan Cole-Cole et dans l'espace de Black avec courbes simulées à l'aide du modèle 2S2P1D pour les éprouvettes 0FT.DRY, 10FT.DRY et 50FT.DRY (matériau non-vieilli)

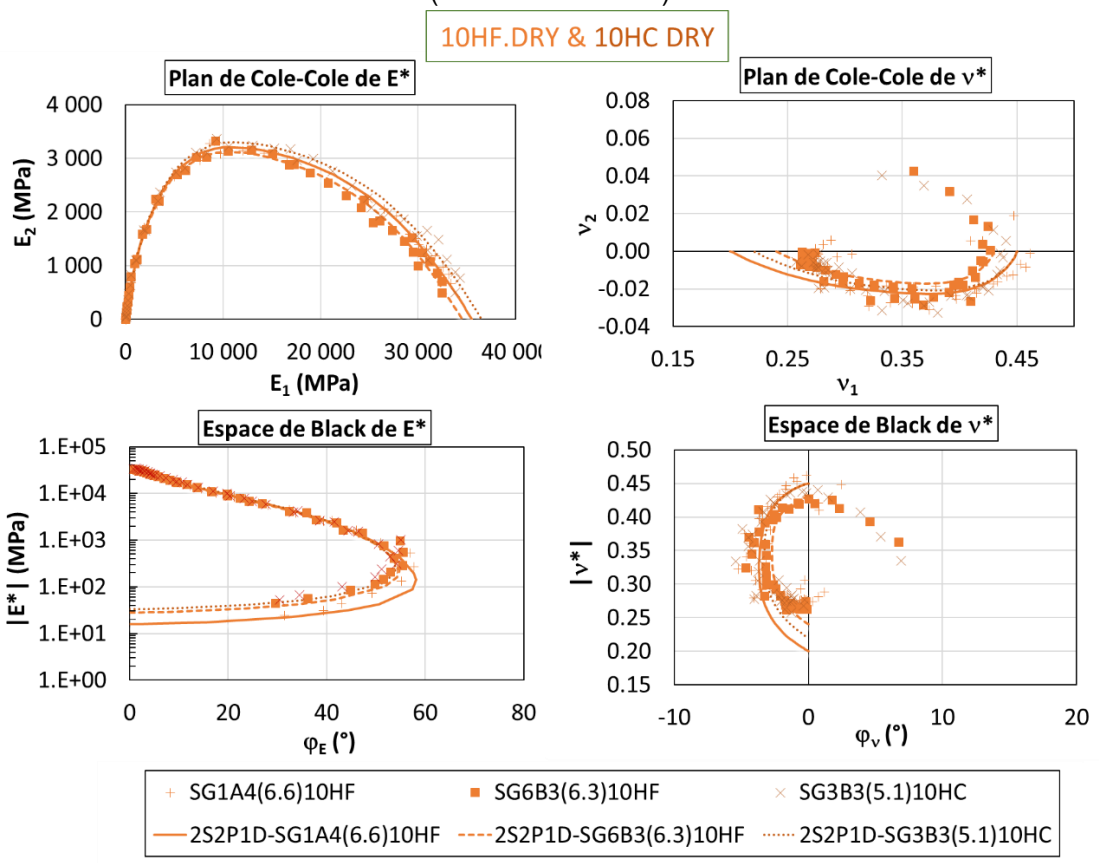


Figure 5-7. Module complexe E*, coefficient ν* dans le plan Cole-Cole et dans l'espace de Black avec courbes simulées à l'aide du modèle 2S2P1D pour les éprouvettes 10HF.DRY et 10HC.DRY (matériau non-vieilli)

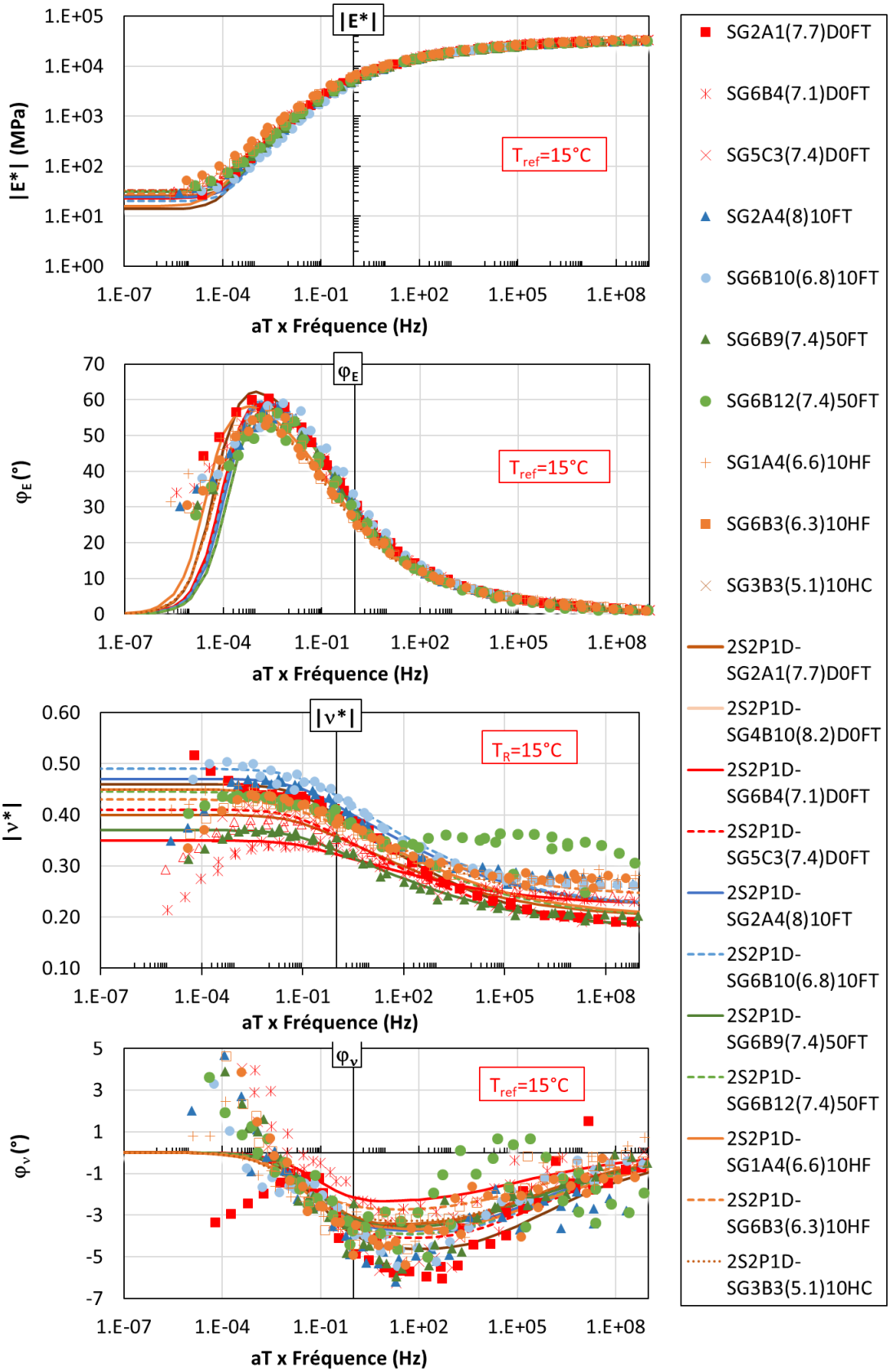


Figure 5-8. Courbes maîtresses de la norme et de l'angle de phase du module complexe E* et du coefficient de Poisson complexe ν* et courbes simulées avec le modèle 2S2P1D des éprouvettes testées à l'état sec pour le matériau non-vieilli

5.2.2.2. Courbes maitresse et modèle 2S2P1D pour le matériau vieilli

Les modélisations à l'aide du modèle 2S2P1D pour les essais sur le matériau vieilli sont tracées sur la Figure 5-9 et la Figure 5-10. Ces figures présentent les résultats obtenus dans le plan de Cole-Cole et dans l'espace de Black. Encore une fois, on constate que le modèle décrit correctement les valeurs expérimentaux du module complexe E* ainsi que celles du coefficient de Poisson complexe ν*.

Pour une meilleure lisibilité, les résultats des éprouvettes de la 1ère plaque (1a) et de la 3ème plaque (3a) du matériau vieilli (ayant subi A.0FT.DRY, A.0FT(sat).DRY et A.10HF.DRY) sont séparés de ceux des éprouvettes de la 2ème plaque (2a) du matériau vieilli (ayant subi A.10HF et A.10HC). Ils sont tracés respectivement dans la Figure 5-9 d'une part, et dans la Figure 5-10 d'autre part. Dans ces deux figures, les courbes de simulation de E* sont similaires et presque superposées pour les éprouvettes de même teneur en vides, malgré des conditionnements différents. Les courbes de simulation de ν* sont plus écartées des points expérimentaux et plus écartées entre elles que celles de E*.

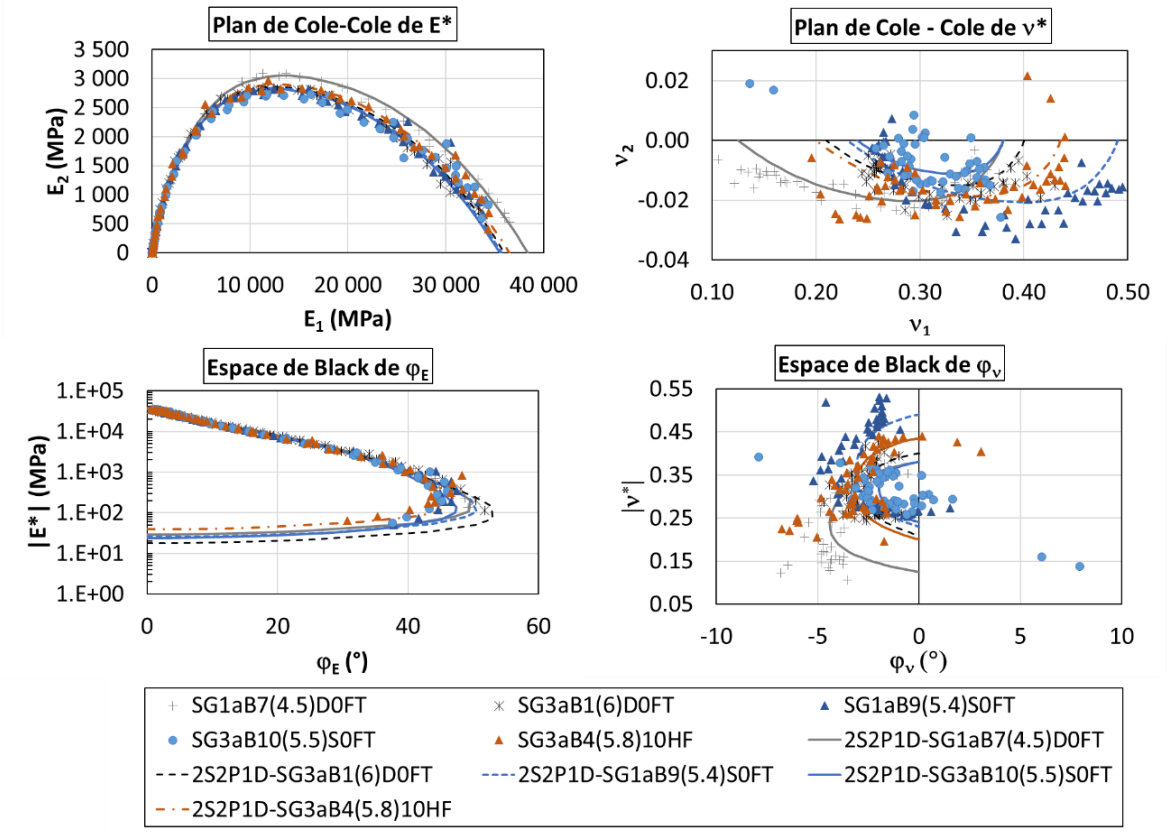


Figure 5-9. Module complexe E*, coefficient ν* dans le plan Cole-Cole et dans l'espace Black avec courbes simulées à l'aide du modèle 2S2P1D pour les éprouvettes vieilli de la plaque 1a et la plaque 3a (ayant subi A.0FT.DRY, A.0FT(sat).DRY et A.10HF.DRY)

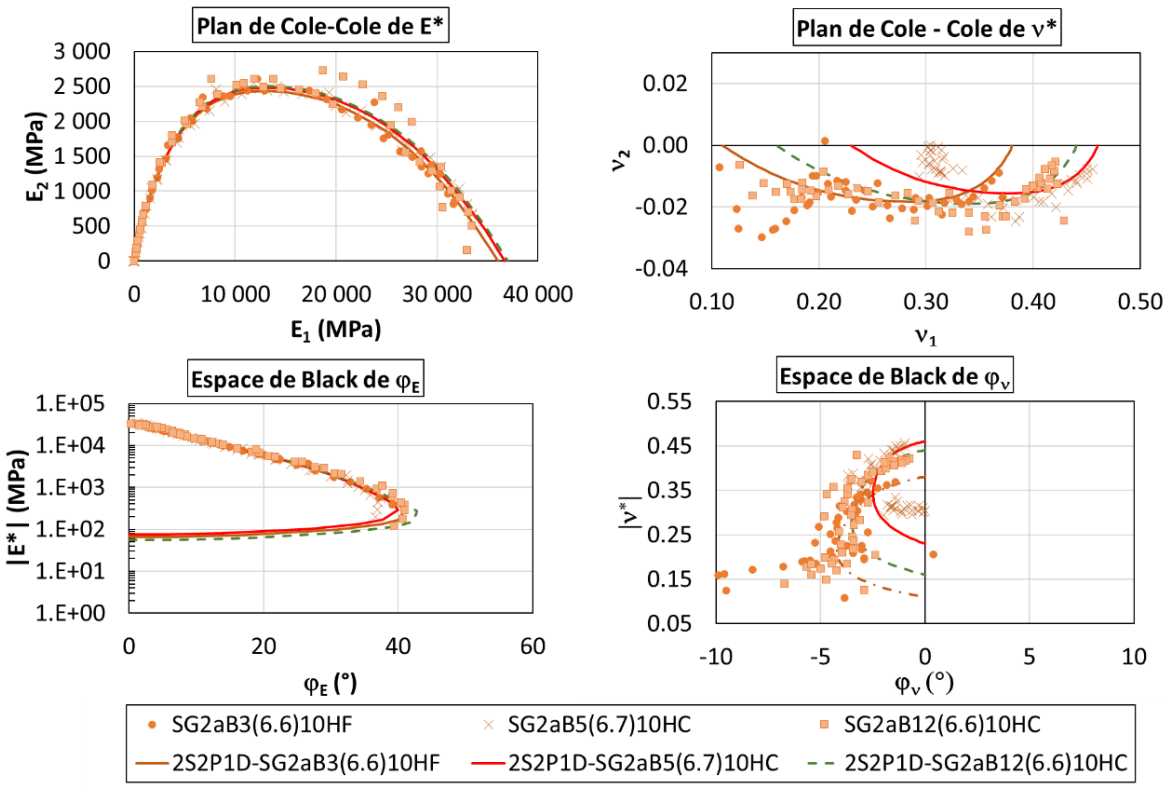


Figure 5-10. Module complexe E*, coefficient ν* dans le plan Cole-Cole et dans l'espace Black avec courbes simulées à l'aide du modèle 2S2P1D pour les éprouvettes vieilli de la plaque 2a (ayant subi A.10HF et A.10HC)

La Figure 5-11 présente l'ensemble des courbes maîtresses de la norme et de l'angle de phase du module E* et celles du coefficient ν* pour les éprouvettes du matériau vieilli. Les courbes maitresses simulées avec le modèle 2S2P1D sont aussi présentées dans la même figure. Les résultats obtenus confirment que le modèle décrit correctement les résultats obtenus sur toute la gamme des fréquences et températures.

Pour les courbes maîtresses de module complexe E*, deux groupes se distinguent clairement, les résultats des éprouvettes de la plaque 1a et ceux des éprouvettes de la plaque 3a d'une part, et ceux des éprouvettes de la plaque 2a d'autre part. Pour la température de référence de 15°C, toutes les courbes maitresses de E* et φ_E sont presque superposées aux fréquences supérieures à 1Hz ; et l'écart entre ces courbes augmente quand la fréquence diminue.

Les valeurs de la norme des coefficients de Poisson complexes ν* décroissent avec la fréquence équivalente et varient de 0,5 à 0,1.

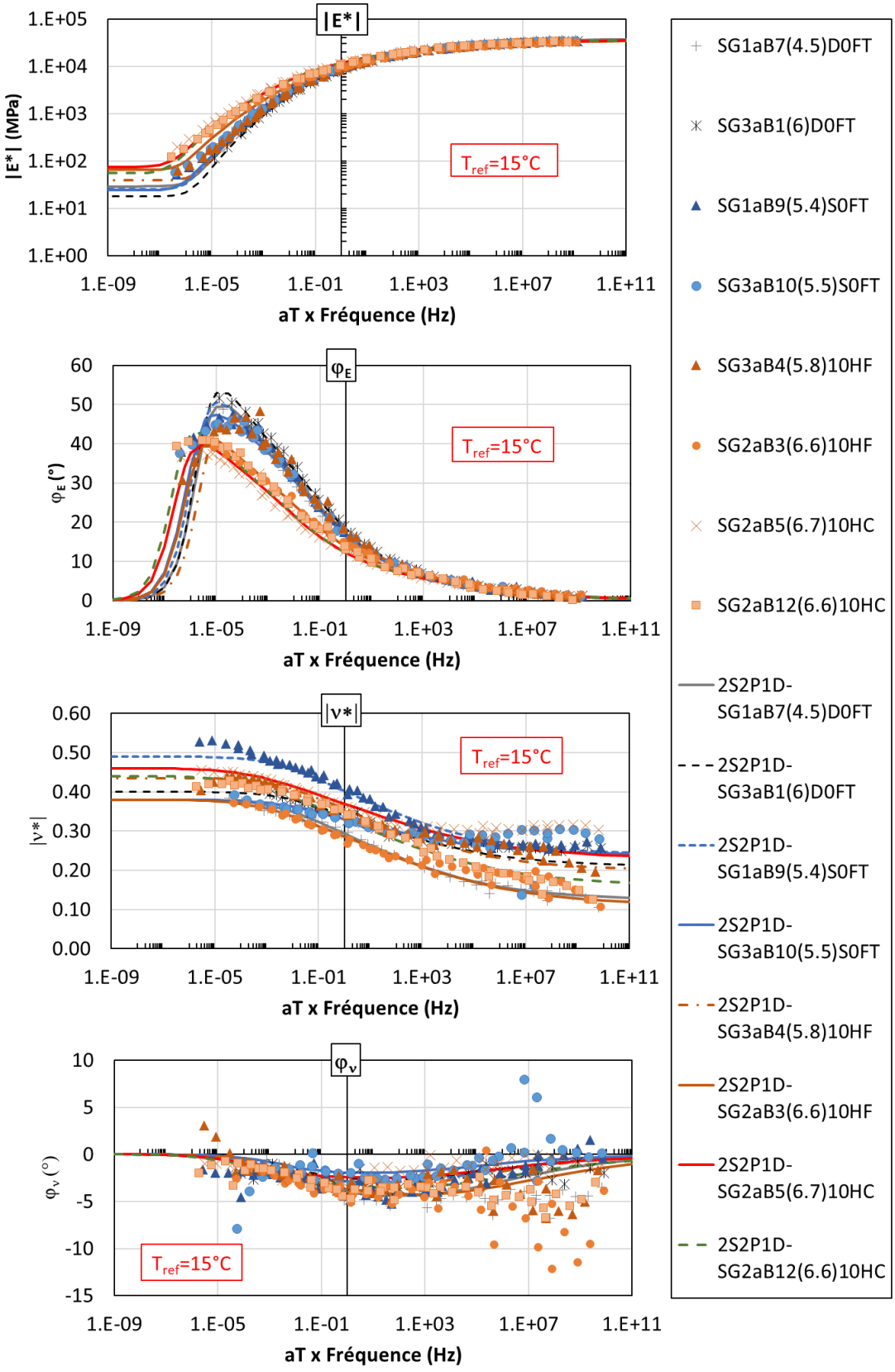


Figure 5-11. Courbes maîtresses de la norme et de l'angle de phase du module complexe E* et du coefficient ν* des éprouvettes vieillies testées à l'état sec et courbes simulées avec le modèle 2S2P1D

5.2.3. Module complexe normalisé E^*_{nor}

Les résultats des modules complexes E* ont été normalisés à l'aide de l'équation Eq. 5-1. Le module complexe ainsi normalisé peut être représenté dans les mêmes axes que le module complexe, à savoir le plan Cole-Cole normalisé, l'espace de Black normalisé et les courbes maitresses (Figure 5-12 à Figure 5-13).

$$E^*_{nor} = \frac{E^* - E_{00}}{E_0 - E_{00}} \qquad \text{Eq. 5-1}$$

Le coefficient de Poisson complexe peut également être normalisé à l'aide de l'équation Eq. 5-2, ci-dessous. Compte tenu de la dispersion du coefficient de Poisson, les résultats ne sont pas présentés ici.

$$\nu^*_{nor} = \frac{\upsilon^* - \upsilon_{00}}{\upsilon_0 - \upsilon_{00}} \qquad \text{Eq. 5-2}$$

Sur les Figure 5-12 et Figure 5-13, on constate que toutes les valeurs normalisées E^*_{nor} des éprouvettes présentées dans chaque figure se situent sur une courbe continue et unique. On peut donc utiliser une courbe unique pour les simulations. Les conditionnements différents appliqués n'ont donc aucun effet sur ces courbes pour les éprouvettes de même groupe.

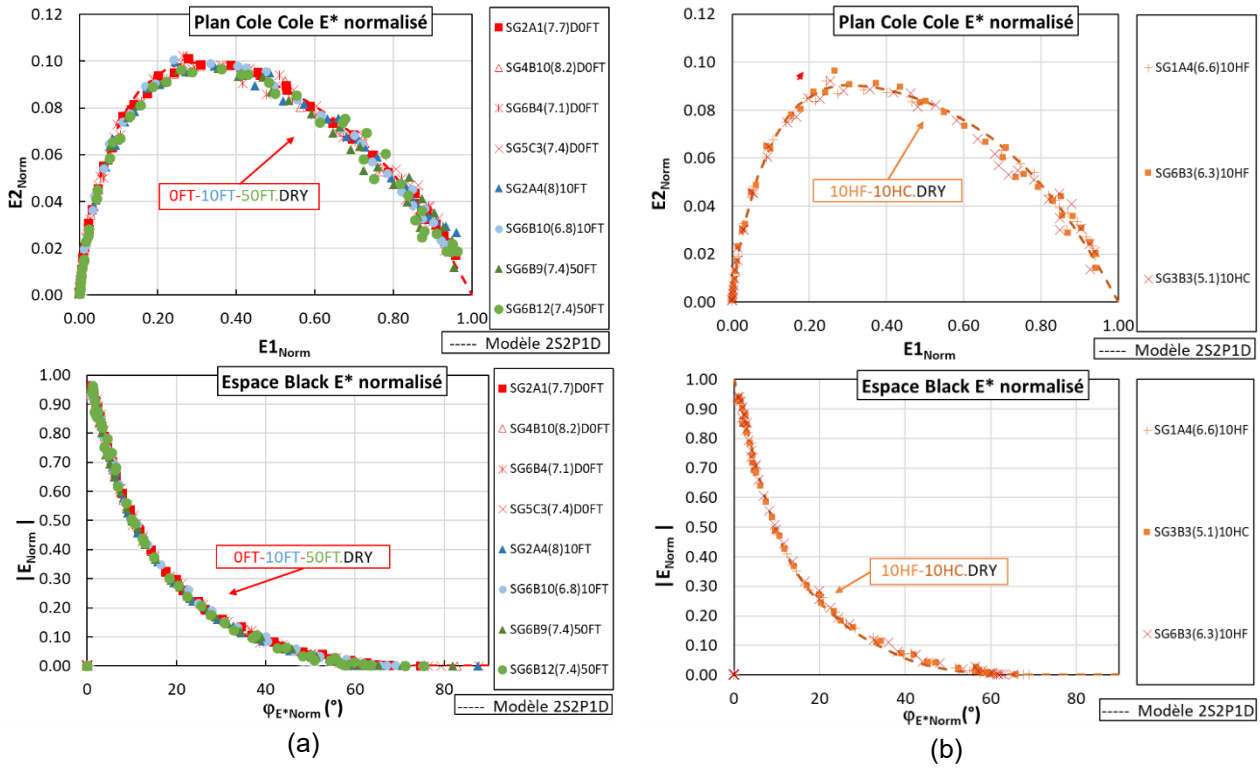


Figure 5-12. Valeurs normalisées de la norme et de l'angle de phase du module complexe E* des éprouvettes 0FT.DRY, 10FT.DRY et 50FT.DRY (a) et celles des éprouvettes 10HF.DRY, 10HC.DRY (b) avec les courbes simulées à l'aide du modèle 2S2P1D

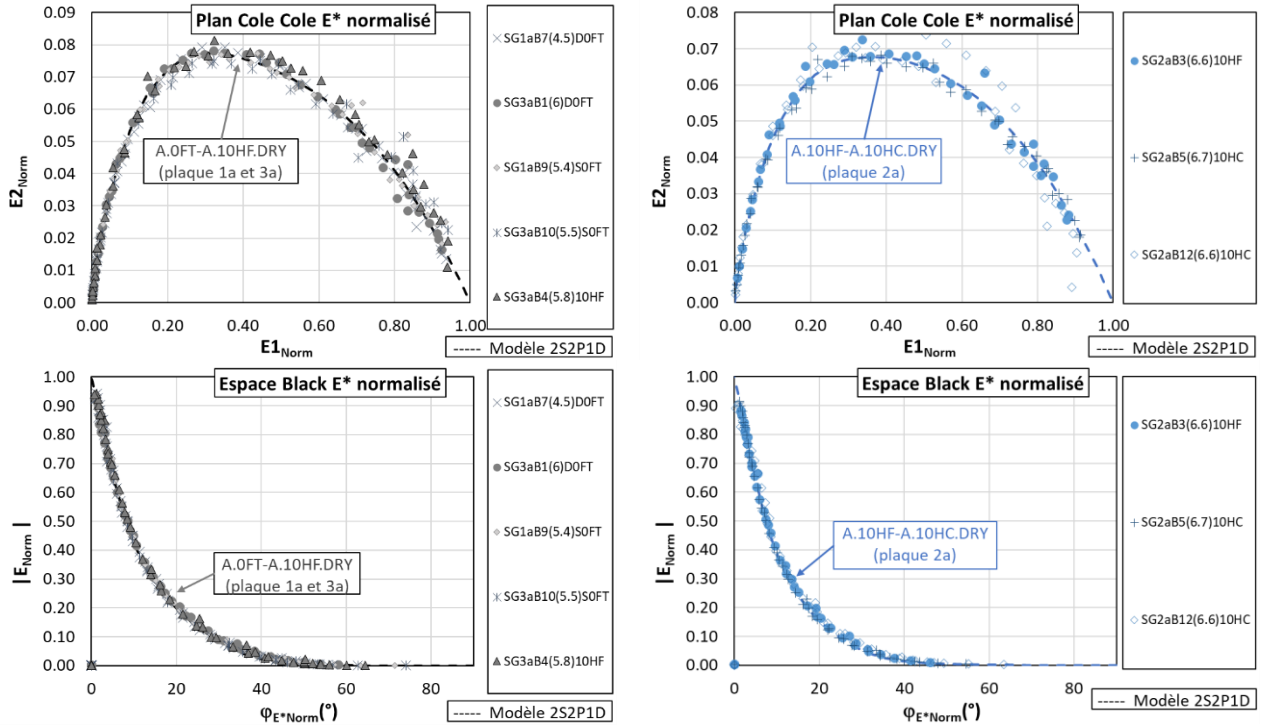


Figure 5-13 ; Valeurs normalisées de la norme et de l'angle de phase du module complexe E* des éprouvettes vieillies de la plaque 1a (a) et celles de la plaque 3a (b) avec les courbes simulées à l'aide du modèle 2S2P1D

Ces observations confirment les résultats obtenus dans la partie 5.2.2, à savoir qu'il y a 4 groupes des éprouvettes ayant chacun des valeurs identiques des constantes (k, h, δ, β).

Les deux premiers groupes correspondent respectivement pour le matériau non-vieilli, i) à des éprouvettes conditionnées avec les cycles FT et, ii) à celles conditionnées avec les cycles HF et HC. Les différences entre ces deux groupes s'expliquent par un vieillissement du bitume généré par les cycles avec échauffement (de type HC ou HF). Le troisième et quatrième groupe concernent le matériau vieilli. Le troisième groupe inclut les éprouvettes de la 1ère plaque (ayant subi 0FT) et celles de la 3ème plaque (ayant subi 10HF). Pour ce groupe, l'effet du vieillissement créé par les cycles HF (avec échauffement) n'est pas visible (mêmes constantes k, h, δ, β). Ce vieillissement est sans doute très minime car le bitume a déjà été vieilli. Le quatrième groupe inclut les éprouvettes de la 2éme plaque ayant subi un échauffement (cycles HF ou HC). Pour ces éprouvettes, le bitume a sans doute subi un vieillissement plus important que celui des plaques 1 et 3 lors de la fabrication.

Cette observation confirme un résultat déjà présenté dans la littérature qui associe la valeur des constantes (k, h, δ, β) du modèle 2S2P1D uniquement à la nature du bitume. Les caractéristiques du squelette granulaire agissent principalement sur les autres constantes E_{00}, E_0, ν_{00} et ν_0.

La Figure 5-14 présente l'ensemble des valeurs normalisées E^*_{nor} et les courbes simulées avec le modèle 2S2P1D.

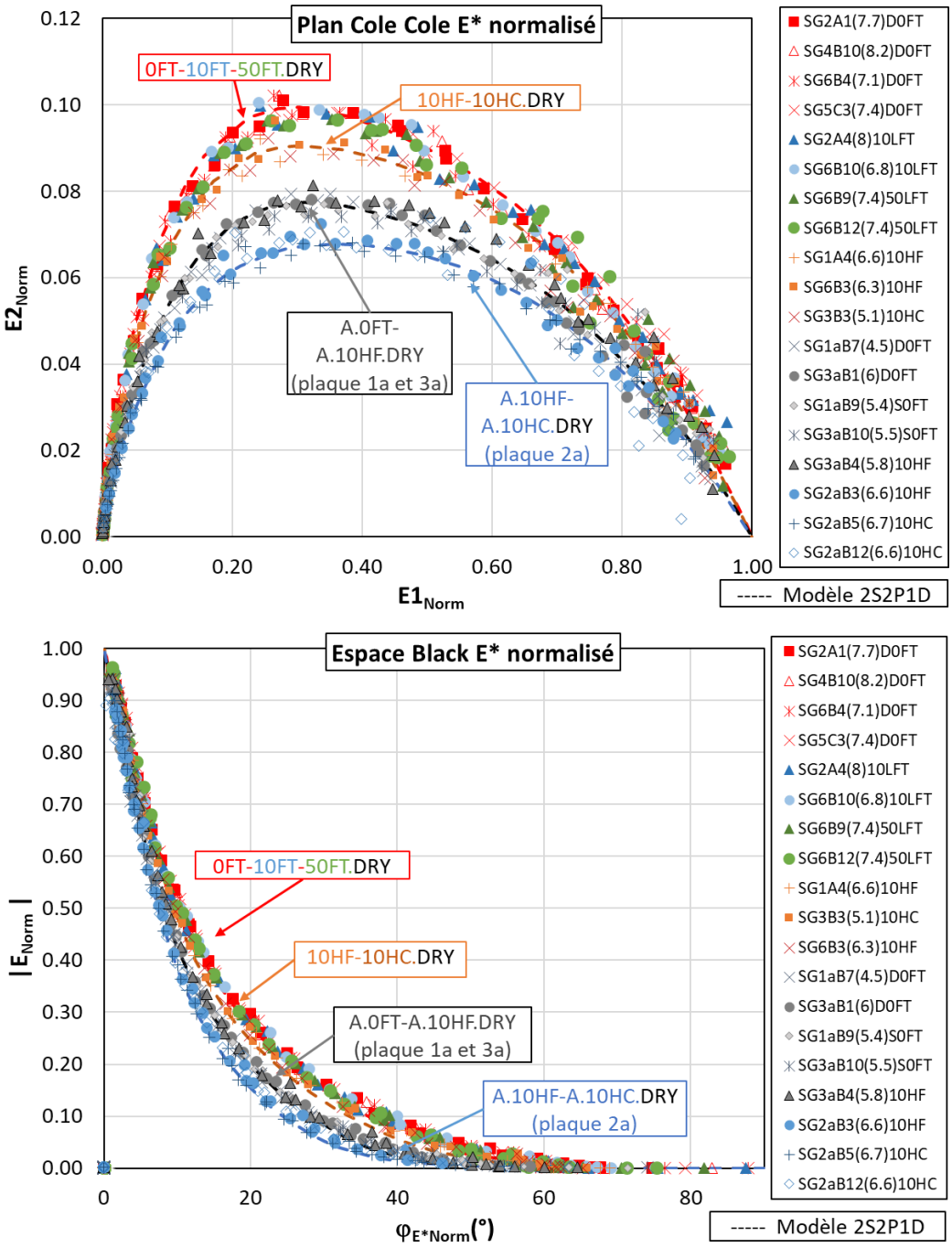


Figure 5-14. Ensemble des valeurs normalisées de la norme et de l'angle de phase du module complexe E* avec les courbes simulées à l'aide du modèle 2S2P1D

5.2.4. Effets de la teneur en vides des cycles thermiques et du vieillissement

5.2.4.1. Effets de la teneur en vides

La teneur en vides (TEV) d'une éprouvette qui est définie par le rapport du volume de vides au volume total, a une influence importante sur la performance des enrobés bitumineux ((Castelblanco Torres, 2004) (Chen, et al., 2004) (Di Benedetto & Corté, 2005) (Mangiafico, 2014) (Lamothe, 2014) (Ramirez Cardona, 2016) (Pedraza, 2018)). La rigidité du matériau a tendance à augmenter avec la diminution de la teneur en vides et vice-versa (Di Benedetto & De la Roche, 1998).

Dans cette partie, l'effet de la teneur en vides est étudié à l'aide des paramètres du modèle 2S2P1D. La Figure 5-15 présente la variation des constantes du modèle (E_0, E_{00}, ν_0, ν_{00} et τ_0) en fonction de la teneur en vides (TEV) des éprouvettes en début d'essai (cf. Tableau 5-1-page 131). Les résultats obtenus montrent que E_0 semble évoluer en fonction de la teneur en vides selon une loi linéaire tandis que les variations des autres constantes E_{00}, ν_0, ν_{00} et τ_0 semblent indépendantes de la teneur en vides de l'éprouvette testée. La relation linéaire entre E_0 et TEV est valable malgré le vieillissement différent du matériau. Pour une augmentation de 1% de TEV, la valeur de E0 diminue d'environ 800MPa. Cette observation est cohérente avec les résultats obtenus dans la littérature ((Di Benedetto & De la Roche, 1998), (Pedraza, 2018)).

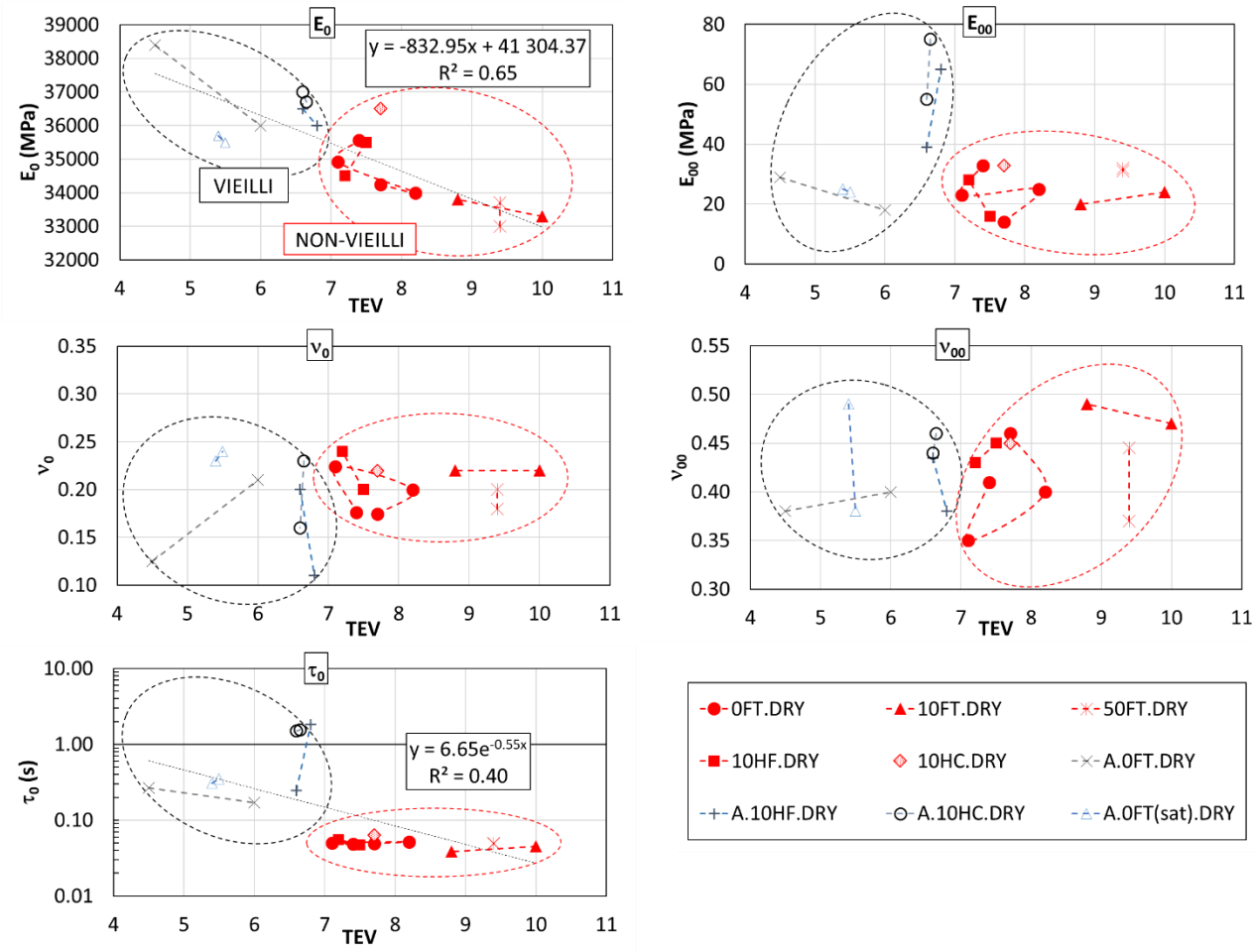


Figure 5-15. Constantes E_0, E_{00}, ν_0, ν_{00} et τ_0 du modèle 2S2P1D en fonction de la teneur en vides déterminée en début d'essai E* (TEV) (Température de référence T_R=15°C)

5.2.4.2. Effets des cycles FT

La Figure 5-16 présente l'évolution des constantes du modèle (E_0, E_{00}, ν_0, ν_{00} et τ_0) en fonction du nombre de cycles FT appliqués. Les résultats obtenus montrent que E_0 diminue lors de l'augmentation du nombre de cycles FT tandis que les variations des autres constantes E_{00}, ν_0, ν_{00} et τ_0 semblent indépendantes du nombre des cycles FT. L'origine de la relation entre E_0 et le nombre des cycles FT vient du fait que : (1) E_0 évolue linéairement selon la variation de la teneur en vides, (2) la teneur en vides elle-même diminue avec l'augmentation des cycles FT (cf. Chapitre 4-Campagne complémentaire).

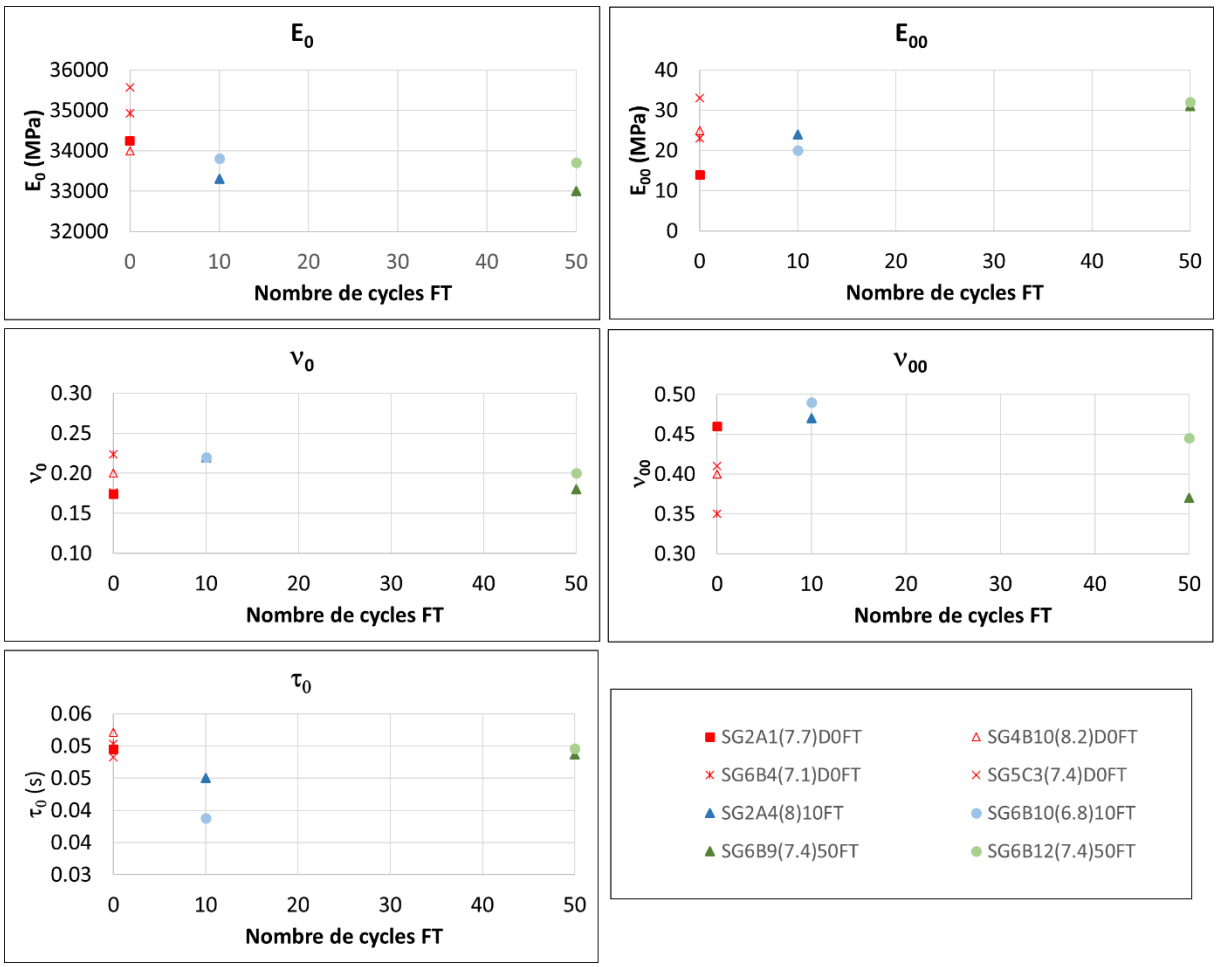


Figure 5-16. Les constantes 2S2P1D en fonction du nombre de cycles gel/dégel (FT)

En résumé, les résultats obtenus lors de cette étude sur les matériaux testés à sec montrent que le nombre de cycles de gel/dégel appliqués lors du conditionnement a un effet négligeable sur les propriétés viscoélastiques linéaires (E* et ν*).

5.2.4.3. Effets des cycles HF, HC et du vieillissement

On rappelle qu'il y a 4 groupes des éprouvettes ayant chacun des valeurs identiques des constantes (k, h, δ, β) (cf.5.2.3 - page 142). Ces 4 groupes ont subi des niveaux du vieillissement différent :

1. Les éprouvettes du matériau non-vieilli conditionnées avec les cycles FT. Ces éprouvettes n'ont subi aucun échauffement lors du conditionnement.
2. Les éprouvettes du matériau non vieilli conditionnées avec les cycles HF et HC. L'effet de ces cycles est similaire. L'étape de l'échauffement à 50°C lors de ces cycles a assurément créé un vieillissement du bitume des éprouvettes.
3. Les éprouvettes de la 1ère plaque (ayant subi 0FT) et celles de la 3ème plaque (ayant subi 10HF) du matériau vieilli. L'effet du vieillissement créé par les cycles HF est minime et peut être négligé sur le bitume qui a déjà été vieilli.
4. Les éprouvettes de la 2ème plaque du matériau vieilli ayant subi un échauffement (cycles HF ou HC). Le bitume de ces éprouvettes a sans doute subi un vieillissement plus important que celui des plaques 1 et 3 lors de la fabrication.

La Figure 5-17 et la Figure 5-18 présentent l'ensemble des courbes de la norme et de l'angle de phase du module complexe normalisé E^*_{nor} simulées à l'aide du modèle 2S2P1D. Dans ces figures, on

constate que les valeurs de (k, h, δ, β) sont influencées par le vieillissement du bitume : plus le bitume vieilli, plus les valeurs de k, h diminuent tandis que celles de (δ, β) augmentent.

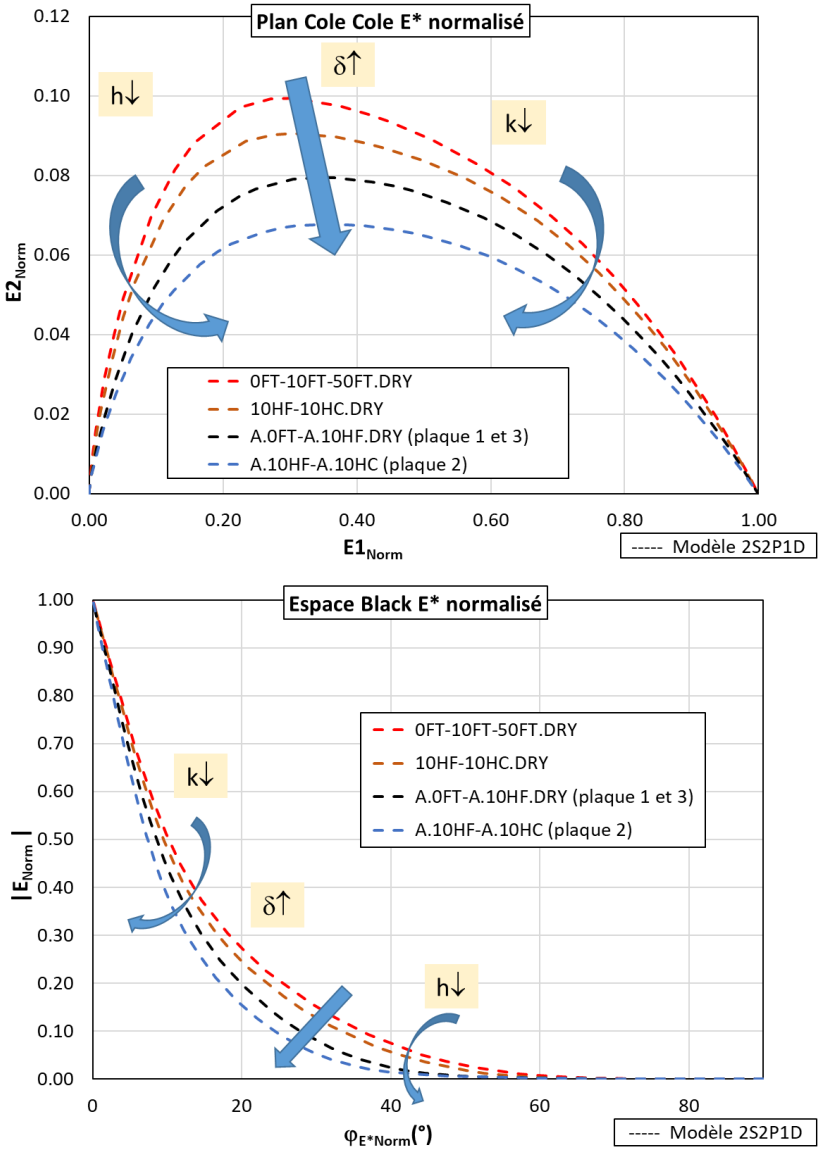


Figure 5-17. Ensemble des courbes de la norme et l'angle de phase du module complexe normalisé E^*_{nor} simulées à l'aide du modèle 2S2P1D, représentées dans le plan Cole-Cole et l'espace de Black (les flèches bleues indiquent l'évolution des courbes avec le vieillissement du bitume)

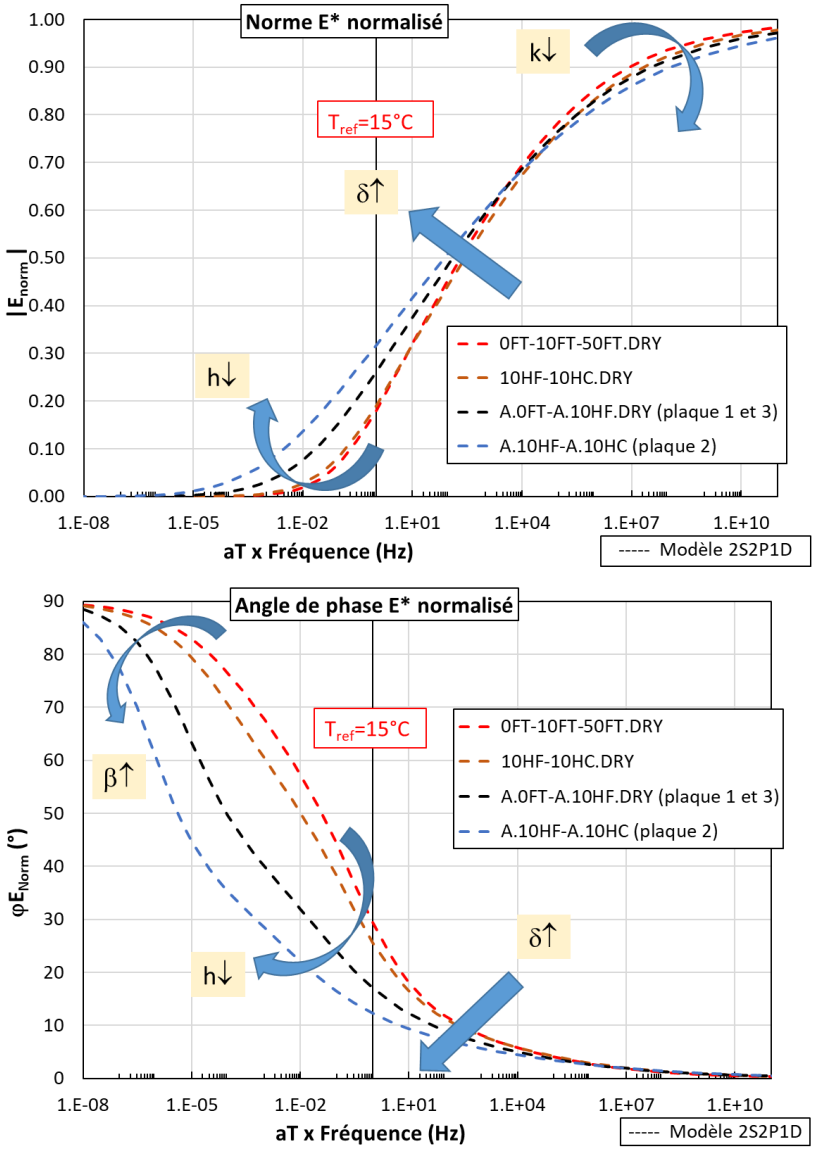


Figure 5-18. Ensemble les courbes maitresses de la norme et l'angle de phase du module complexe normalisé E^*_{nor} simulées à l'aide du modèle 2S2P1D (les flèches bleues indiquent l'évolution des courbes avec le vieillissement du bitume)

En se basant sur les résultats obtenus, deux hypothèses ont été proposées pour mieux analyser les effets des cycles HF, HC et du vieillissement :

1. Les cycles HF et HC intégrant une phase d'échauffement à 50°C influencent seulement les éprouvettes du matériau non vieilli. L'effet de l'échauffement des cycles HF et HC est négligeable pour les éprouvettes du matériau vieilli.
2. Le matériau vieilli de la 2ème plaque (groupe 4) est resté à 85°C, 72h de plus que les matériaux de la plaque 1a et 3a lors de la fabrication.

Le Tableau 5-3 présente les valeurs des constantes k, h, δ et β du modèle 2S2P1D et la durée de vieillissement des éprouvettes pour ces 4 groupes.

La Figure 5-9 présente l'évolution des constantes k, h, δ et β en fonction de la durée de vieillissement à une température supérieure ou égale à 50°C.

Tableau 5-3. Constantes (k, h, δ, β) du modèle 2S2P1D et vieillissement des éprouvettes testées

Groupe	Label	Constantes du modèle 2S2P1D				Temps du vieillissement à température supérieure ou égale à 50°C (h)	Nature du vieillissement
		k	h	δ	β		
Groupe 1	0FT-10FT-50FT.DRY	0,20	0,63	2,25	30	0	Pas de vieillissement
Groupe 2	10HF-10HC.DRY	0,19	0,60	2,40	60	55	Eprouvettes subies de 10 cycles HF ou HC (lors du conditionnement)
Groupe 3	A.0FT-A.10HF (plaque 1a et 3a)	0,17	0,50	2,40	300	220	Mélange de l'enrobé vieilli par la procédure RILEM (lors de la fabrication)
Groupe 4	A.10HF-A.10HC (plaque 2a)	0,15	0,45	2,60	700	220 + X (*)	
(*) X=72h (la valeur de X est choisie afin d'obtenir la valeur maximale de R^2) (cf. Figure 5-9)							

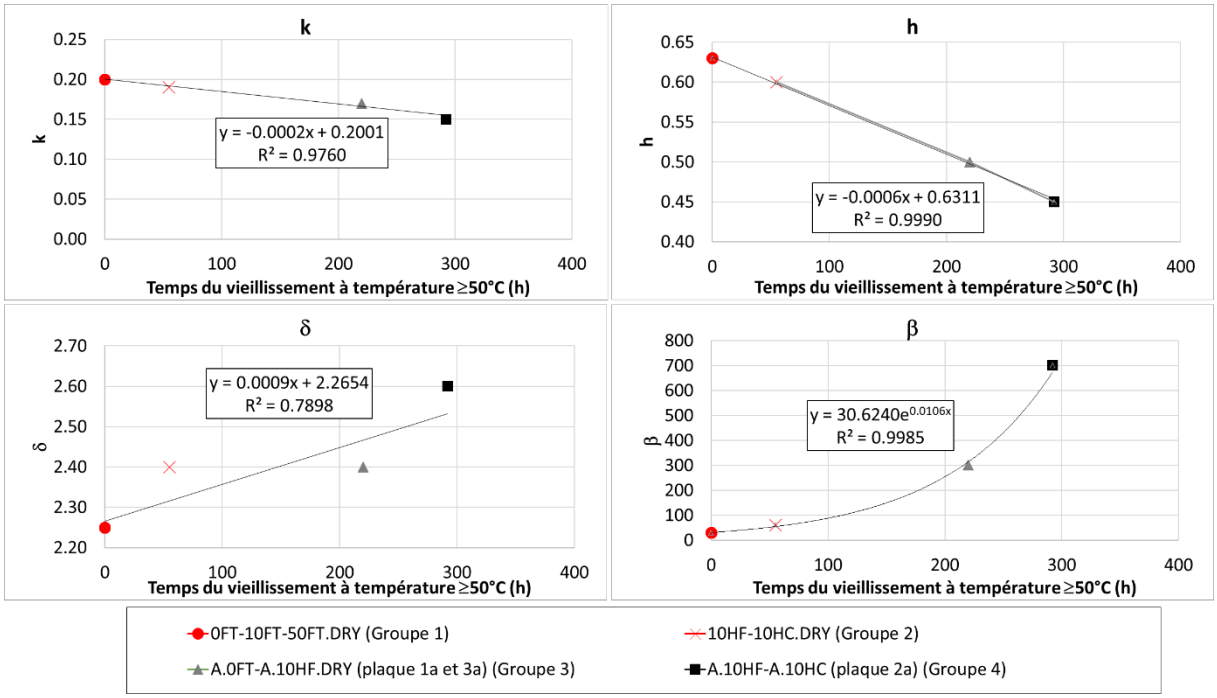


Figure 5-19. Evolution de k, h, δ et β en fonction du temps de vieillissement à température supérieure ou égale à 50°C (en supposant que : (1) l'effet des cycles HF et HC sur les éprouvettes vieillies est négligeable ; (2) les éprouvettes du groupe 4 ont subi 72h à 85°C en plus par rapport à celles du groupe 3)

On constate que les trois constantes k, h et δ évoluent linéairement en fonction du temps de vieillissement considéré tandis que la constante β évolue en fonction exponentielle de celui-ci. Dans toutes ces relations, le coefficient R^2 (toujours supérieur à 0,78 ou presque égal à 1) confirme une forte corrélation entre k, h, δ et β) et le temps de vieillissement.

5.3. Eprouvette testée en condition partiellement saturée (40%)

L'effet de l'eau sur le comportement de l'enrobé bitumineux a été beaucoup étudié dans la littérature (Tran, et al., 2018). L'eau favorise la perte de l'adhésion entre le bitume et les granulats. Les résultats obtenus lors de cette étude sur les matériaux testés à sec montrent que le conditionnement a un effet négligeable sur les propriétés viscoélastiques linéaires (E* et ν*) (cf. paragraphes précédents). Si l'éprouvette est testée à l'état saturé (en fait partiellement saturé mais pour simplifier l'écriture nous

utiliserons « saturée » dans la suite), l'effet de l'eau est visible, comme présenté dans la partie suivante.

Deux essais E* ont été réalisés sur la même éprouvette SG5C3(7.4). Lors du premier essai E*, l'éprouvette était à l'état sec (après plus 6 mois de stockage dans le bureau à température ambiante). Durant le deuxième essai E*, cette éprouvette était partiellement saturée avec un degré de saturation (DS) de l'ordre de 40%. Cette valeur de 40% a été choisie suite aux observations de la campagne X. En effet, sans mise sous vide de l'éprouvette, cette valeur de saturation reste relativement constante ce qui assure un maintien du degré de saturation tout au long de l'essai E*. Pour obtenir DS=40%, la procédure de saturation sous vide a tout d'abord été réalisée. Ensuite l'éprouvette a été séchée jusqu'au degré de saturation de 40%. Des mesures de masse avant et après essai ont permis de confirmer que la masse restait constante donc que le degré de saturation n'avait pas ou très peu varié lors de l'essai.

5.3.1. Résultats expérimentaux

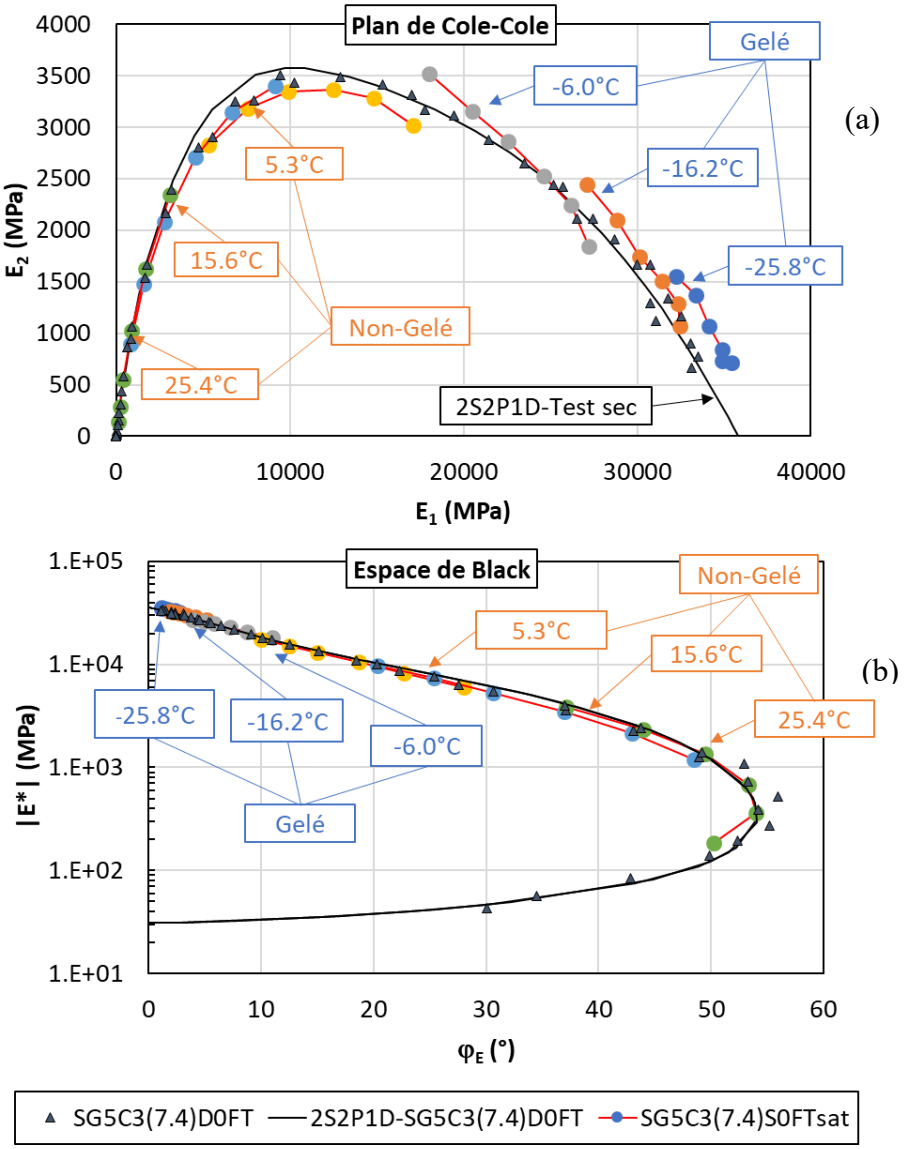


Figure 5-20. Module complexe dans le plan Cole-Cole et l'espace de Black – essais sur éprouvette SG5C3(7.4)

La Figure 5-20 présente les résultats expérimentaux des deux essais dans le plan Cole-Cole, et dans l'espace de Black. On constate que le principe d'équivalence temps température n'est pas parfaitement respecté pour l'éprouvette saturée aux températures négatives (car les points expérimentaux ne décrivent pas une courbe unique). Il est cependant valable quand l'éprouvette est testée à l'état sec.

5.3.2. Construction des courbes maitresses et modélisation des résultats expérimentaux à l'aide du modèle 2S2P1D

Pour construire des courbes maîtresses de la norme et de l'angle de phase de E*, on utilise des coefficients de translation différents : les $a_{T.E}$ pour la norme et les $a_{T.\varphi E}$ pour l'angle de phase (Figure 5-21 à Figure 5-23). Cette propriété observée pour les bitumes polymères par l'équipe de l'Université de Lyon/ENTPE (Olard, 2003) a été nommée Principe Partiel de Superposition Temps-température (PPST). La Figure 5-21 présente les valeurs des a_T et la loi WLF calibrée avec les résultats de l'éprouvette testée à l'état sec.

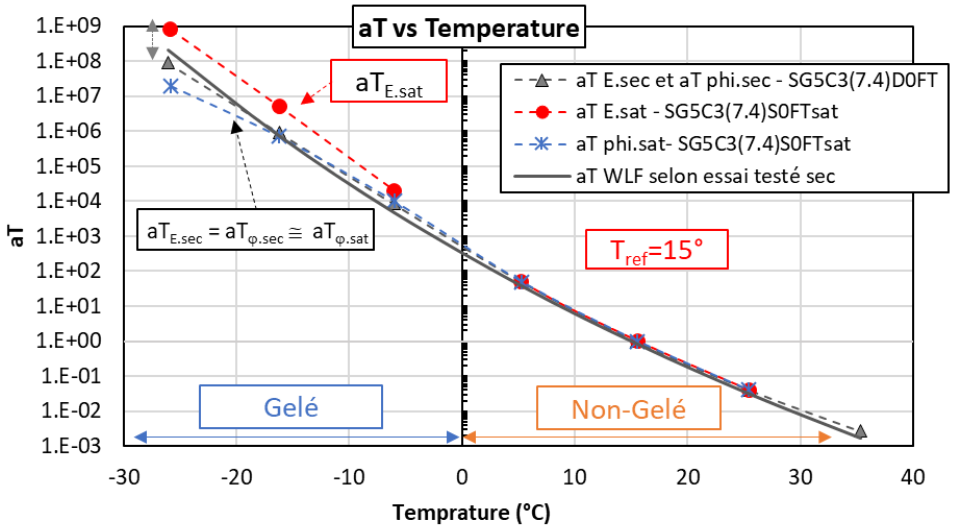


Figure 5-21. Comparaison des coefficients de translation aT vs Température

Aux températures négatives, les $a_{T.E}$ de l'éprouvette testée saturée sont de l'ordre de 10 fois plus élevés que ceux de l'éprouvette testée à sec. Les mêmes valeurs de $a_{T.E}$ sont obtenues pour les température positives., Les valeurs de $a_{T.\varphi E}$ sont quasiment identique pour toutes les gammes de température. La différence peut être expliquée par la formation de glace dans les vides aux températures négatives. Cette glace se comporte très probablement comme du granulat complémentaire qui rigidifie le matériau mais ne modifie pas les propriétés viscoélastiques du liant.

Les Figure 5-22 et Figure 5-23 montrent les courbes maîtresses de la norme et de l'angle de phase du module complexe. Les courbes maîtresses des deux essais sont quasiment superposées en utilisant les coefficients de translation $a_{T.E}$ et $a_{T.\varphi E}$ pour l'essai sur l'éprouvette saturée.

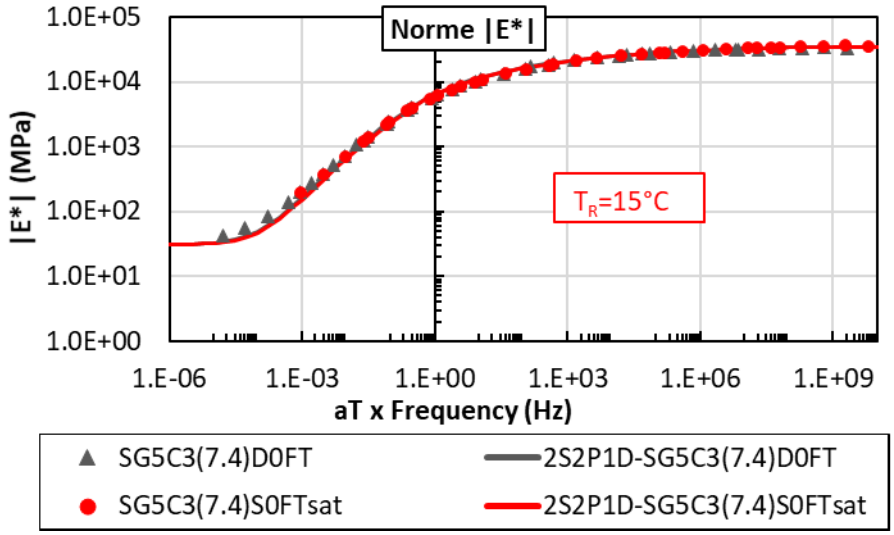


Figure 5-22. Courbes maîtresses de la norme du module complexe avec les coefficients de translation $aT._E$

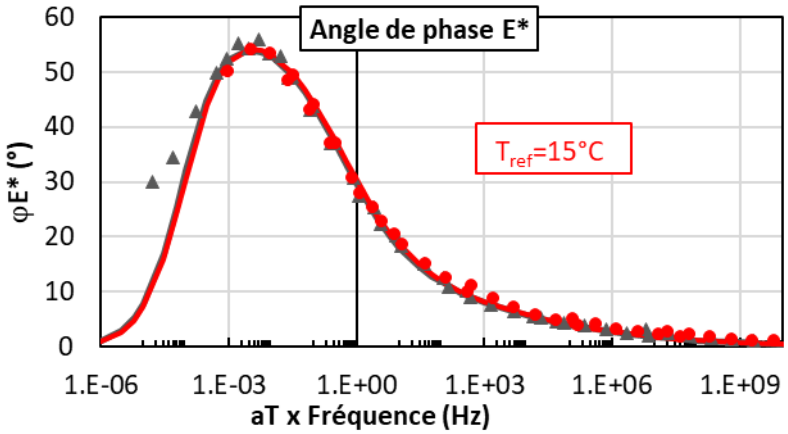


Figure 5-23. Courbes maîtresses de l'angle de phase du module complexe en utilisant les coefficients de translation $aT._{\varphi E}$ pour l'éprouvette testée saturée

Les courbes maîtresses du coefficient de Poisson complexe sont présentées dans la Figure 5-24. Elles ont été tracées en utilisant les mêmes a_T que ceux obtenus pour E*. Les résultats montrent qu'il n'y a pas de différence significative entre les deux essais pour l'angle de phase lorsque les valeurs de a_T obtenues pour E* ($a_{T.E}$) sont utilisées. Ce résultat peut également être étendu à la norme, compte tenu des fluctuations inévitables en raison de la très grande précision requise pour mesurer ce paramètre.

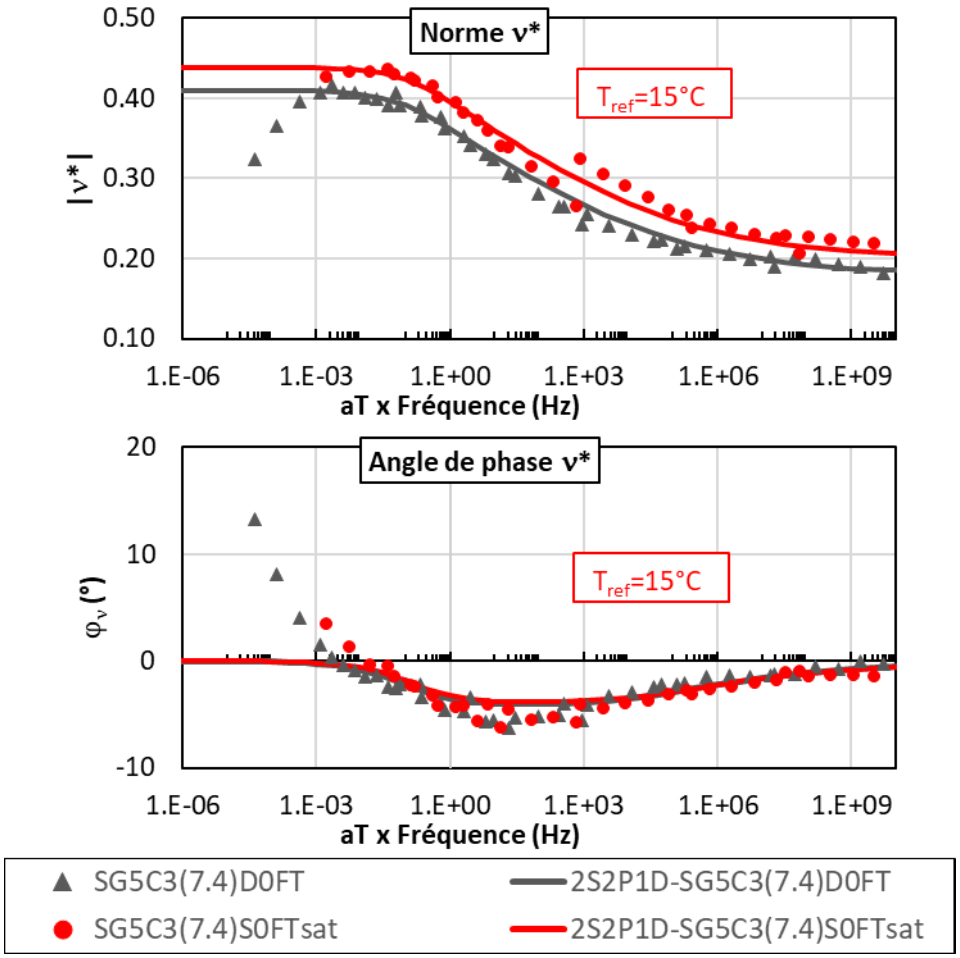


Figure 5-24. Courbes maîtresses de la norme de l'angle de phase du coefficient Poisson complexe en utilisant les mêmes coefficients de translation aT que pour de E* (T_{ref}=15°C)

5.3.3. Effet de l'eau

Une comparaison quantitative entre les résultats du module complexe à l'état sec et ceux à l'état saturé a été réalisée. Les résultats de l'essai E* à l'état sec sont utilisés comme valeurs de référence.

Aux températures négatives (qui correspondent aux températures de consigne -5°C, -15°C, -25°C), la norme du module complexe de l'éprouvette saturée est supérieure à celle de l'éprouvette sèche (environ 5%, Figure 5-25.a), les angles de phase restent assez proches pour les 2 essais.

Aux températures positives (qui correspondent aux températures de consigne 5°C, 15°C, 25°C et 35°C), les angles de phase ne varient pas significativement (Figure 5-25.b). Les valeurs du module complexe sont plus faibles (de l'ordre de 4% Figure 5-25.a).

En générale, la formation de glace dans les vides aux températures négatives rigidifie le matériau. Cette glace se comporte comme du granulat complémentaire et diminue temporairement la teneur en vides de l'éprouvette. Le module complexe de l'essai sur éprouvette saturée augmente donc aux températures négatives.

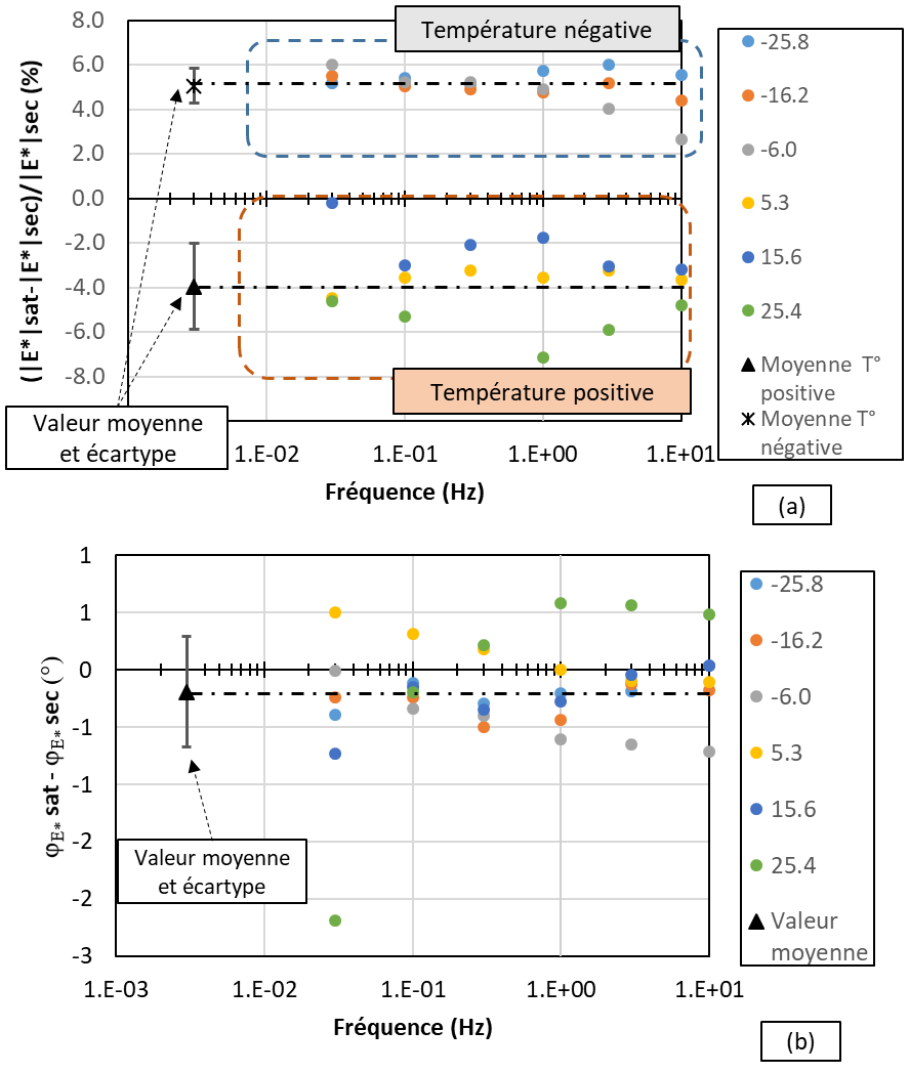


Figure 5-25. Différence relative entre la norme de E* (a) et différence de l'angle de phase de E* entre les essais réalisés à l'état sec et à l'état saturé (éprouvette SG5C3(7.4))

Chapitre VI

RÉSULTATS ET ANALYSES DES ESSAIS DE FATIGUE

6. Résultat et analyse des essais de fatigue

L'essai de fatigue est réalisé sur une éprouvette cylindrique (75mm de diamètre et 140mm de hauteur). La température et la fréquence de sollicitation sont fixées au cours de l'essai : T=10°C et =10Hz. L'éprouvette est soumise à une sollicitation sinusoïdale en déformation centrée à zéro. L'amplitude de déformation axiale est constante au cours de l'essai. Pour un matériau donné, les essais ont été réalisés à 4 différents niveaux d'amplitude : 80 ,90 ,100 et 120µm/m.

6.1.Eprouvettes et conditionnement

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

Tableau 6-1. Eprouvettes non-vieillies utilisées pour l'essai E*

Type de conditionnement	Eprouvettes	Saturation (DS %)	Cycles de conditionnement	Séchage sous vide	TEV en début d'essai (%)	Degré de saturation en début d'essai (%)	Amplitude de sollicitation (µm/m)
0FT.DRY	SG3B1(5.7)	Non	0	Non	5,7	0	80
	SG1A8(5.2)	Non		Non	5,2	0	80
	SG1A2(6.1)	Non		Non	6,1	0	90
	SG6B7(5.9)	Non		Non	5,9	0	100
	SG4B6(7.4)	Non		Non	7,4	0	100
	SG3B12(5.9)	Non		Non	5,9	0	100
	SG3B4(5.7)	Non		Non	5,7	0	120
0FT.SAT	SG4B11(8.0)	Oui (70,0%)	0	Non	8,0	70,0	80
	SG1A5(5.0)	Oui (72,5%)		Non	4,6	72,5	80
	SG5C5(7.9)	Oui (72,0%)		Non	7,5	72,0	100
	SG5C8(8.0)	Oui (81,2%)		Non	7,9	81,2	120
50FT.DRY	SG4B7(7.8)	Oui (73,4%)	50FT	Oui	8,5	0	80
	SG4B5(7.7)	Oui (74,6%)		Oui	9,1	0	90
	SG5C4(7.6)	Oui (77,5%)		Oui	8,8	0	100
	SG6B1(7.5)	Oui (78,4%)		Oui	8,4	0	120

6.2. Résultats expérimentaux avec les critères différents

La Figure 6-1 présente les résultats de trois essais de fatigue des éprouvettes 0FT.SAT aux amplitudes de déformation différentes 80, 100 et 120µm/m. Il est évident que la durée de l'éprouvette augmente lors de la diminution de l'amplitude de sollicitation. Malgré la teneur en vides des éprouvettes est similaire, la norme du module complexe aux 200 premières cycles (dans la phase d'adaptation) de ces éprouvettes n'est pas approchée. Cela vient du fait que le comportement non-linéaire des éprouvettes testées est dominant dans cette phase due à l'application des grandes amplitudes de sollicitation (≥ 50µm/m).

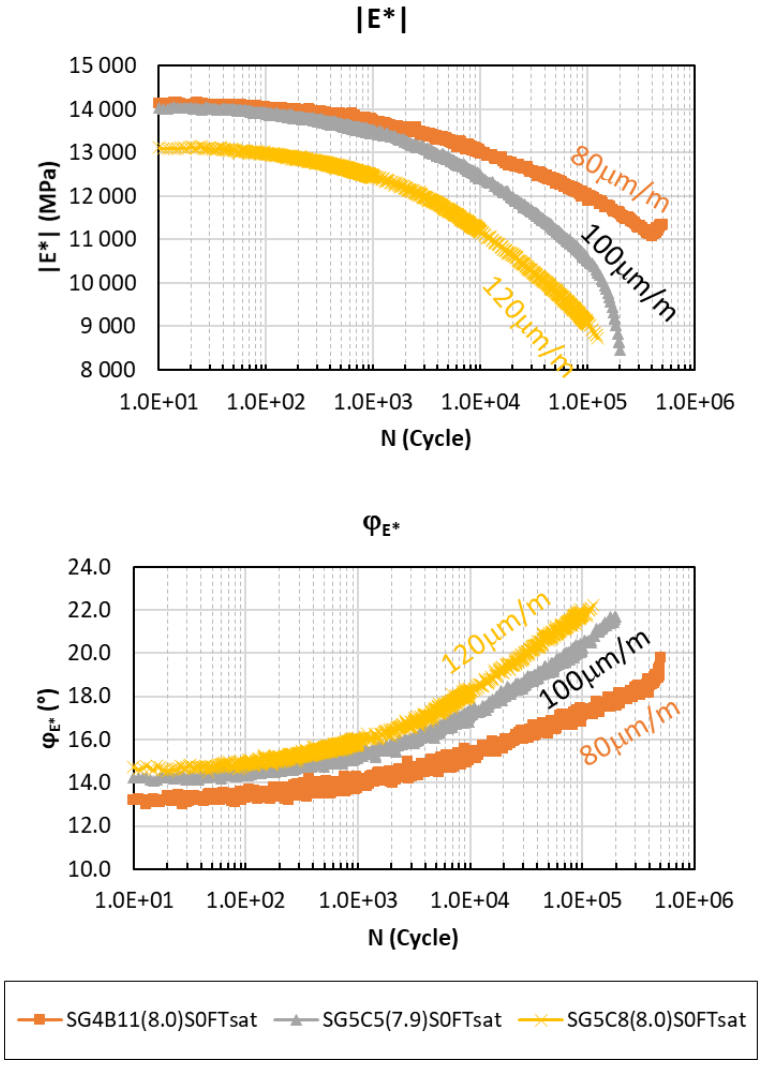


Figure 6-1. Résultats de trois essais de fatigue des éprouvettes 0FT.SAT aux amplitudes de déformation différentes (avec l'abscisses à l'échelle logarithmique)

Pour une meilleure représentation « *sans tenir compte de l'effet de non-linéarité* », l'évolution de |E*| en cours essai peut être exprimée en termes de sa valeur normalisée qui est calculée comme le rapport entre |E *| et la valeur $|E^*_0|$. $|E^*_0|$ est défini comme l'ordonnée à l'origine de la régression linéaire effectuée pour les cycles 50 à 200 de la relation entre |E*| vs N, N étant le nombre de cycles.

La Figure 6-2 présente l'évolution des valeurs $|E^*|/|E^*_0|$ selon le nombre de cycles de sollicitation N.

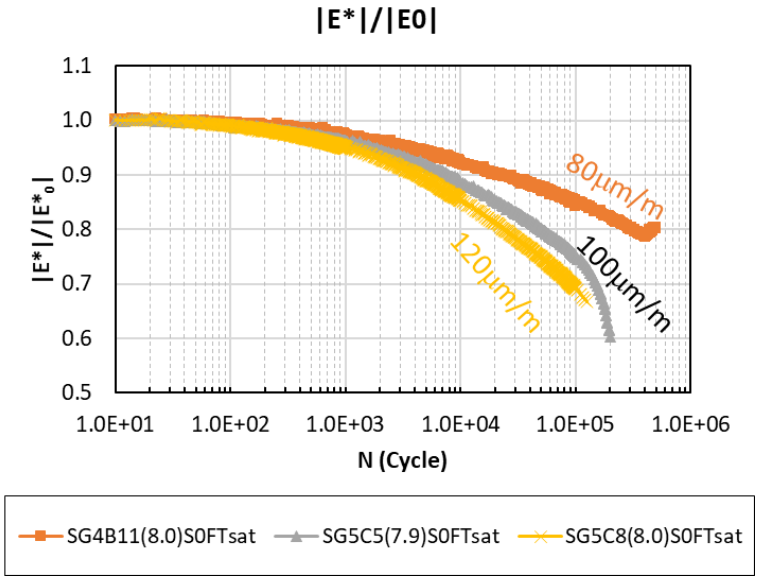


Figure 6-2. L'évolution des courbes $|E^*|/|E^*_0|$ vs N (avec l'abscisses à l'échelle logarithmique)

Dans la littérature ((Ashayer Soltani, 1998) (Baaj, 2002) (Nguyen, 2011) (Nguyen, et al., 2014) (Mangiafico, 2014) (Mangiafico, et al., 2017) (Babadopulos, 2017) (Babadopulos, et al., 2019)), l'effet de non-linéarité a beaucoup été étudié et il est hors du cadre du projet. L'étude de cette recherche est concentrée sur la durée de vie de du matériau testé suivant des conditionnements différents 0FT.DRY, 0FT.SAT et 50FT.DRY.

La durée de vie (ou la fatigue) des enrobés bitumineux est déterminée, non seulement par la rupture physique des éprouvettes, mais aussi par les critères de fatigue basés sur les valeurs mesurées au cours de l'essai tels que définis à la section 1.3.3.3.

5 critères de fatigue sont utilisés dont 3 critères basés sur les mesures globales : $N_{f\text{-}50\%}$, $N_{f\text{-}Co}$, $N_{f\text{-}\varphi max}$. Les deux autres critères $N_{f\text{-}\Delta\varepsilon i}$ et $N_{f\text{-}\Delta\varphi i}$ sont basés sur les mesures locales. Les descriptions des critères sont résumés dans le Tableau 6-2.

Tableau 6-2. Critères de fatigue appliquées

Nature de critère	Critères de fatigue	Symbol	Figure utilisée
Basé sur les mesures globales	Critère classique	$N_{f\text{-}50\%}$	$\frac{\lvert E^*\rvert}{\lvert E^*_0\rvert} vs\ N$
	Changement de concavité de la courbe de fatigue	$N_{f\text{-}Co}$	$\lvert E^*\rvert\ vs\ N$
	Critère basé sur l'angle de phase maximal	$N_{f\text{-}\varphi max}$	$\varphi E^*\ vs\ N$
Basé sur les mesures locales	Critère basé sur les écarts relatifs des amplitudes de 3 extensomètres	$N_{f\text{-}\Delta\varepsilon i}$	$\Delta\varepsilon_i\ vs\ N$
	Critère basé sur les écarts d'angles de phase de 3 extensomètres par rapport à celle de la déformation moyenne	$N_{f\text{-}\Delta\varphi i}$	$\Delta\varphi_i\ vs\ N$

Les Figure 6-3 et Figure 6-4 montrent un exemple des critères de fatigue utilisés pour l'essai réalisé à 80µm/m sur l'éprouvette SG1A5(5.0)S0FTsat. Les autres résultats des essais de fatigue sont présentés dans l'annexe.

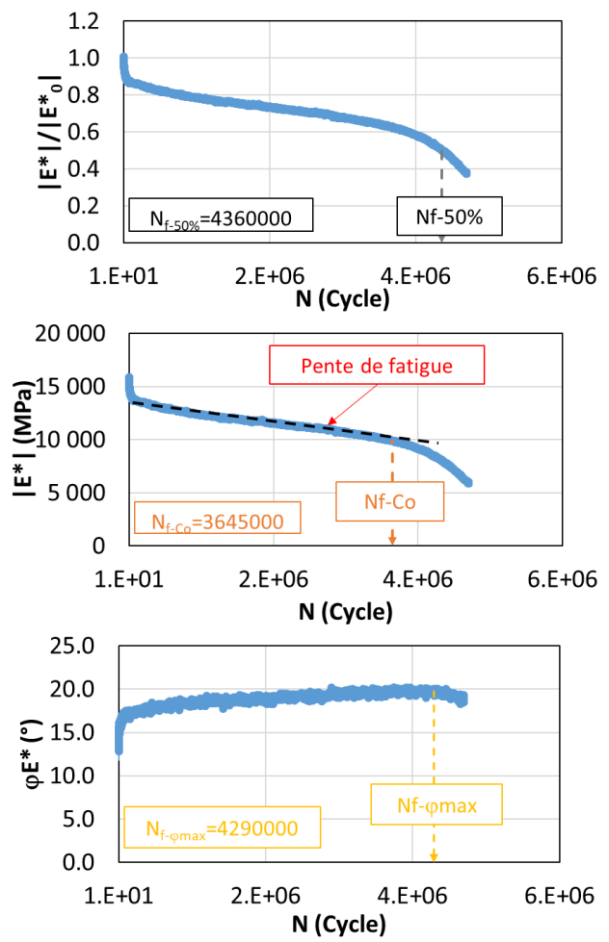


Figure 6-3. Critères de fatigue basés sur les mesures globales (SG1A5(5.0)S0FTsat -80µm/m)

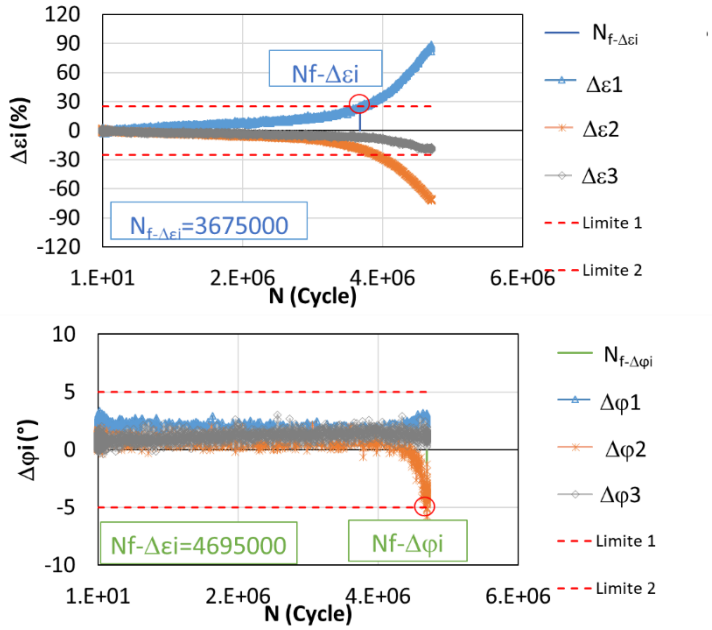


Figure 6-4. Critères de fatigue basés sur les mesures locales (SG1A5(5.0)S0FTsat -80µm/m)

Les 5 critères de base utilisés ci-dessous donnent les 5 valeurs différentes de durée de vie de l'éprouvette testée. Un critère moyen est proposé, il est déterminé par l'équation Eq. 6-1:

$$N_{f-moy} = \frac{1}{5} \times \left(N_{f-50\%} + N_{f-Co} + N_{f-\varphi max} + N_{f-\Delta\varepsilon i} + N_{f-\Delta\varphi i}\right) \qquad \text{Eq. 6-1}$$

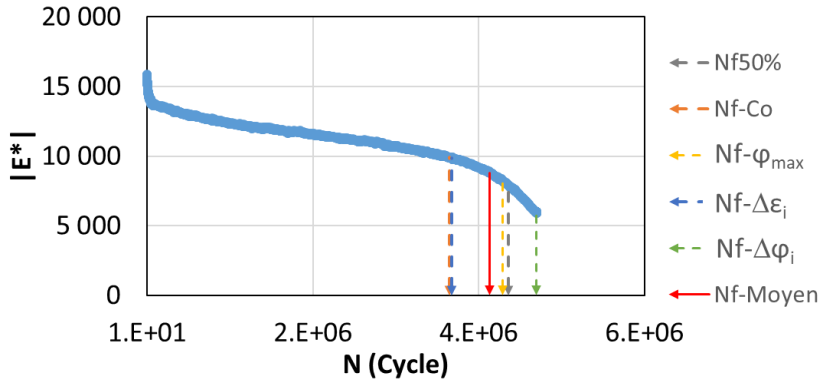


Figure 6-5. Tous les critères de fatigue utilisés (SG1A5(5.0)S0FTsat -80µm/m)

La Figure 6-5 regroupe tous les critères de fatigue utilisés pour l'essai SG1A5(5.0)S0FTsat.

Le Tableau 6-3 présente l'ensemble des résultats des essais fatigue, la durée de vie des éprouvettes testées selon les différents critères.

Tableau 6-3. Résultats des essais de fatigue

Type de conditionnement	Eprouvette	Amplitude (µm/m)	Critères de base					$N_{f\text{-}moy}$	Ecart type relatif (%)
			$N_{f\text{-}50\%}$	$N_{f\text{-}Co}$	$N_{f\text{-}\varphi max}$	$N_{f\text{-}\Delta\varepsilon i}$	$N_{f\text{-}\Delta\varphi i}$		
0FT.DRY	SG3B1	80	1124999	884999	1150000	939999	1170000	1053999	12,5
	SG1A8	80	2085000	1700000	2180974	1195000	2180974	1868390	22,7
	SG1A2	90	215000	205000	215000	215000	215000	213000	2,1
	SG6B7	100	213649	210000	213649	213649	213649	212919	0,8
	SG4B6	100	440000	320000	400000	440000	420000	404000	12,3
	SG3B12	100	175000	100000	240000	105000	230000	152000	39,1
	SG3B4	120	159608	135000	159608	159608	159608	154686	7,1
0FT.SAT	SG4B11	80	513550	375000	490000	505000	513604	479431	12,3
	SG1A5	80	4360000	3645000	4290000	3675000	4695000	4133000	11,1
	SG5C5	100	210000	174999	199999	210000	210000	201000	7,5
	SG5C8	120	154686	154686	154686	154686	154686	154686	0
50FT.DRY	SG4B7	80	1595000	1450000	1500000	1550000	1605000	1540000	4,2
	SG4B5	90	890000	500000	630000	1000000	1000000	804000	28,3
	SG5C4	100	150000	135000	125000	145000	150000	141000	7,7
	SG6B1	120	85500	50000	75000	46500	90500	69500	29,1

En générale, le critère $N_{f\text{-}Co}$ déterminé à la fin de la phase II de fatigue arrive au premier lieu et il est semblable au critère $N_{f\text{-}\Delta\varepsilon i}$ tandis que les critères $N_{f\text{-}\varphi max}$, $N_{f\text{-}50\%}$ et $N_{f\text{-}\Delta\varphi i}$ sont atteints durant la troisième phase de fatigue ou à la fin de l'essai. Par conséquence, le critère moyen donne la valeur intermédiaire. Les variations de la durée de vie selon les critères choisis sont faibles. L'écart type relatif de chaque essai est inférieure à 30% sauf l'essai sur l'éprouvette SG3B12.

La Figure 6-6 présente la corrélation des critères $N_{f\text{-}50\%}$, $N_{f\text{-}Co}$, $N_{f\text{-}\varphi max}$, $N_{f\text{-}\Delta\varepsilon i}$, $N_{f\text{-}\Delta\varphi i}$ avec le critère $N_{f\text{-}moy}$. Les nombres de cycles de fatigue données par ces critères sont bien en cohérence, l'une avec l'autre. La durée de vie obtenue par le critère moyen est donc choisi pour la suite de l'analyse.

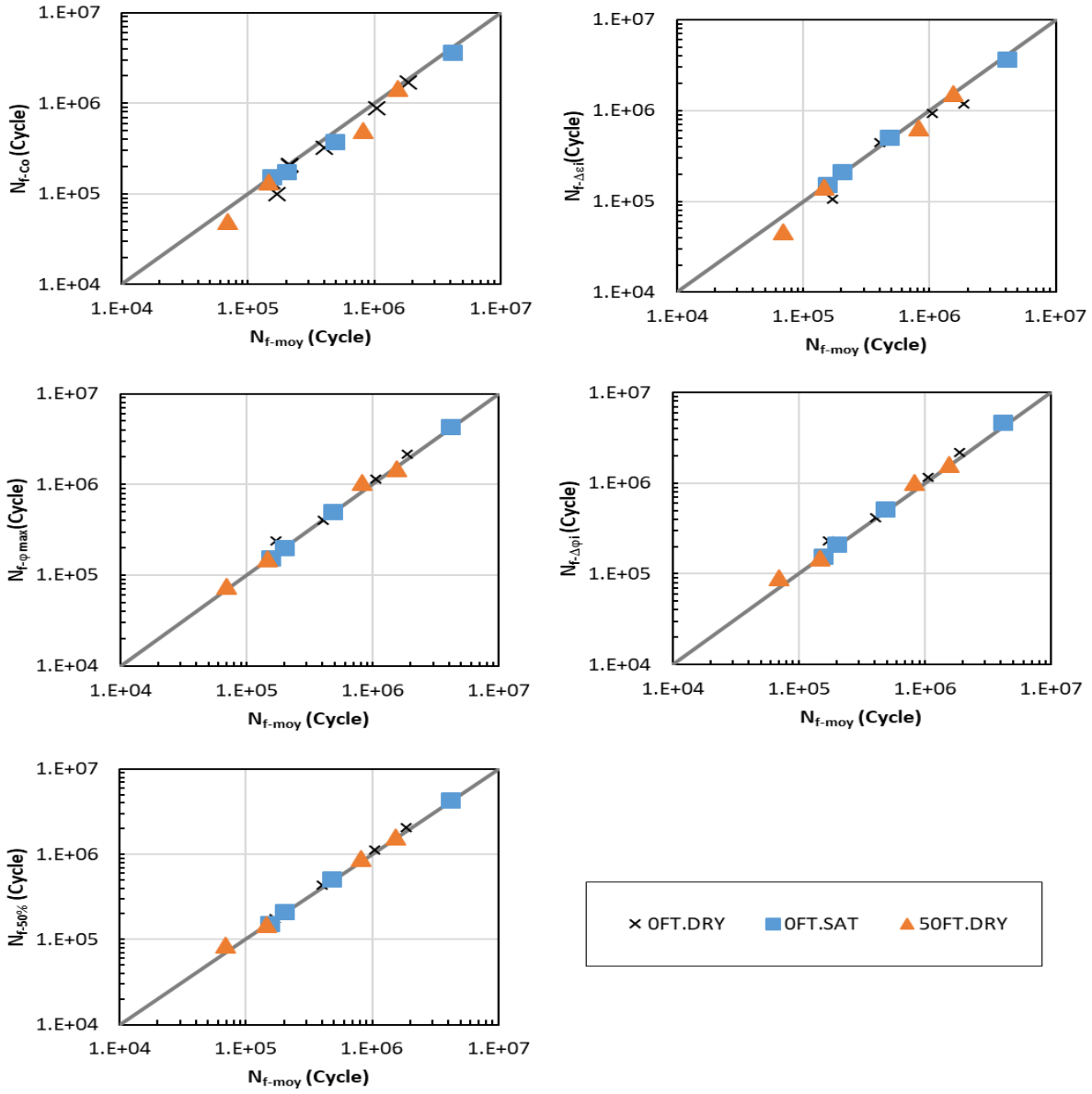


Figure 6-6. Corrélation des critères $N_{f\text{-}50\%}$, $N_{f\text{-}Co}$, $N_{f\text{-}\varphi max}$, $N_{f\text{-}\Delta\varepsilon i}$, $N_{f\text{-}\Delta\varphi i}$ avec le critère $N_{f\text{-}Moyen}$

6.3.Courbes de Wöhler

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

$$\varepsilon = A.N^b \qquad \text{Eq. 6-2}$$

Le constante A et la pente b sont déterminés par une régression linéaire sur les résultats expérimentaux en logarithmes.

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

Les valeurs des constantes A, b et ε_6 sont données dans le Tableau 6-4.

Tableau 6-4. Valeurs des constantes A, b et ε_6

Type de conditionnement	Constantes	Critères de base					Critère moyen
		$N_{f\text{-}50\%}$	$N_{f\text{-}Co}$	$N_{f\text{-}\varphi max}$	$N_{f\text{-}\Delta\varepsilon i}$	$N_{f\text{-}\Delta\varphi i}$	
0FT.DRY	A	426,0	404,1	453,9	444,6	446,6	453,5
	b	-0,117	-0,115	-0,121	-0,122	-0,120	-0,119
	ε_6	84,9	83,0	85,0	82,7	85,1	84,2
0FT.SAT	A	357,0	332,1	353,5	389,2	344,2	355,1
	b	-0,102	-0,097	-0,101	-0,109	-0,099	-0,102
	ε_6	87,6	86,4	87,4	86,7	87,9	87,2
50FT.DRY	A	432,0	405,1	402,6	379,0	421,4	414,1
	b	-0,117	-0,115	-0,118	-0,101	-0,115	-0,114
	ε_6	85,7	82,7	83,9	85,9	86,4	85,0

La Figure 6-7 présente les différentes valeurs de A, b et ε_6 selon les critères de fatigue utilisés.

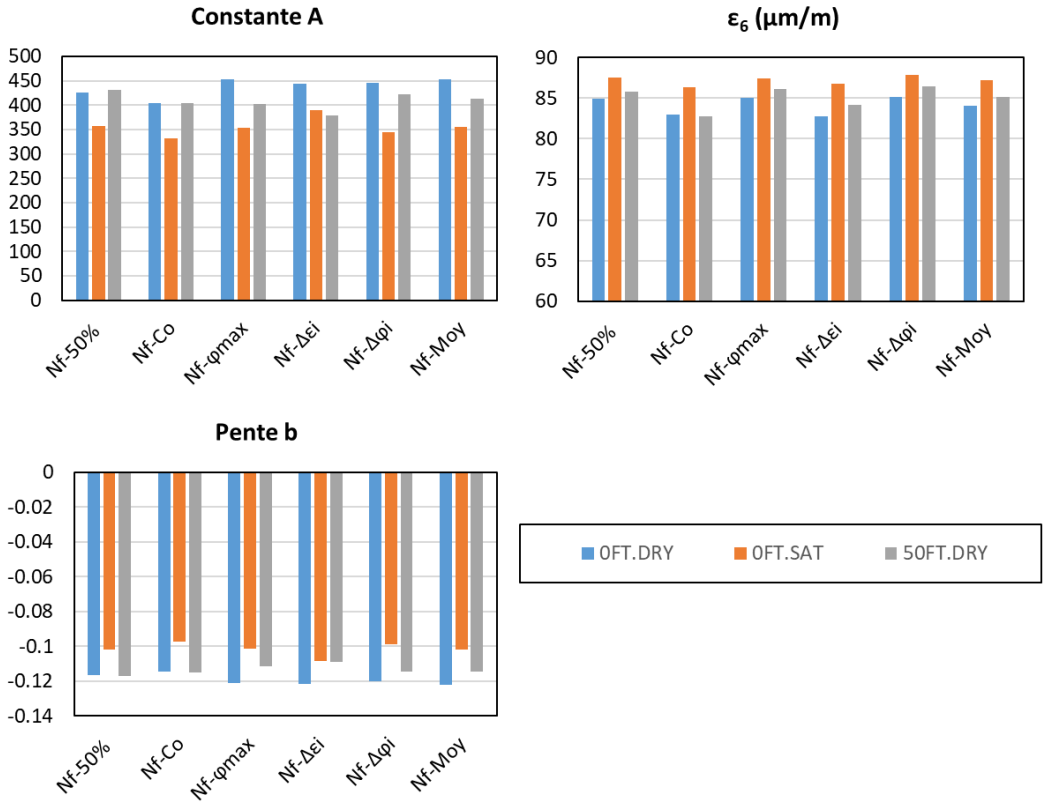


Figure 6-7. Les valeurs d'A, b et ε6 selon les critères de fatigue différents

Les résultats montrent que :

- Les critères de fatigue utilisés donnent des valeurs très proches de A, b et ε_6 pour chaque type de conditionnement,
- Entre deux types de conditionnement 0FT.DRY et 50FT.DRY, les valeurs de A, b et ε_6 ne varient pas nettement. L'effet des cycles FT n'est pas significatif.
- Les valeurs b et ε_6 des éprouvettes 0FT.SAT sont plus grandes que celles des éprouvettes 0FT.DRY et 50FT.DRY. Il semble que la durée de vie de l'éprouvette testée partiellement

saturée augment due à l'effet de l'eau. Cette observation est contradictoire avec les résultats obtenus par (Joaquim de Almeida, et al., 2017).

La Figure 6-8 présente les 3 courbes de Wöhler en utilisant les valeurs N déterminées par le critère $N_{f\text{-}moy}$. Les 3 droites de Wöhler obtenues sont très proches. On peut conclure que les conditionnements utilisés n'ont pas d'effet significatif sur la durée de vie en fatigue du matériau testé.

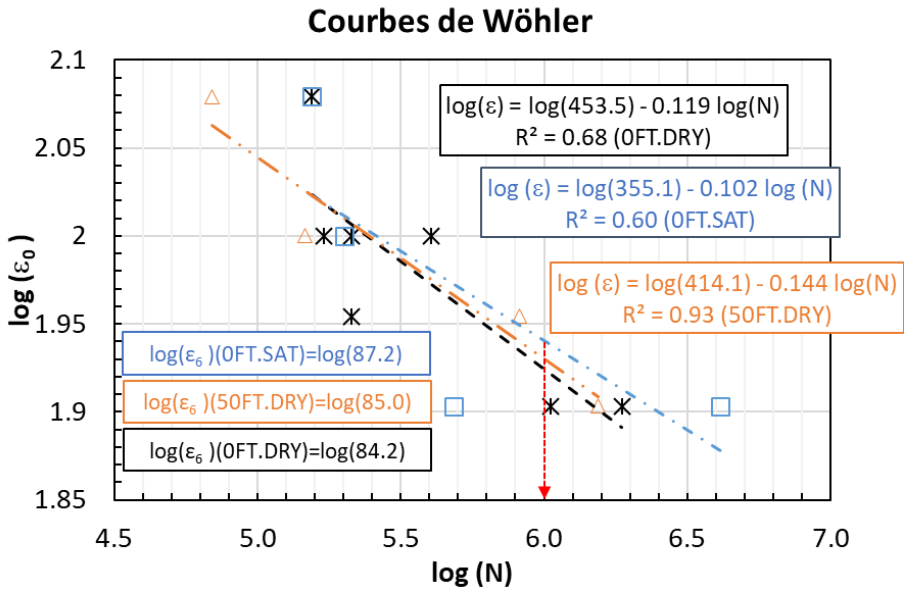


Figure 6-8. Courbes de Wöhler des éprouvettes 0FT.DRY, 0FT.SAT et 50FT.DRY du matériau non-vieilli

Selon les résultats, il n'y a pas de différence significative entre 0FT.DRY, 0FT.SAT et 50FT.DRY. Les performances en fatigue du matériau testé ne sont pas significativement affectées par la saturation et le conditionnement des cycles FT. Cependant, ces conclusions sont basées sur un nombre limité de tests. L'impact du rapport des vides n'est pas pris en compte. Pour mieux comprendre les effets des cycles de saturation et de FT, des recherches supplémentaires sur différents matériaux sont nécessaires.

6.4. Loi d'évolution de l'endommagement

Cette partie contribue à déterminer les paramètres d'une loi d'évolution de l'endommagement à la fatigue. Les effets des cycles de gel/dégel et de l'eau seront analysés à l'aide de ces paramètres de la loi utilisée.

6.4.1. Variable de l'endommagement du matériau bitumineux à la fatigue

L'endommagement dans les solides, en générale, correspond à la création et au développement à l'échelle microscopique de microfissures, qui sont discontinues, dans un milieu considéré continu à l'échelle plus élevée (Lemaitre, 1992).

Pour les matériaux bitumineux, l'endommagement se manifeste par plusieurs mécanismes : la décohésion des joints des grains, la création des microfissures, la propagation des défauts ainsi créés et la coalescence de tous les micro vides résultants. Tous ces dommages contribuent à la diminution de la surface résistant effectivement aux efforts de sollicitation.

Pour caractériser l'endommagement, une variable d'endommagement D qui est définie par la relation Eq. 6-3), est souvent introduite dans la littérature.

$$D = 1 - \frac{\tilde{S}}{S} \quad \text{Eq. 6-3}$$

Où

S : Surface initiale du matériau non-endommagé
$\tilde{S}$: Surface effective du matériau endommagé

Cette définition est associée à une direction de l'espace. Dans le cas où la densité de défauts est isotrope, alors, l'endommagement D est identique dans toutes les directions de l'espace et peut être représenté par un scalaire. En particulier dans le cas mono dimensionnel (essais de traction par exemple), si F est la force de traction exercée sur l'éprouvette, on peut introduire la contrainte effective qui est définie par la relation

$$\tilde{\sigma} = \frac{F}{\tilde{S}} = \frac{F}{S \times (1 - D)} = \frac{\sigma}{(1 - D)} \quad \text{Eq. 6-4}$$

où

$\tilde{\sigma} = \sigma$: pour le matériau non-endommagé
$\tilde{\sigma} \to \infty$: pour le matériau endommagé jusqu'à la rupture

En appliquant une hypothèse que la loi de comportement du matériau endommagé est la même que celle du matériau non endommagé, la contrainte usuelle étant remplacée par la contrainte effective. Dans le cas d'une loi de comportement élastique $\sigma = E\varepsilon$, cette loi devient $\tilde{\sigma} = \tilde{E}\varepsilon$, ce qui permet de définir le module du matériau endommagé par $\tilde{E} = E(1 - D)$

Dans le cas de l'essai de fatigue sous sollicitations sinusoïdales en déformation, la variable d'endommagement D caractérise la perte relative de norme du module complexe, mesuré à la fréquence et à la température de l'essai de fatigue, entre l'état initial et l'état du matériau au cycle N (Di Benedetto & Corté, 2005):

$$D(N) = 1 - \frac{|E_N^*|}{|E_0^*|} \quad \text{Eq. 6-5}$$

où

$|E_N^*|$: la norme du module complexe au cycle N
$|E_0^*|$: la norme du module complexe à l'état initial (début de l'essai)

La Figure 6-9 présente les courbes d'évolution de l'endommagement des éprouvettes 50FT.DRY testées aux amplitudes : 80, 90,100 et 120µm/m.

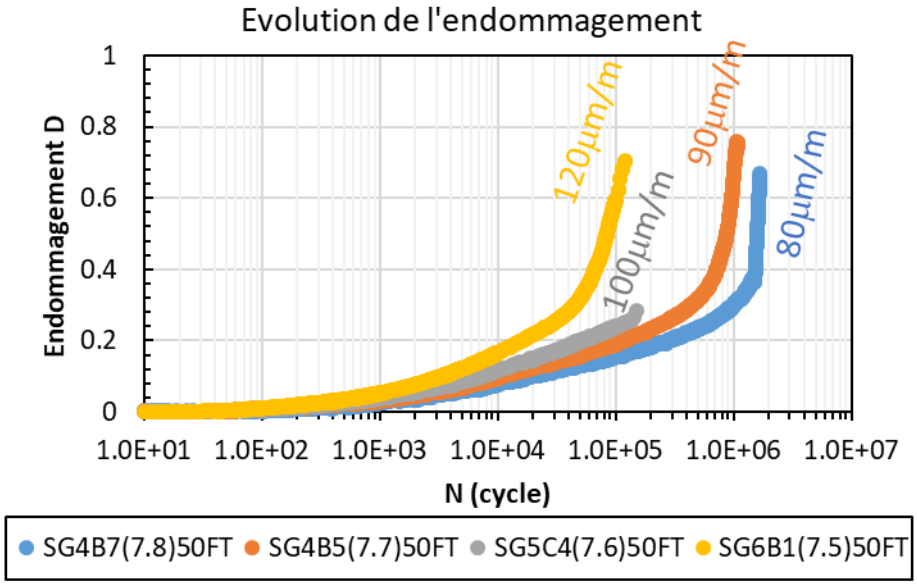


Figure 6-9. Courbes d'évolution de l'endommagement D en fonction du nombre de cycle N (éprouvettes 50FT.DRY)

6.4.2. Loi d'évolution de l'endommagement

6.4.2.1. Introduction de la loi d'évolution de l'endommagement

Comme l'endommagement D est décroisant linéairement par rapport la fraction $\frac{|E_N^*|}{|E_0^*|}$.La courbe d'évolution de l'endommagent peut être décomposée en trois phases qui correspondent à trois phases d'évolution du module complexe :

- Phase I : croissance rapide de D (décroissance rapide du module complexe)
- Phase II : croissance lente et continue de la variable D (décroissance du module complexe)
- Phase III : augmentation brutale de D (chute brutale du module)

La phase III est considérée comme représentative de la propagation d'une macro fissure dans l'échantillon d'endommagement. Durant la phase I coexistent différents phénomènes : dissipation thermique, thixotropie du bitume, non-linéarité et endommagement (cf. chapitre I 1.3.4). Le poids respectif de ces différents phénomènes qui dépend de la sollicitation et de la taille des éprouvettes, diffère selon (Di Benedetto & Corté, 2005).

La description s'accompagne d'une loi de dommage qui précise la variation de D entre deux cycles successifs (ΔD). Elle est prise sous la forme :

$$\Delta D = f(D)\, g(\text{sollicitation au cycle N}) \text{ pour } 0 \leq D \leq 1 \qquad \text{Eq. 6-6}$$

où f est une fonction de D qui peut également dépendre de la température et fréquence de sollicitation ; et g une fonction de la sollicitation appliquée durant le cycle N. Cette fonction g est en général choisie comme dépendante de l'amplitude de contrainte ou de déformation au cycle N. (Di Benedetto & Corté, 2005)

On considère une formulation proposée par (Bodin, 2002). Ce modèle permet d'exprimer l'endommagement D en fonction du cycle N lors d'essais à amplitude de déformation constante (ε_0) par la fonction Eq. 6-7.

$$D = 1 - \frac{|E_N^*|}{|E_0^*|} = \alpha\left(N\varepsilon_0^{\theta}\right)^{\gamma} \qquad \text{Eq. 6-7}$$

où

α, θ, γ : constantes, identifiés expérimentalement
ε_0 : amplitude de sollicitation
N : nombre de cycles de chargement

6.4.2.2. Détermination des constantes de la loi d'évolution de l'endommagement

Les constantes (α,θ,γ) dans la loi d'évolution de l'endommagement (Eq. 6-7) sont déterminés à partir des données expérimentales.

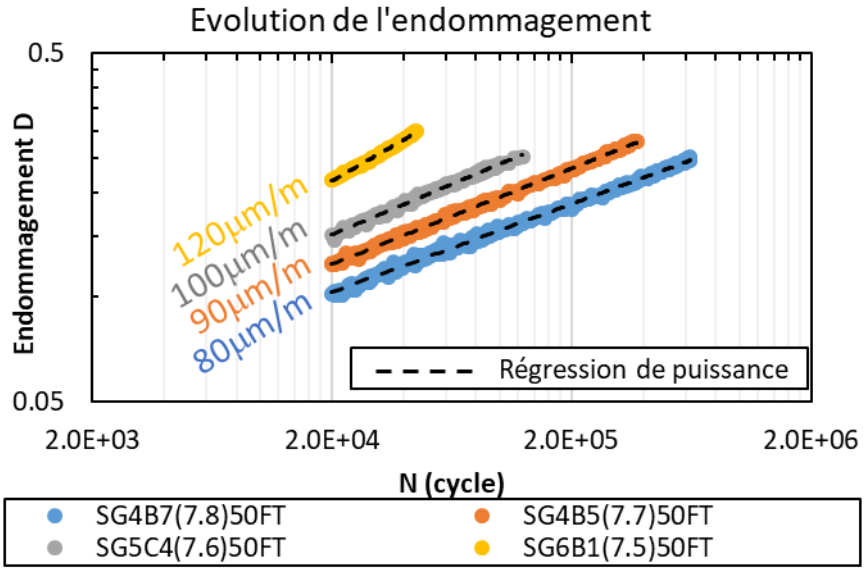


Figure 6-10. Evolution de l'endommagement en fonction du logarithme du nombre de cycles pour le matériau 50FT.DRY, à différentes amplitudes de sollicitation

La Figure 6-10 présente l'évolution de l'endommagement en fonction du logarithme du nombre de cycles pour les 4 amplitudes de déformation considérées pour le matériau 50FT.DRY. Les résultats tracés Figure 6-10 commencent au cycle 20 000 (2000 secondes) car avant ce nombre de cycles les effets biaisants sont prépondérant dans l'évolution de l'endommagement mesuré (Di Benedetto et al. 2011, Nguyen Q.T. et al. 2015). Soulignons que la loi proposée (Eq. 6-7) prend en compte l'ensemble des phénomènes (réversibles et non réversibles) induisant une diminution du dommage mesuré lors de l'essai de fatigue.

La Figure 6-11 explique comment les 3 constantes de l'Eq. 6-7 peuvent être obtenues simplement. La valeur de θ est déterminée en maximisant la valeur de R^2 pour l'ensemble des données à partir de 20 000 cycles.

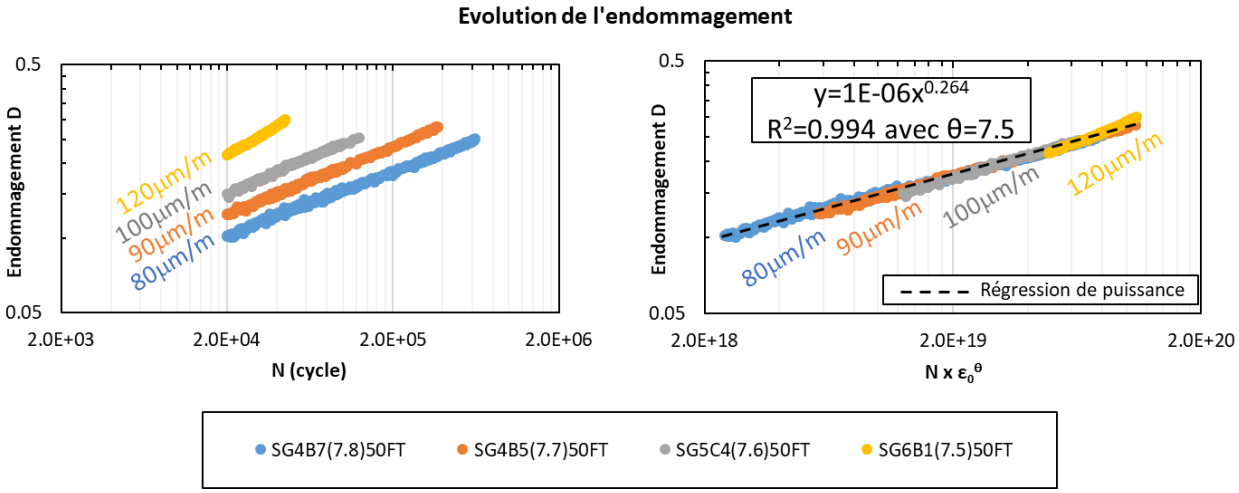


Figure 6-11. Obtention des constantes de l'Eq. 6-7. La valeur de θ obtenue est 7,5 (Eprouvettes 50FT.DRY)

Les valeurs de (α,θ,γ) sont données dans le Tableau 6-5.

Tableau 6-5. Résultats de la calibration de la loi d'évolution de l'endommagement

Type de conditionnement	Eprouvette	Amplitude (µm/m)	Intervalle considéré				Coefficient de corrélation R^2	α (x10-⁶)	θ	γ
			Point de début		Point de fin					
			Cycle **N**	Valeur **D**	Cycle **N**	Valeur **D**				
0FT.DRY	SG3B1	80	20000	0,104	800000	0,277	0,981	3,98	6,6	0,261
	SG1A8	80	20000	0,100	800000	0,272				
	SG1A2	90	20000	0,118	100000	0,178				
	SG6B7	100	20000	0,147	150000	0,268				
	SG4B6(*)	100	---	---	---	---				
	SG3B12	100	20000	0,156	70000	0,233				
	SG3B4	120	20000	0,190	150000	0,364				
0FT.SAT	SG4B11	80	20000	0,094	90000	0,130	0,977	1,69	6,7	0,278
	SG1A5	80	20000	0,098	375000	0,209				
	SG5C5	100	20000	0,145	95000	0,244				
	SG5C8	120	20000	0,185	95000	0,305				
50FT.DRY	SG4B7	80	20000	0,102	625000	0,252	0,994	1,43	7,5	0,262
	SG4B5	90	20000	0,124	375000	0,280				
	SG5C4	100	20000	0,151	125000	0,253				
	SG6B1	120	20000	0,216	45000	0,301				
	(*) l'essai n'est pas pris en compte en raison d'un problème expérimental									

Les résultats montrent que :

- La pente de l'endommagement γ des éprouvettes 0FT.DRY et 50FT.DRY est similaire et légèrement inférieure à celle des éprouvettes 0FT.SAT.
- La valeur de θ des éprouvettes 0FT.DRY et 0FT.SAT est similaire et inférieure à celle des éprouvettes 50FT.DRY.

6.4.2.3. Simulation des courbes de l'endommagement à partir du cycle 20000ème

Des simulations d'évolution de l'endommagement des éprouvettes 0FT.DRY, 0FT.SAT et 50FT.SAT sont présentées. Ces simulations sont réalisées aux amplitudes de 80, 100 et 120 µm/m et à partir du cycle 20000ème jusqu'au cycle 3500000ème.

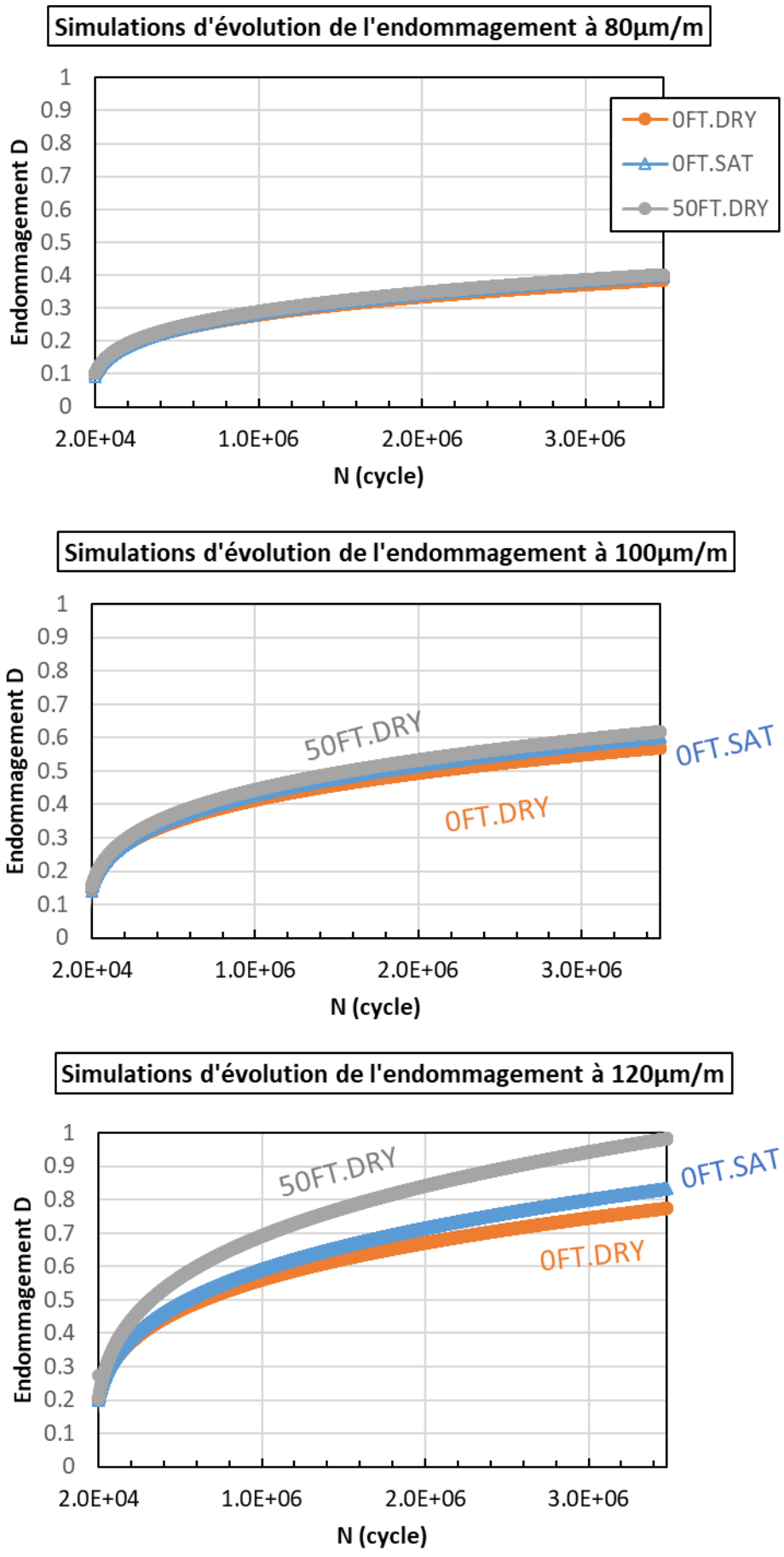


Figure 6-12. Simulations des courbes d'évolution de l'endommagement des éprouvettes 0FT.DRY, 0FT.SAT, 50FT.DRY aux amplitudes de sollicitation de 80, 100 et 120µm/m

La valeur de début de l'endommagement D au cycle 20000ème est déterminée expérimentalement. Ces valeurs sont égales à 0,10, 0,15 et 0,20 qui correspondent respectivement aux sollicitations en déformation de 80, 100 et 120 µm/m

Le résultat montre que

- La variation de l'endommagement D des éprouvettes 0FT.DRY, 0FT.SAT et 50FT.DRY est quasiment identique pour les sollicitations à 80 et 100µm/m.
- Pour la sollicitation à 120µm/m, la différence des 3 courbes de simulation est significative. Les éprouvettes 50FT.DRY sont toujours plus endommagées que les éprouvettes 0FT.SAT qui sont elles-mêmes plus endommagées par rapport aux éprouvettes 0FT.DRY. Cependant, ces écarts sont significatifs à parti du 200000ème cycle.

En se basant sur ces résultats, on peut conclure que les effets de 0FT.SAT et 50FT.DRY sur le comportement à la fatigue sous sollicitions en déformation ne sont que observables quand l'amplitude de déformation est supérieure à 120µm/m, et à partir de 200000 cycles de sollicitation. Cependant ces effets uniquement obtenus à partir des simulations sont faibles et ne peuvent pas être considérés comme significatifs.

Chapitre VII

RÉSULTATS ET ANALYSES DES ESSAIS DE RETRAIT THERMIQUE EMPECHE (TSRST) ET DE RETRAIT THERMIQUE LIBRE (TUST)

7. Résultat et analyse des essais de retrait thermique (TSRST) et de retrait thermique libre (TUST)

7.1. Résultat at analyse des essais TSRST

7.1.1. Eprouvettes et conditionnement

27 essais de retrait thermique empêché (TSRST) ont été réalisés, parmi lesquels il y a 21 essais sur les éprouvettes du matériau non-vieilli et 6 essais sur les éprouvettes du matériau vieilli. Trois essais minimum sont réalisés pour chaque type de conditionnement sauf 10HF.DRY (cf. Tableau 7-1).

Avant chaque essai, la teneur en vides des éprouvettes conditionnées a été mesurée et sa valeur est présentée dans le Tableau 7-1. Pour les éprouvettes ayant subi 10 cycles FT, la teneur en vides n'a été mesurée qu'après le carottage (TEV_0). Cette teneur en vides doit donc être corrigée pour obtenir la valeur avant essai puisque les phases de conditionnement modifient cette propriété du matériau (cf. chapitre IV). Une majoration forfaitaire de 2% de la teneur en vides initiale TEV_0 a donc été appliquée. Ce coefficient de correction est déterminé à partir des résultats de la campagne complémentaire X (cf. chapitre IV).

Tableau 7-1. Eprouvettes utilisées pour l'essai TSRST

Matériau	Type de conditionnement	Eprouvettes	Degré de Saturation (DS %)	Cycles de condition nement	Séchage sous vide	TEV en début d'essai (%)	Etat pendant d'essai (DS début d'essai %)
Non-vieilli	0FT.DRY	SG5C12(6.0)	Non	0FT	Non	6,0	Sec
		SG5C13(7.3)	Non	0FT	Non	7,3	Sec
		SG7D7(6.3)	Non	0FT	Non	6,3	Sec
	0FT.SAT	SG1A9(6.7)	Oui (63%)	0FT	Non	6,7	Saturé (63%)
		SG1A13(6.9)	Oui (75,3%)	0FT	Non	6,9	Saturé (75 ;3%)
		SG5C9(7.0)	Oui (78,3%)	0FT	Non	7,0	Saturé (78,3%)
		SG7D6(6.9)	Oui (77,7%)	0FT	Non	6,9	Saturé (77,7%)
	10FT.DRY	SG1A10(5.9)	Oui (70,0%)	10FT	Oui	7,9(*)	Sec
		SG5C11(6.4)	Oui (66,2%)	10FT	Oui	8,4(*)	Sec
		SG7D1(6.4)	Oui (77,9%)	10FT	Oui	8,4(*)	Sec
	10FT.SAT	SG1A12(5.6)	Oui (73,1%)	10FT	Non	5,6	Saturé (82,0%)
		SG2A12(5.6)	Oui (74,7%)	10FT	Non	5,6	Saturé (76,2%)
		SG5C10(5.7)	Oui (73,6%)	10FT	Non	6,1	Saturé (84,4%)
	50FT.DRY	SG7D2(5.1)	Oui (78,2%)	50FT	Oui	7,3	Sec
		SG7D8(5.2)	Oui (76,0%)	50FT	Oui	6,7	Sec
		SG7D4(5.2)	Oui (75,5%)	50FT	Oui	7,3	Sec
	10HF.DRY	SG8D2(6.5)	Oui (86,6%)	10HF	Oui	7,1	Sec
		SG8D4(6.2)	Oui (85,8%)	10HF	Oui	7,1	Sec
	10HC.DRY	SG2A13(7.1)	Oui (83,4%)	10HC	Oui	7,5	Sec
		SG8D1(7.0)	Oui (81,7%)	10HC	Oui	7,3	Sec
		SG8D3(6.6)	Oui (79,5%)	10HC	Oui	7,1	Sec
Vieilli	A.10HF.DRY	SG4aD6(6.5)	Oui (78,5%)	10HF	Oui	6,6	Sec

		SG4aD9(6.5)	Oui (76,7%)	10HF	Oui	6,8	Sec
		SG4aD10(6.4)	Oui (79,5%)	10HF	Oui	6,6	Sec
	A.10HC.DRY	SG4aD1(6.4)	Oui (79,5%)	10HC	Oui	6,7	Sec
		SG4aD5(6.2)	Oui (79,5%)	10HC	Oui	6,2	Sec
		SG4aD7(6.4)	Oui (79,5%)	10HC	Oui	6,1	Sec
(*) TEV calculée en appliquant une majoration de 2% à la valeur mesurée de TEV_0 (selon les résultats obtenus de la camapgne X)							

L'évolution générale des paramètres mécaniques (contrainte axiale et déformation radiale en fonction de la température) durant les essais est d'abord analysée en fonction des différents conditionnements appliqués et conditions d'essai. Les paramètres mesurés à la rupture sont ensuite comparés.

7.1.2. Eprouvettes testées à l'état sec (lors de l'essai)

7.1.2.1. Résultats expérimentaux

Les Figures 7-1 à 7-3 présentent l'ensemble des résultats des éprouvettes testées à l'état sec. Cela regroupe les essais sur le matériau non-vieilli qui n'a pas subi de conditionnement particulier (0FT.DRY) et qui servira de référence, les matériaux non-vieillis saturés qui ont subi 10 cycles ou 50 cycles FT, 10 cycles HC ou 10 cycles HF et enfin les matériaux vieillis saturés qui ont subi 10 cycles HF ou HC. La Figure 7-2 présente les résultats pour les matériaux non-vieillis et la Figure 7-3 présente ceux des matériaux vieillis. Les évolutions de la température mesurée à la surface des éprouvettes pendant les essais sont présentées dans la Figure 7-1.

Les résultats obtenus montrent que :

- Les courbes température-temps des éprouvettes testées à l'état sec se superpose très bien. La consigne de température est donc bien respectée et les essais peuvent être comparés entre eux sans biais liés à des différences de sollicitations en température.
- Les courbes de contrainte-température et déformation radiale –température des éprouvettes ayant subi le même type de conditionnement présentent une évolution très similaire au cours des essais. En particulier, les résultats des 3 éprouvettes non-conditionnées (0FT.DRY) se superposent bien. Ces courbes sont utilisées comme référence pour les comparaisons des résultats de suite. Les différences apparaissant à la rupture seront analysées dans la partie 7.4.

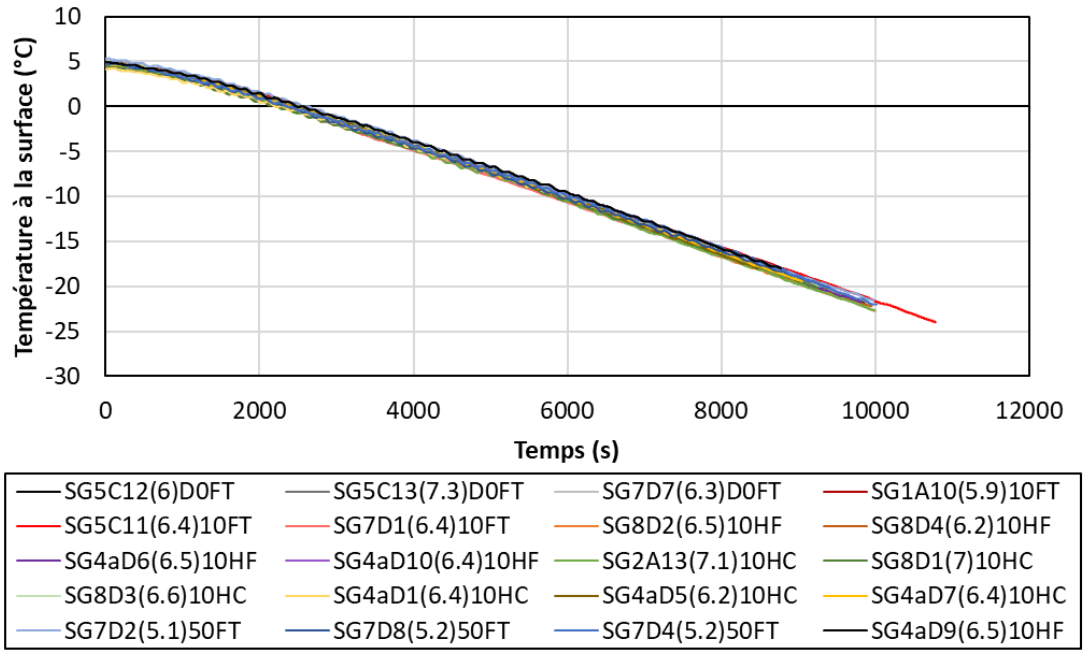


Figure 7-1. Evolution de la température mesurée à la surface des éprouvettes lors des essais TSRST sur les éprouvettes testées sèches

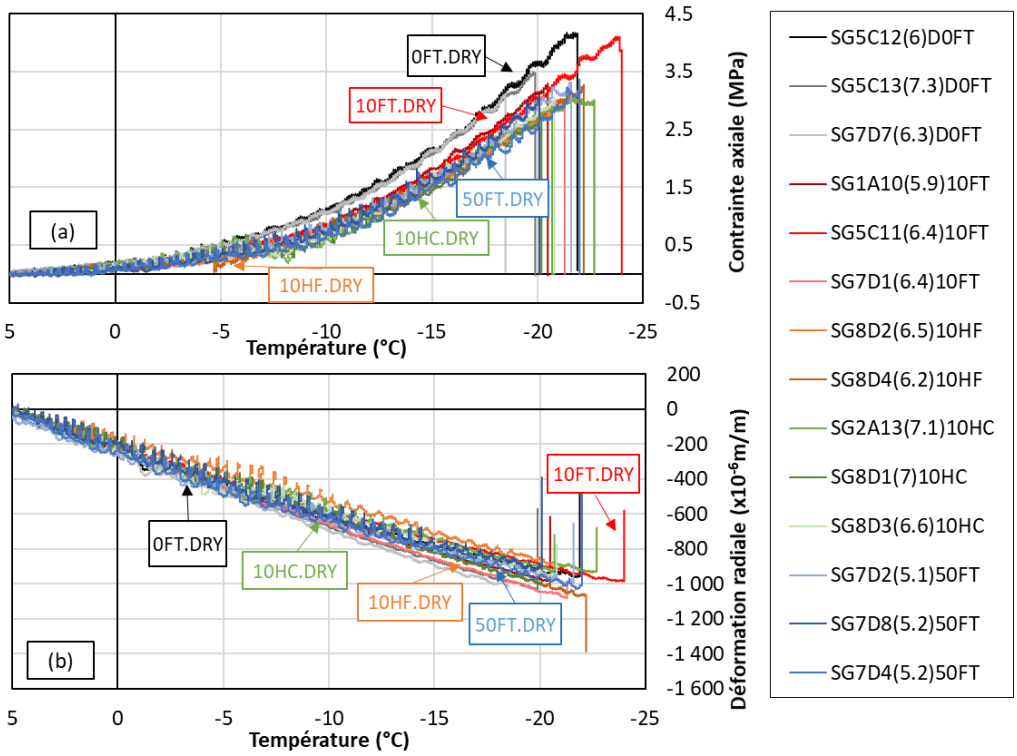


Figure 7-2. Contrainte (a) et déformation radiale (b) vs Température mesurée à la surface des éprouvettes testées à l'état sec pour le matériau non-vieilli

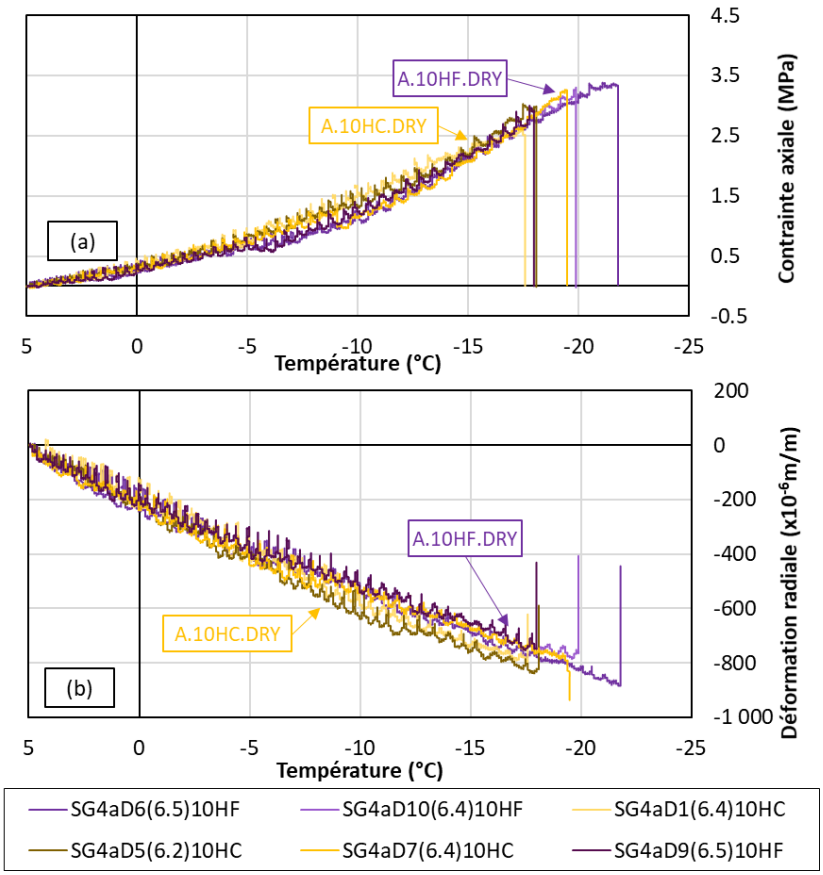


Figure 7-3. Contrainte (a) et déformation radiale (b) vs Température mesurée à la surface des éprouvettes testées à l'état sec pour le matériau vieilli

7.1.2.2. Effet des cycles thermiques

7.1.2.2.1. Effet des cycles FT

La Figure 7-4 présente les résultats des éprouvettes non-conditionnées (0FT.DRY) et des éprouvettes conditionnées avec 10 cycles ou 50 cycles de gel/dégel (10FT.DRY; 50FT.DRY) testées à l'état sec.

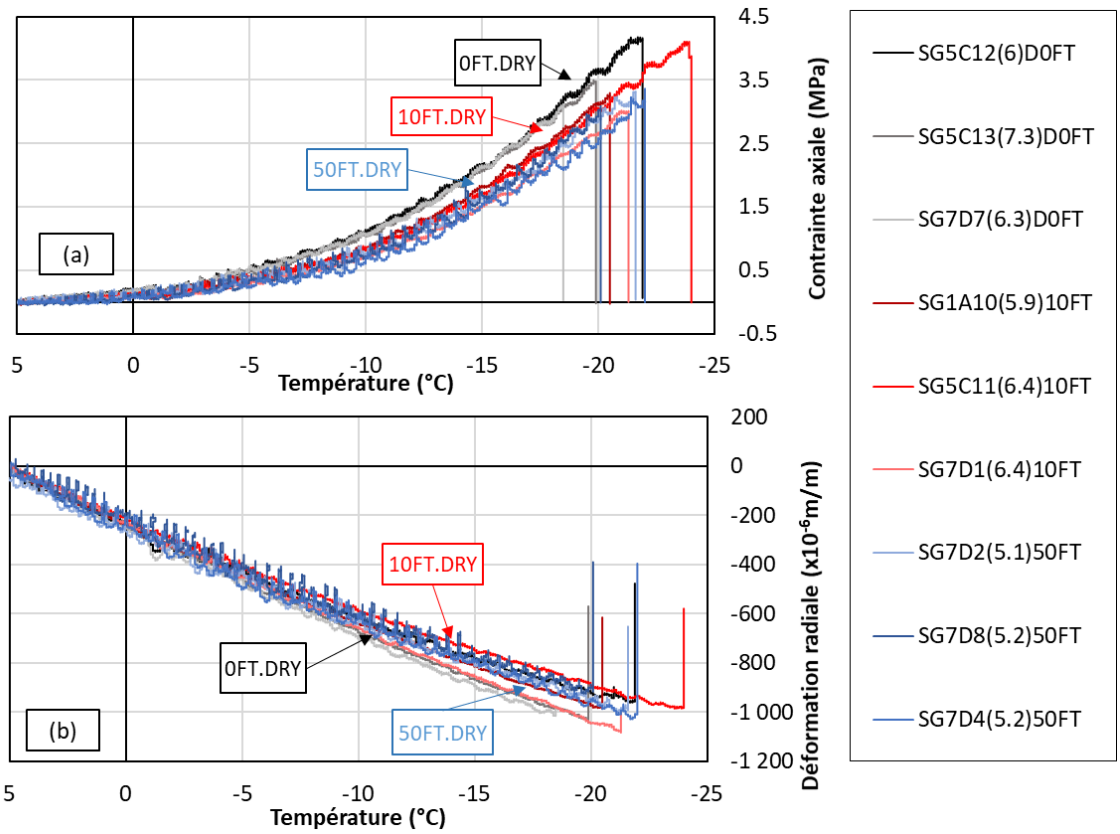


Figure 7-4. Contrainte (a) et déformation radiale (b) vs Température mesurée à la surface des éprouvettes ayant subi des cycles 0FT, 10FT et 50FT, testées à l'état sec, pour le matériau non-vieilli

Des variations non-significatives sont observées sur les résultats expérimentaux :

- Sur la courbe de contrainte-température, on constate qu'à une température donnée, la contrainte de l'éprouvette non-conditionnée est légèrement plus grande que celle de l'éprouvette conditionnée.
- Sur la courbe de déformation radiale-température, aucune tendance significative n'est marquée. Il semble que les cycles FT n'affectent pas sur l'évolution de la déformation radiale pendant l'essai TSRST.
- Sur ces deux courbes de contrainte-température et de déformation radiale-température, les résultats des éprouvettes du groupe 10FT.DRY et celles du groupe 50FT.DRY sont quasiment identiques. L'effet de 10 cycles FT et de 50 cycles FT n'est pas significativement différent.

7.1.2.2.1. Effet des cycles HC et HF

La Figure 7-5 présent les résultats des éprouvettes ayant subi 0FT, 10FT, 10HF et 10HC puis testées à l'état sec.

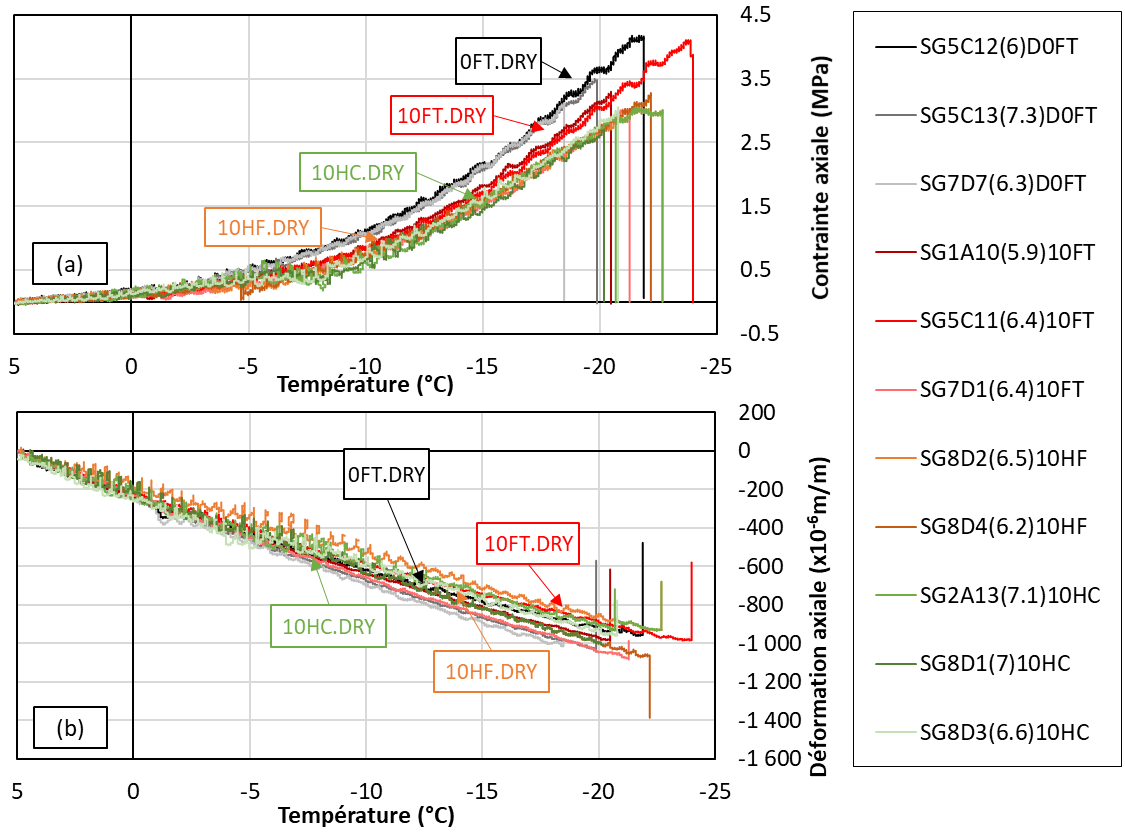


Figure 7-5. Contrainte (a) et déformation radiale (b) vs Température mesurée à la surface des éprouvettes ayant subi des cycles 0FT, 10FT, 10HF et 10HC, testées à l'état sec, pour le matériau non-vieilli

D'après les résultats obtenus, on constate que :

- Il n'y a pas de différence entre les 2 types de conditionnement avec réchauffement (10HF et 10HC).
- Sur la courbe de contrainte-température, à une température donnée, la contrainte de l'éprouvette conditionnée avec 10FT est légèrement plus grande que celle de l'éprouvette conditionnée avec 10HF et 10HC.
- Sur la courbe de déformation radiale-température, les éprouvettes avec 10FT ont des courbes très proches de celles avec 10HF et 10HC. Aucune distinction significative entre les éprouvettes conditionnées et celles non-conditionnées (0FT.DRY) n'est discernable. Il semble que les cycles FT, HF et HC n'affectent pas l'évolution de la déformation radiale pendant l'essai TSRST.

7.1.2.3. Effet du vieillissement

Pour analyser l'effet du vieillissement sur les courbes de contrainte-température et de déformation radiale-température, la Figure 7-6 compare les résultats du matériau non-vieilli et du matériau vieilli pour les éprouvettes qui ont subi les mêmes types de conditionnement, à savoir 10 cycles HF ou 10 cycles HC.

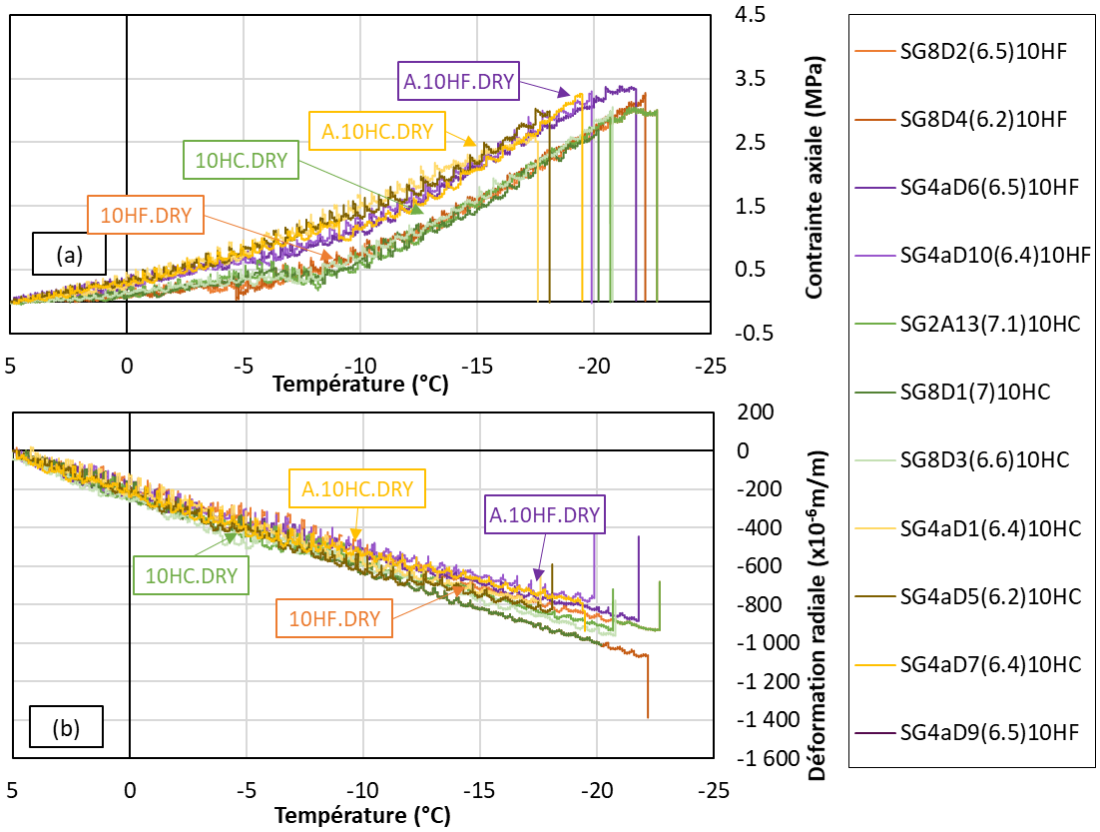


Figure 7-6. Comparaison des courbes de contrainte (a) et déformation radiale (b) vs température mesurée à la surface des éprouvettes ayant subi des cycles 10HF et 10HC, pour le matériau non-vieilli et le matériau vieilli

Les résultats montrent que :

- Sur la courbe de contrainte-température, à une température donnée, la contrainte pour les éprouvettes en matériau vieilli est plus élevée que celle des éprouvettes de matériau non-vieilli, quel que soit le conditionnement appliqué. Quel que soit le matériau, les deux conditionnements HF et HC donnent des effets identiques sur les éprouvettes.
- Sur la courbe de déformation radiale-température, les éprouvettes ayant subi 10 cycles FT ont des courbes très proches de celles avec 10HF et 10HC. Aucune variation significative des éprouvettes conditionnées par rapport à celles non-conditionnées (0FT.DRY) est marquée. Il semble que les cycles FT, HF et HC n'affectent pas sur l'évolution de la déformation radiale pendant l'essai TSRST.

7.1.3. Eprouvettes testées à l'état saturé (lors de l'essai)

7.1.3.1. Résultats expérimentaux

Les Figure 7-7 et Figure 7-8 présentent les résultats des éprouvettes testées alors qu'elles étaient encore saturées (partiellement). Cela concerne des essais sur le matériau non-vieilli, avec des éprouvettes saturées qui ont subi 0 ou 10 cycles de gel/dégel (10FT.SAT et 10FT.SAT). Les évolutions de la température mesurée à la surface de ces éprouvettes pendant les essais sont présentées sur la Figure 7-7. La Figure 7-8 présente l'évolution des paramètres mécaniques (contrainte et déformation radiale) en fonction de la température mesurée à la surface de l'éprouvette.

L'évolution de la température présente une déviation de -3°C à -5°C avant de reprendre une évolution linéaire. L'évolution de la contrainte et de la déformation radiale en fonction de la température fait apparaître des courbes plus chahutées mais avec des caractéristiques qui semblent répétables. Ces phénomènes, qui sont liés à la saturation des éprouvettes lors de l'essai, sont analysés dans la partie suivante.

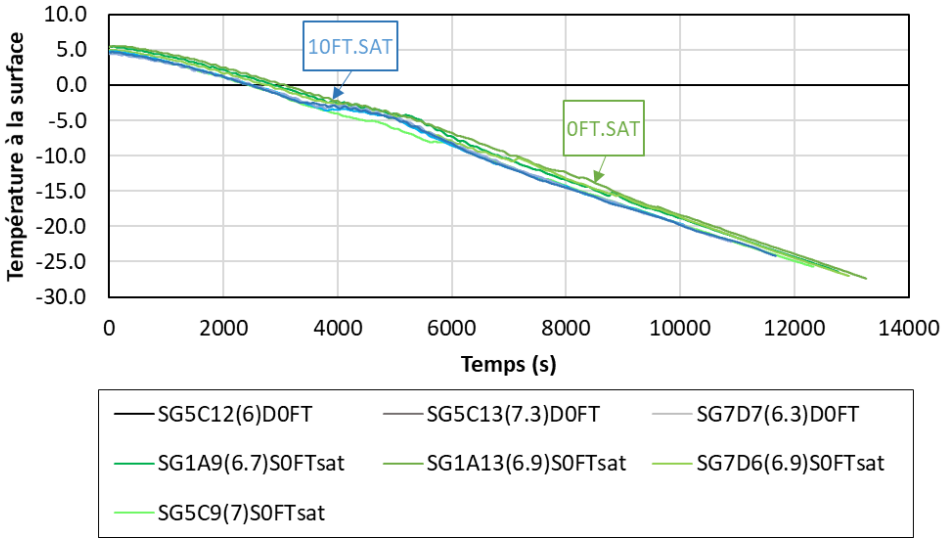


Figure 7-7. Evolution de la température mesurée à la surface des éprouvettes lors des essais TSRST sur éprouvettes testées saturées (partiellement)

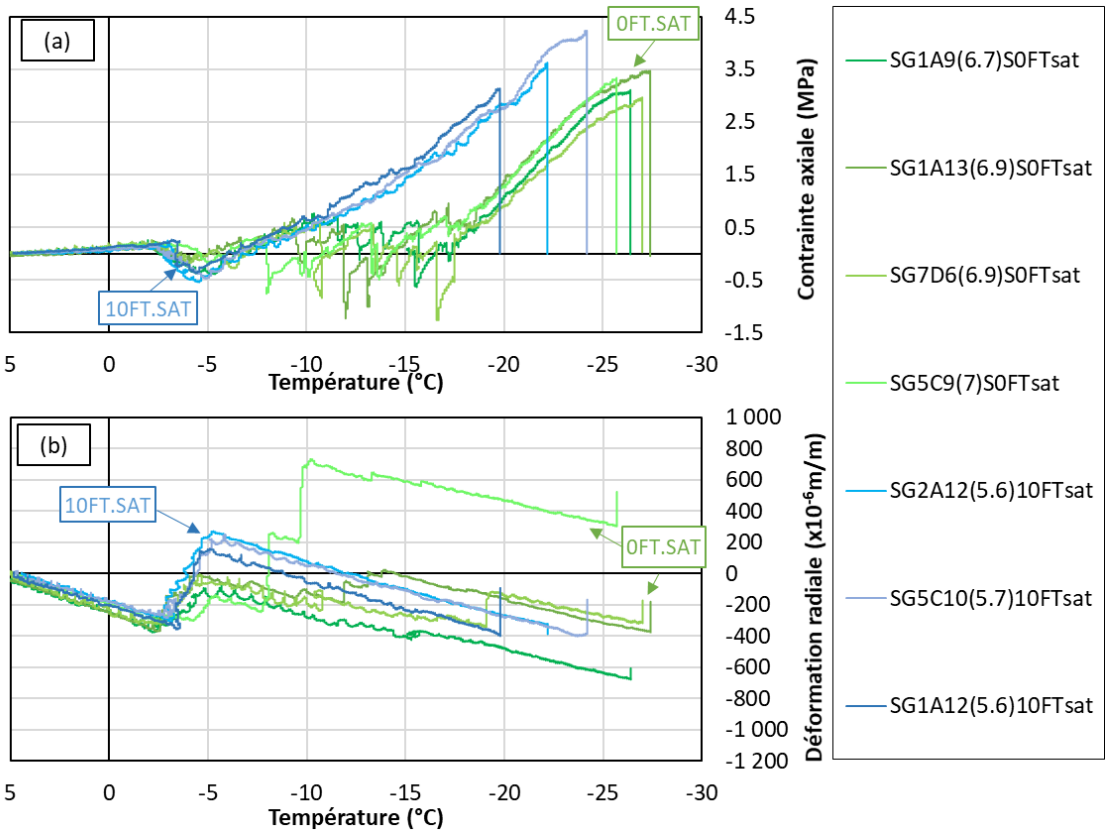


Figure 7-8. Contrainte (a) et déformation radiale (b) vs Température mesurée à la surface des éprouvettes testées à l'état saturé (lors de l'essai) pour le matériau non-vieilli

7.1.3.2. Effet de la saturation

L'influence de l'eau sur le comportement à basse température du matériau dépend du conditionnement appliqué. Pour pouvoir analyser ce phénomène, les essais réalisés alors que les matériaux sont saturés, sont directement comparés à ceux des matériaux secs.

Rappelons que, le degré de saturation des éprouvettes ne peut pas être mesuré et contrôlé pendant l'essai. Afin de limiter la variation du degré de saturation, les éprouvettes sont entourés par un film plastique avant l'essai. Le degré de saturation en début de l'essai est pris dans les analyses.

7.1.3.2.1. Effet de la saturation sur les éprouvettes n'ayant subie aucun cycle de gel/dégel (0FT)

La Figure 7-10 présente les résultats des éprouvettes non-conditionnées (0FT.DRY) avec les éprouvettes saturées n'ayant subi aucun cycle FT (0FT.SAT). La Figure 7-9 présente l'évolution de la température à la surface des éprouvettes au cours de ces essais. Une cassure légère apparait dans la courbe d'évolution pour les matériaux saturés vers 0°C, et la vitesse de refroidissement reprend la valeur imposée de -10°C/h. De la même façon, les courbes de contrainte-température divergent pour les matériaux saturés à partir de -2°C, jusqu'à -17°C environ. 4 périodes différentes se distinguent dans l'évolution de ces courbes :

- La première période ($T < -2$°C): l'éprouvette saturée se comporte comme l'éprouvette sèche jusqu'à la température sur la surface de l'éprouvette attient environ -2°C.
- La deuxième période (-2°C $\geq T > -7$°C) : L'eau libre dans les éprouvettes commence à se transformer en glace. La formation de glace crée des dilatations volumiques qui apparaissent sur la courbe de déformation radiale (la déformation axiale étant maintenue nulle). La contrainte axiale diminue afin de maintenir la déformation axiale nulle malgré la

glace qui se forme. Dans cette phase, la libération de chaleur due à la formation de glace entraine l'augmentation de la température. L'écart maximale de température de l'éprouvette testée à l'état saturé par rapport celle testée à l'état sec peut atteindre 4°C.

- La troisième période ($-7℃ \geq T > -17℃$) : Des fluctuations rapides de la contrainte axiale, autour de la valeur nulle, se produisent. Ces fluctuations s'expliquent par la formation de glace qui se poursuit. L'eau sous pression qui était dans les micropores et qui n'a pas pu geler, se transforme en glace au fur et à mesure que la température continue de diminuer. Les déformations radiales évoluent également rapidement sous l'effet des dilatations créées par l'apparition de glace. La libération de chaleur continue très localement, avec le développement de glace, et la courbe de temps-température des éprouvettes saturées évolue presque parallèlement avec celle des éprouvettes sèches.
- La quatrième période ($-17℃ \geq T$) : Une fois que toute l'eau s'est transformée en glace, les courbes reprennent une évolution plus régulière, semblable à celle observée pour les courbes des éprouvettes non-conditionnées.

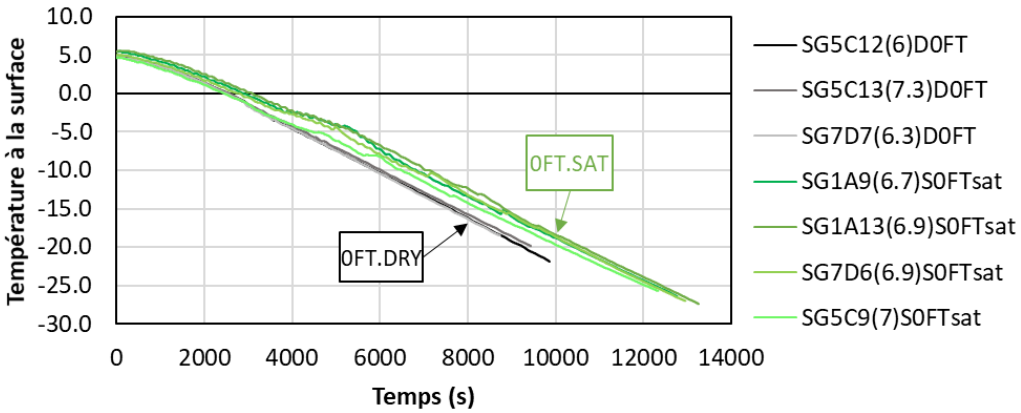


Figure 7-9. Comparaison de la température mesurée à la surface des éprouvettes (0FT.DRY et 0FT.SAT)

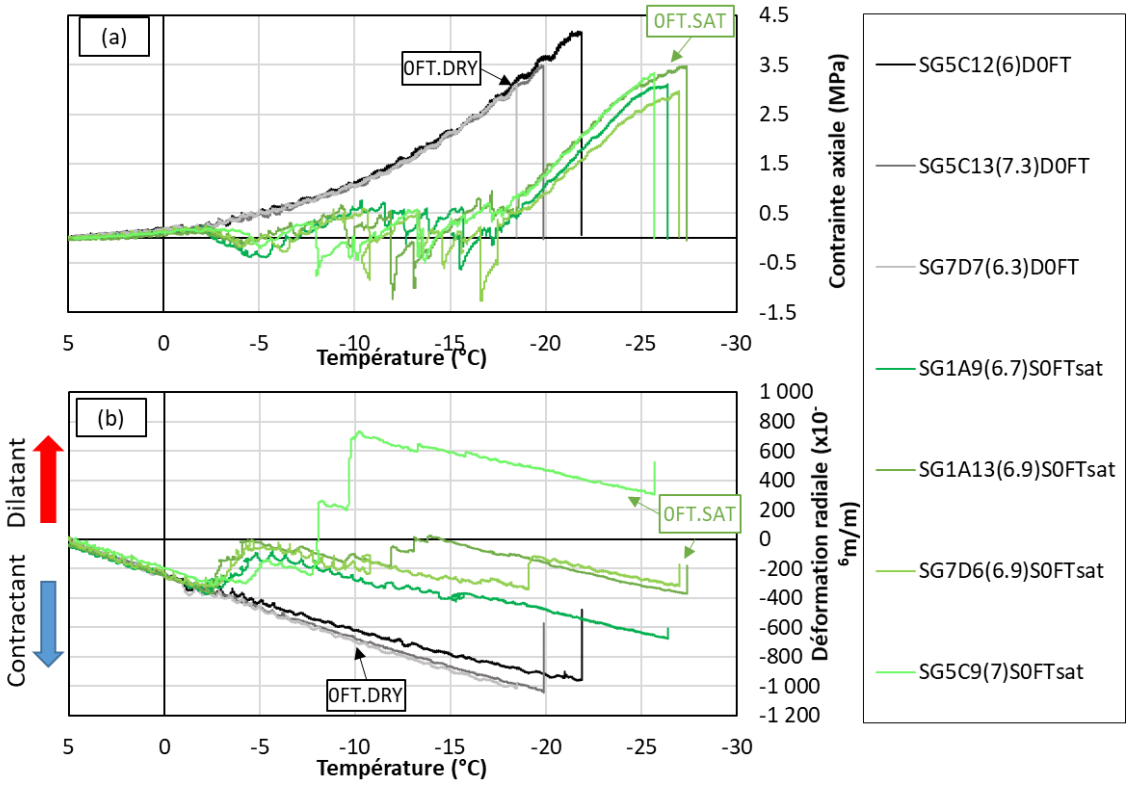


Figure 7-10. Comparaison des courbes de Contrainte (a) et Déformation radiale (b) vs Température mesurée à la surface des éprouvettes non-vieillies subies aucun cycle de gel/dégel testées à l'état sec (0FT.DRY) et celles testées à l'état saturé (0FT.SAT)

7.1.3.2.2. Effet de la saturation sur les éprouvettes ayant subi 10 cycles de gel/dégel (10FT)

La Figure 7-11 compare l'évolution de température des matériaux ayant subi 10 cycles FT testés à l'état sec (10FT.DRY) avec ceux testés à l'état saturé (10FT.SAT). La Figure 7-12 montre les courbes contrainte-température, et déformation radiale-température pour ces essais (10FT.DRY et 10FT.SAT).

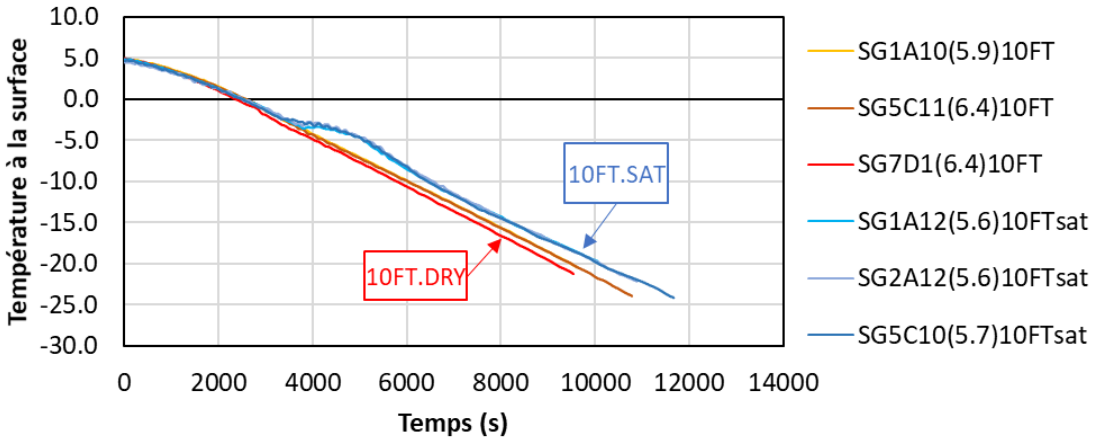


Figure 7-11. Comparaison de la température mesurée à la surface des éprouvettes (10FT.DRY et 10FT.SAT)

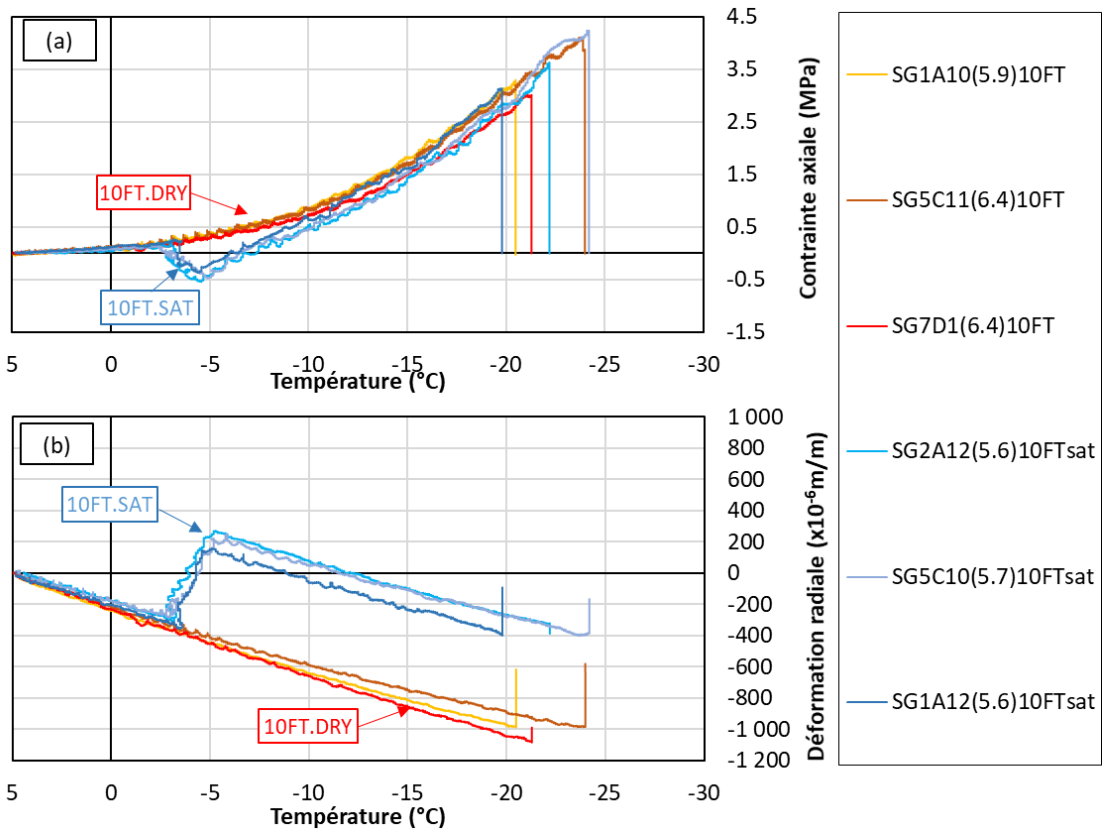


Figure 7-12. Comparaison des courbes de Contrainte (a) et Déformation radiale (b) vs Température mesurée à la surface des éprouvettes non-vieillies ayant subi 10 cycles de gel/dégel testées à l'état sec (10FT.DRY) et celles testées à l'état saturé (10FT.SAT)

L'effet de l'eau influence différemment l'évolution des paramètres lors de l'essai TSRST pour les matériaux qui ont subi 10 cycles FT par rapport aux résultats présentés pour les éprouvettes qui subissent leur premier gel lors de l'essai. Le comportement des éprouvettes saturées avec cycles FT ne se compose que de 3 périodes :

- La première période (T<-2°C): l'éprouvette saturée se comporte comme l'éprouvette sèche jusqu'à la température sur la surface de l'éprouvette attient environ -2°C.
- La deuxième période (-2°C≥T>-5°C) : La formation de glace limite la contraction de l'éprouvette liée à la baisse de température. La contrainte axiale diminue, et la déformation radiale augmente avec une vitesse de dilatation environ 180µm/m/°C. Dans cette phase, la libération de chaleur due à la formation de glace entraine l'augmentation de la température de l'éprouvette saturée. L'écart maximal de température des éprouvettes testées à l'état saturé par rapport à celle testée à l'état sec peut atteindre 3°C.
- La troisième période (-5°C≥T) : A partir de -5°C, la courbe contrainte-température reprend une évolution comparable à celle des éprouvettes sèches avec cycles FT. Dans cette phase, la libération de chaleur continue jusqu'à -10°C. A partir de cette température, la courbe de temps-température des éprouvettes saturées a tendance à rejoindre celle des éprouvettes sèches.

Les deux premières périodes correspondent aux deux périodes décrites précédemment (jusqu'à environ -5°C). La troisième période correspond à la dernière période présentée précédemment. En fait la troisième période qui faisait apparaitre des fluctuations rapides de la contrainte et de la déformation radiale a disparu. La transformation empêchée de l'eau en glace dans les micropores n'a donc plus lieu. L'application des cycles FT lors du conditionnement a donc fait geler l'eau et ouvert

les micropores. L'eau peut donc se transformer en glace sous les mêmes conditions de température que de l'eau libre.

7.1.4. Comparaison des résultats à la rupture

Au cours de l'essai TSRST, la contrainte axiale et la déformation radiale sont enregistrées et leur évolution en fonction de la température à la surface de l'éprouvette est étudiée. Trois caractéristiques principales sont exploitées à partir les résultats des essais TSRST :

- Température à la rupture : T_{rup}
- Contrainte axiale à la rupture : σ_{rup}
- Déformation radiale à la rupture : $\varepsilon_{r.rup}$

Tableau 7-2. Résultats à la rupture des essais TSRST

Matériau	Type de conditionnement	Eprouvettes	Caractéristiques à la rupture								
			Température			Contrainte axiale			Déformation radiale		
			T_{rup} (°C)	Moy	Ecart type	σ_{rup} (MPa)	Moy	Ecart type	$\varepsilon_{r.rup}$ (µm/m)	Moy	Ecart type
Non-vieilli	0FT.DRY	SG5C12(6.0)	-21,9	-20,03	1,44 (11,1%)	4,1	3,52	0,39 (11,1%)	-915	-996,7	54,4 (5,5%)
		SG5C13(7.3)	-19,8			3,5			-1046		
		SG7D7(6.3)	-18,4			3,0			-1029		
	0FT.SAT	SG1A9(6.7)	-26,4	-26,52	0,48 (1,8%)	3,1	3,21	0,23 (7,2%)	-727	-294,9	288,7 (97,9%)
		SG1A13(6.9)	-27,4			3,5			-385		
		SG5C9(7.0)	-25,7			3,3			283		
		SG7D6(6.9)	-26,6			2,8			-366		
	10FT.DRY	SG1A10(5.9)	-20,5	-21,90	1,33 (6,6%)	3,2	3,40	0,40 (11,8%)	-963	-1040,3	51,6 (5,0%)
		SG5C11(6.4)	-23,9			4,0			-1086		
		SG7D1(6.4)	-21,3			3,0			-1072		
	10FT.SAT	SG1A12(5.6)	-22,2	-22,06	1,51 (6,9%)	3,6	3,67	0,38 (10,3%)	-395	-401,3	8,5 (2,1%)
		SG2A12(5.6)	-24,2			4,2			-395		
		SG5C10(5.7)	-19,8			3,1			-414		
	50FT.DRY	SG7D2(5.1)	-21,6	-21,23	0,76 (3,6%)	3,3	3,20	0,10 (3,1%)	-1001	-985,3	39,7 (4,0%)
		SG7D8(5.2)	-20,1			3,1			-9256		
		SG7D4(5.2)	-22,2			3,4			-1029		
	10HF.DRY	SG8D2(6.5)	-22,7	-22,45	0,25 (1,1%)	3,0	3,20	0,15 (4,8%)	-935	-1152,1	216,8 (18,8%)
		SG8D4(6.2)	-22,2			3,3			-1369		
	10HC.DRY	SG2A13(7.1)	-22,7	-21,23	0,98 (4,6%)	3,1	2,94	0,16 (5,4%)	-935	-969,4	28,4 (2,9%)
		SG8D1(7.0)	-20,2			2,7			-1012		
		SG8D3(6.6)	-20,8			3,1			-961		
Vieilli	A.10HF.DRY	SG4aD6(6.5)	-21,8	-19,90	1,27 (6,4%)	3,4	3,23	0,16 (4,8%)	-884	-807,9	50,9 (6,3%)
		SG4aD9(6.5)	-18,0			3 ,0			-754		
		SG4aD10(6.4)	-19,9			3,3			-786		
	A.10HC.DRY	SG4aD1(6.4)	-17,6	-18,40	0,73 (4,0%)	2,6	2,97	0,24 (7,9%)	-796	-828,0	21,2 (2,6%)
		SG4aD5(6.2)	-18,1			3.0			-838		
		SG4aD7(6.4)	-19,5			3.3			-850		

La température, la contrainte et la déformation à la rupture des essais TSRST sont exposées dans le Tableau 7-2. La valeur moyenne et l'écart type sont aussi calculés. Ces résultats sont présentés sur la Figure 7-13.

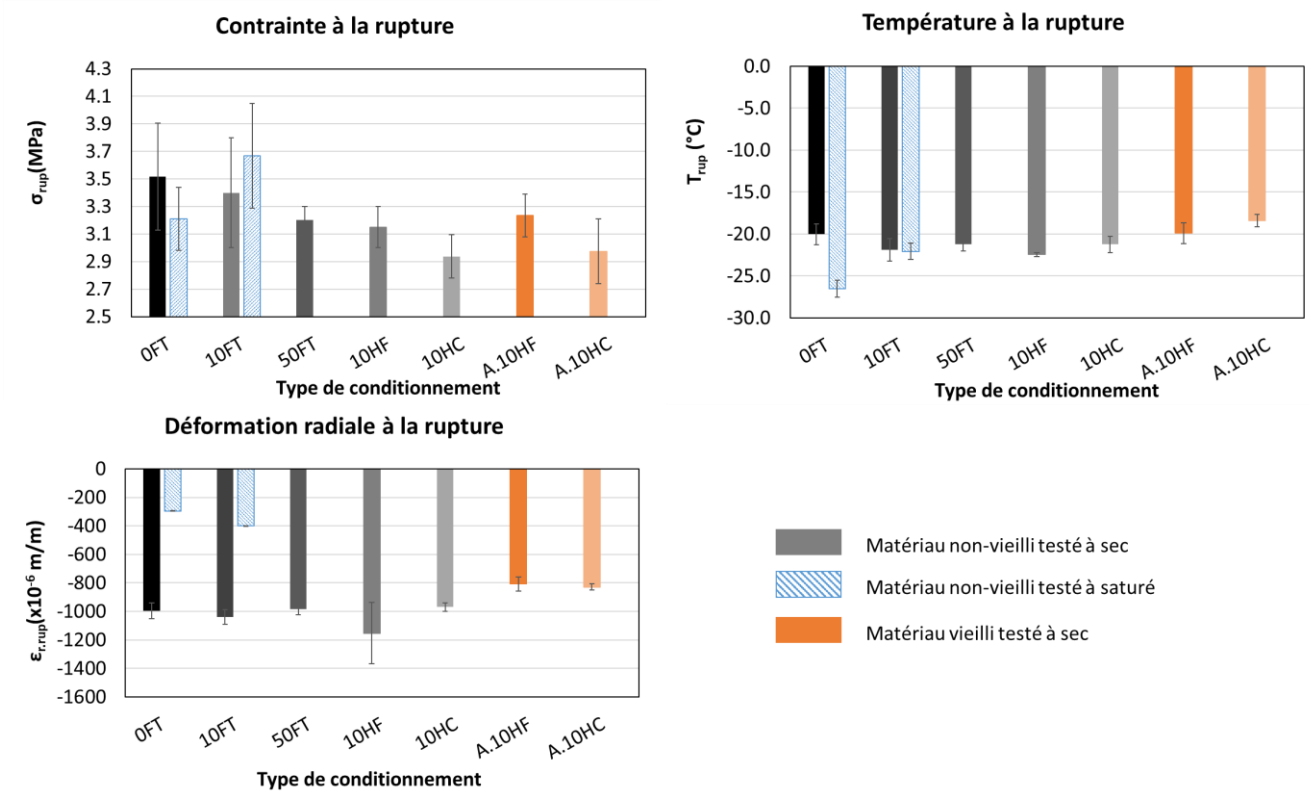


Figure 7-13. Valeurs à la rupture de la contrainte, de la température et de la déformation radiale lors des essais TSRST (moyenne et écart type)

Les résultats montrent que :

- Pour le matériau non-vieilli testé à l'état sec : Les conditionnements avec 50FT 10HF ou 10HC ont tendance à diminuer la contrainte à la rupture par rapport aux conditionnement 0FT et 10FT. Cependant, ces conditionnements ne semblent pas avoir influencé les valeurs à la rupture de la température et de la déformation radiale.
- Pour le matériau non-vieilli testé à l'état saturé : la formation du gel dans l'éprouvette saturée est l'effet prédominant qui affecte sur les résultats expérimentaux. Cette effet diminue la température à la rupture (environ 6°C), surtout pour le matériau saturé n'ayant subi aucun cycle de gel/dégel, tout en diminuant significativement la déformation radiale en contraction (de l'ordre de $6x10^{-4}$m/m) pendant l'essai TSRST.
- Pour le matériau vieilli testé à l'état sec : la différence entre 10HF et 10HC n'est pas significative. En comparant avec les résultats du matériau non-vieilli ayant subi le même conditionnement, la déformation radiale à la rupture est plus élevée (de l'ordre $2x10^{-4}$m/m), tandis que la contrainte et la température à la rupture restent identiques.

7.1.5. Répétabilité de l'essai TSRST

Trois caractéristiques différentes sont étudiées pour analyse de la répétabilité de l'essai TSRST :

- Les écart types des valeurs à la rupture (cf. Tableau 7-2)
- La courbe d'évolution de la contrainte en fonction de la température
- La courbe d'évolution de la déformation radiale en fonction de la température

Pour la variation de la contrainte en fonction de la température, la Figure 7-144 montre que les courbes de trois essais différents sur les éprouvettes non-conditionnées (0FT.DRY) se superposent très bien. En tenant compte de la forme de variation des courbes contrainte-température, la croissance, et la concavité sont quasiment identique.

Pour quantifier la différence entre trois essais du même matériau, autre que les valeurs de rupture, l'intégrale sous la courbe de contrainte – température a été calculée. Cette intégrale est calculée en utilisant la température de rupture la plus élevée obtenue pour chaque matériau ayant subi le même type de conditionnement. Le Tableau 7-3 présente cette température et la valeur de l'intégrale sous la courbe contrainte-température pour chaque essai. Les moyennes et les écarts types des intégrales sont aussi présentés.

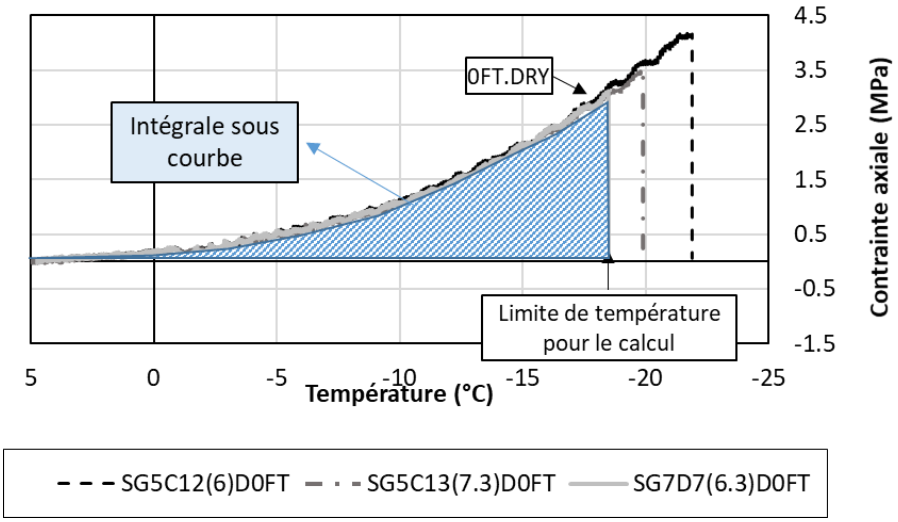


Figure 7-14. Courbe contrainte – température des éprouvettes non conditionnées (0FT.DRY) et zone de calcul de l'intégrale

Les résultats montrent que :

- Pour les éprouvettes testées à l'état sec, l'écart type maximum de l'intégrale est toujours inférieur à 10%. On peut ainsi conclure que la répétabilité de l'essai TSRST à l'état sec est bonne, en considérant l'évolution de la contrainte en fonction de la température. En outre, les écarts types de la température à la rupture sont inférieurs à 11,8% (maximal pour 10FT.DRY). L'écart type maximal de la contrainte à la rupture est de 11,1% (pour 0FT.DRY).
- Pour les éprouvettes testées à l'état saturé, l'écart type de l'intégrale est supérieur à celui des éprouvettes testées à l'état sec (la valeur maximale 13,4% pour 10FT.SAT). Les écarts types de la température à la rupture sont inférieurs à 6,9% (maximal pour 10FT.SAT). Quant à la contrainte à la rupture, l'écart type maximal est de 10,3%.
- Ces écarts types relativement faibles indiquent la bonne répétabilité des mesures de la température et de la contrainte des essais TSRST à l'état sec ainsi qu'à l'état saturé.

Tableau 7-3. Valeur de l'intégrale sous la courbe contrainte-température et celle sous la courbe déformation radiale-température

Type de conditionnement	Eprouvettes	Température de calcul	Intégrale sous courbe contrainte-température			Intégrale sous courbe déformation radiale -température		
		T_{calcul} (°C)	Valeur (MPa .°C)	Moy	Ecart type	Valeur (µm/m.°C)	Moy	Ecart type
0FT.DRY	SG5C12(6.0)	-18,4	-23,2	-22,4	0,8 (3,4%)	11510,8	12202,6	636,8 (5,2%)
	SG5C13(7.3)		-21,7			12332,7		
	SG7D7(6.3)		-22,3			12764,4		
0FT.SAT	SG1A9(6.7)	-25,7	-16,4	-16,6	2,0 (12,2%)	10090,2	3592,7	7000,4 (194,9%)
	SG1A13(6.9)		-13,8			6060,6		
	SG5C9(7.0)		-18,1			-6299,3		
	SG7D6(6.9)		-18,1			4519,4		
10FT.DRY	SG1A10(5.9)	-20,5	-24,3	-22,8	2,1 (9,0%)	13640,7	13408,2	830,7 (6,2%)
	SG5C11(6.4)		-23,5			12486,0		
	SG7D1(6.4)		-20,4			14097,9		
10FT.SAT	SG1A12(5.6)	-19,8	-18,6	-16,2	2,2 (13,4%)	3341,9	2187,2	1109,5 (50,7%)
	SG2A12(5.6)		-14,4			1129,1		
	SG5C10(5.7)		-15,7			2090,7		
50FT.DRY	SG7D2(5.1)	-20,1	-21,0	-19,9	1,4 (6,9%)	13468,3	13280,6	498,7 (3,8%)
	SG7D8(5.2)		-20,3			12715,2		
	SG7D4(5.2)		-18,4			13658,2		
10HF.DRY	SG8D2(6.5)	-22,2	-25,7	-26,0	0,5 (2,1%)	13063,4	14162,8	1554,8 (11,0%)
	SG8D4(6.2)		-26,4			15262,3		
10HC.DRY	SG2A13(7.1)	-20,2	-19,8	-20,1	0,5 (2,6%)	12602,2	12925,4	295,4 (2,3%)
	SG8D1(7.0)		-19,7			13181,5		
	SG8D3(6.6)		-20,7			12992,6		
A.10HF.DRY	SG4aD6(6.5)	-18,0	-26,5	-25,8	1,9 (7,4%)	11074,9	10691,4	370,9 (3,5%)
	SG4aD9(6.5)		-27,2			10334,6		
	SG4aD10(6.4)		-23,6			10664,6		
A.10HC.DRY	SG4aD1(6.4)	-17,6	-24,4	-23,7	1,2 (4,9%)	9701,7	9848,8	366,3 (3,7%)
	SG4aD5(6.2)		-24,3			10265,7		
	SG4aD7(6.4)		-22,3			9578,9		

La répétabilité des mesures de déformations radiales est étudiée à l'aide de la courbe d'évolution de la déformation radiale en fonction de la température. L'intégrale sous la courbe de déformation radiale – température a été calculée (Figure 7-15). La température de calcul pour cette l'intégrale est identique pour celle sous la courbe contrainte-température. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 7-3.

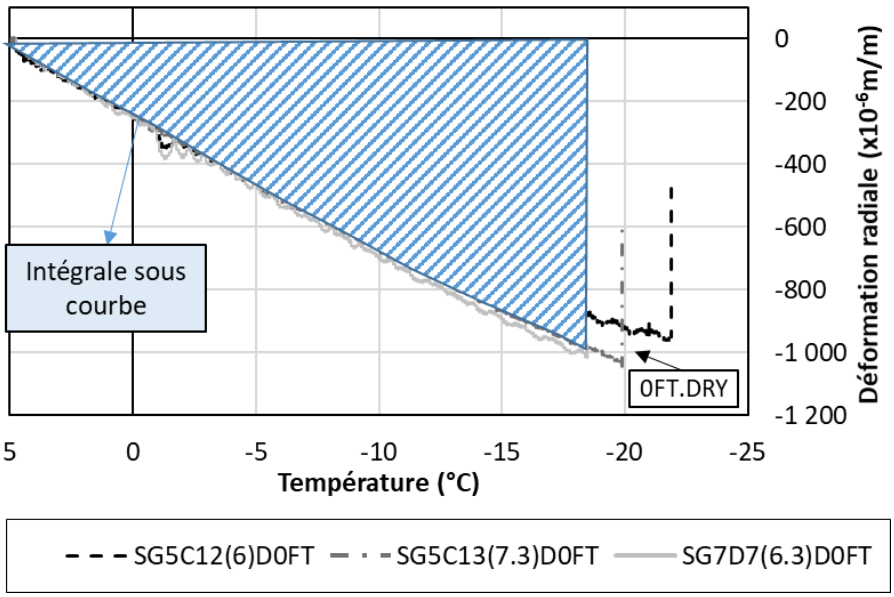


Figure 7-15. Courbe déformation radiale– température des éprouvettes non conditionnées (0FT.DRY) et Zone de calcul de l'intégrale.

On constate que :

- Pour les éprouvettes testées à l'état sec, l'écart type maximum de l'intégrale sous la courbe déformation radiale – température est toujours inférieur à 11%. On peut ainsi conclure que la répétabilité des essais TSRST à l'état sec est bonne, en considérant l'évolution de la courbe déformation radiale-température. En outre, les écarts types de la déformation radiale de rupture sont inférieurs à 18,8% (maximal pour 10HF.DRY).
- Pour les éprouvettes testées à l'état saturé, l'écart type de l'intégrale sous la courbe déformation radiale – température est bien supérieur à celui des éprouvettes testées à l'état sec (la valeur maximale 194,9% pour 0FT.SAT). En outre, l'écart type maximal de la déformation radiale à la rupture est de 97,9% pour les éprouvettes n'ayant subi aucun cycle FT (0FT). Ces écarts types élevés indiquent la faible répétabilité des mesures de la déformation radiale des essais TSRST testés à l'état saturé.

7.2. Résultat et analyse des essais complémentaires - (TUST-Thermal Unstressed Specimen Test)

La saturation en eau influence significativement le comportement de l'enrobé bitumineux durant l'essai TSRST. A basse température, la transformation de l'eau en glace (surtout de l'eau dans les pores « fermés ») entraine une dilatation significative de l'éprouvette testée. Pour mieux comprendre cet effet, l'estimation de la quantité d'eau dans les pores fermés est nécessaire. C'est la raison pour laquelle les essais TUST (Thermal Unstressed Specimen Test) ont été réalisés.

L'objectif de l'essai est de quantifier d'abord la déformation radiale et axiale d'une éprouvette saturée en retrait thermique libre durant un refroidissement à vitesse constante (identique à celle de l'essai TSRST). L'analyse des résultats de l'essai TUST donne ensuite la première estimation de la quantité d'eau dans les pores fermés (ou la quantité d'eau effective).

7.2.1. Présentation de l'essai

Le principe de cet essai est de mesurer les déformations axiale et radiale en diminuant la température de 5 à -30°C à 10°C/h sur une seule éprouvette saturée, ou non, laissée libre.

4 essais TSUT ont été réalisés :

- Le premier essai : l'éprouvette est testée à l'état sec. Le résultat de cet essai est utilisé comme référence.
- Le deuxième, troisième et quatrième essais, réalisés sur la même éprouvette : l'éprouvette est testée à l'état saturé. Avant chaque essai, l'éprouvette est saturée sous vide (la procédure de saturation déjà présentée dans le chapitre II).

La Figure 7-16 présente l'ordre de la saturation et des essais TSUT réalisés

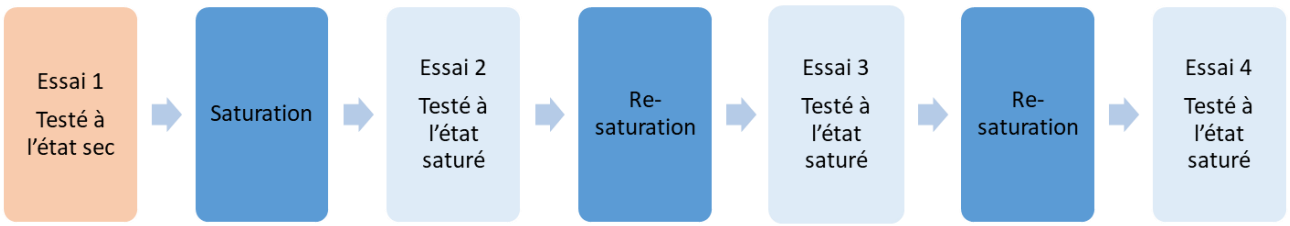


Figure 7-16. Ordre de la saturation et des essais TSUT réalisés.

7.2.2. Résultat des essais TUST

7.2.2.1. Eprouvette testée et variation du degré de saturation après l'essai TUST

L'éprouvette utilisée est SG2A9(6.5) qui n'asubi aucun conditionnement.

La Figure 7-17 présente le degré de saturation de l'éprouvette au début et à la fin de chaque essai TUST. Le résultat montre que l'éprouvette saturée a perdu environ 15% de degré de saturation durant l'essai bien qu'elle soit entourée par un film plastique avant chaque test.

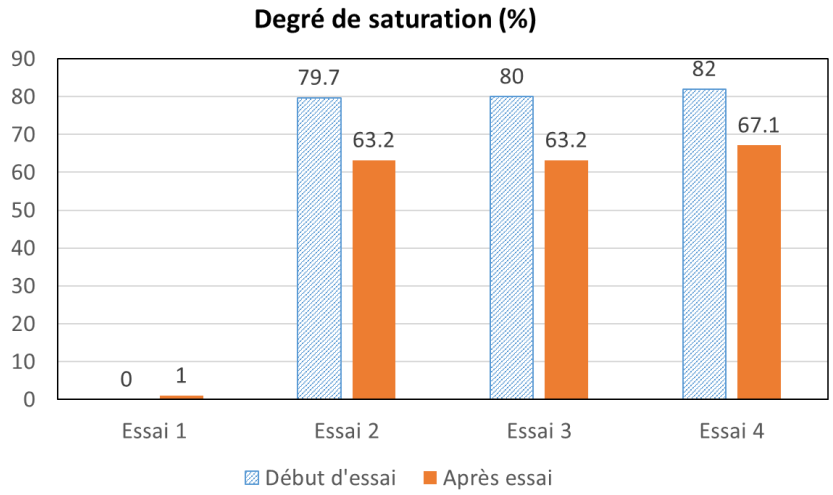


Figure 7-17. Degré de saturation début et après l'essai TUST

7.2.2.2. Courbes de température-temps, déformation axiale-température, déformation radiale- température

Durant l'essai, deux types de température sont mesurées :

- La température dans l'air qui est mesurée par les thermocouples placés autour de l'éprouvette et à côté des extensomètres.
- La température à la surface du matériau qui est mesurée par une sonde PT100 collée à la surface de l'éprouvette cylindrique

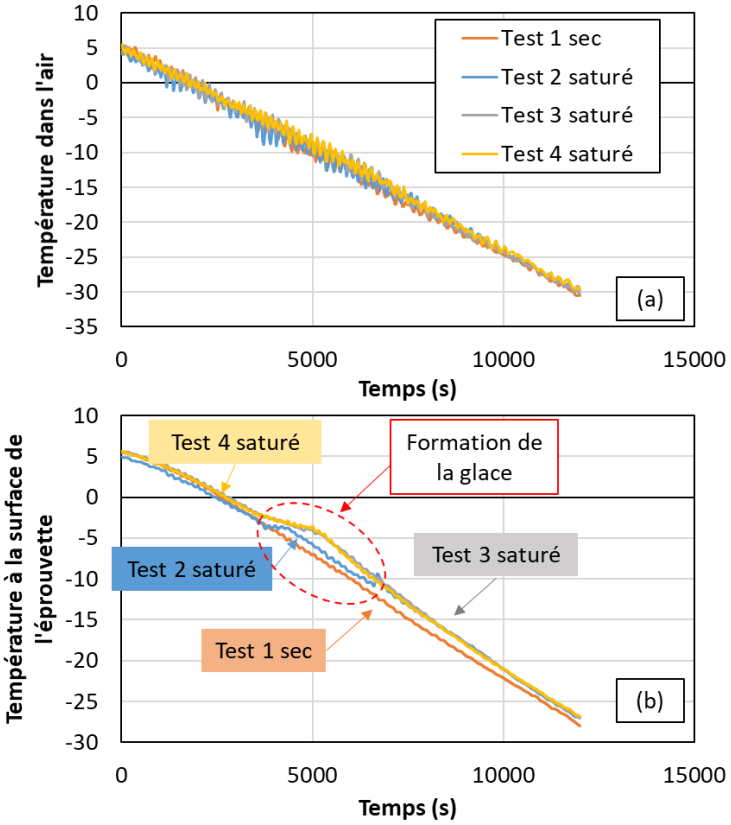


Figure 7-18. Température mesurée dans l'air vs Temps (a) et Température mesurée à la surface de l'éprouvette vs Temps (b)

La Figure 7-18 présente la variation de ces deux types de température. La Figure 7-18 (a) confirme un bon pilotage de l'enceinte thermique utilisée, tandis que les résultats de la Figure 7-18 (b) permettent de déduire le moment où la formation de glace se produit (à partir de -2°C).

La Figure 7-19 montre la variation de la déformation axiale de l'éprouvette en fonction du temps et de la température mesurée à la surface de l'éprouvette. On constate que la formation de glace prend plus de temps dans le 2ème essai que dans le 3ème et 4ème essai.

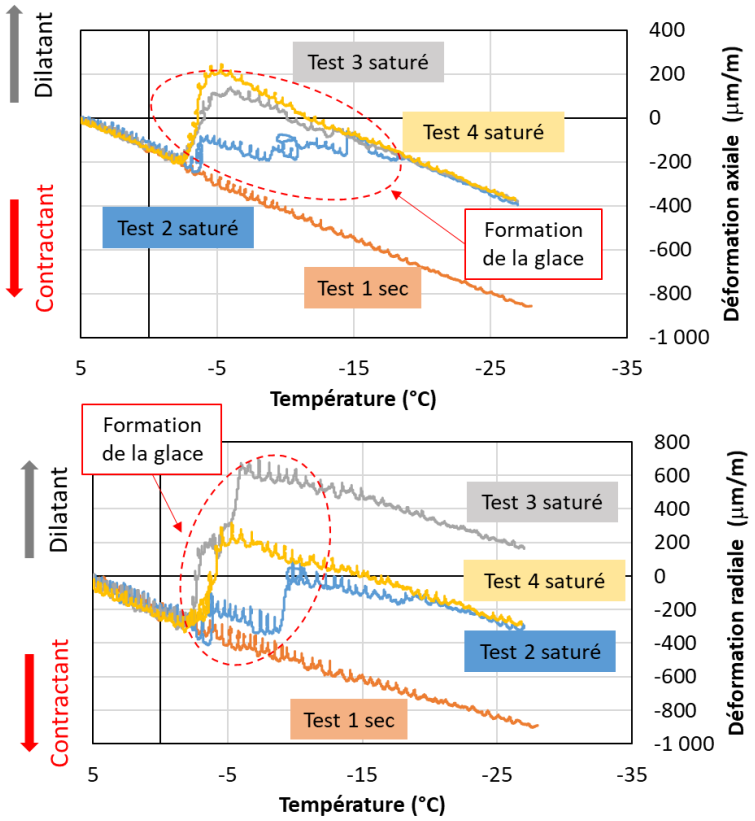


Figure 7-19. Déformation axiale et radiale en fonction de la température mesurée à la surface de l'éprouvette

7.2.3. Effet de l'eau

7.2.3.1. Effet de l'eau sur la déformation axiale, radiale et volumique de l'éprouvette testée durant l'essai TUST

Les résultats des essais TUST montrent que la formation de glace influence significativement le retrait thermique de l'éprouvette lors du refroidissement. Ce changement de phase de l'eau effective dans les pores est la cause des sauts de déformation axiale et radiale observés uniquement lors des essais à l'état saturé.

La Figure 7-20 montre la comparaison entre les sauts de déformation axiale et ceux de déformation radiale des essais TUST. Le saut de déformation axiale a une bonne répétabilité et sa valeur moyenne est environ de 500µm/m. Quant à la déformation radiale, les sauts varient entre 600µm/m et 1100 µm/m.

Ces premiers résultats semblent indiquer que la dilatation de l'enrobé liée au changement de phase de l'eau n'est pas isotrope. Cependant, les mesures de la déformation radiale des éprouvettes saturées ont une faible répétabilité. (cf partie 7.1.5-Répétabilité de l'essai TSRST). Des investigations supplémentaires sont nécessaires pour confirmer cette observation.

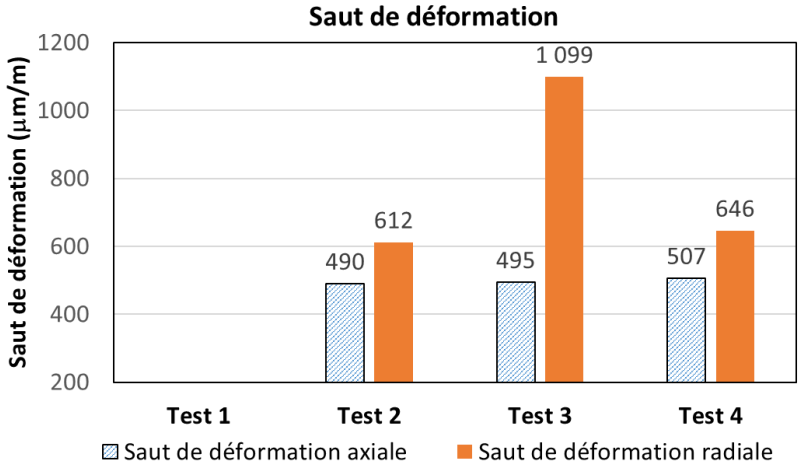
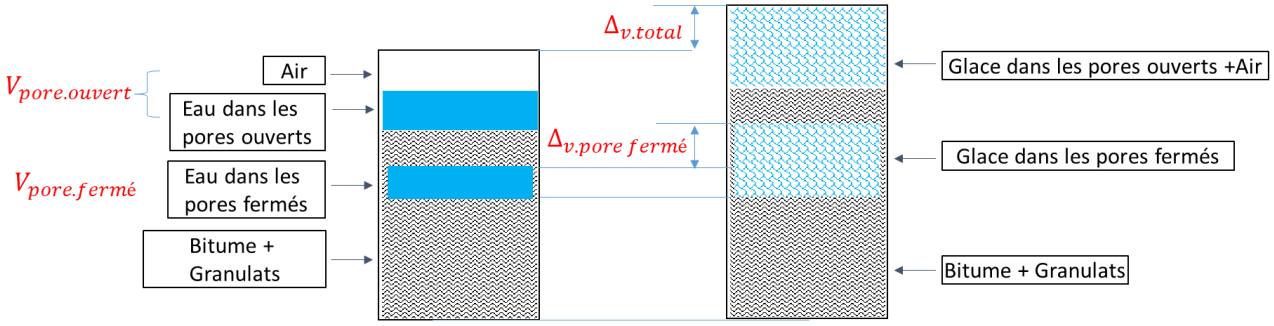


Figure 7-20. Valeur des sauts de déformation axiale et de déformation radiale lors du gel de l'eau dans les essais TUST

7.2.3.2. Quantification de l'eau effective

Avec les données obtenues dans les parties précédentes, la quantité de l'eau dans les pores fermés peut être calculée. Pour faire le calcul, les hypothèses ci-dessous sont utilisées :

- Hypothèse 1 : Dans les pores partiellement saturés ou ouverts, l'augmentation de volume de ces pores ne se répercute pas sur la variation volumique totale de l'éprouvette
- Hypothèse 2 : Les pores « fermés » sont saturés à 100%. Le changement de phase de l'eau effective de l'état liquide en glace entraine une dilation volumique ($\Delta_{v(pore\ fermé)}$) qui se répercute entièrement sur la variation volumique totale de l'éprouvette ($\Delta_{v.total}$)



$$Hypothèse\ 1:\ \Delta_{v.pore-overt} = 0$$

$$Hypothèse\ 2:\ \Delta_{v.total} = \Delta_{v.pore-fermé}$$

Figure 7-21. Illustration des hypothèses utilisées pour calculer la quantité d'eau, qui crée une dilatation de l'éprouvette en gelant.

Parmi les 3 essais à l'état saturé sur l'éprouvette SG2A9(6.5), l'essai n°4 donne les courbes de déformation axiale – température et de déformation radiale – température les plus similaires et stables par rapport à l'essai à l'état sec. Il convient d'utiliser les valeurs expérimentales de ce 4ème essai pour le calcul qui suit.

La déformation volumique totale peut être calculée selon la formule donnée dans l' Eq. 7-1

$$\varepsilon_v = \varepsilon_z + 2\varepsilon_r \qquad \text{Eq. 7-1}$$

Où ε_z et ε_r correspondent respectivement au saut de déformation axiale et au saut de déformation radiale de l'essai 4.

La déformation volumique totale peut être aussi calculée selon la formule de l' Eq. 7-2.

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta_{v.total}}{V_{total}} = \frac{\Delta_{v.pore-fermé}}{V_{total}} \qquad \text{Eq. 7-2}$$

A partir de ces équations (Eq. 7-1 et Eq. 7-2), on introduit l'équation Eq. 7-3 pour calculer la variation volumique des pores fermés $\Delta_{v.pore-fermé}$

$$\Delta_{v.pore-fermé} = V_{total} \times (\varepsilon_z + 2\varepsilon_r) \qquad \text{Eq. 7-3}$$

Le changement de phase de l'eau à l'état liquide en glace entraine une augmentation du volume initial occupé par de l'eau d'environ 10% (ici c'est le volume des pores fermés saturés à 100%). On peut donc déterminer la quantité d'eau effective par la formule Eq. 7-4.

$$\mathrm{V}_{eau.eff} = \frac{V_{total} \times (\varepsilon_z + 2\varepsilon_r)}{10\%} \qquad \text{Eq. 7-4}$$

En remplaçant $V_{total} = 741cm^3$; $\varepsilon_z = 507\mu def$; $\varepsilon_z = 646\mu def$; on obtient la quantité d'eau effective $\mathrm{V}_{eau.eff} = 13.3cm^3$. Cette quantité correspond à environ 35% du volume total de l'eau contenue dans l'éprouvette.

CONCLUSIONS

CONCLUSIONS

Les résultats présentés tout au long de ce mémoire conduisent aux principales conclusions suivantes.

1. L'évolution de la teneur en vides (TEV), de la saturation et du volume des éprouvettes lors du conditionnement a été étudiée dans la campagne complémentaire. Les résultats obtenus montrent que:

- Une éprouvette non-conditionnée est sèche (degré de saturation inférieur à 0,5%) après un stockage d'au moins 6 mois dans un bureau.
- Les éprouvettes ne sont que partiellement saturées, malgré la procédure de saturation sous vide appliquée. Le degré de saturation atteint environ 70% et augmente avec la teneur en vides.
- Lors de l'application des cycles gel/dégel, l'éprouvette saturée se dilate d'environ 1% (déformation volumique).
- Dans la phase de séchage effectuée dans un dessiccateur sous vide avec gel de silice, le degré de saturation est inférieur à 5% après 7 jours.
- Durant cette phase de séchage, on a observé une dilatation puis une contraction pour les éprouvettes saturées ayant subi des cycles de gel/dégel. Cependant le bilan global est une augmentation comprise entre 1% et 2% de teneur en vides.

2. Les résultats des essais du module complexe E* montrent que :

- Pour une éprouvette testée à l'état sec :

  - Les effets sur E* des cycles de gel/dégel (cycle FT) avec un nombre de cycles inférieur à 50 sont négligeables.

  - Les effets sur E* des cycles avec réchauffement de type HF et HC sont similaires. Il semble que l'échauffement crée un vieillissement du bitume pour les éprouvettes dont l'enrobé n'a pas été vieilli au préalable. Pour les éprouvettes dont l'enrobé (bitume) a été vieilli avant le compactage, ce phénomène de vieillissement lié aux cycles avec réchauffement n'est pas observé.

- Pour une éprouvette testée à l'état saturé (en réalité partiellement saturée), le comportement VEL du matériau est modifié de la manière suivante :

  - pour les températures négatives, la norme du module complexe de l'éprouvette saturée est supérieure à celle de l'éprouvette sèche (environ 5%)

  - pour les températures positives, la norme de E* est plus faible que celle de l'éprouvette sèche (environ 4%).

  - Les angles de phase restent quasiment identiques entre une éprouvette saturée ou sèche.

- La modélisation VEL des résultats expérimentaux a été réalisée à l'aide du modèle 2S2P1D développé à l'ENTPE. L'analyse des constantes du modèle calibré pour chaque matériau ayant subi un conditionnement différent a permis de quantifier les différents effets sur l'ensemble du comportement VEL (prise en compte de l'ensemble de fréquences et des températures). Les résultats principaux sont résumés ci-dessous.

  - Les constantes k, h, δ, β, C_1 et C_2 dépendent uniquement de la nature du bitume. Ces constantes sont identiques pour le même type de matériau testé, vieilli, d'une part, et non-vieilli, d'autre part, quelles que soient le conditionnement et les conditions d'essai. La caractérisation du vieillissement peut être faite à l'aide des constantes k, h, δ, β.
  - Les constantes E_{00}, E_0, ν_{00}, ν_0 et τ_0 dépendent des caractéristiques du squelette granulaire. En particulier, E_0 évolue linéairement en fonction de la TEV (si la TEV augmente de 1% → E_0 diminue de 1000MPa) tandis que E_{00}, ν_0 et ν_{00} ne semblent pas influencées par la TEV.

3. Les résultats des essais de fatigue montrent que :

- L'effet de 50 cycles de gel/dégel et l'effet de la saturation en eau n'influencent pas significativement le comportement à la fatigue du matériau testé.

4. Les résultats des essais de retrait thermique empêché (TSRST) montrent que :

- Pour les éprouvettes non-vieillies testées à l'état sec :
  - Les conditionnements avec 50FT, 10HF ou 10HC ont tendance à diminuer la contrainte à la rupture par rapport aux conditionnement 0FT et 10FT. Cependant, ces conditionnements ne semblent pas avoir influencé les valeurs de la température et de la déformation radiale à la rupture.
- Pour les éprouvettes non-vieillies testées à l'état saturé :
  - La température de rupture est significativement plus élevée pour les éprouvettes saturées n'ayant subi aucun cycle FT que pour celles sèches.
  - La température de rupture est identique pour les éprouvettes (saturée ou non) ayant subi 10 cycles FT.
  - La déformation radiale à la rupture est toujours supérieure (de l'ordre de 600µm/m) pour les éprouvettes saturées (qui sont moins contractantes) par rapport à celles sèches.

- Pour les éprouvettes vieillies testées à l'état sec :
  - La différence entre 10HF et 10HC n'est pas significative. Seule la déformation radiale à la rupture est plus élevée pour ces éprouvettes par rapport aux éprouvettes non-vieillies ayant subi le même conditionnement. La contrainte et la température à la rupture restent identiques.

5. Les résultats des essais de retrait thermique libre (TUST) montrent que :

- La présence d'eau dans l'enrobé bitumineux lors du refroidissement influence significativement les déformations thermiques du matériau. La déformation axiale varie

d'environ 500µm/m, l'éprouvette étant moins contractante. Quant à la déformation radiale, elle varie entre 600µm/m et 1100µm/m, l'éprouvette étant plus dilatante.

En se basant sur les résultats obtenus, des perspectives à ce travail sont proposées :

Concernant le conditionnement appliqué :

- Les résultats obtenus montrent que les cycles gel/dégel avec réchauffement ont un effet de vieillissement significatif sur le comportement viscoélastique du matériau. Pour découpler l'effet de gel/dégel de l'effet du vieillissement, il est donc conseillé d'appliquer des cycles de gel/dégel sans réchauffement dont l'amplitude de température est inférieure à 40°C.
- Il serait intéressant de répéter la saturation sous vide des éprouvettes après chaque cycle gel/dégel afin que l'eau puisse s'infiltre dans les micropores créés lors de la phase de gel. Cette étape pourrait jouer un rôle important à la création des nouveaux micropores qui contribuent à l'endommagement du matériau testé. Cette procédure allongerait les phases de conditionnement mais il serait possible de conserver un faible nombre de cycles de gel/dégel pour des études en laboratoire.

Concernant l'essai utilisé :

- Les effets des cycles gel/dégel et de l'eau sont non-significatifs dans le domaine des petites déformations et à température positive. Il conviendrait d'étendre les recherches dans le domaine de grande déformation en utilisant des essais destructifs tels que : l'essai de traction directe ou indirecte (essai brésilien).
- A température négative, l'effet de l'eau lors de l'essai de module complexe et de TSRST est significatif. Il pourrait être intéressant de réaliser des essais de fatigue à température négative au lieu de 10°C comme dans cette thèse.

Concernant le matériau et l'éprouvette testée :

- La teneur en vides des éprouvettes utilisées dans cette thèse varie de 5% à 8%. Pour augmenter la répétabilité des essais, il convient de tester des éprouvettes ayant une même teneur en vides.
- Le matériau utilisé dans cette thèse semble moins sensible aux conditionnements appliqués. Il faudrait tester des matériaux différents afin de confirmer les conclusions obtenues.

Les enrobés bitumineux semblent finalement peu sensibles aux effets des cycles de gel/dégel. Les dégradations hivernales ne peuvent donc pas être simplement expliquées par l'endommagement du matériau. Les phénomènes observés sur site (nids de poule, de « départs en plaque » ou « pelade » de la couche de roulement etc.) sont certainement liés à d'autres mécanismes de rupture, en lien avec les structures. Il conviendrait notamment d'étudier plus précisément le rôle des interfaces entre couches de chaussées. L'étude de l'endommagement des interfaces soumis à des cycles de gel/dégel pourrait être une bonne piste pour des recherches futures.

RÉFÉRENCES

A. El-M. Behiry, A. E., 2012. Laboratory Evaluation of Resistance to Moisture Damage in Asphalt Mixtures. *Ain Shams Engineering Journal,* Volume 4, pp. 351-363.

AASHTO T283, 2014. Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage. *American Association of State Highway and Transportation Officials.*

AASHTO R28, 2012. Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV). *American Association of State Highway and Transportation Officials.*

AASHTO R30, 2002. Standard Practice for: Mixture Conditioning of of Hot Mix Asphalt (HMA). *American Association of State Highway and Transportation Officials.*

AASHTO T165, 2002. Standard Test Method for Effect of Water on Compressive Strength of Compacted Bituminous Mixtures. *American Association State Highway and Transportation Officials Standard.*

AASHTO T240, 2013. Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt Binder (Rolling Thin-Film Oven Test). *American Association of State Highway and Transportation Officials.*

AASHTO T324, 2014. Standard Method of Test for: Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA). *American Association of State Highway and Transportation Officials.*

AASHTO T342, 2014. Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA). *American Association of State Highway and Transportation Officials.*

AIPCR, 2012. Prendre en compte les effets du changement climatique sur les chaussées routières. *AIPCR - Association mondiale de la Route,* Issue 2012R06FR, pp. 16-22.

Amini, B. & Tehrani, S. S., 2014. Simultaneous effects of salted water and water flow on asphalt concrete pavement deterioration under freeze–thaw cycles. *International Journal of Pavement Engineering,* 15(5), pp. 383-391.

Applied Research Associates (ARA), 2004. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. *National Cooperative Highway Research Program, USA.*

Arand, W., 1987. Influence of bitumen hardness on the fatigue behavior of asphalt pavements of different thickness due to bearing capacity of subbase, traffic loading and temperature. *Structural of design asphalt pavements,* I(6).

Ashayer Soltani, M. A., 1998. Comportement en fatigue des enrobés bitumineux. *PhD Thesis, INSA de Lyon - ENTPE, France.*

Ashayer Soltani, M. A. & Anderson, D. A., 2005. New Test Protocol to Measure Fatigue Damage in Asphalt Mixtures. *Road Materials and Pavement Design,* 6(4), pp. 485-514.

ASTM D4867, 2004. Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures. *ASTM International.*

Baaj, H., 2002. Comportement des matériaux granulaires traité aux liants hydrocarbonés. *PhD Thesis, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE)- Université de Lyon, France.*

Baaj, H., 2003. Fatigue of mixes: an intrinsic damage approach. *Sixth International RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials, M. N. Partl ed.,* Issue RILEM Publications SARL, pp. 394-400.

Baaj, H., Di Benedetto, H. & Chaverot, P., 2005. Effect of binde characteristics on fatigue of asphalt pavement using an intrinsic damage approach. *Road Materials and Pavement Design,* 6(2), pp. 147-174.

Babadopulos, L. F. A. L. et al., 2019. Influence of loading amplitude on viscoelastic properties of bitumen, mastic and bituminous mixtures. *Road Materials and Pavement Design,* 20(2), pp. 780-796.

Badeli, S., Carter, A. & Doré, G., 2018. Effect of laboratory compaction on the viscoelastic characteristics of an asphalt mix before and after rapid freeze-thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology,* Volume 146, pp. 98-109.

Baek, C., Underwood, B. & Kim, Y., 2012. Effects of Oxidative Aging on Asphalt Mixture Properties. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,* Issue 2296, pp. 77-85.

Bagampadde, U., Isacsson, U. & M. Kiggundu, B., 2004. Classical and Contemporary Aspects of Stripping in Bituminous Mixe. *Road Materials and Pavement Design,* 5(1), pp. 7-43.

Baldi-Sevilla, A., Aguiar-Moya, J. P., Vargas-Nordcbeck, A. & Loria-Salazar, L., 2017. Effect of Aggregate–bitumen Compatibility on Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures. *Road Materials and Pavement Design,* pp. 1-11.

Bell, C. A., Fellin, M. & Wieder, A., 1994. SHRP A390 - Laboratory Aging of Asphalt-Aggregate Mixtures: Field Validation. *National Research Council : Strategic Highway Research Program, USA.*

California Test 307, 2000. Method of Test for Moisture Vapor Susceptibility of Bituminous Mixtures. *Departement of Transportation California.*

Caro S., S., 2009. A Coupled Micromechanical Model of Moisture-induced Damage in Asphalt Mixtures: Formulation and Applications. *PhD Thesis, Texas A&M University, USA.*

Castaneda Pinzon, E. A., 2004. Contribution de méthodes non destructives à l'évaluation de l'effet de l'eau sur les enrobés bitumineux. *PhD Thesis, Université de Nantes, France.*

Corté, J. F. & Di Benedetto, H., 2005. Matériaux Routiers Bitumineux I. *Hermès Lavoisier editions, Paris,* Volume I.

Corté, J. F. & Garnier, P., 2010. Rapport de la mission sur les dégâts occasionnés sur le réseau routier national durant l'hiver 2009-2010. *Conseil général de l'environnement et du developpement durable,* 007210(01).

Das, P. K., 2014. Ageing of Asphalt Mixtures: Micro-scale and Mixture Morphology. *PhD Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Sweden.*

Delaporte, B., Di Benedetto, H., Chaverot, P. & Gauthier, G., 2007. Linear Viscoelastic Properties of Bituminous Materials: from Binders to Mastics. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists,* Issue 76, p. 455–494.

Delaporte, B. et al., 2008. New procedure to evaluate fatigue of bituminous mastics using an annular shear rheometer prototype. *6th RILEM International conference on cracking in pavements, Chicago,* pp. 457-467.

Di Benedetto, H.; De La Roche, C.; Baaj, H.; Pronk, A.; Lundström, R., 2004. Fatigue of bituminous mixtures. *Materials and Structures,* 37(3), pp. 202-216.

Di Benedetto, H. & Corté, J. F., 2005. Matériaux Routiers Bitumineux II. *Hermès Lavoisier editions, Paris,* Volume II.

Di Benedetto, H. & De la Roche, C., 1998. State of the art on stiffness modulus and fatigue of bituminous mixtures.. *Bituminous Binders and Mixes: State of the art and interlaboratory tests on mechanical behaviour and mix design,* Issue In L. Francken & RILEM Report 17, pp. 137-180.

Di Benedetto, H., De La Roche, C. & Francken, L., 1997. Fatigue of bituminous mixtures: Different approaches and RILEM interlaboratory tests. *Proceedings of the 5th int. RILEM Symposium MTBM.*

Di Benedetto, H. & Des Croix, P., 1996. Binder-mix rheology: limits of linear domain, non linear behaviour. *Eurasphalt & Eurobitume Congress.*

Di Benedetto, H., Nguyen, Q. T. & Sauzéat, C., 2011. Nonlinearity, Heating, Fatigue and Thixotropy during Cyclic Loading of Asphalt Mixtures. *Road Materials and Pavement Design,* 12(1), pp. 129-158.

Di Benedetto, H., Olard, F., Sauzéat, C. & Delaporte, B., 2004. Linear Viscoelastic Behaviour of Bituminous Materials: From binders to mixes. *Road Materials and Pavement Design,* Volume 5:sup1, pp. 163-202.

Doan, T. H., 1977. Les études de fatigue des enrobés bitumineux au LCPC. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées,* Volume V, pp. 215-228.

Dony, A. & Ziyani, L., 2016. Etat de l'art sur les procédés de vieillissement accéléré en laboratoire et sur les caractéristiques des agrégats d'enrobés sur les chantiers français - Thème de rattachement : S01 - Procédés de vieillissement. *Projet National MURE – Projet ANR IMPROVMURE - MUlti-Recyclage et Enrobés tièdes, France.*

Doré, G., Konrad, J. M. & Roy, M., 1997. Role of Deicing Salt in Pavement Deterioration by Frost Action. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,* Issue 1596, pp. 70-75.

Faure, M., 1998. Les cours de l'ENTPE: ROUTES Tome 2. *ENTPE ALEAS,* Volume 2.

Feng, D., Yi, J., Wang, D. & Chen, L., 2010. Impact of Salt and Freeze–Thaw Cycles on Performance of Asphalt Mixtures in Coastal. *Cold Regions Science and Technology,* 62(1), pp. 34-41.

Ferry, J. D., 1980. Viscoelastic Properties of Polymers. *John Wiley & Sons.*

Gartner, W., 1989. Asphalt concrete mix design: Development of more rational approaches. *ASTM International,* Volume 1041.

Hammoum, F., 2015. *Présentation au séminaire sur l'Adaptation des infrastructures et des réseaux de trasport au changement climatique: Adaptation des Infrastructures aux évolutions des conditions climatiques.* Champs-sur-Marne, DGITM-AIPCR, Cerema.

Hicks, R. G., Santucci, L. & Aschenbrener, T., 2003. Introduction and Seminar Objectives - Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements: A National Seminar. *Transportation Research Board - TRB, San Diego, California, USA,* pp. 3-35.

Huet, C., 1963. Étude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés. *Thèse de Docteur Ingénieur, Laboratoire central des Ponts et Chaussées, Paris, France.*

Jaskula, P., 2014. The Effect of Water and Frost on Fatigue Life of Asphalt Concrete. *Conference Paper: Advanced Characterization of Asphalt and Concrete Materials, Gdansk University of Technology, Poland.*

Jaskula, P. & Judycki, J., 2008. Verification of the Criteria for Evaluation of Water and Frost Resistance of Asphalt Concrete. *Road Materials and Pavement Design,* 9(sup1), pp. 135-162.

Joaquim de Almeida, A., Momm, L., Trichês, G. & Shinohara, K. J., 2017. Evaluation of the influence of water and temperature on the rheological behavior and resistance to fatigue of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials,* Issue 158, pp. 401-409.

Joly, D. et al., 2010. Les Types de Climats en France, Une Construction Spatiale. *Cybergeo: European Journal of Geography.*

Jung, D. H. & Vinson, T. S., 1994. SHRP-A-400 - Low-temprature cracking: Test selection. *Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC.*

Kakar, M. R., Hamzah, M. O. & Valentin, J., 2015. A Review on Moisture Damages of Hot and Warm Mix Asphalt and Related Investigations. *Journal of Cleaner Production,* Volume 99, pp. 39-58.

Kiggundu, B. M. & Roberts, F. L., 1988. Stripping in HMA Mixtures: State-of-the-Art and Critical Review of Test Methods. *National Center for Asphalt Technology: NCAT Report No. 88-2, USA.*

Kim, Y. R. et al., 2013. Project NCHRP 09-54: Long-Term Aging of Asphalt Mixtures for Performance Testing and Prediction. *National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), USA.*

Kim, Y. R., Little, D. N. & Lytton, R. L., 2003. Fatigue and Healing Characterization of Asphalt Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering,* 15(1), pp. 75-83.

Lamothe, S., 2014. Endommagement d'un enrobe bitumineux partiellement sature en eau ou en saumure soumis a des sollicitations cycliques de gel-dégel et mécaniques. *PhD Thesis, Ecole Nationale des Travaux Pulics de l'Etat (ENTPE)- Université de Lyon, France.*

Lamothe, S., Perraton, D. & Di Benedetto, H., 2015. Contraction and Expansion of Partially Saturated Hot Mix Asphalt Samples Exposed to Freeze–Thaw Cycles. *Road Materials and Pavement Design,* 16(2), pp. 277-299.

Lamothe, S., Perraton, D. & Di Benedetto, H., 2017. Degradation of Hot Mix Asphalt Samples Subjected to Freeze-Thaw Cycles and Partially Saturated with Water or Brine. *Road Materials and Pavement Design,* 18(4), pp. 849-864.

Lau, C. K., Lunsford, K. M., Glover, C. J. & R. R. Davison, 1992. Reaction Rate and Hardening Susceptibilities as Determined from Pressure Oxygen Vessel Aging of Asphalt. *Transportation Research Record,* Issue 1342, pp. 50-75.

LCPC & SETRA, 1994. Conception et dimensionnement des structures de chaussées - Guide technique. *LCPC et SETRA.*

Lei, Z., Tian-shuai, L. & Yi-qiu, T., 2016. The Potential of Using Impact Resonance Test Method Evaluating the Anti-freeze-thaw Performance of Asphalt Mixture. *Construction and Building Materials,* Volume 115, pp. 54-61.

Lottman, R. P., 1978. NCHRP Report 192: Predicting Moisture-Induced Damage to Asphaltic Concrete. *Transportation Research Board (TBR), National Research Council,Washington, D.C., USA.*

Mandel, J., 1969. Aperçu sur les principaux comportements rhéologiques. *La rhéololgie. Masson & Cie, Paris,* pp. 1-17.

Mangiafico, S., 2014. Linear viscoelastic properties and fatigue of bituminous mixtures produced with Reclaimed Asphalt Pavement and corresponding binder blends. *PhD Thesis, Ecole Nationale des Travaux Pulics de l'Etat (ENTPE)- Université de Lyon, France.*

Mangiafico, S., Babadopulos, L. F. A. L., Sauzéat, C. & Di Benedetto, H., 2017. Nonlinearity of bituminous mixtures. *Mechanics of Time-Dependent Materials,* pp. 1-21.

Mauduit, C. et al., 2014. Experimental Investigation of Frost/thaw Effects on Bituminous Mixes under Wet Conditions. *Asphalt Pavements,* p. 139.

Mauduit, C. et al., 2010. Quantifying Expansion Effects induced by Freeze-Thaw cycles in Partially Water Saturated Bituminous Mix: Laboratory Experiments. *Road Materials and Pavement Design,* 11(Sup1), pp. 443-457.

Mauduit, V., Maudit, C., Vulcano-Greullet, N. & Coulon, N., 2007. Dégradations précoces des couches de roulement bitumineuses à la sortie des hivers. *RGRA-Revue Générale des Routes et des Aérodromes,* Volume 859, pp. 99-104.

Mauduit, V. et al., 2013. Dégradation subite des enrobés bitumineux par période de gel/dégel: analyse de cas de terrain et recherche exploratoire en laboratoire. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées LPC, France,* Issue 279, pp. 47-63.

Mehrara, A. & Khodaii, A., 2013. A Review of State of the Art on Stripping Phenomenon in Asphalt Concrete. *Construction and Building Materials,* Volume 38, pp. 423-442.

Mercado, E. A., 2007. Influence of Fundamental Material Propreties and Air Void Structure on Moisture Damage Of Asphalt Mixes. *PhD Thesis, Texas A&M University, USA.*

Mohamed, A. & Magdy, A., 2010. Sensitivity of Untreated Reclaimed Asphalt Pavement to Moisture, Density, and Freeze-Thaw Cycles. *Journal of Materials in Civil Engineering,* 22(12), pp. 1260-1269.

Monismith, C. L., Secor, G. A. & Secor , K. E., 1965. Temperature Induced Stresses and Deformations in Asphalt Conrete. *Proceeding of Association of Asphalt Paving Technologist,* Volume 34, pp. 248-285.

Mouillet, V. et al., 2011. Re-road – End of Life Strategies of Asphalt Pavements: Test Procedures - Methodeologies for Reclaimed Asphalt Binder. *European Commission DG Research.*

MTQ, 2008. Dossier dégel - La protection du réseau routier: une priorité. *Ministère des Transports du Québec.*

N Partl , M.; U Bahia, H.; Canestrari, F.; Di Benedetto, H.; Piber, H.; Sybilski, D., 2012. Advances in interlaboratory testing and evaluation of bituminous materials: State-of-the-art report of the RILEM technical committee 206-ATB. *Springer Science & Business Media,* Volume 9.

N. Kingros, 2008. Modeling of Combined Physical-Mechanical Moisture Induced Damage in Asphaltic Mixes. *PhD Thesis, Delft University, Netherlands.*

N. Partl, M. et al., 2018. Testing and Characterization of Sustainable Innovative Bituminous Materials and Systems: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 237-SIB. *Springer Science & Businesse Media,* Volume 24.

Nadkarni, A., Kaloush, K., Zeiada, W. & Biligiri, K. P., 2009. Using Dynamic Modulus Test to Evaluate Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board,* Issue 2127, pp. 29-35.

NF EN 1097-6, 2014. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau. *Association Française de Normalisation - AFNOR.*

NF EN 12593, 2015. Bitumes et liants bitumineux - Détermination du point de fragilité Fraass. *Association Française de Normalisation - AFNOR.*

NF EN 12697-12, 2008. Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 12 : Détermination de la sensibilité à l'eau des éprouvettes bitumineuses. *Association Française de Normalisation - AFNOR.*

NF EN 12697-24, 2012. Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 24 : Résistance à la fatigue. *Association Française de Normalisation - AFNOR.*

NF EN 12697-26, 2012. Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 26 : Module de rigidité. *Association Française de Normalisation - AFNOR.*

NF EN 12697-29, 2003. Mélanges bitumineux Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 29 : Détermination des dimensions des éprouvettes d'enrobés hydrocarbonés. *Association Française de Normalisation - AFNOR.*

NF EN 12697-31, 2007. Mélanges bitumineux Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 31 : Confection d'éprouvettes à la presse à compactage giratoire. *Association Française de Normalisation - AFNOR.*

NF EN 12697-33, 2007. Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 33: Confection d'eprouvettes au compacteur de plaque. *Association Française de Normalisation - AFNOR.*

NF EN 12697-34, 2012. Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 34 : Essai Marshall. *Association Française de Normalisation - AFNOR.*

NF EN 12697-46, 2013. Mélanges bitumineux - Essais pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 46: fissuration et propriétés à basse température par des essais de traction uniaxiale. *Association Française de Normalisation - AFNOR.*

NF EN 13108-1, 2007. Mélanges bitumineux - Specifications des matériaux - Partie 1: Enrobés bitumineux. *Association Française de Normalisation - AFNOR.*

NF EN 1426, 2007. Bitumes et liants bitumineux - Détermination de la pénétrabilité à l'aiguille. *Association Française de Normalisation - AFNOR.*

NF EN 1427, 2007. Bitumes et liants bitumineux - Détermination du point de ramollissement - Méthode Bille et Anneau. *Association Française de Normalisation - AFNOR.*

NF EN 933-1, 2012. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : Détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage. *Association Française de Normalisation - AFNOR.*

Nguyen, H. M., Pouget, S., Di Benedetto, H. & Sauzéat, C., 2009. Generalization of the Time-Temperature Superposition Principle for bituminous mixtures: experimentation and modeling. *European Journal of Environmental and Civil Engineering,* 13(9).

Nguyen, M. L., 2009. Etude de la fissuration et de la fatigue des enrobés bitumineux. *PhD Thesis, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE)- Université de Lyon, France.*

Nguyen, Q. T., 2011. Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux sous sollicitations cycliques dans les domaines linéaire et non-linéaire. *PhD Thesis, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE)- Université de Lyon, France.*

Nguyen, Q. T., Di Benedetto, H. & Sauzéat, C., 2014. Linear and nonlinear viscoelastic behaviour of bituminous mixtures. *Materials and Structures,* Volume 48, pp. 2339-2351.

Olard, F., 2003. Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à basses températures. *PhD Thesis, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE)- Université de Lyon, France.*

Olard, F. & Di Benedetto, H., 2004. General "2S2P1D" Model and Relation Between the Linear Viscoelastic Behaviours of Bituminous Binders and Mixes. *Road Materials and Pavement Design,* 4(2/2003), pp. 185-224.

Özgan, E. & Serin, S., 2013. Investigation of Certain Engineering Characteristics of Asphalt Concrete Exposed to Freeze–Thaw Cycles. *Cold Regions Science and Technology,* Volume 85, pp. 131-136.

Partl, ,. M. N. et al., 2012. STAR 206-ATB: Advances in Interlaboratory Testing and Evaluation of Bituminous Materials. *Report of the RILEM Technical Committee 206-ATB unedited version,* Issue Springer Science & Business Media.

Pedraza, A., 2018. Propriétés thermomécaniques d'enrobés multi-recyclés. *PhD Thesis, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE)- Université de Lyon, France.*

Perraton, D., Di Benedetto, H., Sauzéat, C., Hofko, B., Graziani, A., Nguyen, Q. T., Pouget, S., D. Poulikakos, L., Tapsoba, N; Grenfell, J., 2016. 3Dim experimental investigation of linear viscoelastic properties of bituminous mixtures. *Materials and Structures,* 49(11), pp. 4813-4829.

Petersen, J. C., Branthaver, J. F., Robertson, R. E., Michael Harnsberger, P., Duvall, J. J., Keith Ensley, E., 1993. Effects of Physicochemical Factors on Asphalt Oxidation Kinetics. *Transportation Research Record,* Issue 1391, pp. 1-10.

Petersen, J. C., 1993. Asphalt Oxidation – An Overview Including a New Model for Oxidation Proposing That Physicochemical Factors Dominate the Oxidation Kinematics. *Fuel Science and Technology International,* 11(1), pp. 57-87.

Pham, N. H., 2014. Etude thermomécanique avancée de différents types d'enrobés recyclés tièdes avec additifs. *PhD Thesis, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE)- Université de Lyon, France.*

Pham, N. H. et al., 2015. Analysis and modeling of 3D complex modulus tests on hot and warm bituminous mixtures. *Mechanics of Time-Dependent Materials,* 19(2), p. 167–186.

Phan, C. V., 2016. Comportement thermomécanique des matériaux bitumineux traités à la chaux. *PhD Thesis, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE)- Université de Lyon, France.*

Piau, J. M., Chupin, O. & Chabot, A., 2018. Présentation : " Chaussées et interfaces: 1. viscosité des interfaces; 2. pelades sous gel/dégel". *JTR - Journées Techniques Routes.*

Ramirez Cardona, A. D., 2016. Characterisation of Thermomechanical Properties of Bituminous Mixtures Used for Railway Infrastructures. *PhD Thesis, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE)- Université de Lyon, France.*

Ramirez Cardona, A. D. et al., 2017. Influence of Moisture Conditioning on Linear Viscoelastic Behaviour of Bituminous Mixtures Used For Railway Trackbeds. *Journal of Testing and Evaluation,* 45(1), pp. 40-50.

Robert A., E., Robert H., J. & Edmund A., W., 1989. Pothole Primer: A Pulic Administrator's Guide to Undestanding and Managing the Pothole Problem. *US Army Corps of Engineers—Cold Regions Research & Engineering Laboratory,* Issue Report 81-21.

Salençon, J., 2009. Viscoélasticité pour le calcul des structures. *Palaiseau & Presses des Ponts et Chaussées.*

Sayegh, G., 1965. Contribution à l'étude des propriétés viscoélastiques des bitumes purs et des bétons bitumineux. *PhD Thesis,Faculté des Sciences de Paris, France.*

Si, W. et al., 2014. Reliability-based Assessment of Deteriorating Performance to Asphalt Pavement under Freeze–Thaw Cycles in Cold Regions. *Construction and Building Materials,* Volume 68, pp. 572-579.

Solaimanian, M., Harvey, J., Tahmoressi, M. & Tandon, V., 2003. Test Methods to Predict Moisture Sensitivity of Hot-Mix Asphalt Pavements. *Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements: A National Seminar,* pp. 77-110.

Sol-Sánchez, M., Moreno-Navarro, F., García-Travé, G. & Rubio-Gámez, M. C., 2015. Laboratory Study of The Long-term Climatic Deterioration of Asphalt Mixtures. *Construction and Building Materials,* Volume 8, pp. 32-40.

Tapsoba, N., 2012. Comportement des enrobés bitumineux à base de matériaux recyclés et/ou fabriqués à température réduite. *PhD Thesis, Ecole Nationale des Travaux Pulics de l'Etat (ENTPE)- Université de Lyon, France.*

Tapsoba, N. et al., 2016. 3D Analysis and Modelling of Thermal Stress Restrained Specimen Test on Asphalt Mixes with RAP and Roofing Shingles. *Construction and Building Materials,* Issue 120, p. 393–402.

Tapsoba, N., Sauzéat, C. & Di Benedetto, H., 2013. Analysis of Fatigue Test for Bituminous Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering,* 25(6), pp. 701-710.

Terrel, R. L. & Al-Swailmi, S., 1994. Water Sensitivity of Asphalt-Aggregate Mixes: Test Selection. *Strategic Highway Research Program, USA,* Volume SHRP-A/UIR-91-507.

Tran, D. T., Di Benedetto, H. & Sauzéat, C., 2018. Étude bibliographique sur l'endommagement des enrobés bitumineux à l'eau et au gel. *DVDC Rapport N°1: LC/17/DVDC/09.*

Tran, D. T., Di Benedetto, H. & Sauzéat, C., 2019. Endommagement des enrobés bitumineux à l'eau et au gel: Étude bibliographique. *Revue générale des routes et de l'aménagement - RGRA ,* Issue 963.

Tran, D. T., Sauzéat, C. & Di Benedetto, H., 2019. Étude de l'endommagement des enrobés bitumineux à l'eau et au gel - Présentation de la campagne expérimentale et premiers résultats. *DVDC Rapport N°2: LC/18/DVDC/45.*

URF, 2016. FAITS ET CHIFFRES Octobre 2016 Statistiques des Transports. *Union Routière de France,* p. 3.

Van den Bergh, W., 2011. The Effect of Aging on Fatigue and Healing Properties of Bituminous Mortars. *PhD Thesis, Delft University, Netherlands.*

Vu, V. T., 2017. Étude expérimentale et numérique du comportement au gel et au dégel des enrobés bitumineux partiellement saturés. *PhD Thesis, École Centrale de Nantes, France.*

William, M., Landel, R. & Ferry, J., 1955. The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquid. *Journal of American Chesmistry Society,* Volume n°20.

Xu, H., Guo, W. & Tan, Y., 2015. Internal Structure Evolution of Asphalt Mixtures During Freeze–Thaw Cycles. *Materials & Design,* Volume 86, pp. 436-446.

Yang, S., Braham, A., Wang, L. & Wang, Q., 2016. Influence of Aging and Moisture on Laboratory Performance of Asphalt Concrete. *Construction and Building Materials,* Volume 115, pp. 527-535.

Yi, J., Shen, S., Feng, D. & Huang, Y., 2016. Effect of Testing Conditions on Laboratory Moisture Test for Asphalt Mixtures. *Journal of Testing and Evaluation,* 44(2), pp. 856-867.

ANNEXES

1. Caractéristiques des plaques d'enrobé et des éprouvettes 215

2. Essais de module complexe E* 224

2.1. Eprouvettes non-vieillies 224

2.1.1. Eprouvettes non-vieillies sans cycle FT testées à l'état sec (0FT.DRY) 224

2.1.2. Eprouvette non-vieillie sans cycle FT testée à l'état partiellement saturé (0FT.SAT) – SG5C3(7.4)0FT.sat 239

2.1.3. Eprouvettes non-vieillies avec 10 cycles FT testées à l'état sec (10FT.DRY) 243

2.1.4. Eprouvettes non-vieillies avec 50 cycles FT testées à l'état sec (50FT.DRY) 252

2.1.5. Eprouvettes non-vieillies avec 10 cycles HF testées à l'état sec (10HF.DRY) 259

2.1.6. Eprouvette non-vieillie avec 10 cycles HC testées à l'état sec (10HC.DRY) – SG3B3(5.1)10HC 268

2.2. Eprouvettes vieillies 272

2.2.1. Eprouvettes vieillies sans cycle FT testées à l'état sec (A.0FT.DRY) 272

2.2.2. Eprouvettes vieillies saturées sans cycle FT testées à l'état sec (A.0FT(sat).DRY) 280

2.2.3. Eprouvettes vieillies avec 10 cycles HF testées à l'état sec (A.10HF.DRY) 288

2.2.4. Eprouvettes vieillies avec 10 cycles HC testées à l'état sec (A.10HC.DRY) 295

2.3. Ensemble des résultats sur les éprouvettes (non-vieilli et vieilli) testées à l'état sec 304

2.3.1. Résultats dans le plan de Cole-Cole et dans l'espace de Black 304

2.3.2. Courbes maîtresses à 15°C 305

3. Essais de fatigue 306

3.1. Eprouvettes non-vieillies sans cycle FT testées à l'état sec (0FT.DRY) 306

3.1.1. SG1A8(5.2)0FT - 80µm/m 306

3.1.2. SG3B1(5.7)0FT - 80µm/m 307

3.1.3. SG1A2(6.1)0FT - 90µm/m 308

3.1.4. SG3B12(5.9)0FT - 100µm/m 309

3.1.5. SG4B6(7.4)0FT - 100µm/m 310

3.1.6. SG6B7(7.4)0FT - 100µm/m 311

3.1.7. SG3B4(5.7)0FT - 120µm/m 312

3.1. Eprouvettes non-vieillies avec 50 cycles FT (50FT.DRY) 313

3.1.1. SG4B7(7.8)50FT – 80µm/m 313

3.1.2. SG4B5(7.7)50FT – 90µm/m 314

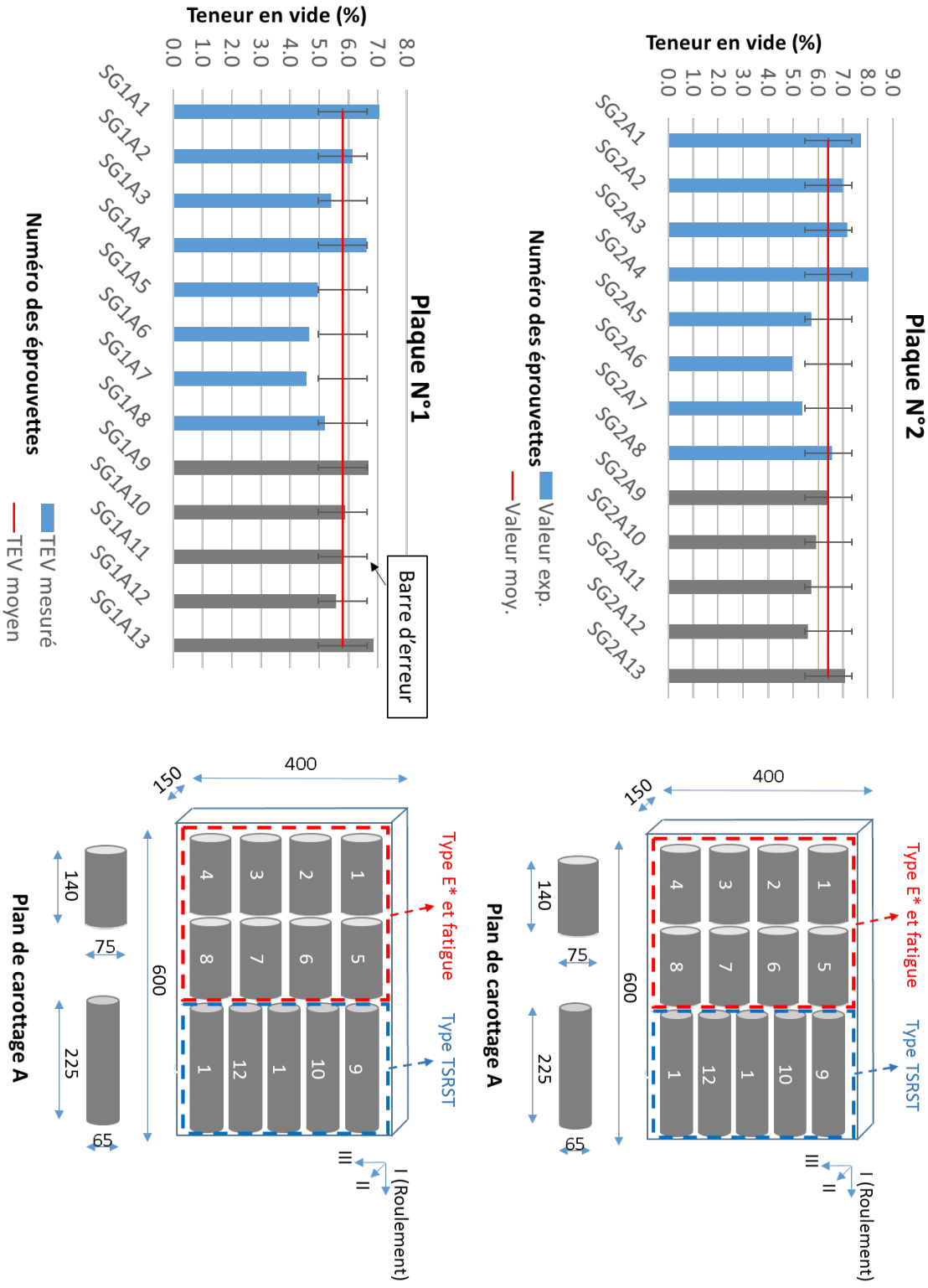
3.1.3. SG5C4(7.6)50FT – 100µm/m 315

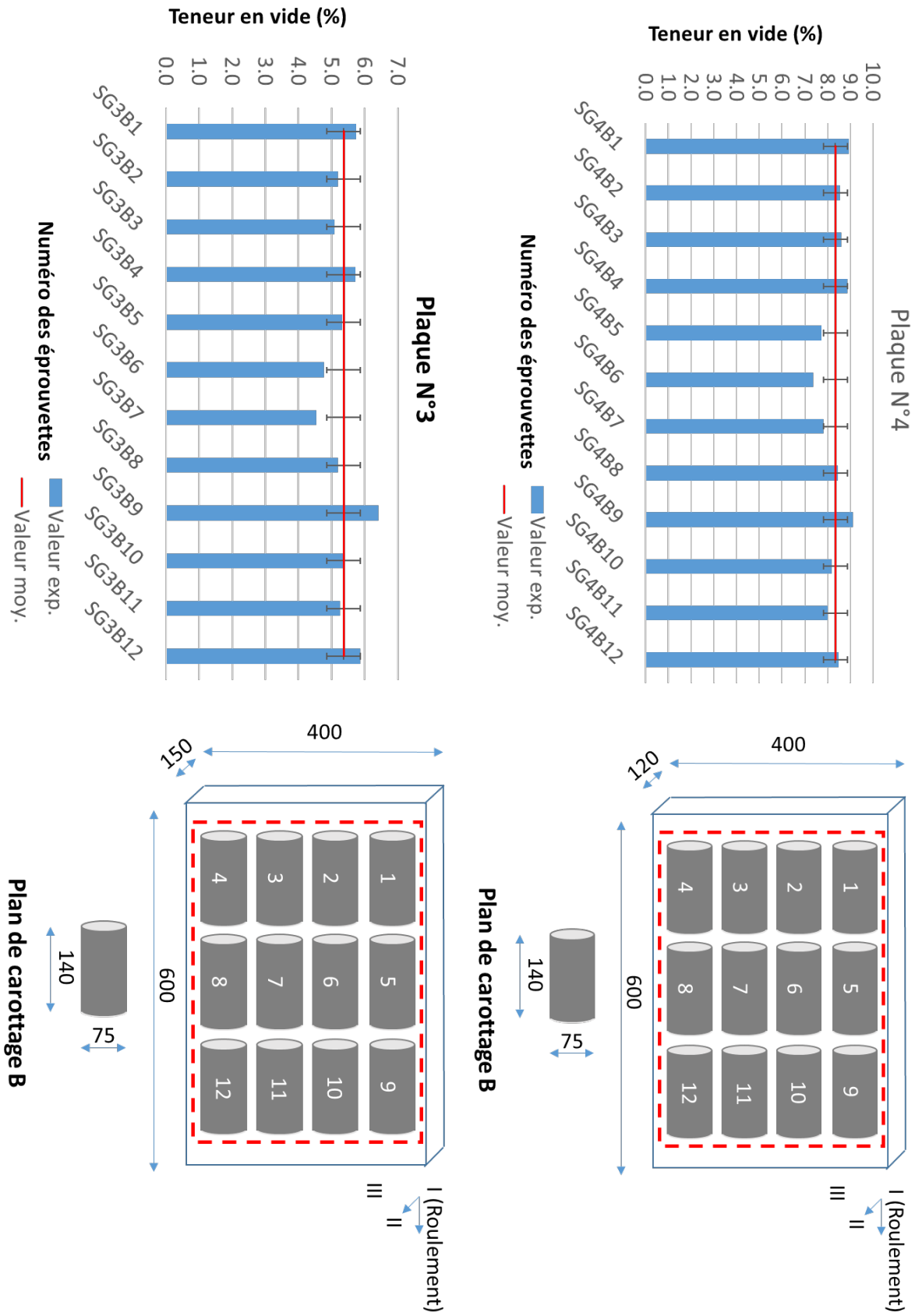
3.1.4. SG6B1(7.5)50FT – 120µm/m 316

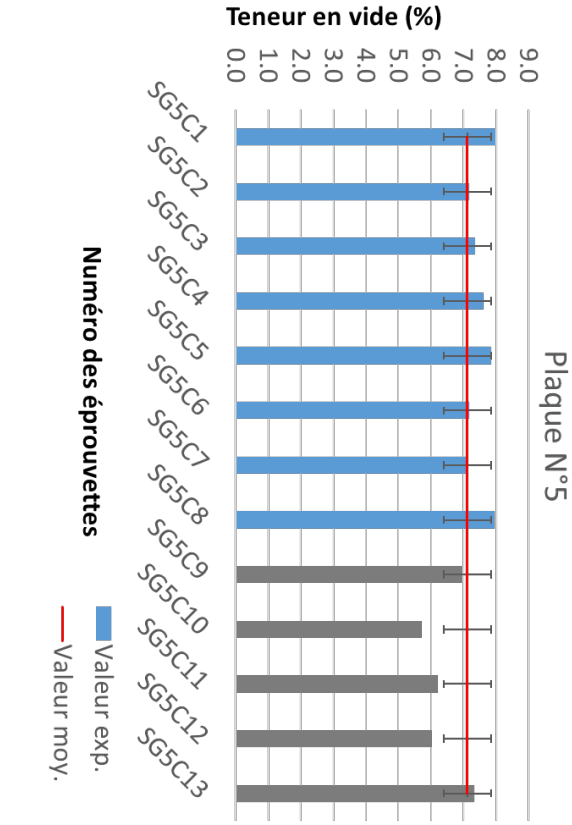
3.2. Eprouvettes non-vieillies testées à l'état partiellement saturé sans cycle FT (0FT.SAT) 317

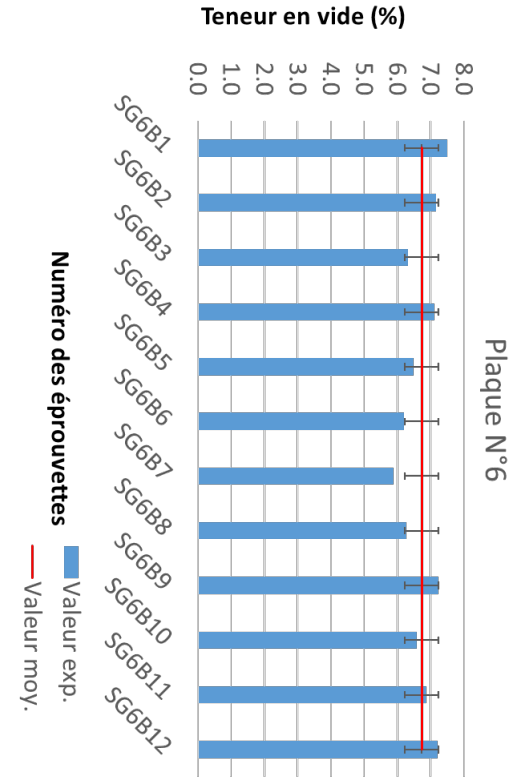
3.2.1. SG1A5(5)0FTsat – 80µm/m 317
3.2.2. SG4B11(8)0FTsat – 80µm/m 318
3.2.3. SG5C5(7.9)0FTsat – 100µm/m 319
3.2.4. SG5C8(7.9)0FTsat – 120µm/m 320
4. Essais TSRST 321
4.1. Eprouvettes non-vieillies 321
4.1.1. Eprouvettes non-vieillies sans cycle FT testées à l'état sec (0FT.DRY) 321
4.1.2. Eprouvettes non-vieillies avec 10 cycles FT testées à l'état sec (10FT.DRY) 324
4.1.3. Eprouvettes non-vieillies avec 50 cycles FT testées à l'état sec (50FT.DRY) 327
4.1.4. Eprouvettes non-vieillies avec 10 cycles HF testées à l'état sec (10HF.DRY) 330
5. Annexe de la campagne X 332
5.1. Sous-campagne X.a 332
5.2. Sous-campagne X.b 333
5.3. Sous-campagne X.c 334
5.4. Sous-campagne X.d 335
5.5. Sous-campagne X.e 336

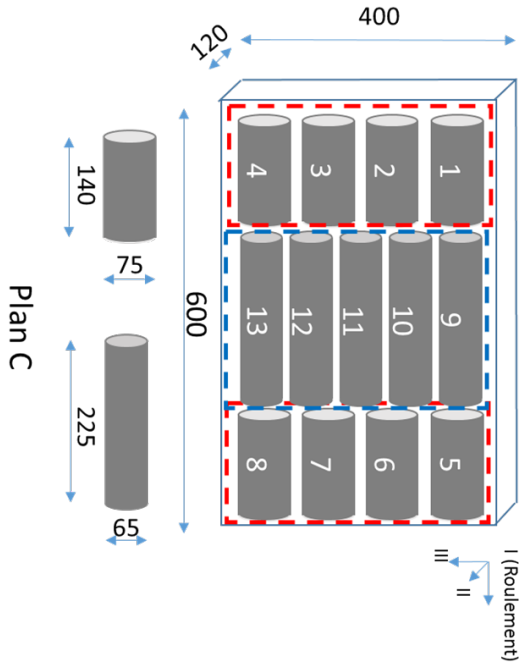
1. Caractéristiques des plaques d'enrobé et des éprouvettes

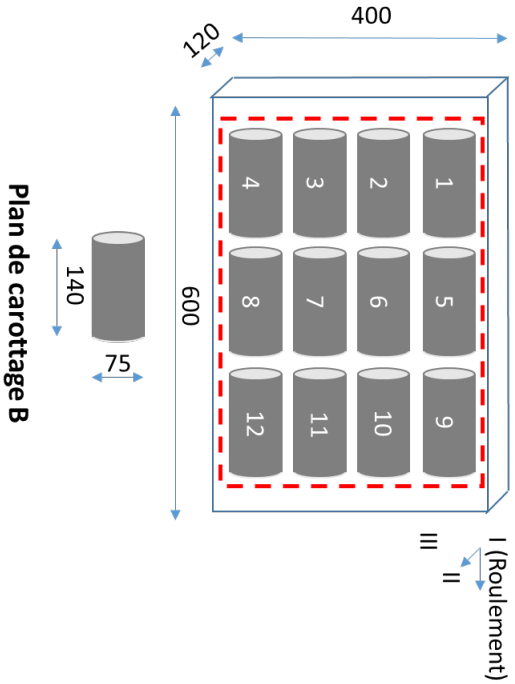


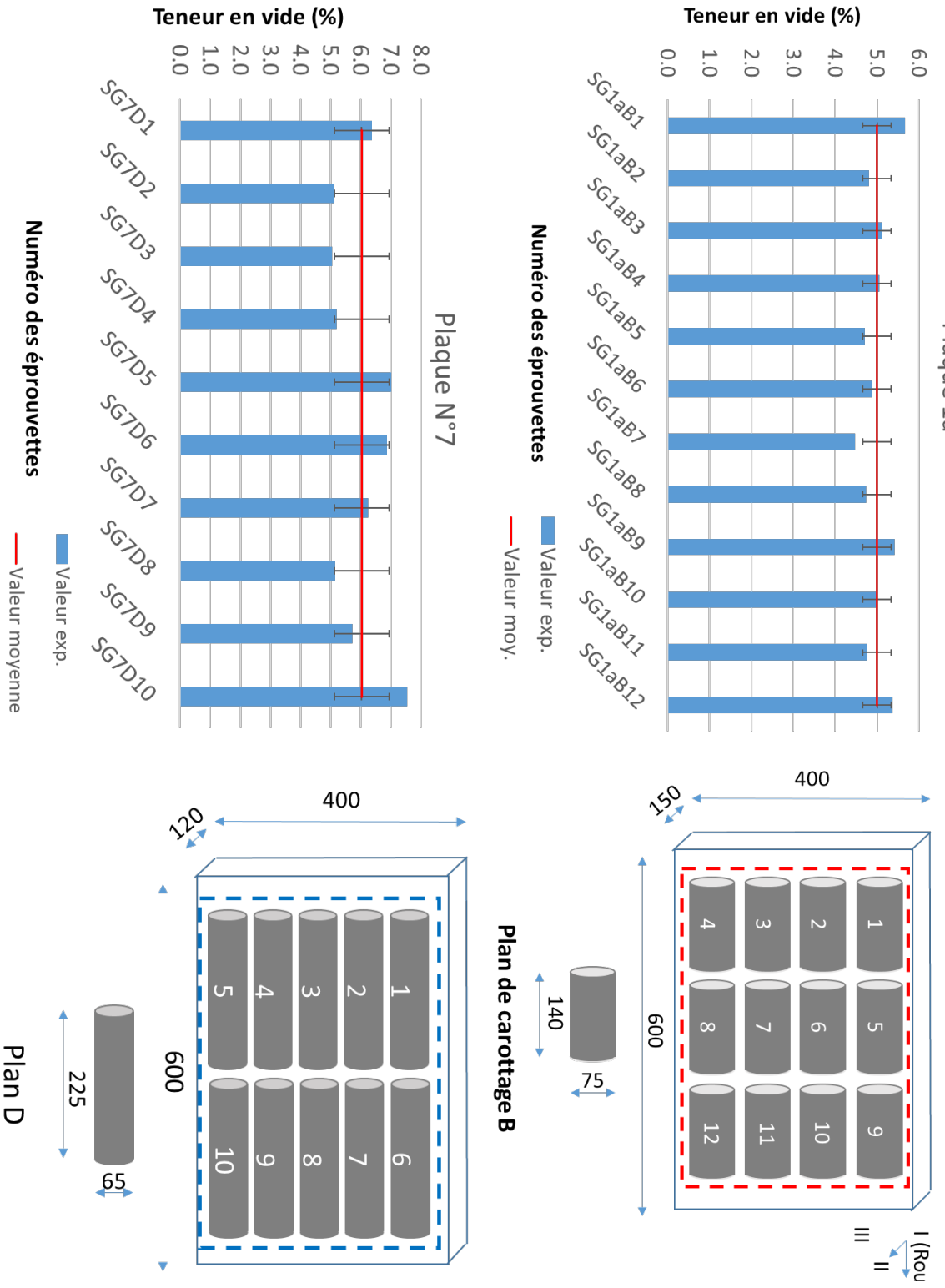

Teneur en vide (%)
Plaque N°4
Numéro des éprouvettes
Valeur exp.
Valeur moy.
Plan de carottage B
I (Roulement)
II
III
400
120
600
140
75
Teneur en vide (%)
Plaque N°3
Numéro des éprouvettes
Valeur exp.
Valeur moy.
Plan de carottage B
I (Roulement)
II
III
400
150
600
140
75

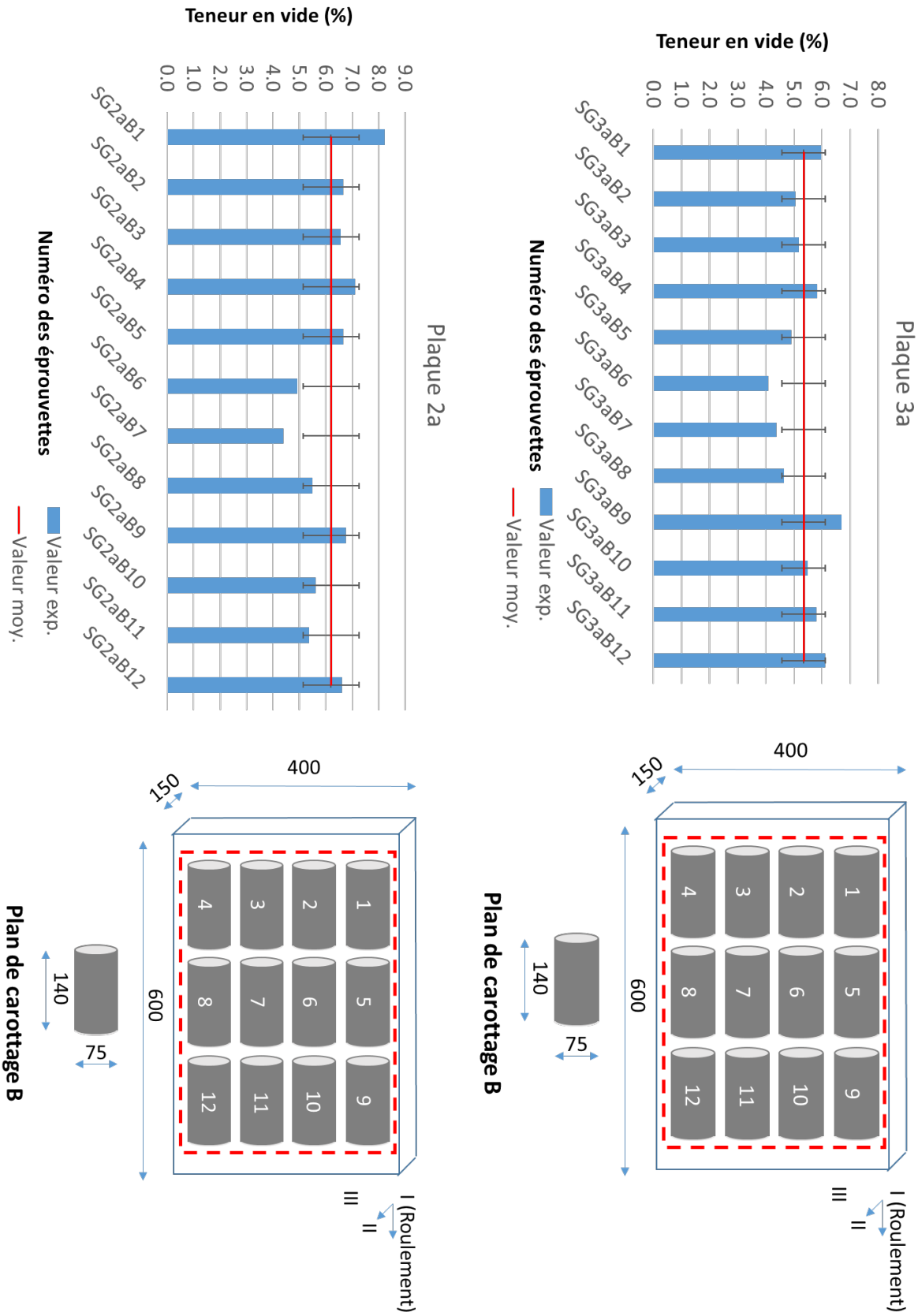

Teneur en vide (%)
0.0
1.0
2.0
3.0
4.0
5.0
6.0
7.0
8.0
9.0
SG5C1
SG5C2
SG5C3
SG5C4
SG5C5
SG5C6
SG5C7
SG5C8
SG5C9
SG5C10
SG5C11
SG5C12
SG5C13
Numéro des éprouvettes
Valeur exp.
Valeur moy.
Plaque N°5

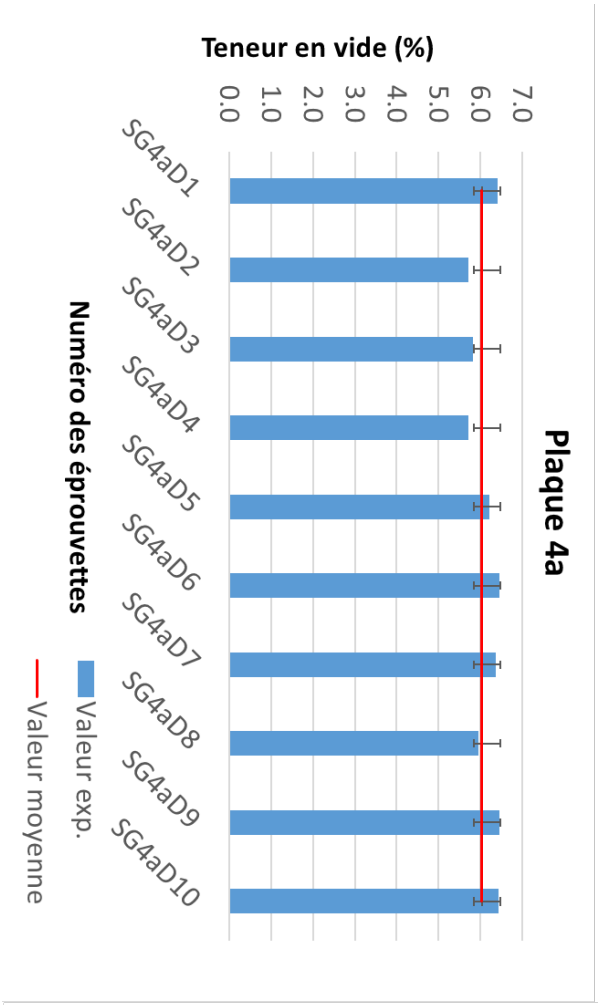

Teneur en vide (%)
0.0
1.0
2.0
3.0
4.0
5.0
6.0
7.0
8.0
SG6B1
SG6B2
SG6B3
SG6B4
SG6B5
SG6B6
SG6B7
SG6B8
SG6B9
SG6B10
SG6B11
SG6B12
Numéro des éprouvettes
Valeur exp.
Valeur moy.
Plaque N°6

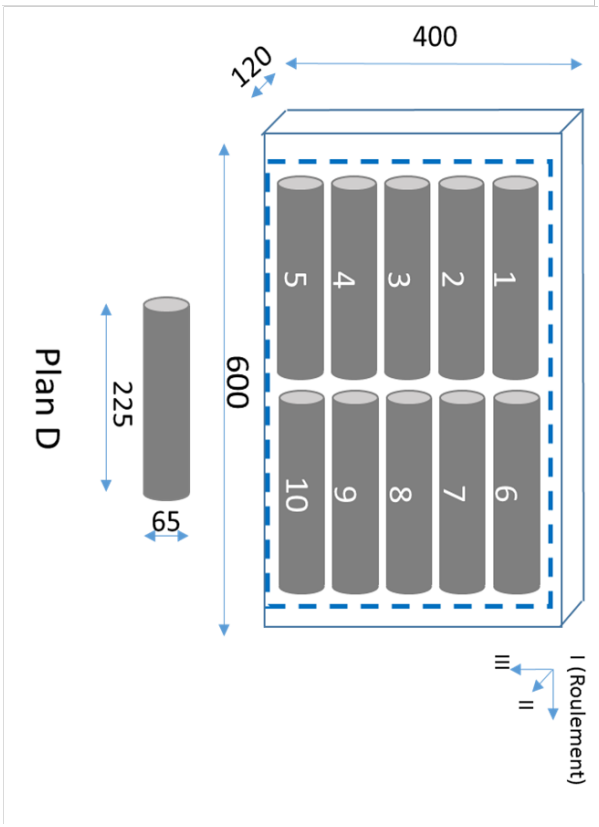

Plan C
400
120
600
140
75
225
65
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
I (Roulement)
II
III


Plan de carottage B
400
120
600
140
75
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
I (Roulement)
II
III


Teneur en vide (%)
Plaque 1a
Numéro des éprouvettes
Valeur exp.
Valeur moy.
Plan de carottage B
Teneur en vide (%)
Plaque N°7
Numéro des éprouvettes
Valeur exp.
Valeur moyenne
Plan D


Teneur en vide (%)
Plaque 3a
SG3aB1
SG3aB2
SG3aB3
SG3aB4
SG3aB5
SG3aB6
SG3aB7
SG3aB8
SG3aB9
SG3aB10
SG3aB11
SG3aB12
Numéro des éprouvettes
Valeur exp.
Valeur moy.
Plan de carottage B
400
150
600
140
75
I (Roulement)
II
III
Teneur en vide (%)
Plaque 2a
SG2aB1
SG2aB2
SG2aB3
SG2aB4
SG2aB5
SG2aB6
SG2aB7
SG2aB8
SG2aB9
SG2aB10
SG2aB11
SG2aB12
Numéro des éprouvettes
Valeur exp.
Valeur moy.
Plan de carottage B
400
150
600
140
75
I (Roulement)
II
III


Teneur en vide (%)
0.0
1.0
2.0
3.0
4.0
5.0
6.0
7.0
SG4aD1
SG4aD2
SG4aD3
SG4aD4
SG4aD5
SG4aD6
SG4aD7
SG4aD8
SG4aD9
SG4aD10
Numéro des éprouvettes
Valeur exp.
Valeur moyenne
Plaque 4a


400
120
600
225
65
Plan D
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
I (Roulement)
II
III

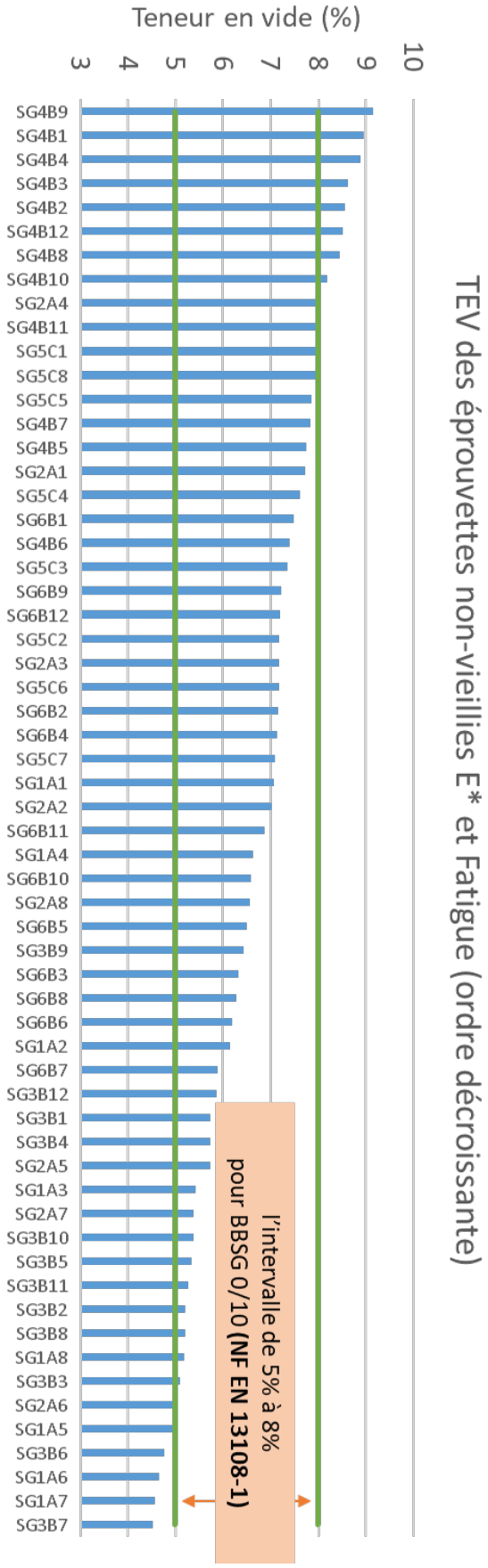


Figure 1-1. Choix des éprouvettes non-vieillies type E* et fatigue

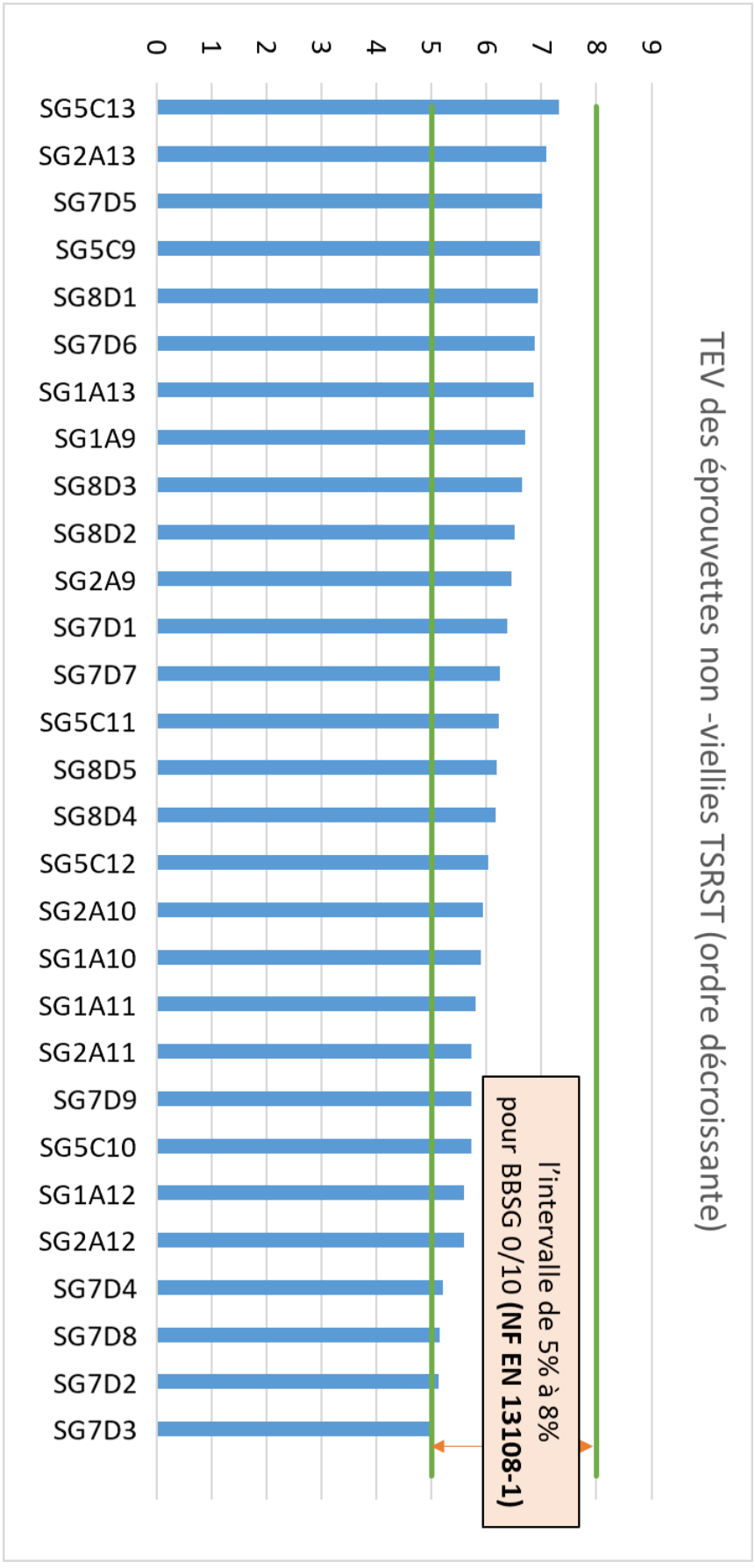


Figure 1-2. Choix des éprouvettes non-vieillies type TSRST

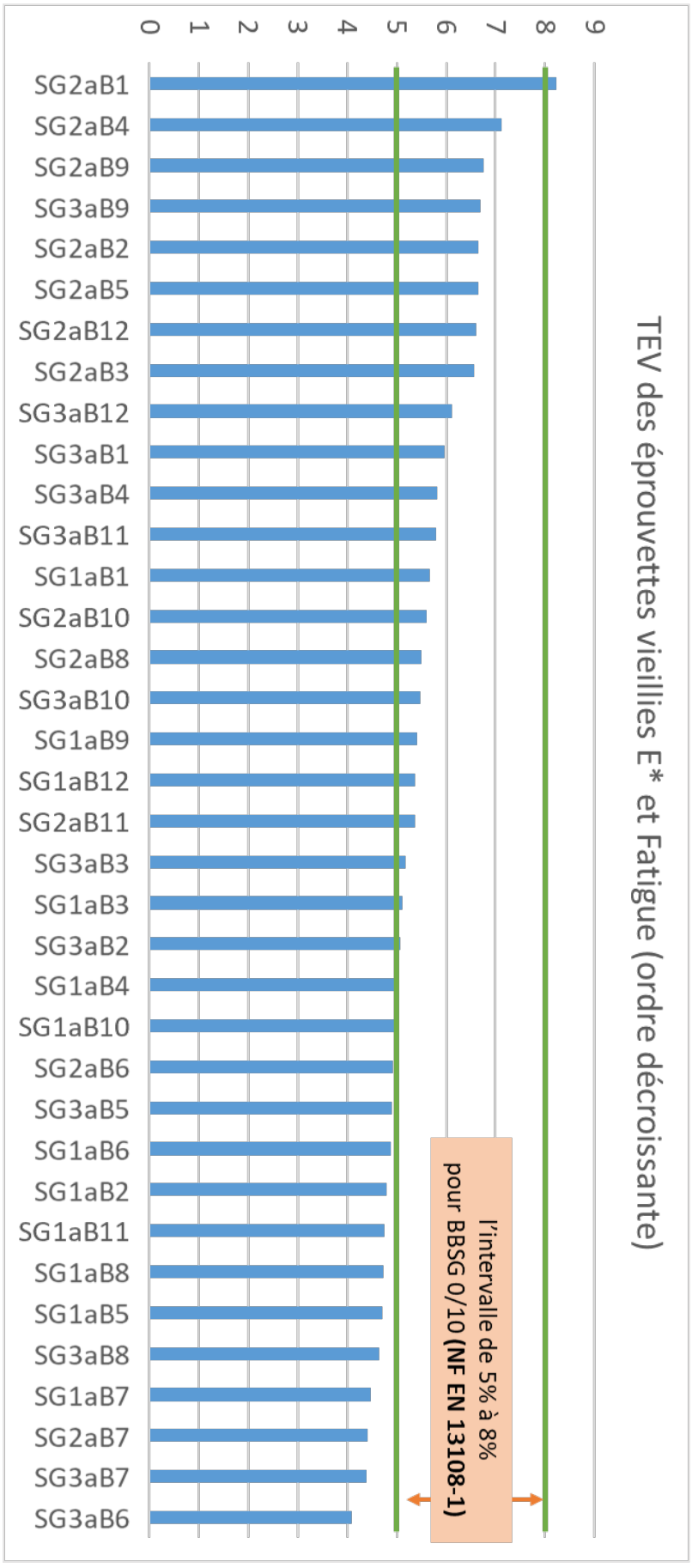


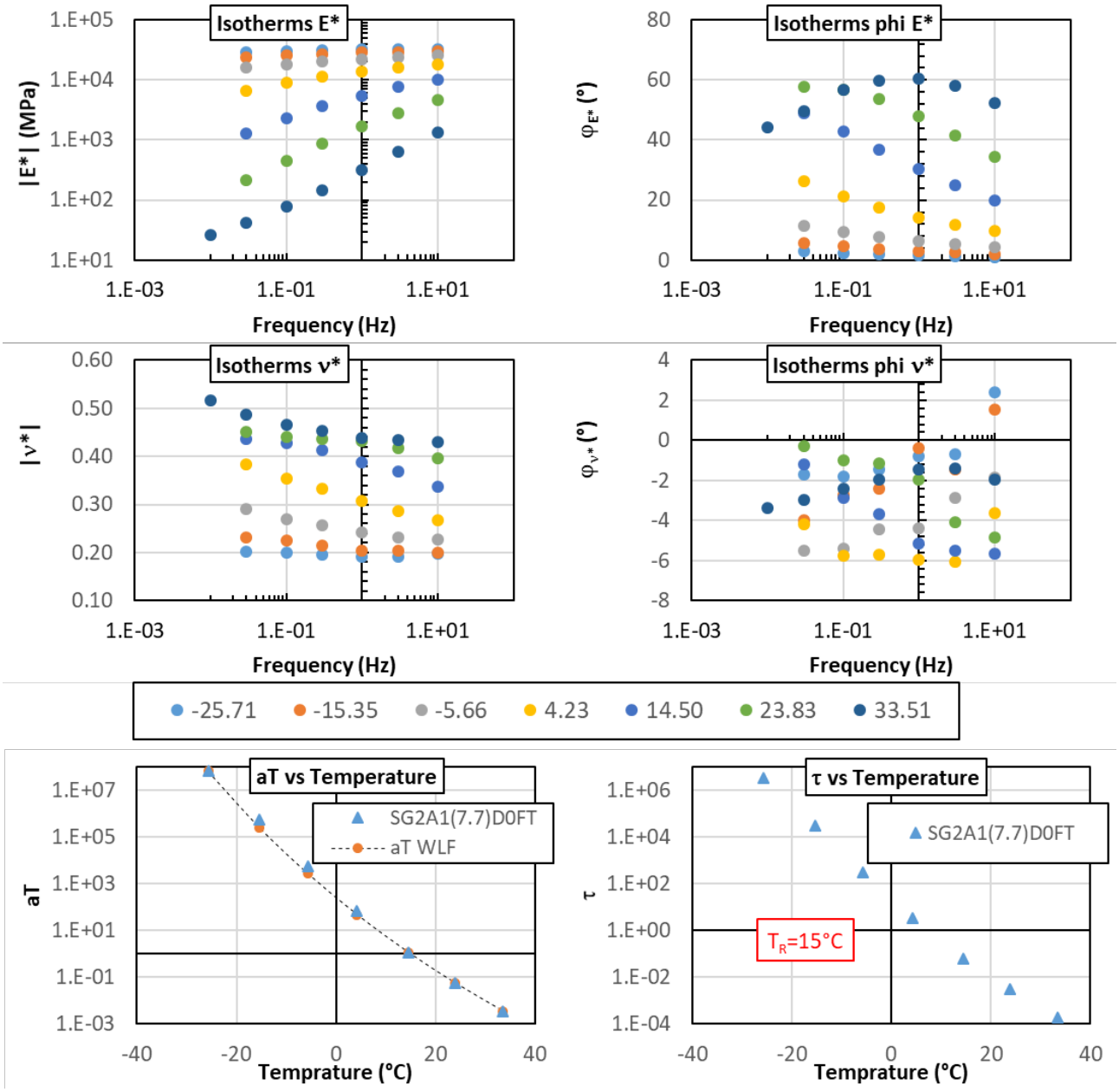
Figure 1-3. Choix des éprouvettes vieillies type E* et fatigue

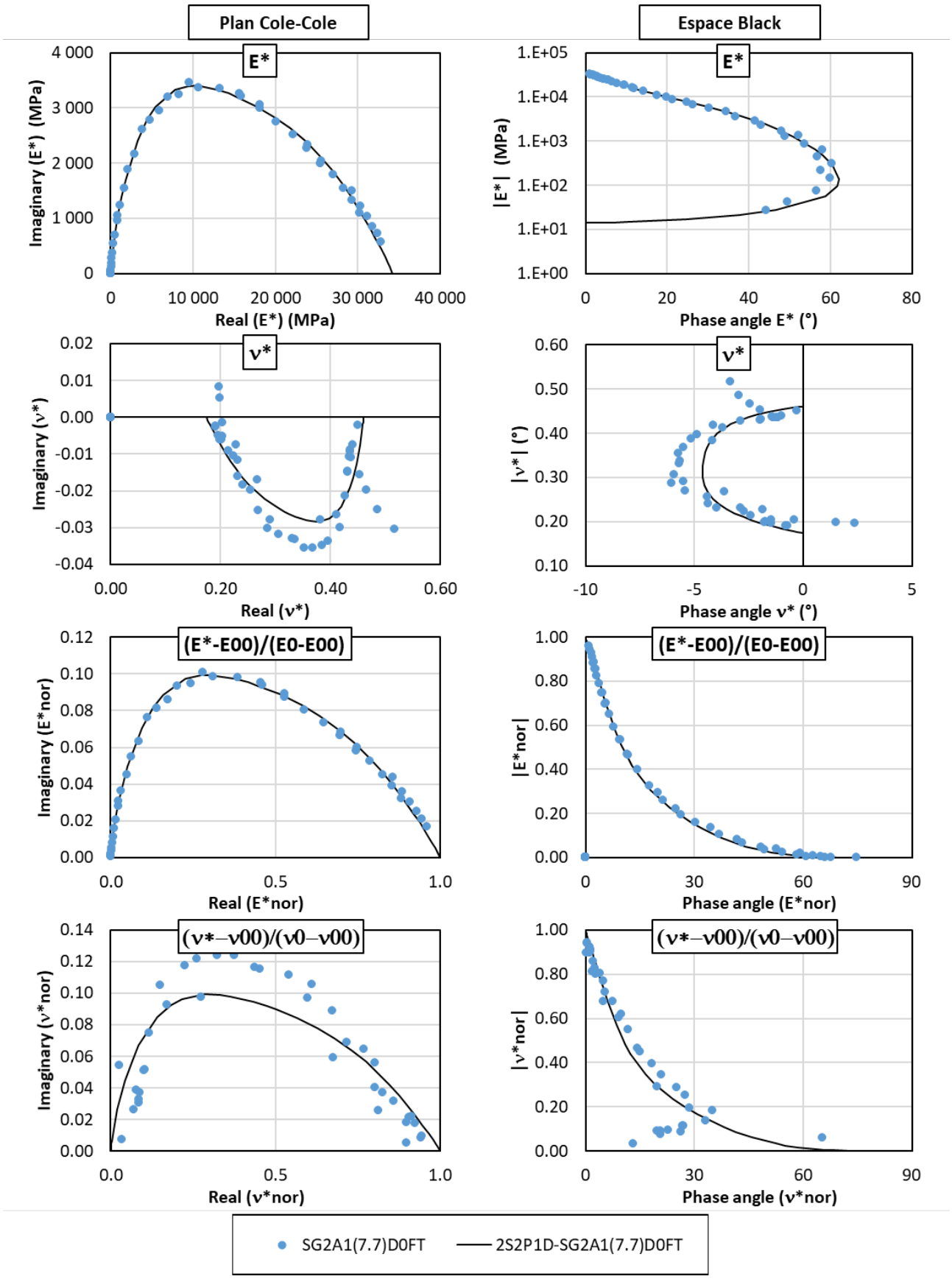
2. Essais de module complexe E*

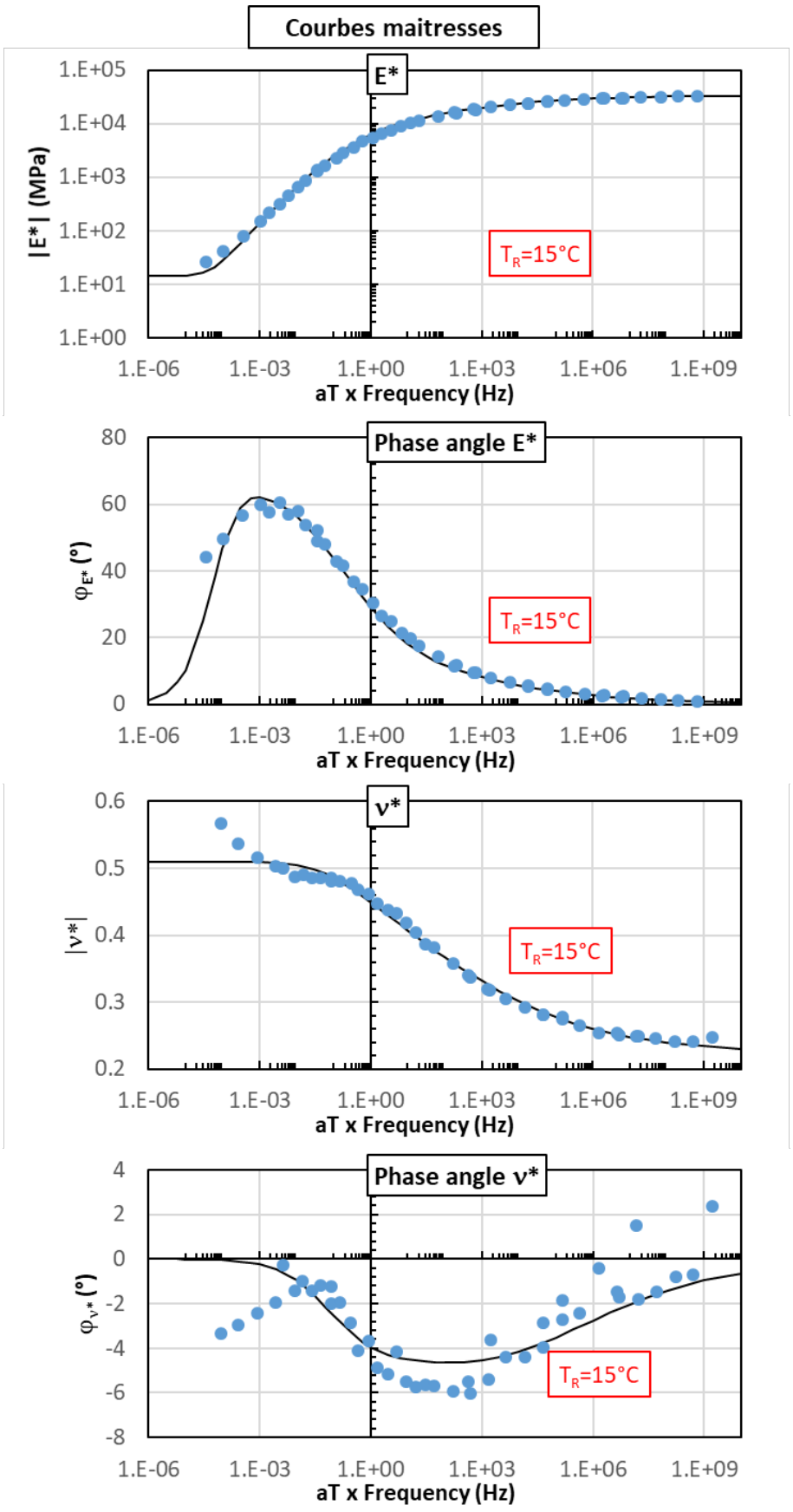
2.1. Eprouvettes non-vieillies

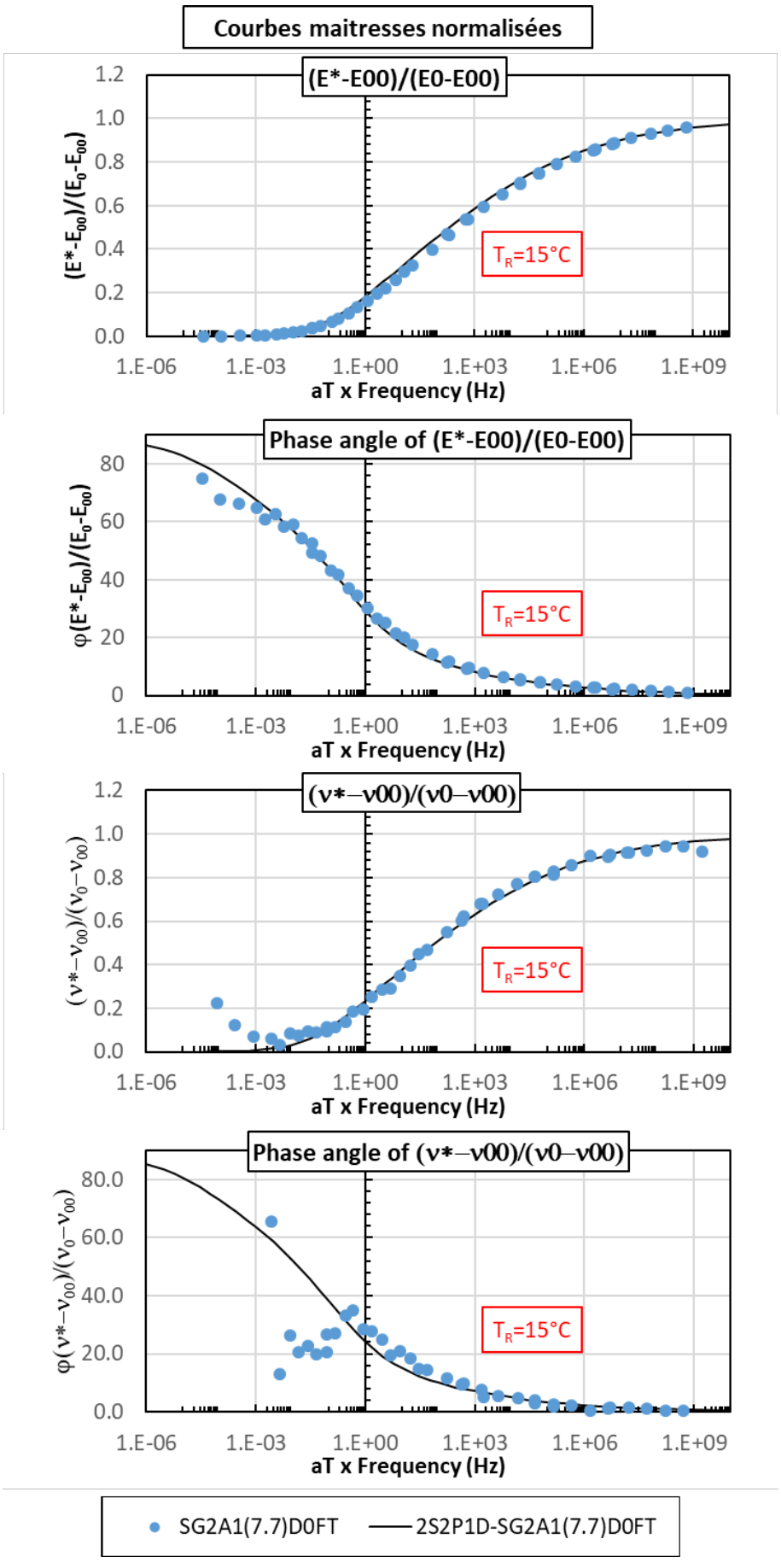
2.1.1. Eprouvettes non-vieillies sans cycle FT testées à l'état sec (0FT.DRY)

2.1.1.1. SG2A1(7.7)D0FT

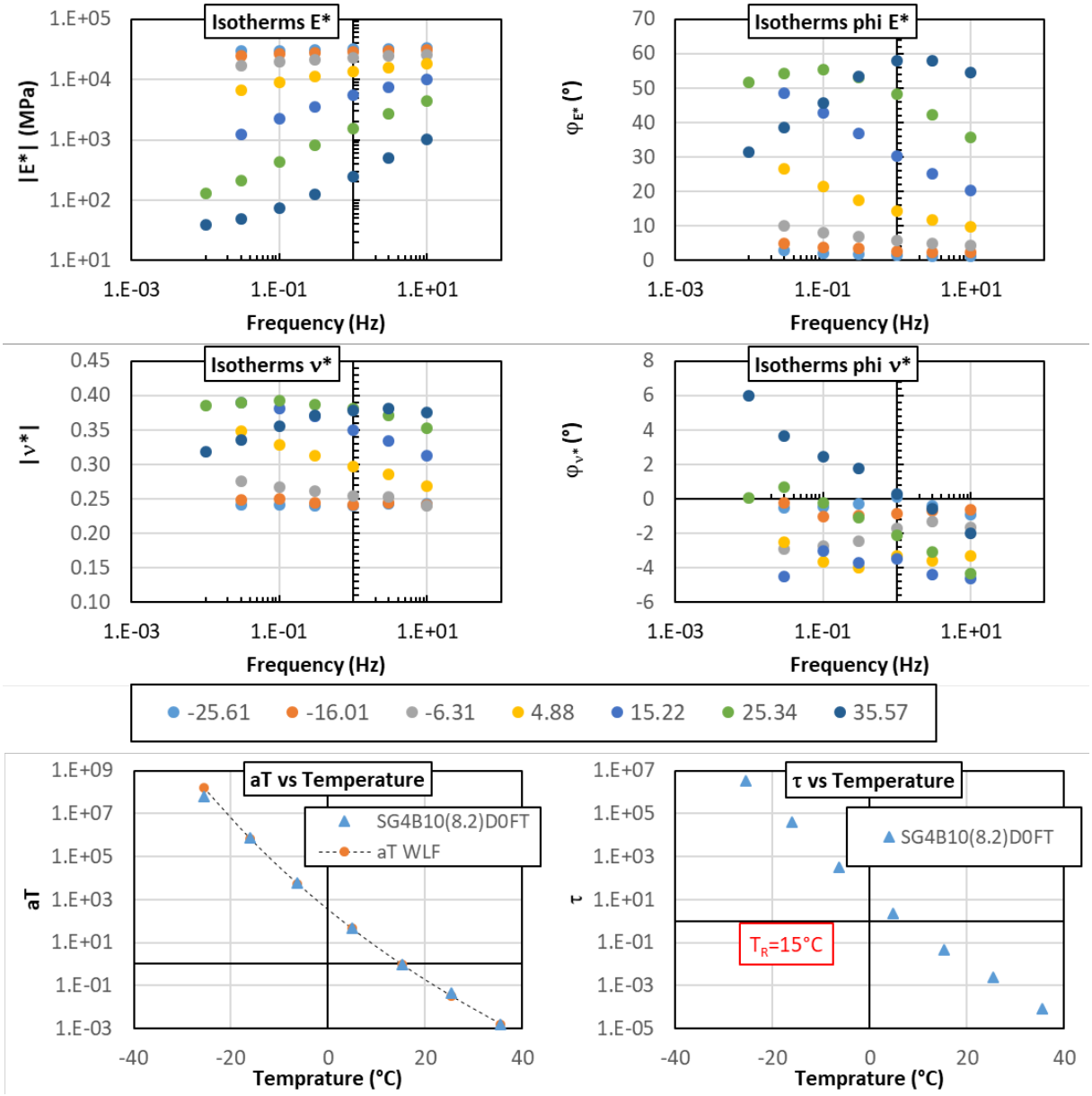


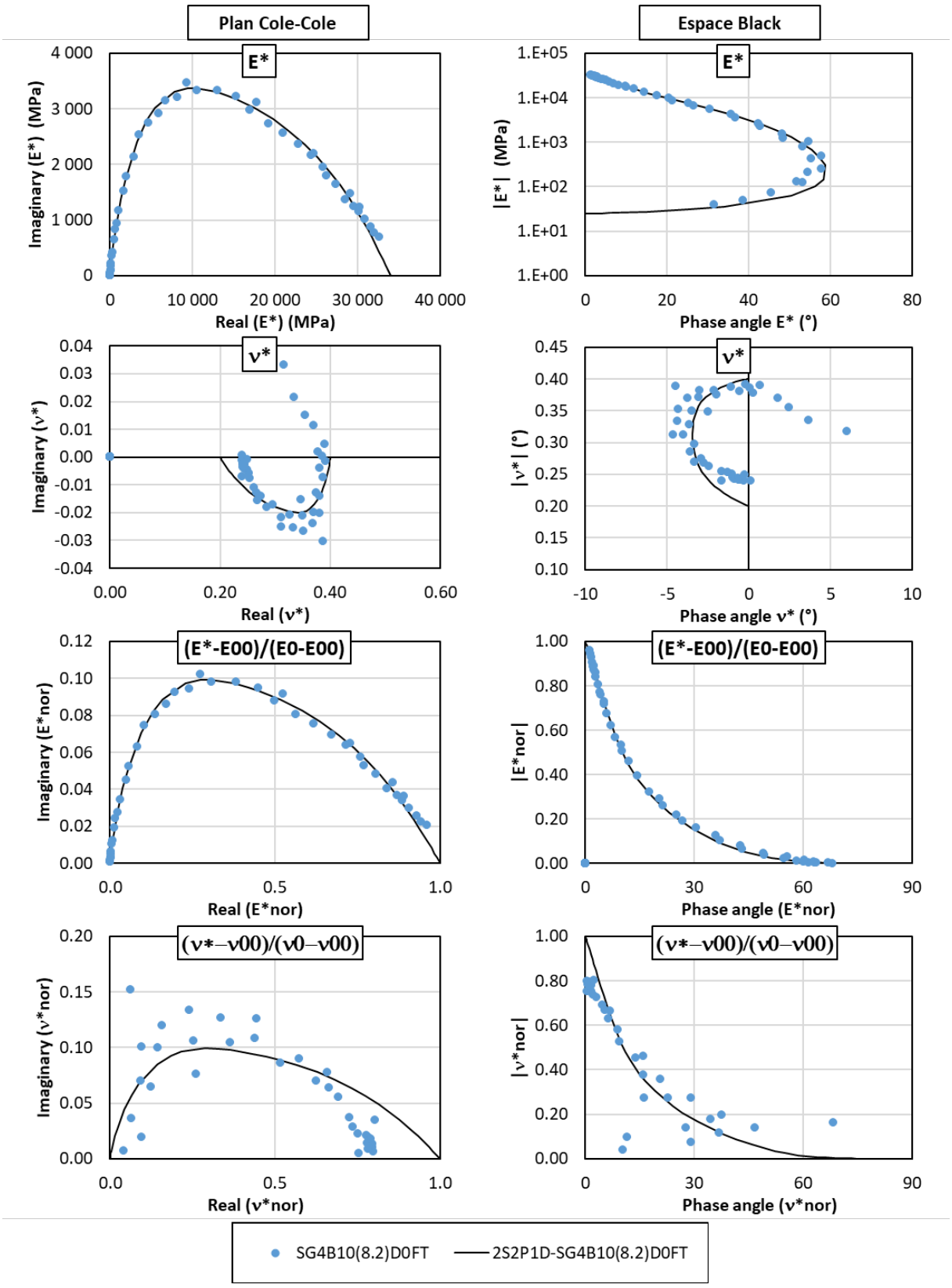

Plan Cole-Cole
Espace Black
E*
Imaginary (E*) (MPa)
Real (E*) (MPa)
|E*| (MPa)
Phase angle E* (°)
ν*
Imaginary (ν*)
Real (ν*)
|ν*| (°)
Phase angle ν* (°)
(E*-E00)/(E0-E00)
Imaginary (E*nor)
Real (E*nor)
|E*nor|
Phase angle (E*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
Imaginary (ν*nor)
Real (ν*nor)
|ν*nor|
Phase angle (ν*nor)
SG2A1(7.7)D0FT
2S2P1D-SG2A1(7.7)D0FT

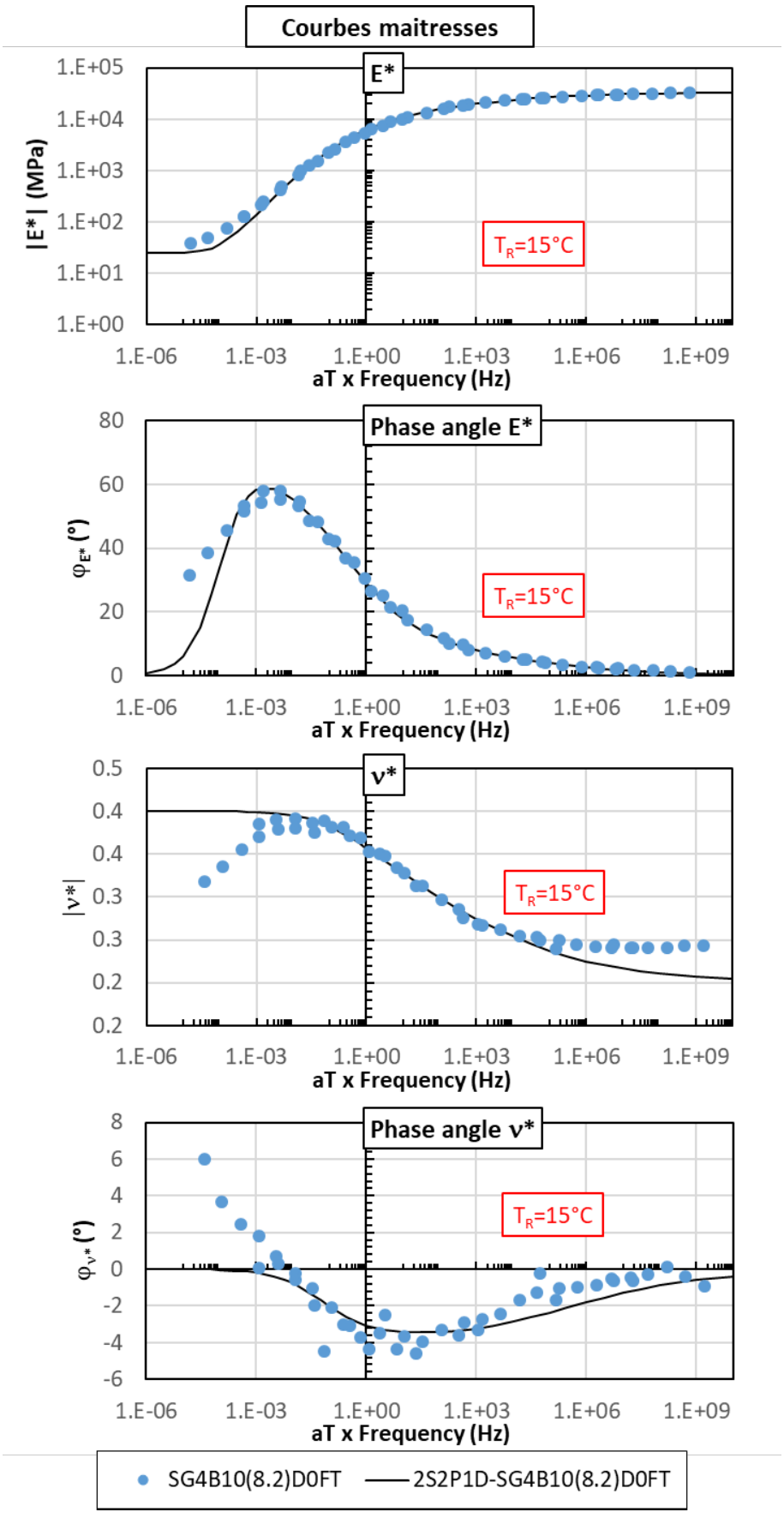

Courbes maitresses
E*
|E*| (MPa)
1.E+05
1.E+04
1.E+03
1.E+02
1.E+01
1.E+00
T_R=15°C
1.E-06
1.E-03
1.E+00
1.E+03
1.E+06
1.E+09
aT x Frequency (Hz)
Phase angle E*
φ_{E^*} (°)
80
60
40
20
0
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
ν*
|ν*|
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle ν*
φ_{ν^*} (°)
4
2
0
-2
-4
-6
-8
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)

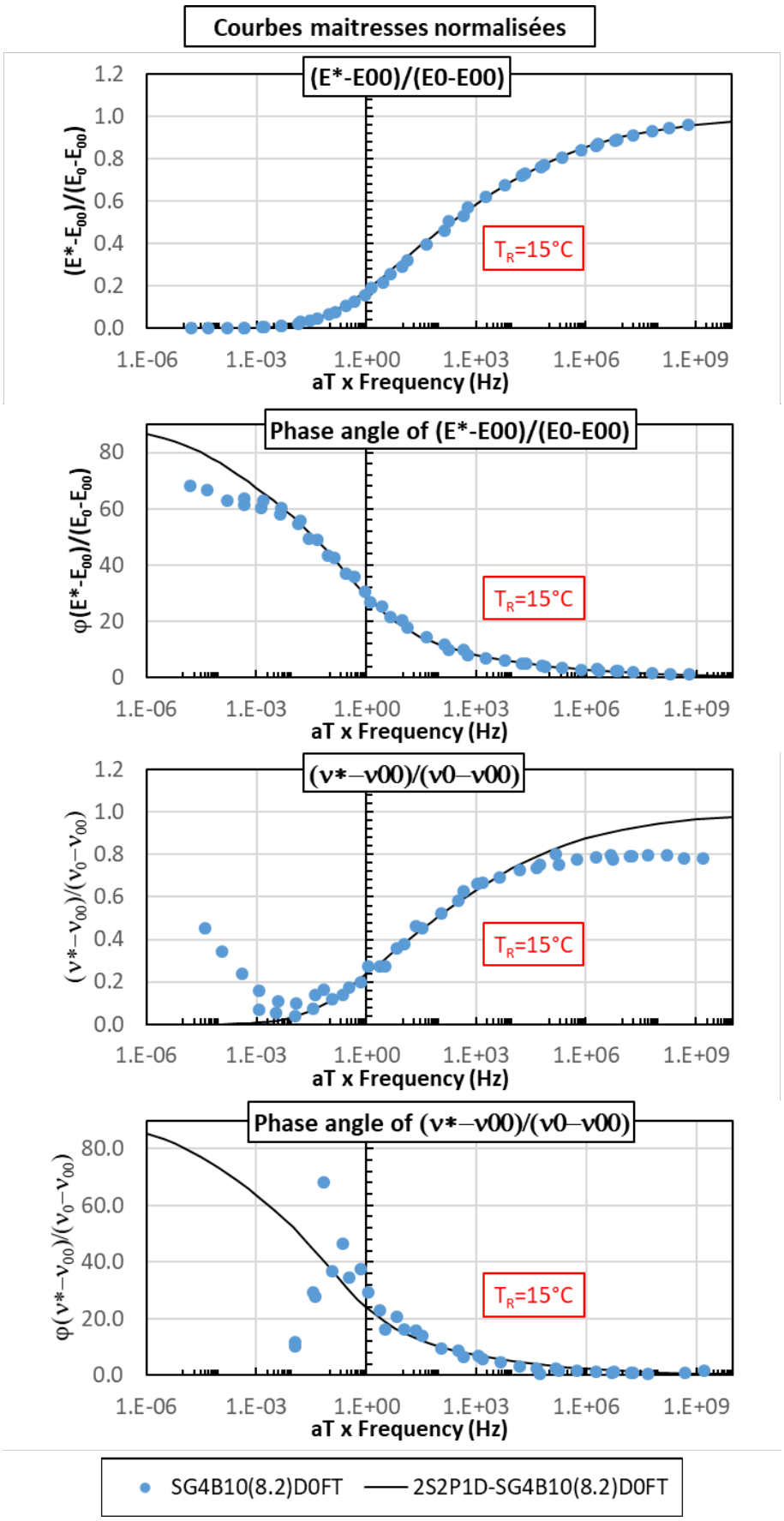


2.1.1.2. SG4B10(8.2)D0FT

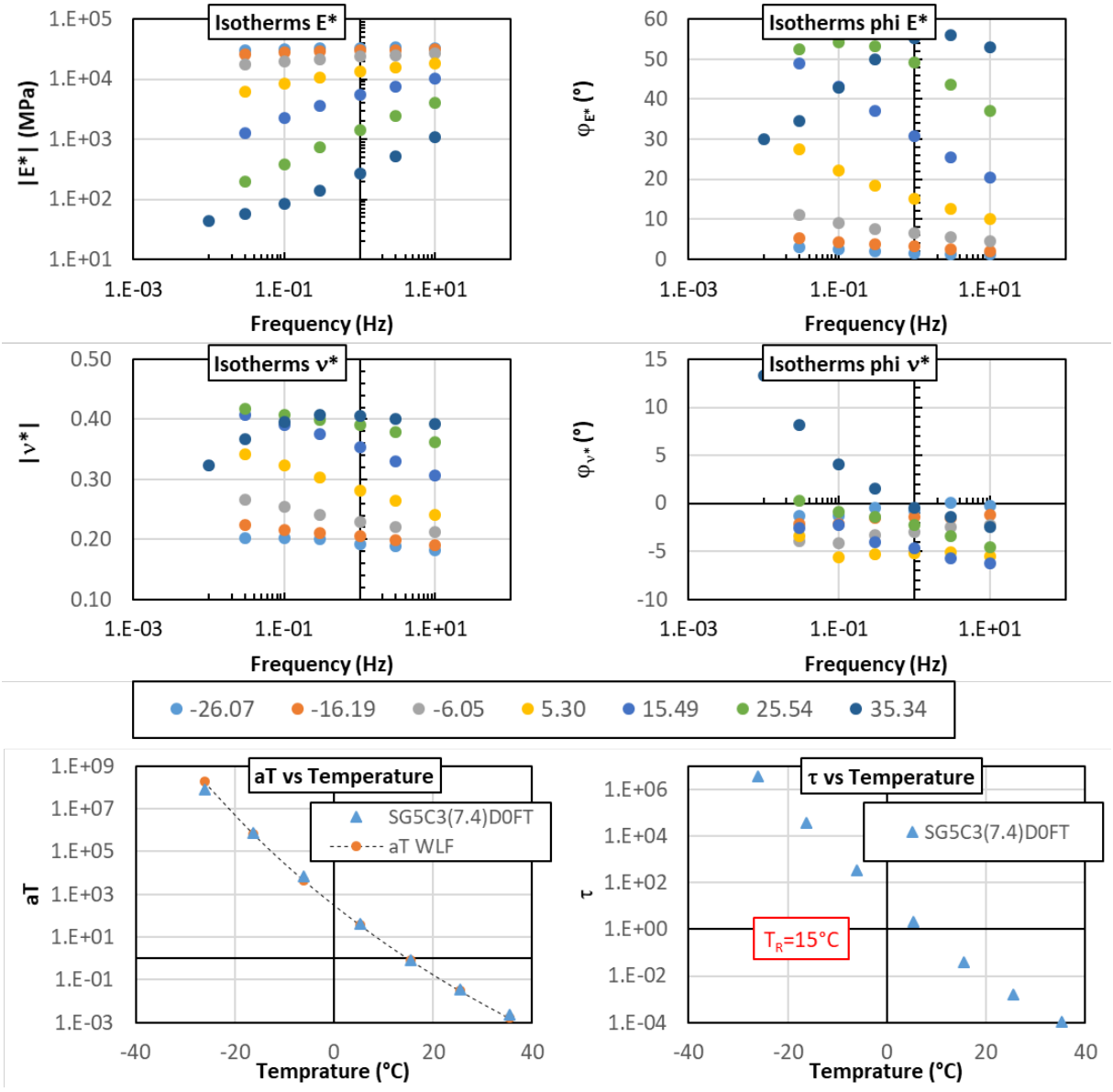

Isotherms E*
|E*| (MPa)
Frequency (Hz)
Isotherms phi E*
φE* (°)
Frequency (Hz)
Isotherms ν*
|ν*|
Frequency (Hz)
Isotherms phi ν*
φν* (°)
Frequency (Hz)
-25.61
-16.01
-6.31
4.88
15.22
25.34
35.57
aT vs Temperature
SG4B10(8.2)D0FT
aT WLF
aT
Temprature (°C)
τ vs Temperature
SG4B10(8.2)D0FT
TR=15°C
τ
Temprature (°C)

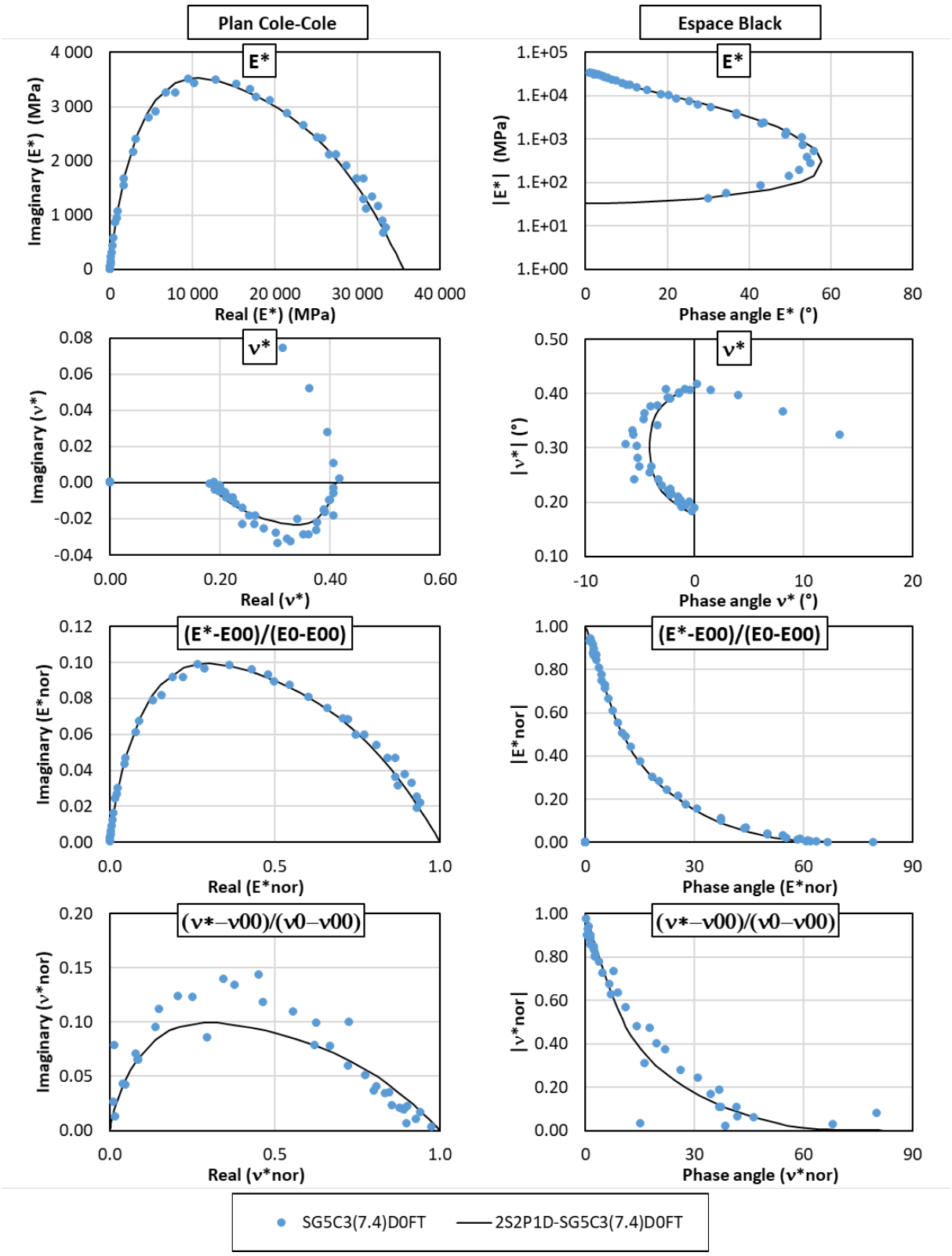

Plan Cole-Cole
E*
Imaginary (E*) (MPa)
Real (E*) (MPa)
Espace Black
E*
|E*| (MPa)
Phase angle E* (°)
ν*
Imaginary (ν*)
Real (ν*)
ν*
|ν*| (°)
Phase angle ν* (°)
(E*-E00)/(E0-E00)
Imaginary (E*nor)
Real (E*nor)
(E*-E00)/(E0-E00)
|E*nor|
Phase angle (E*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
Imaginary (ν*nor)
Real (ν*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
|ν*nor|
Phase angle (ν*nor)
SG4B10(8.2)D0FT
2S2P1D-SG4B10(8.2)D0FT

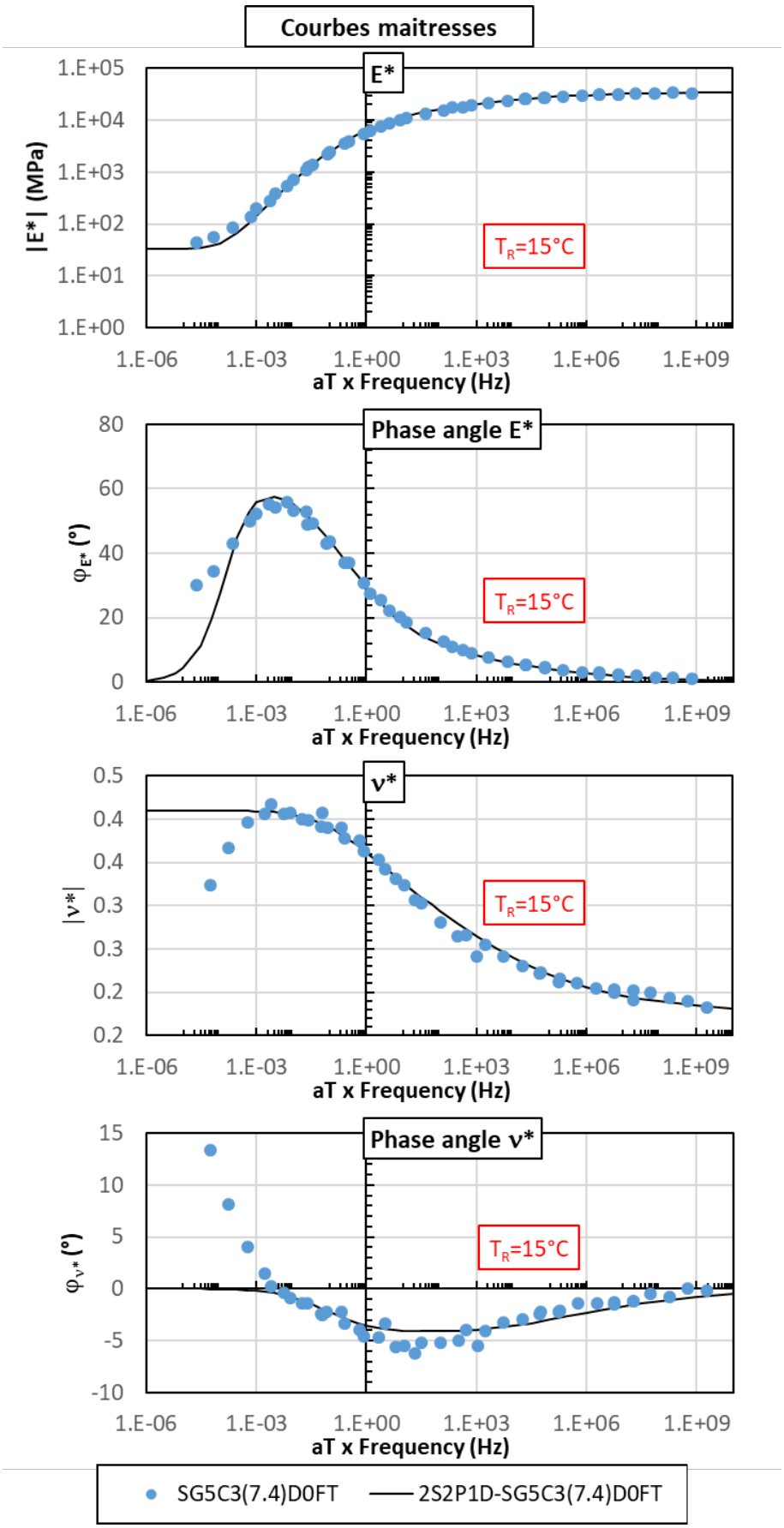

Courbes maitresses
E*
|E*| (MPa)
1.E+05
1.E+04
1.E+03
1.E+02
1.E+01
1.E+00
T_R=15°C
1.E-06
1.E-03
1.E+00
1.E+03
1.E+06
1.E+09
aT x Frequency (Hz)
Phase angle E*
φ_E* (°)
80
60
40
20
0
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
ν*
|ν*|
0.5
0.4
0.4
0.3
0.3
0.2
0.2
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle ν*
φ_ν* (°)
8
6
4
2
0
-2
-4
-6
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
SG4B10(8.2)D0FT
2S2P1D-SG4B10(8.2)D0FT

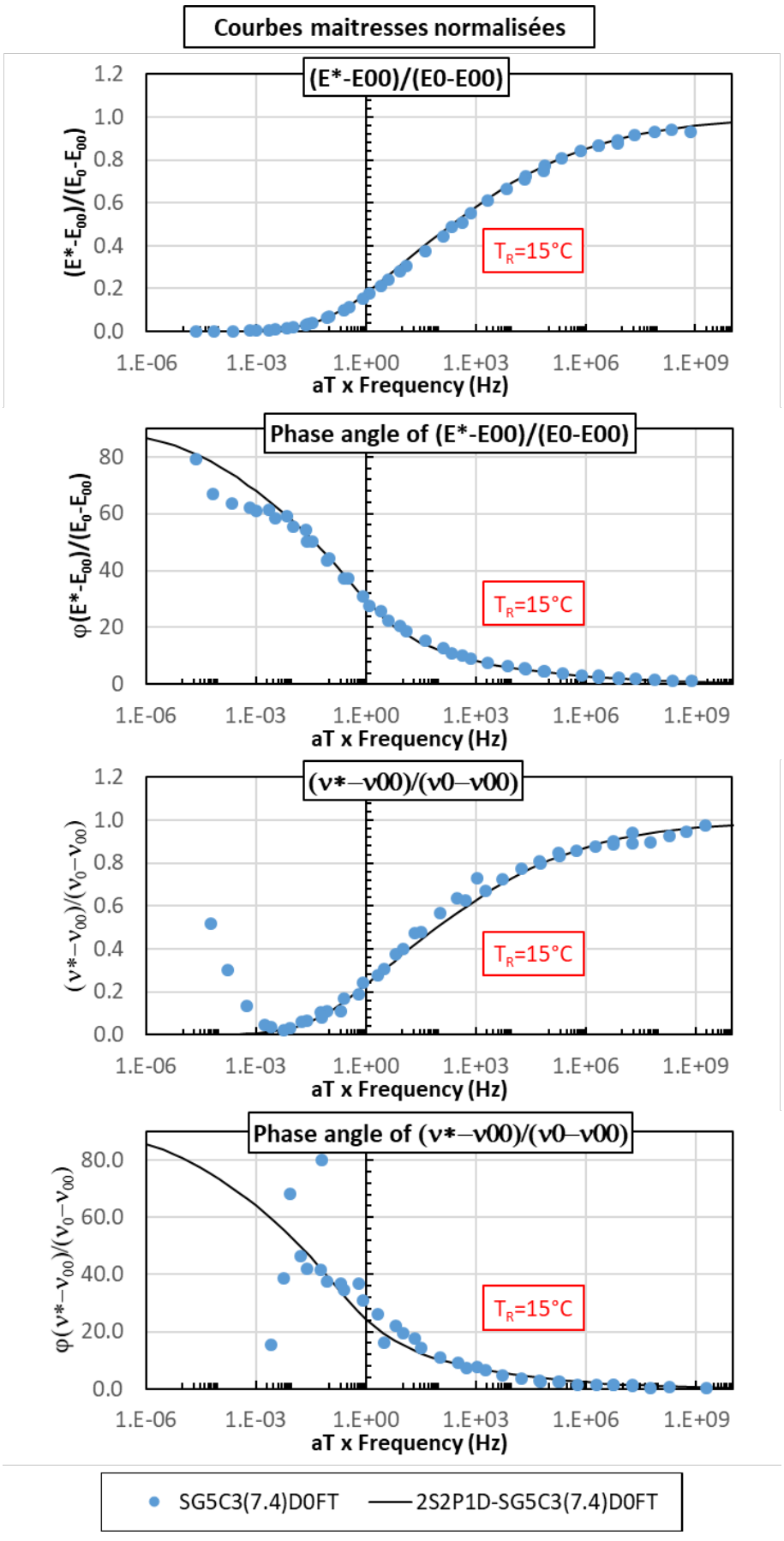


2.1.1.3. SG5C3(7.4)D0FT

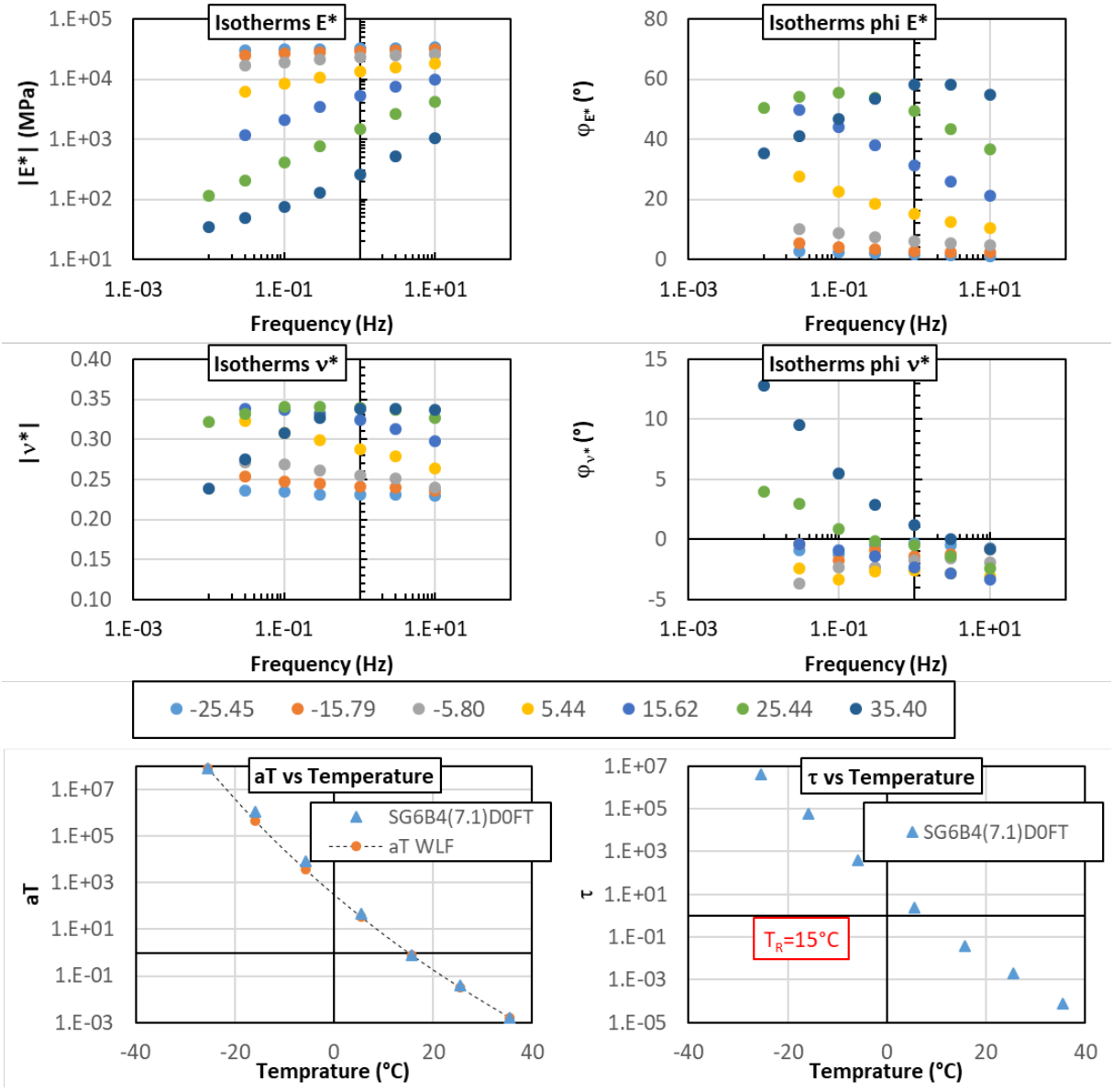

Isotherms E*
|E*| (MPa)
1.E+05
1.E+04
1.E+03
1.E+02
1.E+01
1.E-03
1.E-01
1.E+01
Frequency (Hz)
Isotherms phi E*
φE* (°)
60
50
40
30
20
10
0
Isotherms ν*
|ν*|
0.50
0.40
0.30
0.20
0.10
Isotherms phi ν*
φν* (°)
15
10
5
0
-5
-10
-26.07
-16.19
-6.05
5.30
15.49
25.54
35.34
aT vs Temperature
aT
1.E+09
1.E+07
1.E+05
1.E+03
1.E+01
1.E-01
1.E-03
SG5C3(7.4)D0FT
aT WLF
-40
-20
0
20
40
Temprature (°C)
τ vs Temperature
τ
1.E+06
1.E+04
1.E+02
1.E+00
1.E-02
1.E-04
SG5C3(7.4)D0FT
TR=15°C

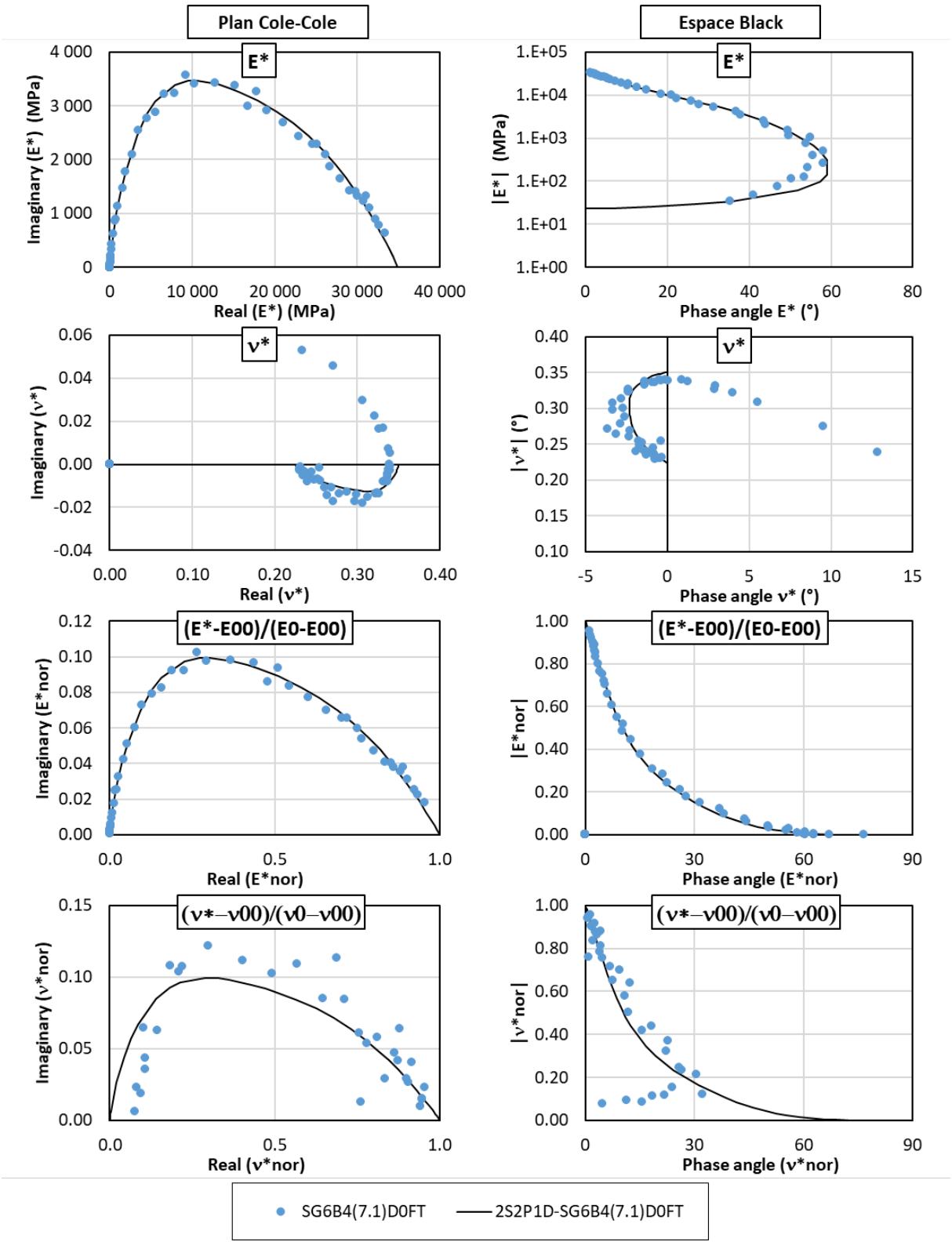

Plan Cole-Cole
E*
Imaginary (E*) (MPa)
Real (E*) (MPa)
Espace Black
E*
|E*| (MPa)
Phase angle E* (°)
ν*
Imaginary (ν*)
Real (ν*)
ν*
|ν*| (°)
Phase angle ν* (°)
(E*-E00)/(E0-E00)
Imaginary (E*nor)
Real (E*nor)
(E*-E00)/(E0-E00)
|E*nor|
Phase angle (E*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
Imaginary (ν*nor)
Real (ν*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
|ν*nor|
Phase angle (ν*nor)
SG5C3(7.4)D0FT
2S2P1D-SG5C3(7.4)D0FT

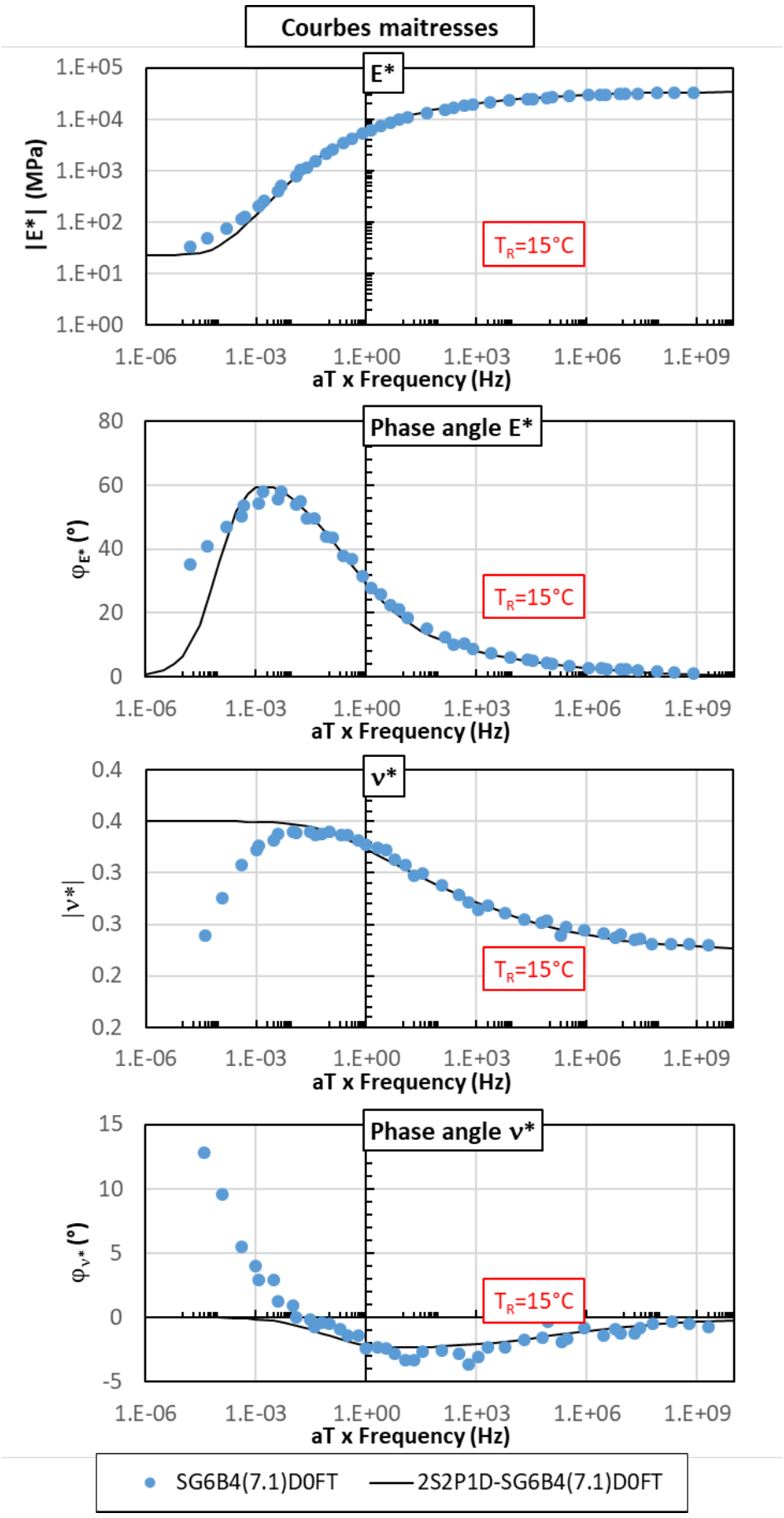

Courbes maitresses
E*
|E*| (MPa)
1.E+05
1.E+04
1.E+03
1.E+02
1.E+01
1.E+00
T_R=15°C
1.E-06
1.E-03
1.E+00
1.E+03
1.E+06
1.E+09
aT x Frequency (Hz)
Phase angle E*
φ_E* (°)
80
60
40
20
0
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
ν*
|ν*|
0.5
0.4
0.4
0.3
0.3
0.2
0.2
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle ν*
φ_ν* (°)
15
10
5
0
-5
-10
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
SG5C3(7.4)D0FT
2S2P1D-SG5C3(7.4)D0FT

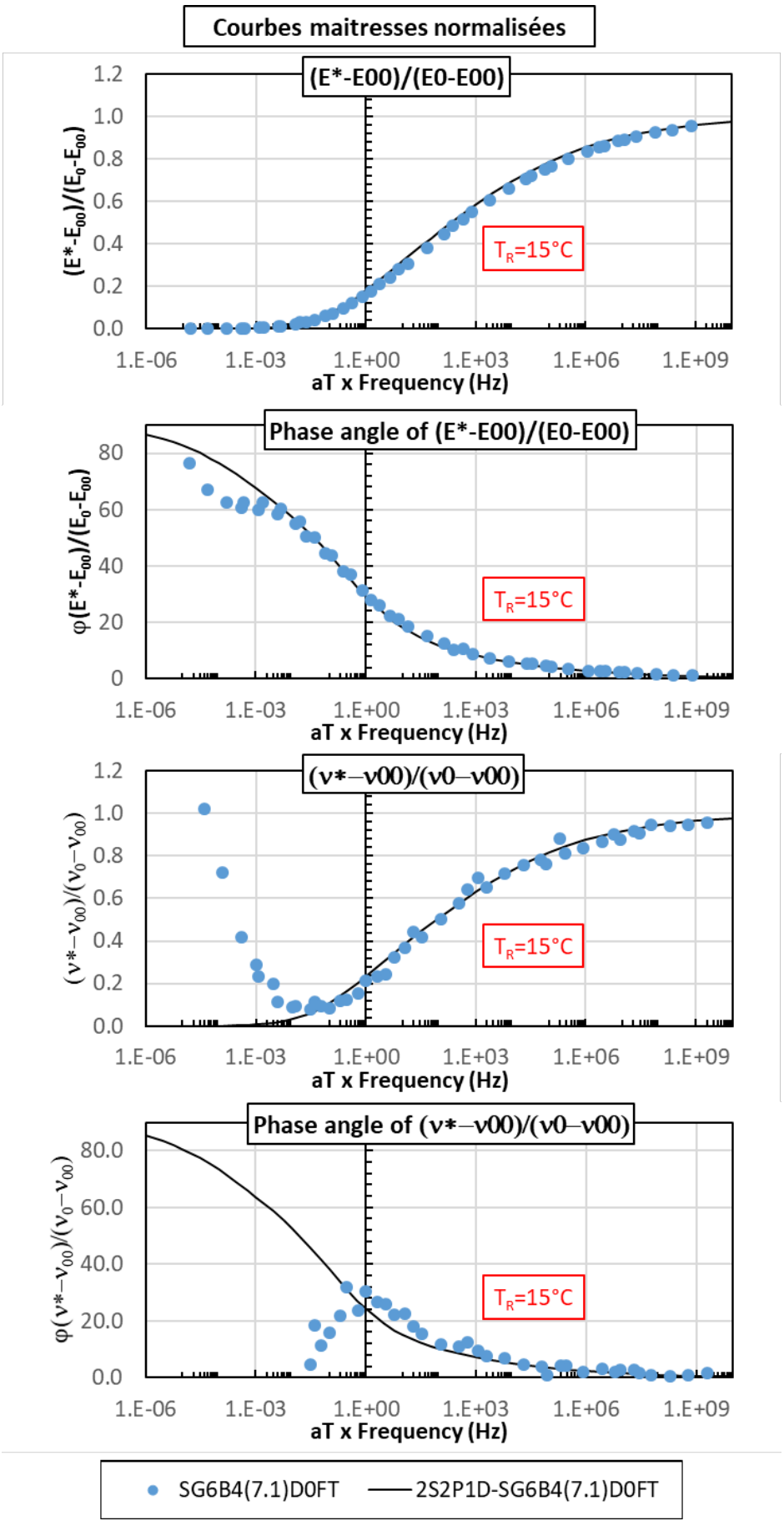


2.1.1.4. SG6B4(7.1)D0FT

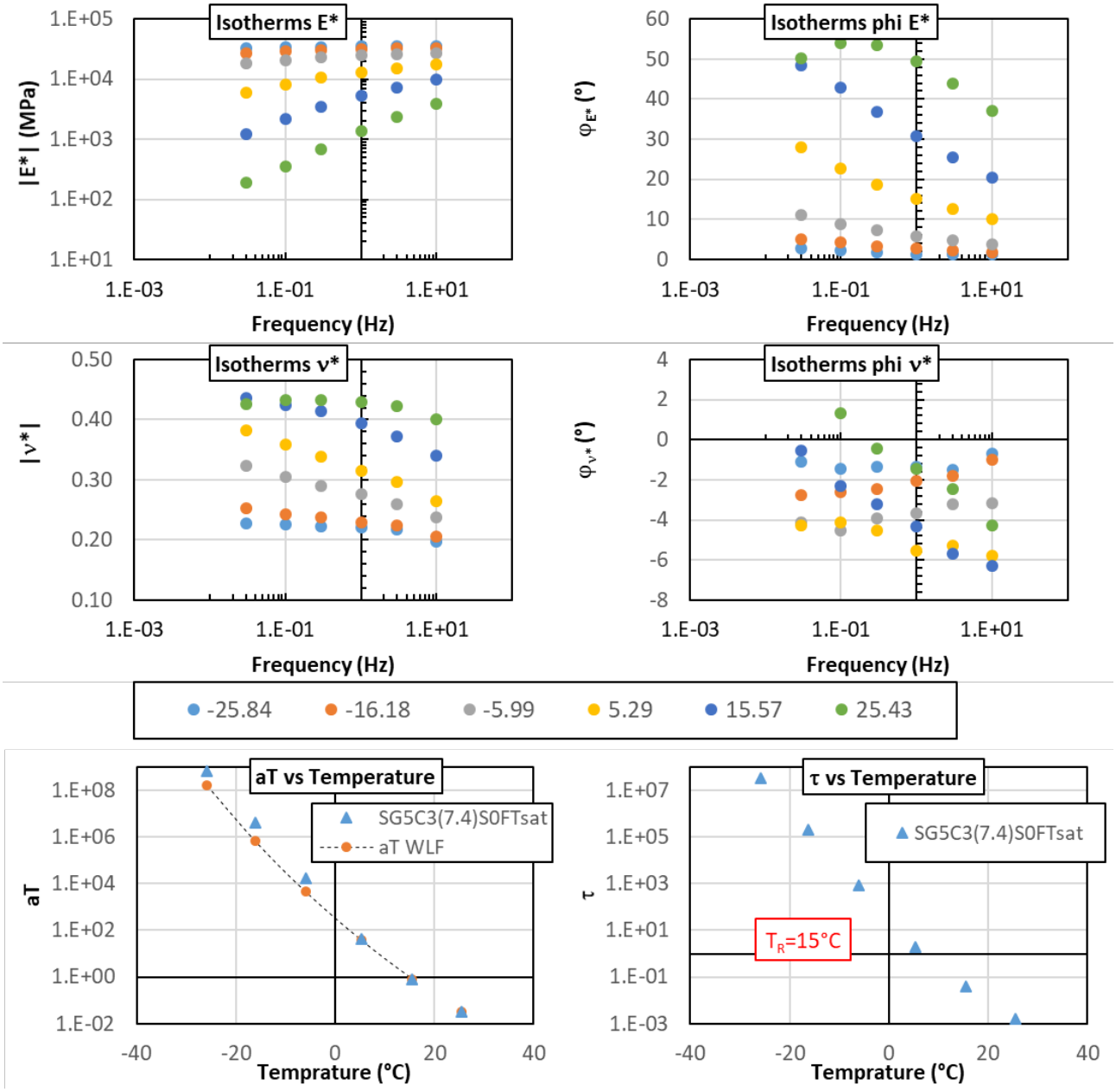

Isotherms E*
|E*| (MPa)
1.E+05
1.E+04
1.E+03
1.E+02
1.E+01
1.E-03
1.E-01
1.E+01
Frequency (Hz)
Isotherms phi E*
φE* (°)
80
60
40
20
0
Isotherms ν*
|ν*|
0.40
0.35
0.30
0.25
0.20
0.15
0.10
Isotherms phi ν*
φν* (°)
15
10
5
0
-5
-25.45
-15.79
-5.80
5.44
15.62
25.44
35.40
aT vs Temperature
aT
SG6B4(7.1)D0FT
aT WLF
Temprature (°C)
τ vs Temperature
τ
1.E+07
1.E+05
1.E+03
1.E+01
1.E-01
1.E-03
1.E-05
TR=15°C

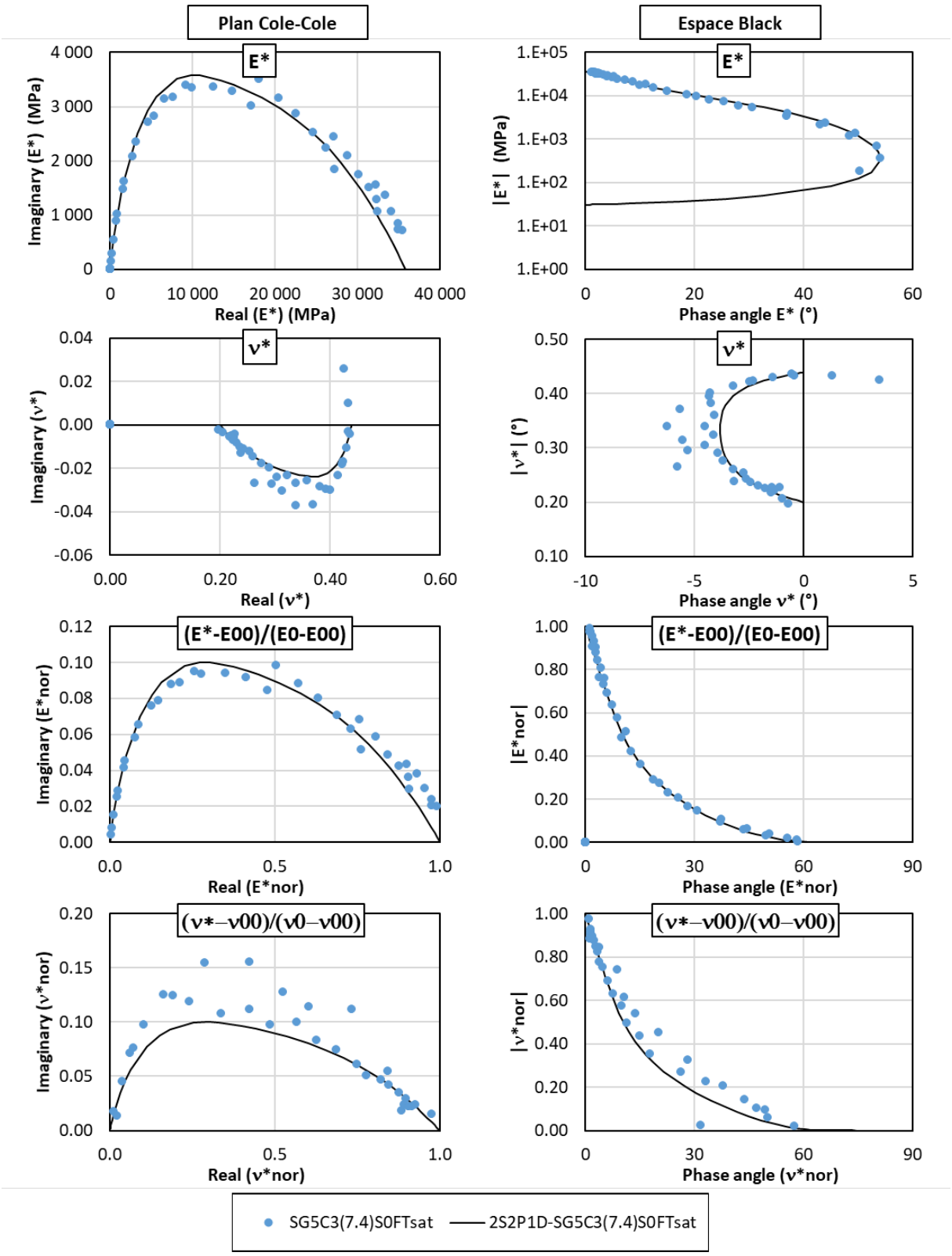

Plan Cole-Cole
E*
Imaginary (E*) (MPa)
Real (E*) (MPa)
Espace Black
E*
|E*| (MPa)
Phase angle E* (°)
ν*
Imaginary (ν*)
Real (ν*)
ν*
|ν*| (°)
Phase angle ν* (°)
(E*-E00)/(E0-E00)
Imaginary (E*nor)
Real (E*nor)
(E*-E00)/(E0-E00)
|E*nor|
Phase angle (E*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
Imaginary (ν*nor)
Real (ν*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
|ν*nor|
Phase angle (ν*nor)
SG6B4(7.1)D0FT
2S2P1D-SG6B4(7.1)D0FT

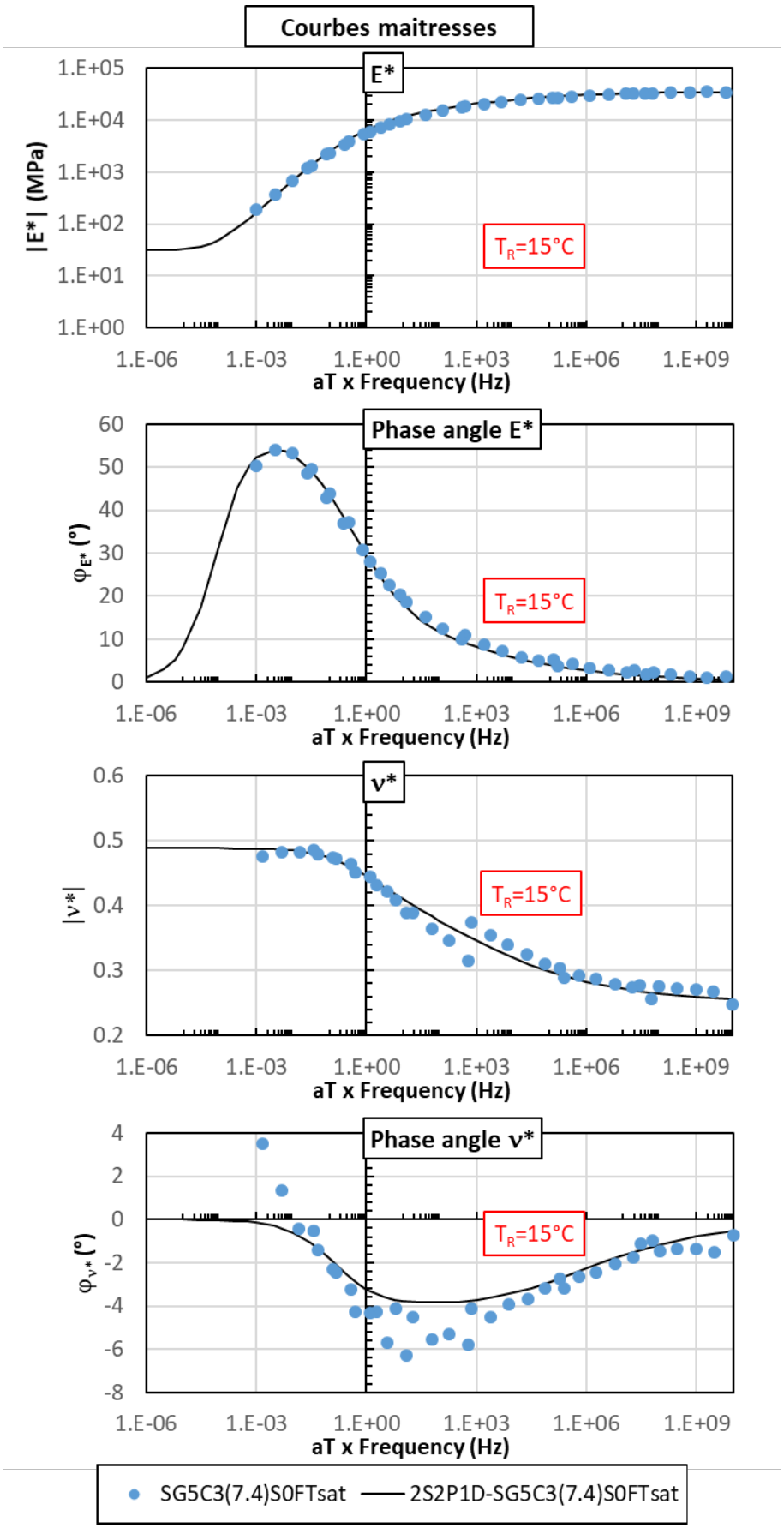

Courbes maitresses
E*
|E*| (MPa)
1.E+05
1.E+04
1.E+03
1.E+02
1.E+01
1.E+00
T_R=15°C
1.E-06
1.E-03
1.E+00
1.E+03
1.E+06
1.E+09
aT x Frequency (Hz)
Phase angle E*
φ_E* (°)
80
60
40
20
0
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
ν*
|ν*|
0.4
0.4
0.3
0.3
0.2
0.2
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle ν*
φ_ν* (°)
15
10
5
0
-5
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
SG6B4(7.1)D0FT
2S2P1D-SG6B4(7.1)D0FT

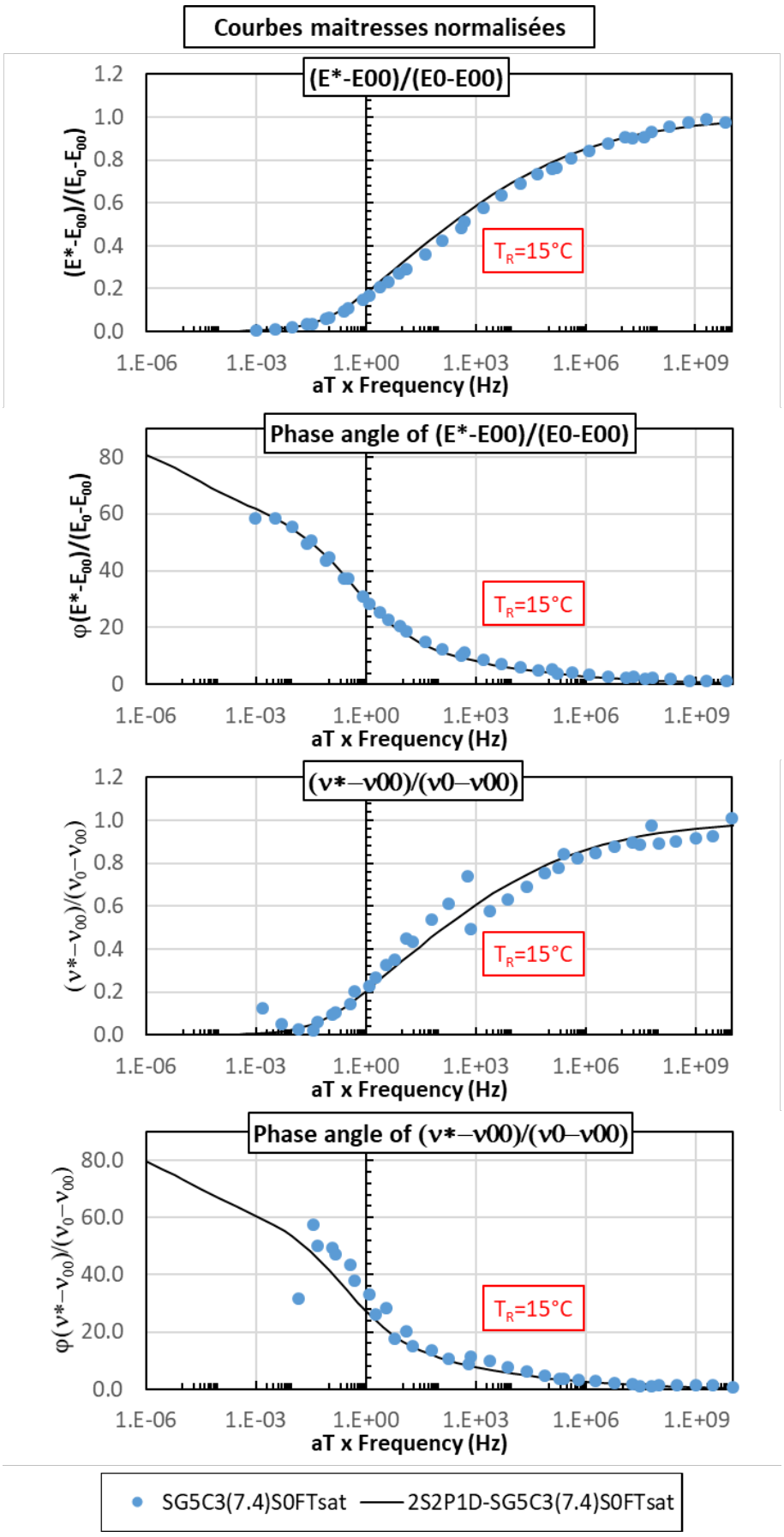


2.1.2. Eprouvette non-vieillie sans cycle FT testée à l'état partiellement saturé (0FT.SAT) – SG5C3(7.4)0FT.sat


Isotherms E*
|E*| (MPa)
1.E+05
1.E+04
1.E+03
1.E+02
1.E+01
1.E-03
1.E-01
1.E+01
Frequency (Hz)
Isotherms phi E*
φE* (°)
60
50
40
30
20
10
0
Isotherms ν*
|ν*|
0.50
0.40
0.30
0.20
0.10
Isotherms phi ν*
φν* (°)
4
2
0
-2
-4
-6
-8
-25.84
-16.18
-5.99
5.29
15.57
25.43
aT vs Temperature
aT
1.E+08
1.E+06
1.E+04
1.E+02
1.E+00
1.E-02
SG5C3(7.4)S0FTsat
aT WLF
-40
-20
0
20
40
Temprature (°C)
τ vs Temperature
τ
1.E+07
1.E+05
1.E+03
1.E+01
1.E-01
1.E-03
SG5C3(7.4)S0FTsat
TR=15°C

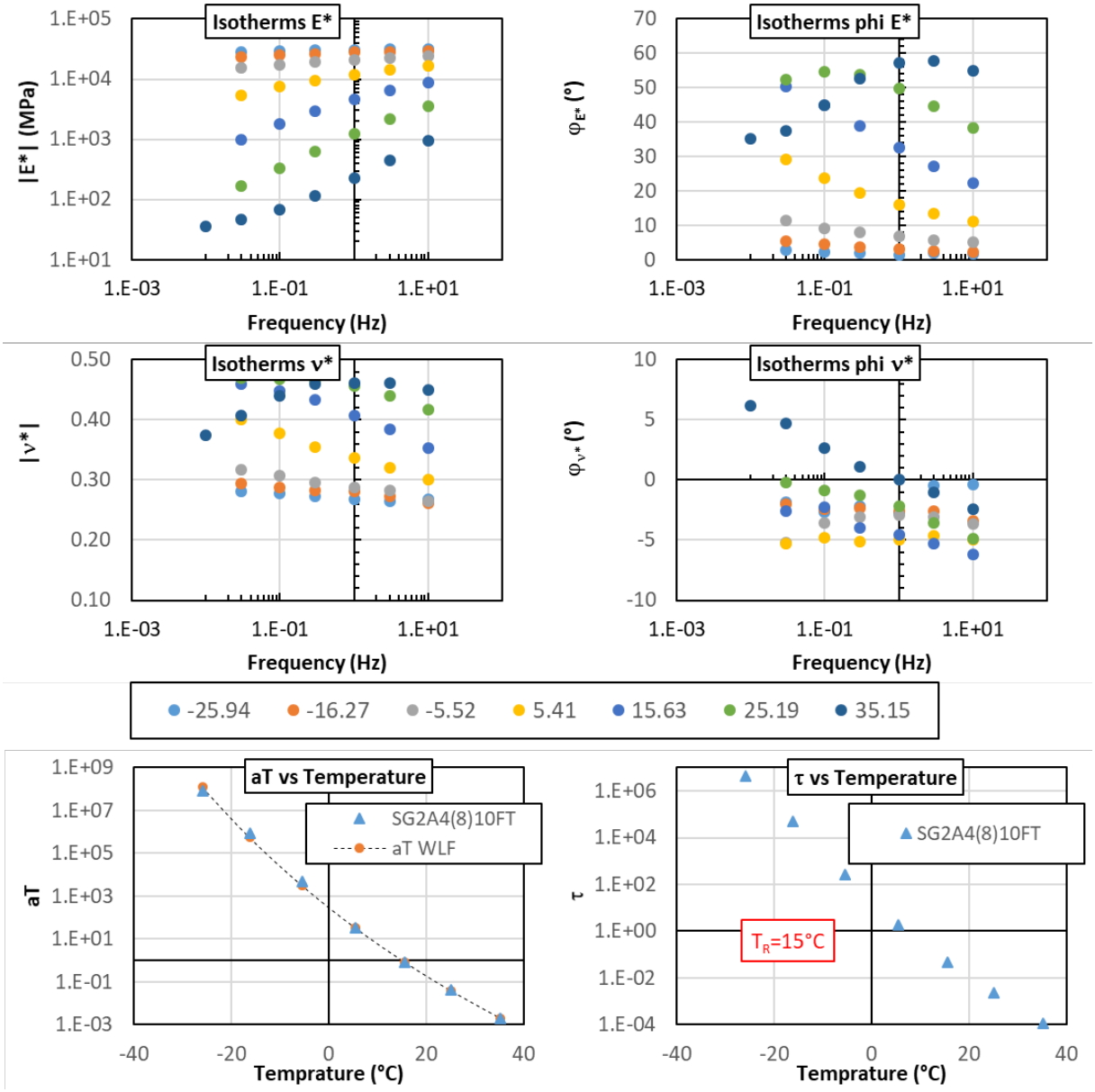

Plan Cole-Cole
E*
Imaginary (E*) (MPa)
Real (E*) (MPa)
Espace Black
E*
|E*| (MPa)
Phase angle E* (°)
ν*
Imaginary (ν*)
Real (ν*)
ν*
|ν*| (°)
Phase angle ν* (°)
(E*-E00)/(E0-E00)
Imaginary (E*nor)
Real (E*nor)
(E*-E00)/(E0-E00)
|E*nor|
Phase angle (E*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
Imaginary (ν*nor)
Real (ν*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
|ν*nor|
Phase angle (ν*nor)
SG5C3(7.4)S0FTsat
2S2P1D-SG5C3(7.4)S0FTsat

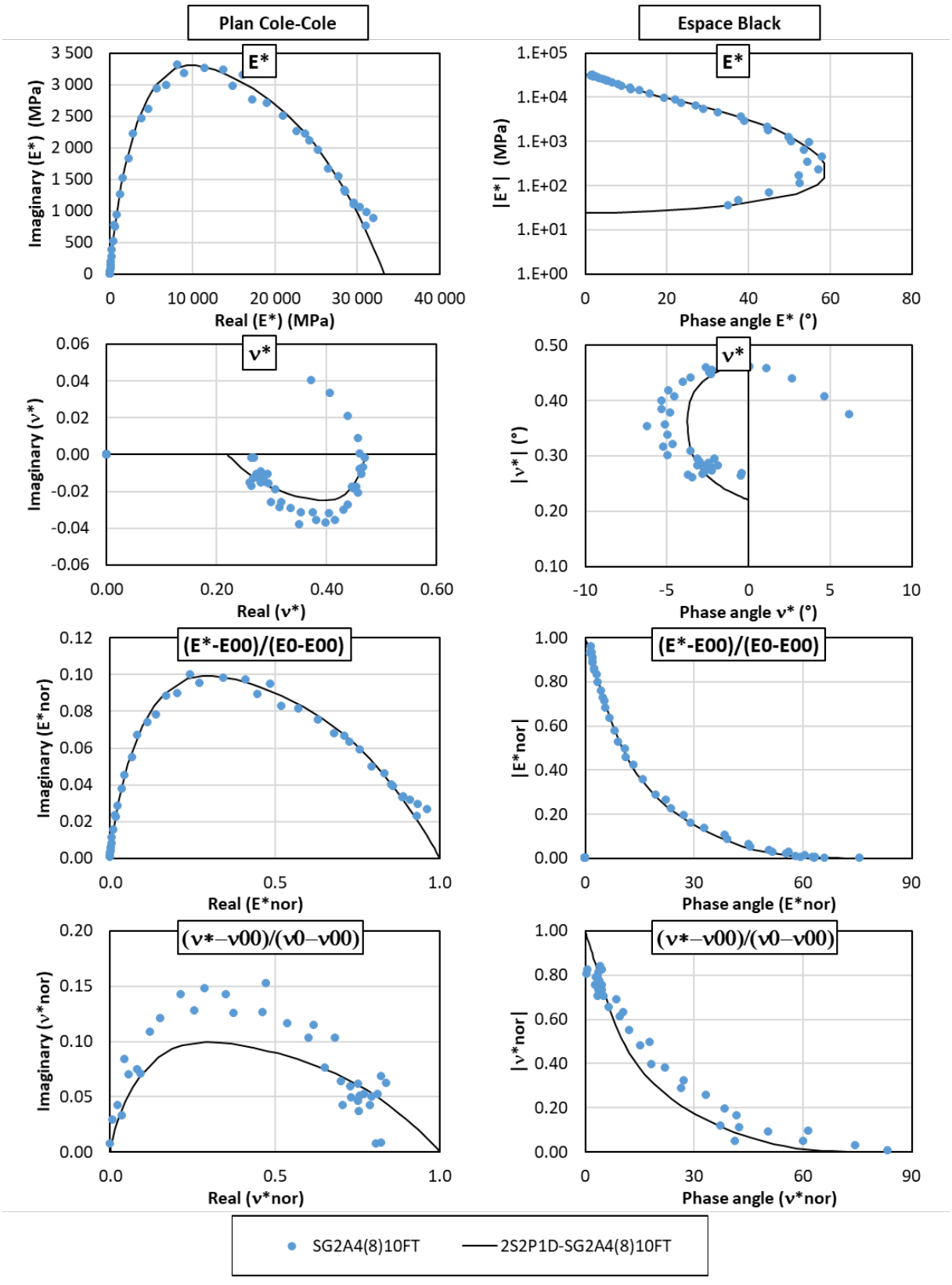

Courbes maitresses
E*
|E*| (MPa)
1.E+05
1.E+04
1.E+03
1.E+02
1.E+01
1.E+00
T_R=15°C
1.E-06
1.E-03
1.E+00
1.E+03
1.E+06
1.E+09
aT x Frequency (Hz)
Phase angle E*
φ_E* (°)
60
50
40
30
20
10
0
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
ν*
|ν*|
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle ν*
φ_ν* (°)
4
2
0
-2
-4
-6
-8
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
SG5C3(7.4)S0FTsat
2S2P1D-SG5C3(7.4)S0FTsat

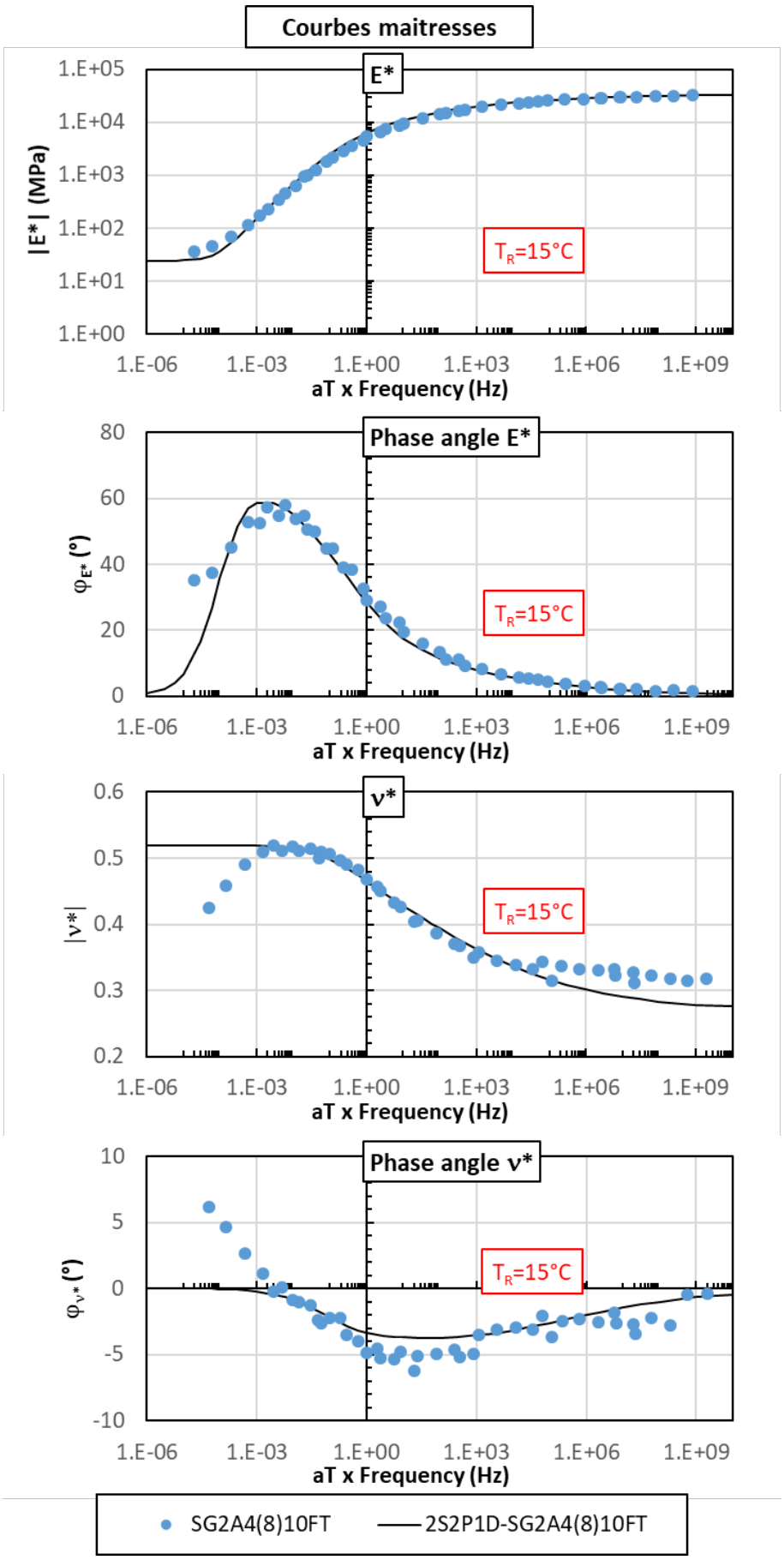


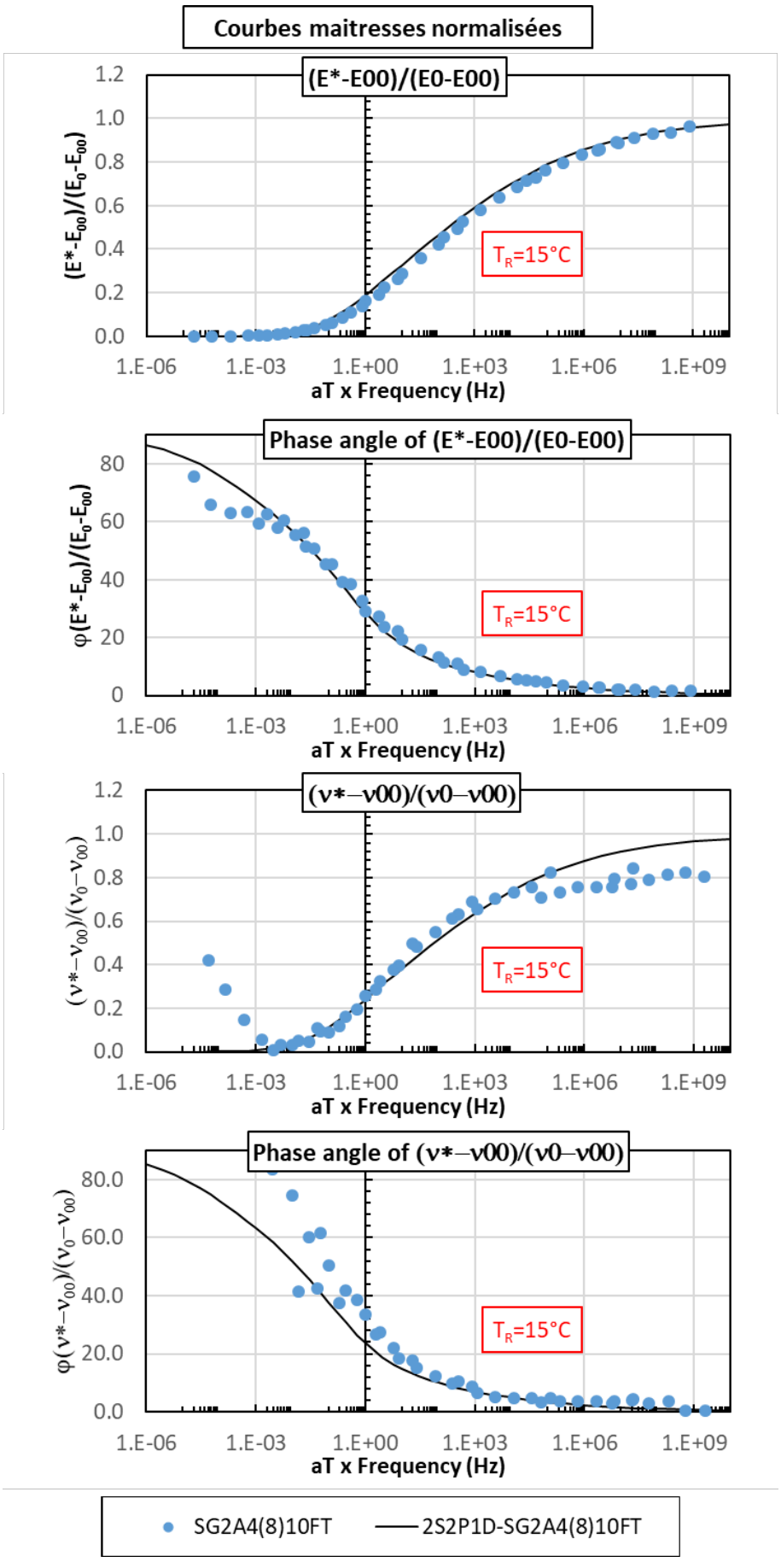
2.1.3. Eprouvettes non-vieillies avec 10 cycles FT testées à l'état sec (10FT.DRY)

2.1.3.1. SG2A4(8)10FT

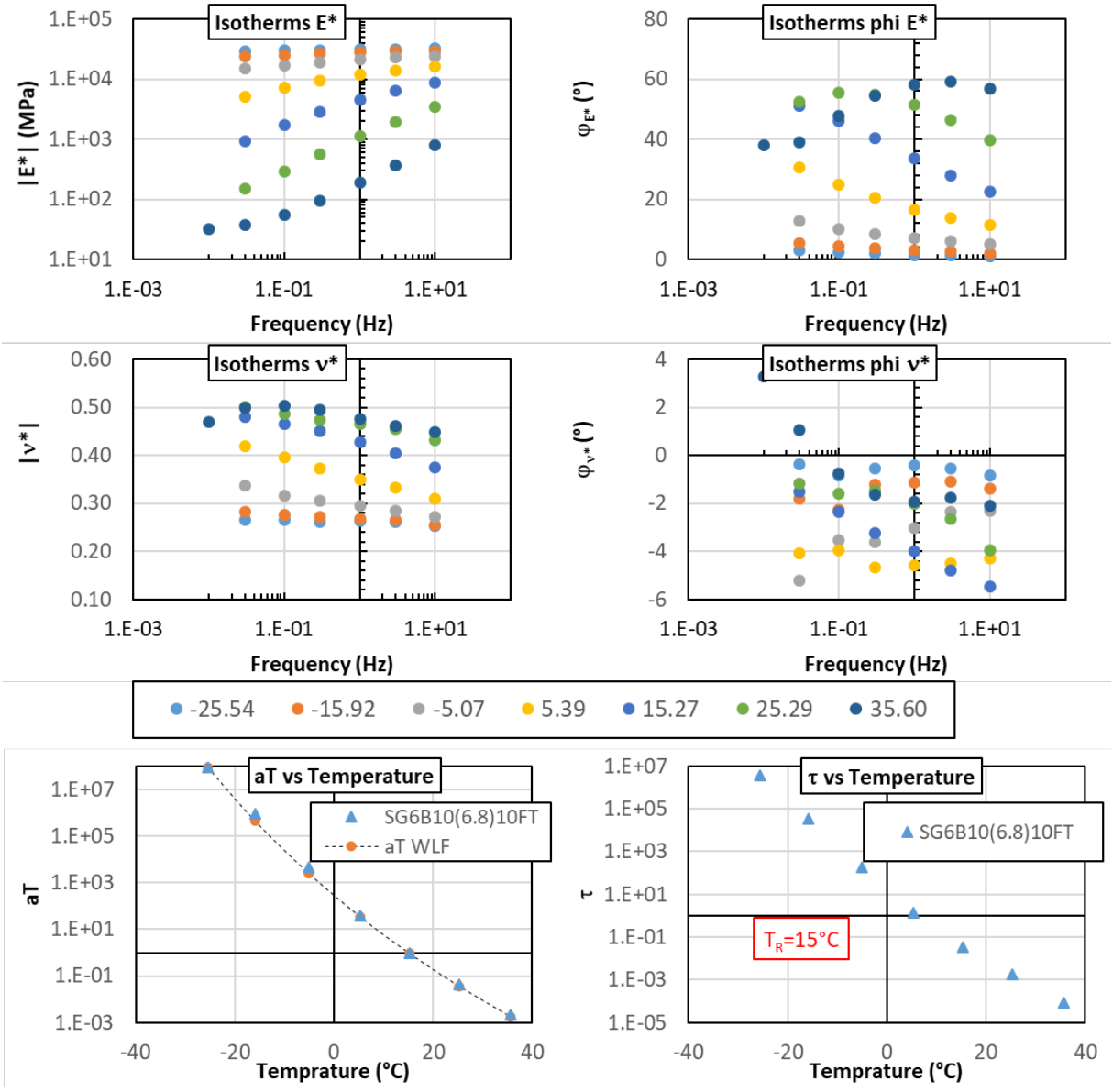

Isotherms E*
|E*| (MPa)
1.E+05
1.E+04
1.E+03
1.E+02
1.E+01
1.E-03
1.E-01
1.E+01
Frequency (Hz)
Isotherms phi E*
φE* (°)
70
60
50
40
30
20
10
0
Isotherms ν*
|ν*|
0.50
0.40
0.30
0.20
0.10
Isotherms phi ν*
φν* (°)
10
5
0
-5
-10
-25.94
-16.27
-5.52
5.41
15.63
25.19
35.15
aT vs Temperature
aT
1.E+09
1.E+07
1.E+05
1.E+03
1.E+01
1.E-01
1.E-03
SG2A4(8)10FT
aT WLF
-40
-20
0
20
40
Temprature (°C)
τ vs Temperature
τ
1.E+06
1.E+04
1.E+02
1.E+00
1.E-02
1.E-04
SG2A4(8)10FT
TR=15°C

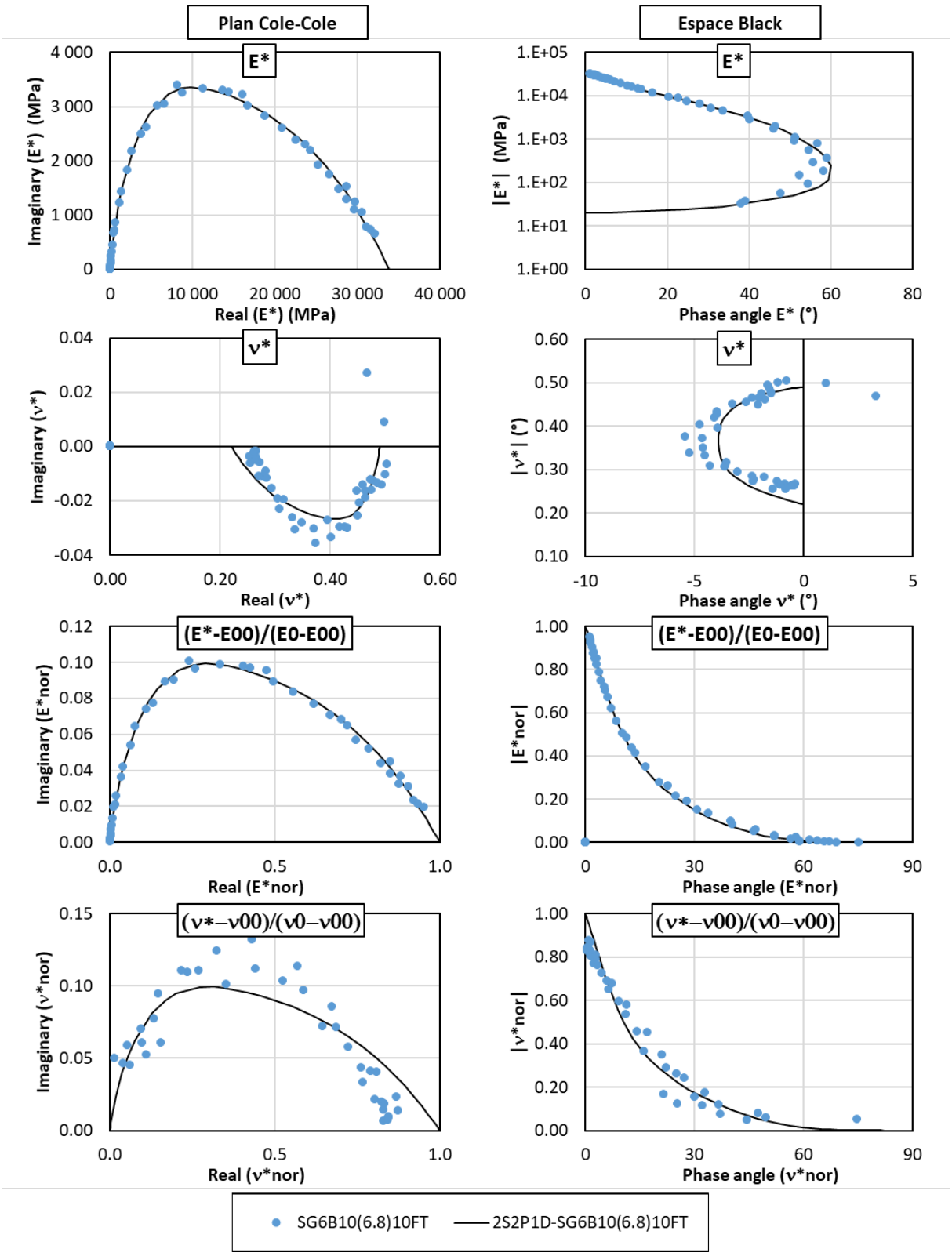

Plan Cole-Cole
E*
Imaginary (E*) (MPa)
Real (E*) (MPa)
Espace Black
E*
|E*| (MPa)
Phase angle E* (°)
ν*
Imaginary (ν*)
Real (ν*)
ν*
|ν*| (°)
Phase angle ν* (°)
(E*-E00)/(E0-E00)
Imaginary (E*nor)
Real (E*nor)
(E*-E00)/(E0-E00)
|E*nor|
Phase angle (E*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
Imaginary (ν*nor)
Real (ν*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
|ν*nor|
Phase angle (ν*nor)
SG2A4(8)10FT
2S2P1D-SG2A4(8)10FT

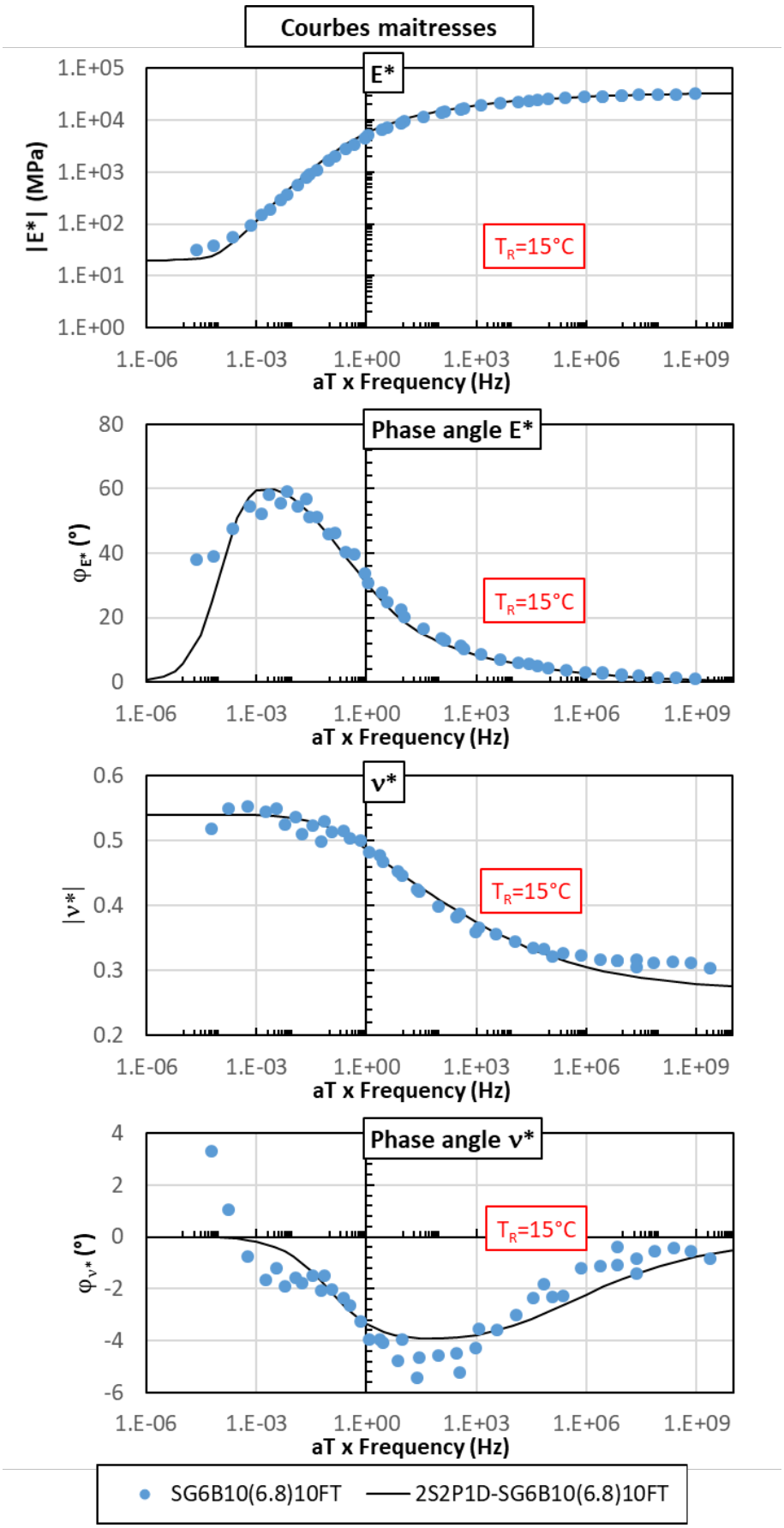

Courbes maitresses
E*
|E*| (MPa)
1.E+05
1.E+04
1.E+03
1.E+02
1.E+01
1.E+00
T_R=15°C
1.E-06
1.E-03
1.E+00
1.E+03
1.E+06
1.E+09
aT x Frequency (Hz)
Phase angle E*
φ_E* (°)
80
60
40
20
0
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
ν*
|ν*|
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle ν*
φ_ν* (°)
10
5
0
-5
-10
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
SG2A4(8)10FT
2S2P1D-SG2A4(8)10FT

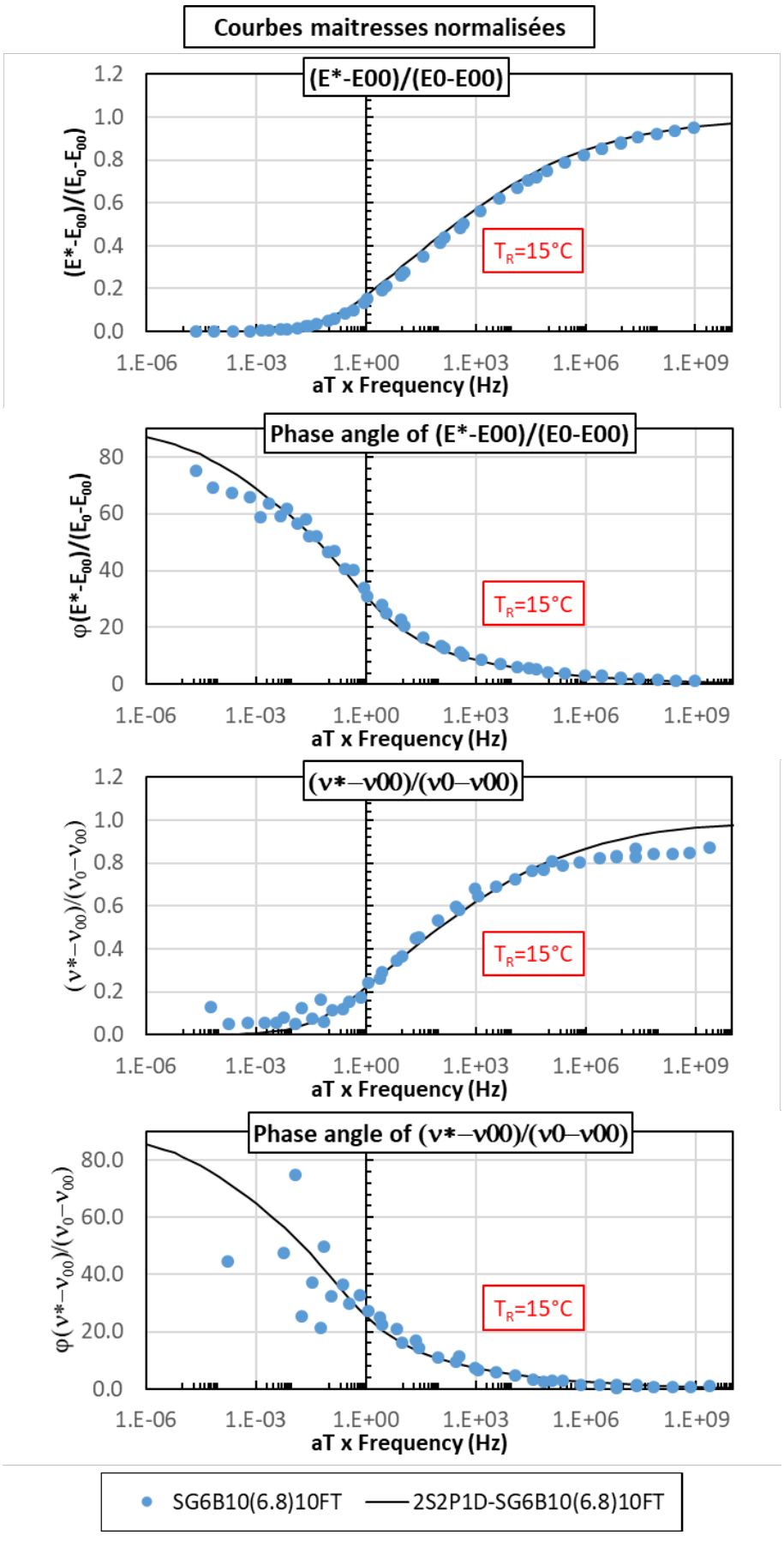


2.1.3.2. SG6B10(6.8)10FT


Isotherms E*
|E*| (MPa)
1.E+05
1.E+04
1.E+03
1.E+02
1.E+01
1.E-03
1.E-01
1.E+01
Frequency (Hz)
Isotherms phi E*
φE* (°)
80
60
40
20
0
Isotherms ν*
|ν*|
0.60
0.50
0.40
0.30
0.20
0.10
Isotherms phi ν*
φν* (°)
4
2
0
-2
-4
-6
-25.54
-15.92
-5.07
5.39
15.27
25.29
35.60
aT vs Temperature
aT
SG6B10(6.8)10FT
aT WLF
Temprature (°C)
τ vs Temperature
τ
TR=15°C

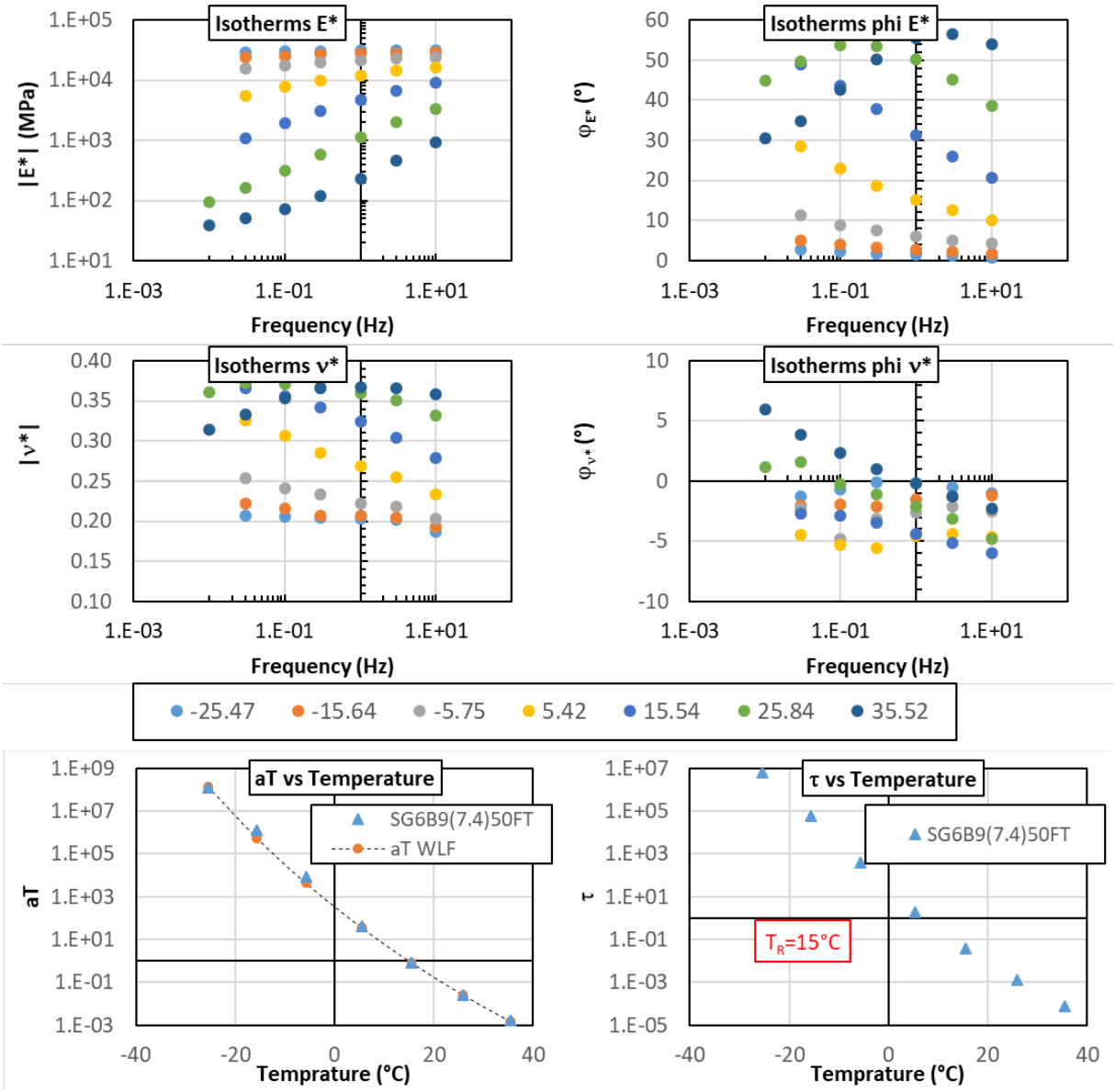

Plan Cole-Cole
E*
Imaginary (E*) (MPa)
Real (E*) (MPa)
Espace Black
E*
|E*| (MPa)
Phase angle E* (°)
ν*
Imaginary (ν*)
Real (ν*)
ν*
|ν*| (°)
Phase angle ν* (°)
(E*-E00)/(E0-E00)
Imaginary (E*nor)
Real (E*nor)
(E*-E00)/(E0-E00)
|E*nor|
Phase angle (E*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
Imaginary (ν*nor)
Real (ν*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
|ν*nor|
Phase angle (ν*nor)
SG6B10(6.8)10FT
2S2P1D-SG6B10(6.8)10FT

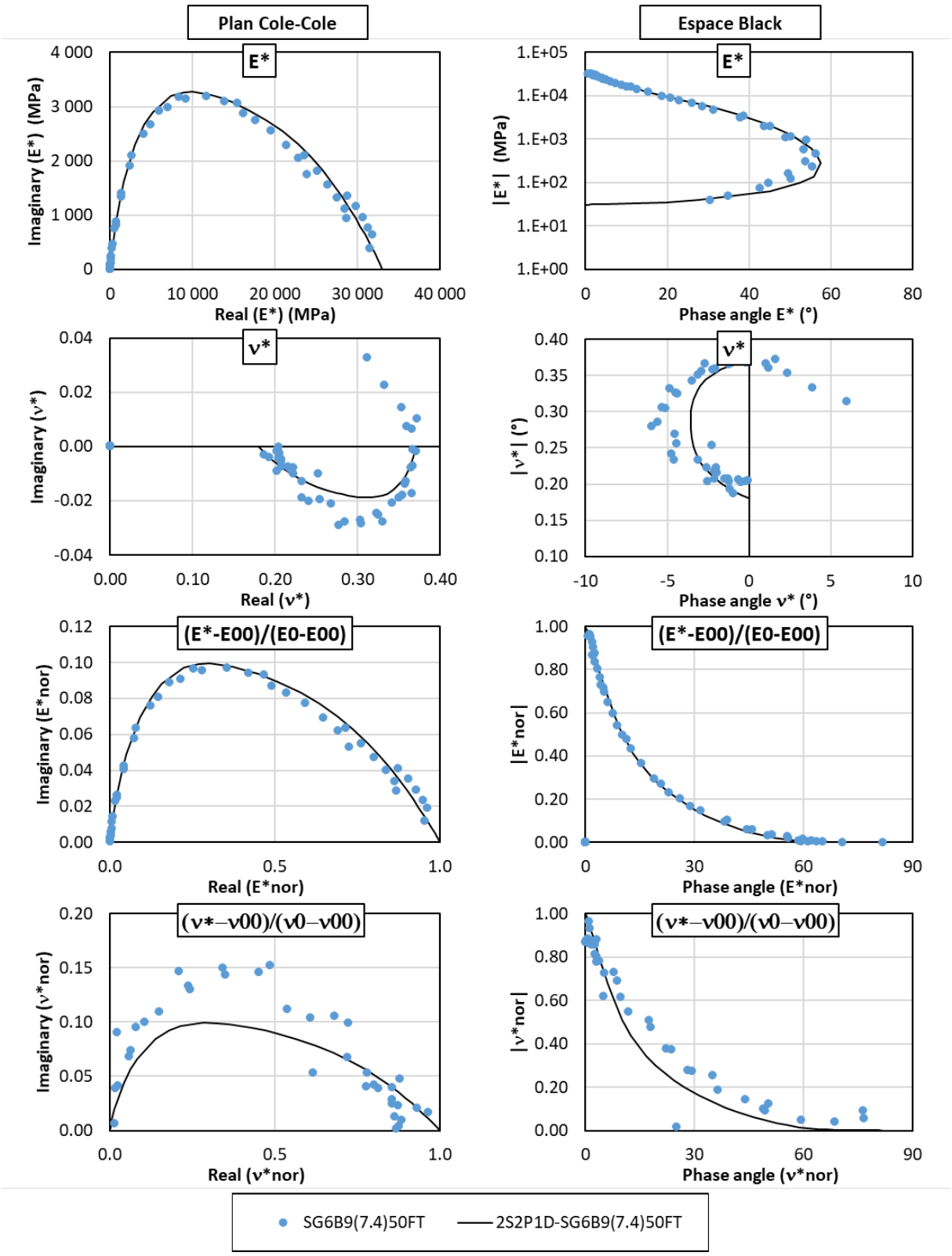

Courbes maitresses
E*
|E*| (MPa)
1.E+05
1.E+04
1.E+03
1.E+02
1.E+01
1.E+00
T_R=15°C
1.E-06
1.E-03
1.E+00
1.E+03
1.E+06
1.E+09
aT x Frequency (Hz)
Phase angle E*
φ_E* (°)
80
60
40
20
0
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
ν*
|ν*|
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle ν*
φ_ν* (°)
4
2
0
-2
-4
-6
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
SG6B10(6.8)10FT
2S2P1D-SG6B10(6.8)10FT

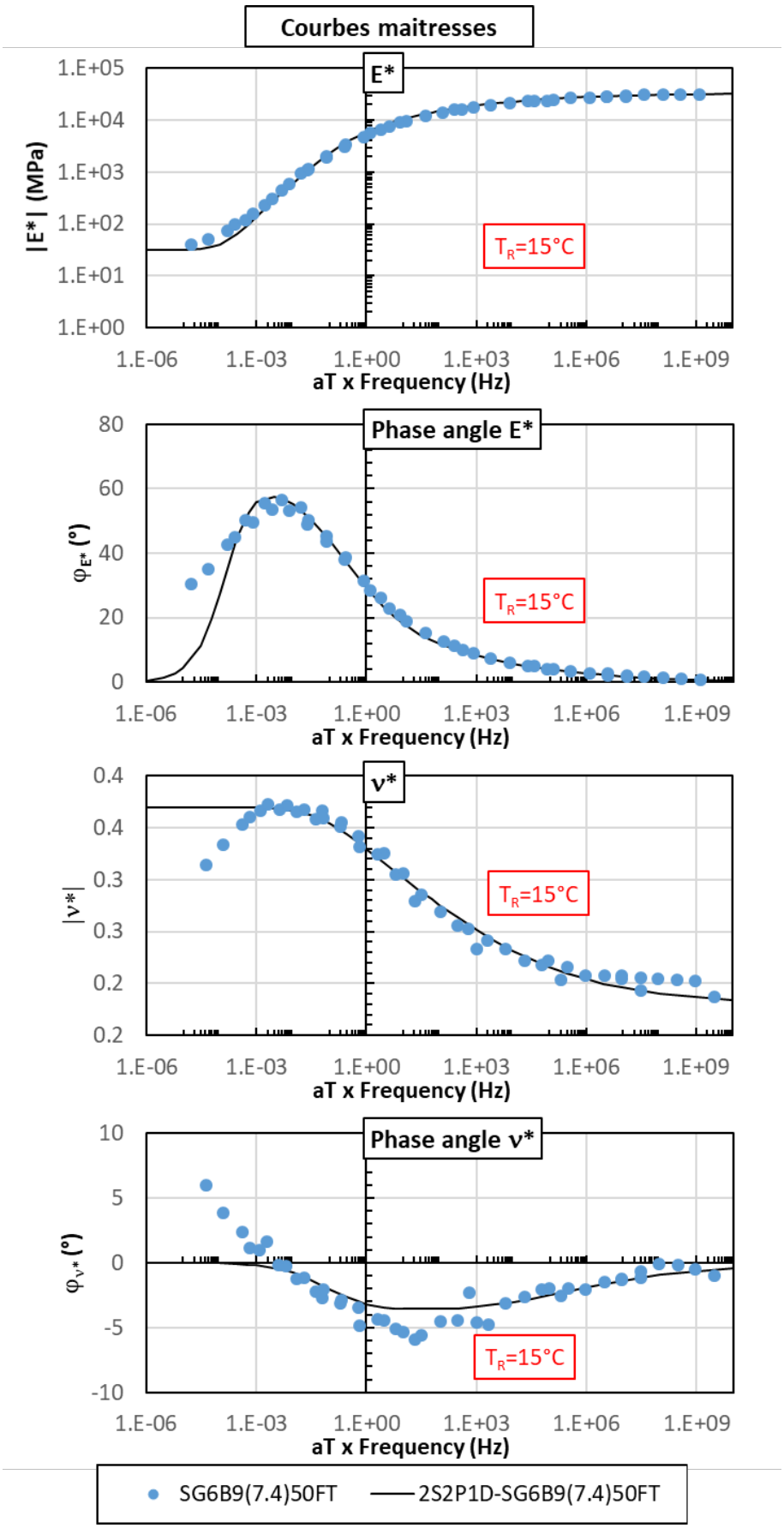

Courbes maitresses normalisées
(E*-E00)/(E0-E00)
(E*-E00)/(E0-E00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle of (E*-E00)/(E0-E00)
φ(E*-E00)/(E0-E00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle of (ν*–ν00)/(ν0–ν00)
φ(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
SG6B10(6.8)10FT
2S2P1D-SG6B10(6.8)10FT

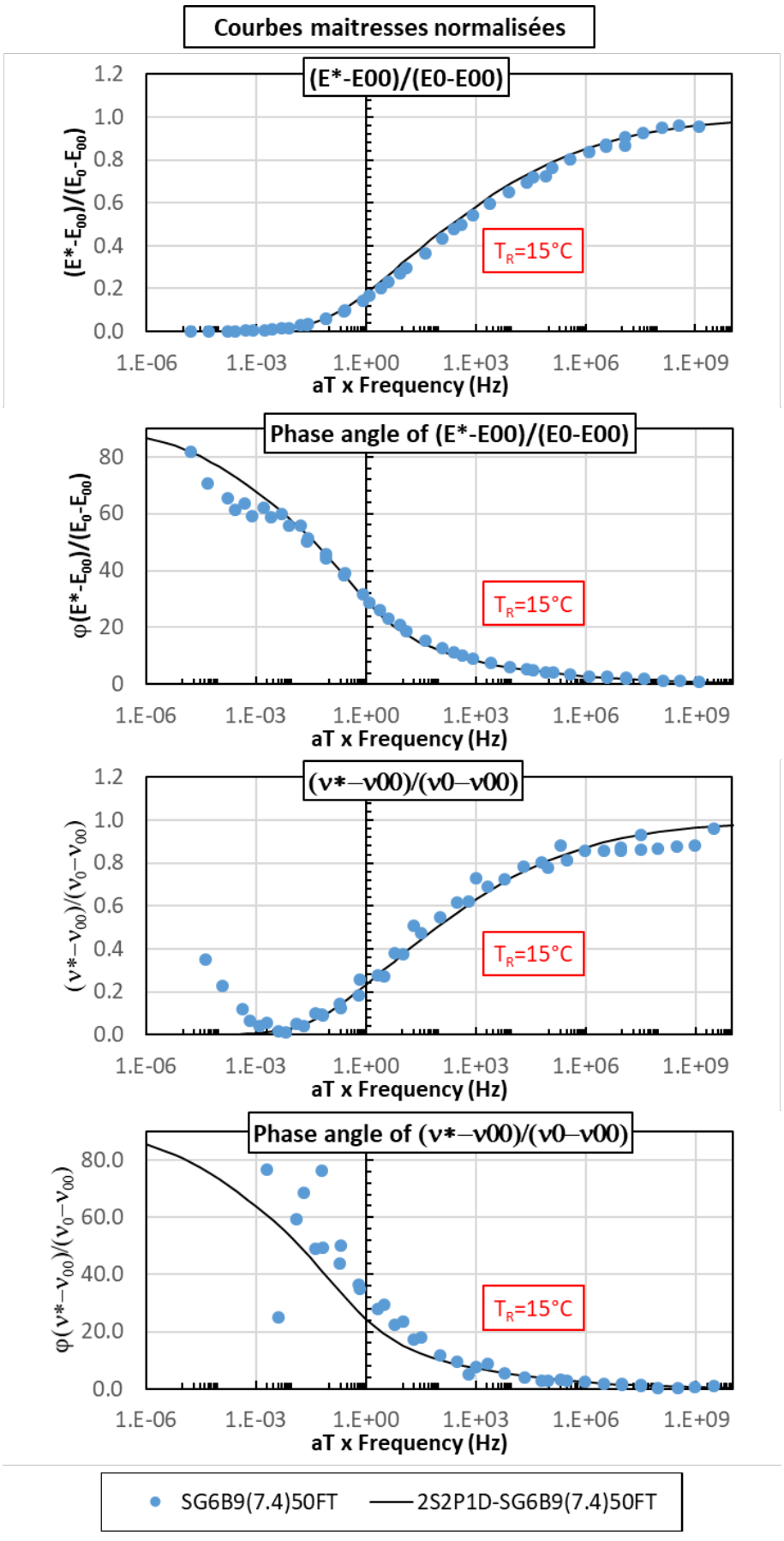
2.1.4. Eprouvettes non-vieillies avec 50 cycles FT testées à l'état sec (50FT.DRY)

2.1.4.1. SG6B9(7.4)50FT

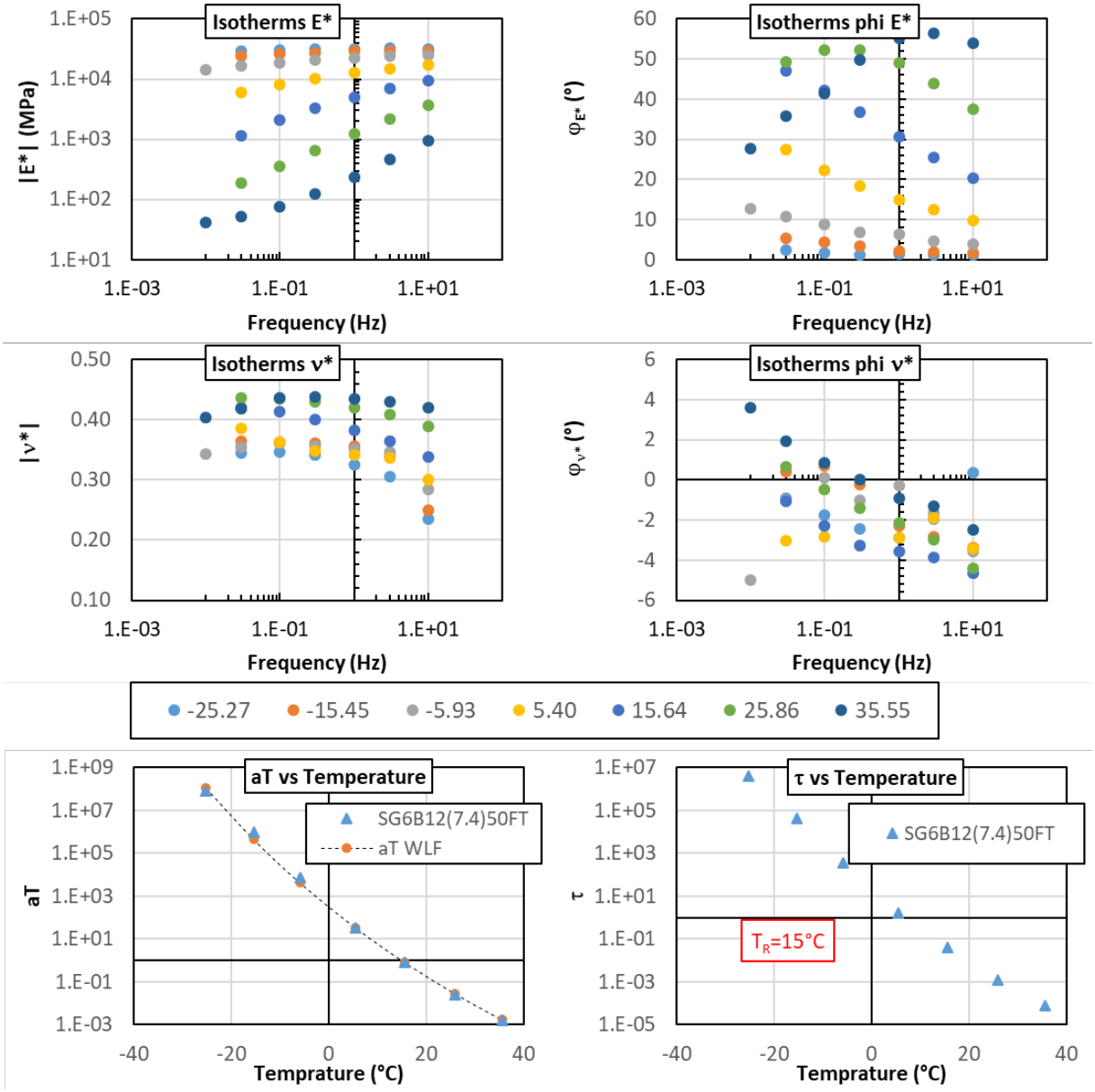


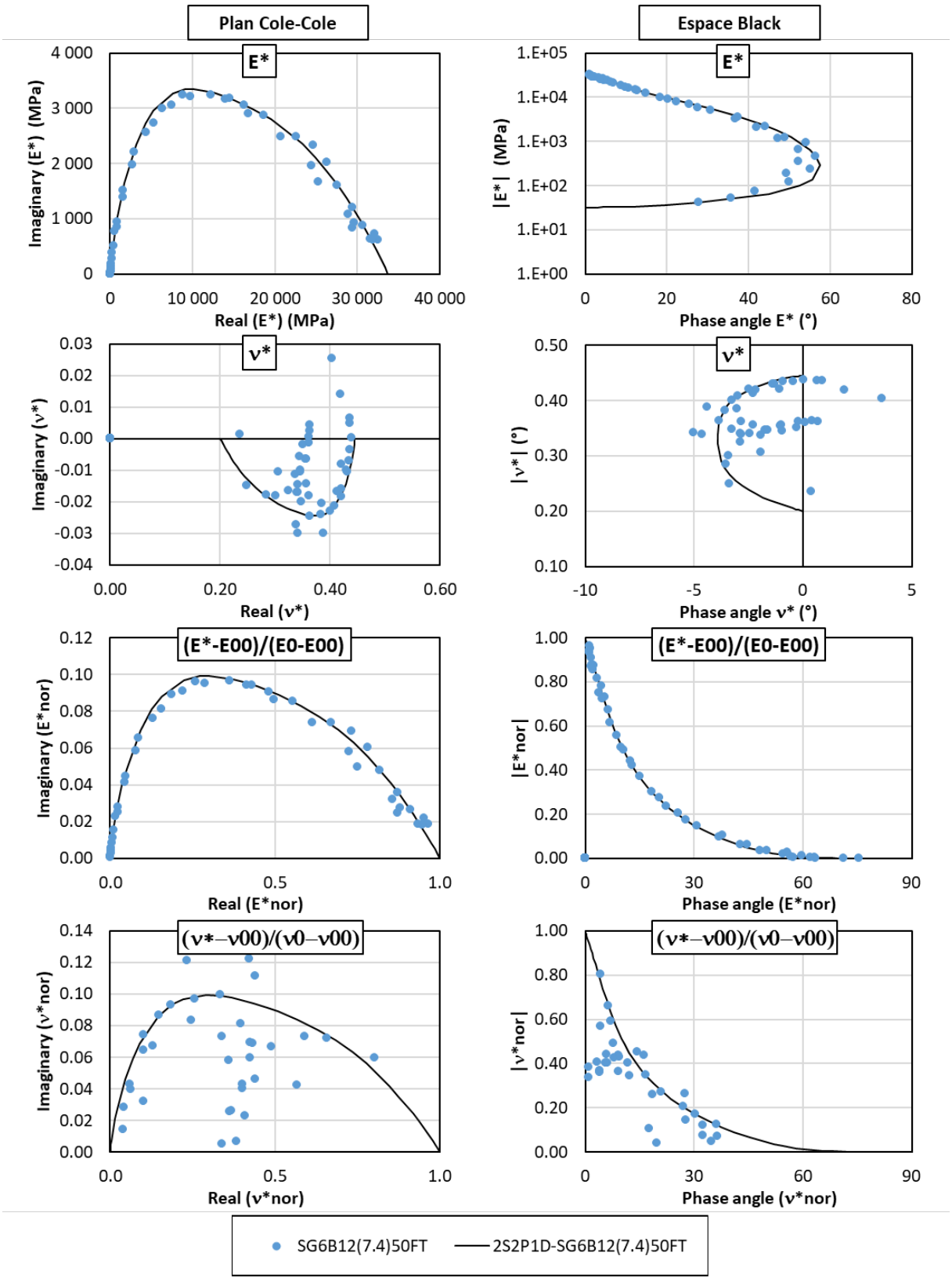

Plan Cole-Cole
E*
Imaginary (E*) (MPa)
Real (E*) (MPa)
Espace Black
E*
|E*| (MPa)
Phase angle E* (°)
ν*
Imaginary (ν*)
Real (ν*)
ν*
|ν*| (°)
Phase angle ν* (°)
(E*-E00)/(E0-E00)
Imaginary (E*nor)
Real (E*nor)
(E*-E00)/(E0-E00)
|E*nor|
Phase angle (E*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
Imaginary (ν*nor)
Real (ν*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
|ν*nor|
Phase angle (ν*nor)
SG6B9(7.4)50FT
2S2P1D-SG6B9(7.4)50FT

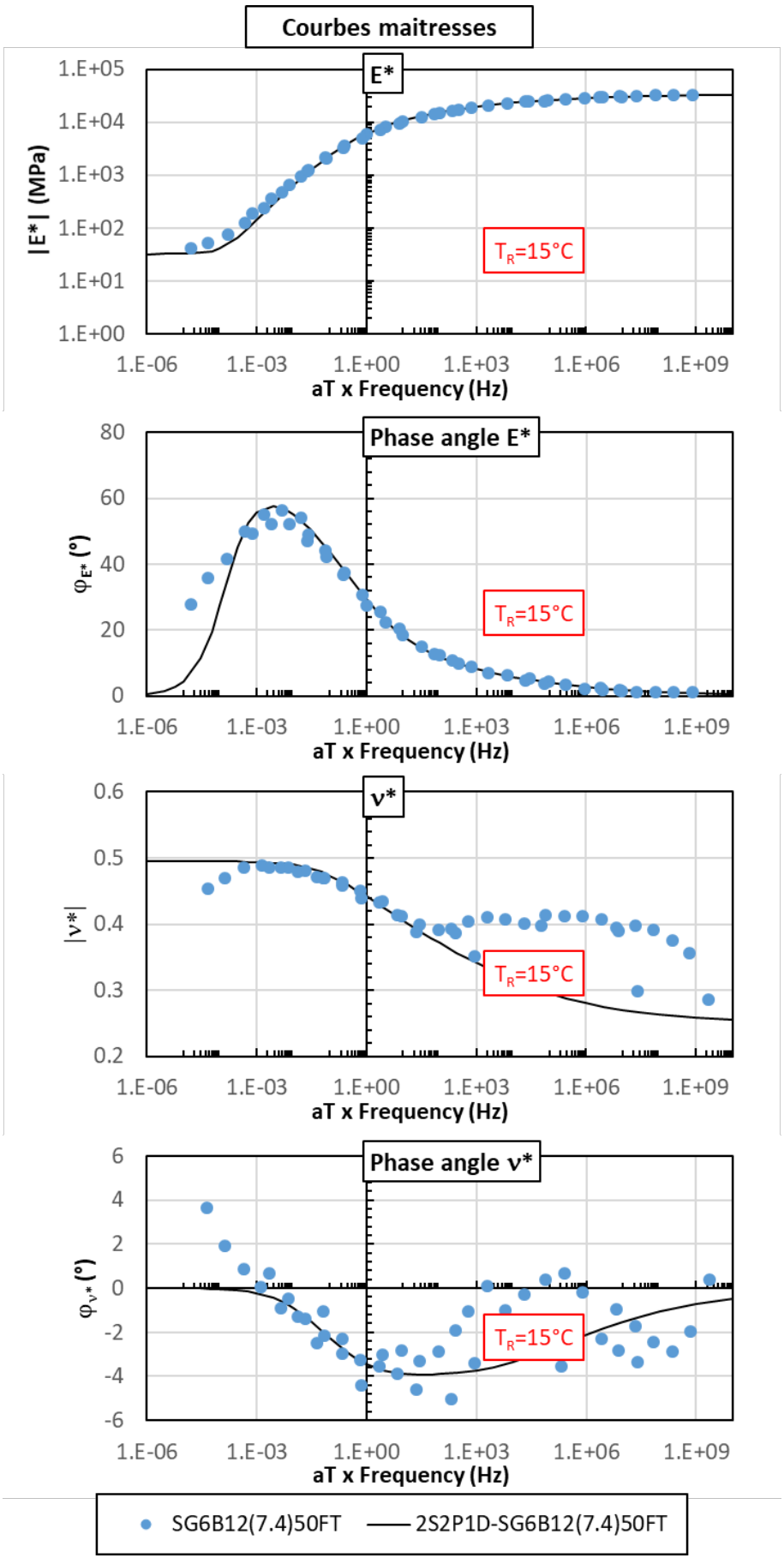

Courbes maitresses
E*
|E*| (MPa)
1.E+05
1.E+04
1.E+03
1.E+02
1.E+01
1.E+00
T_R=15°C
1.E-06
1.E-03
1.E+00
1.E+03
1.E+06
1.E+09
aT x Frequency (Hz)
Phase angle E*
φ_E* (°)
80
60
40
20
0
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
ν*
|ν*|
0.4
0.4
0.3
0.3
0.2
0.2
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle ν*
φ_ν* (°)
10
5
0
-5
-10
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
SG6B9(7.4)50FT
2S2P1D-SG6B9(7.4)50FT

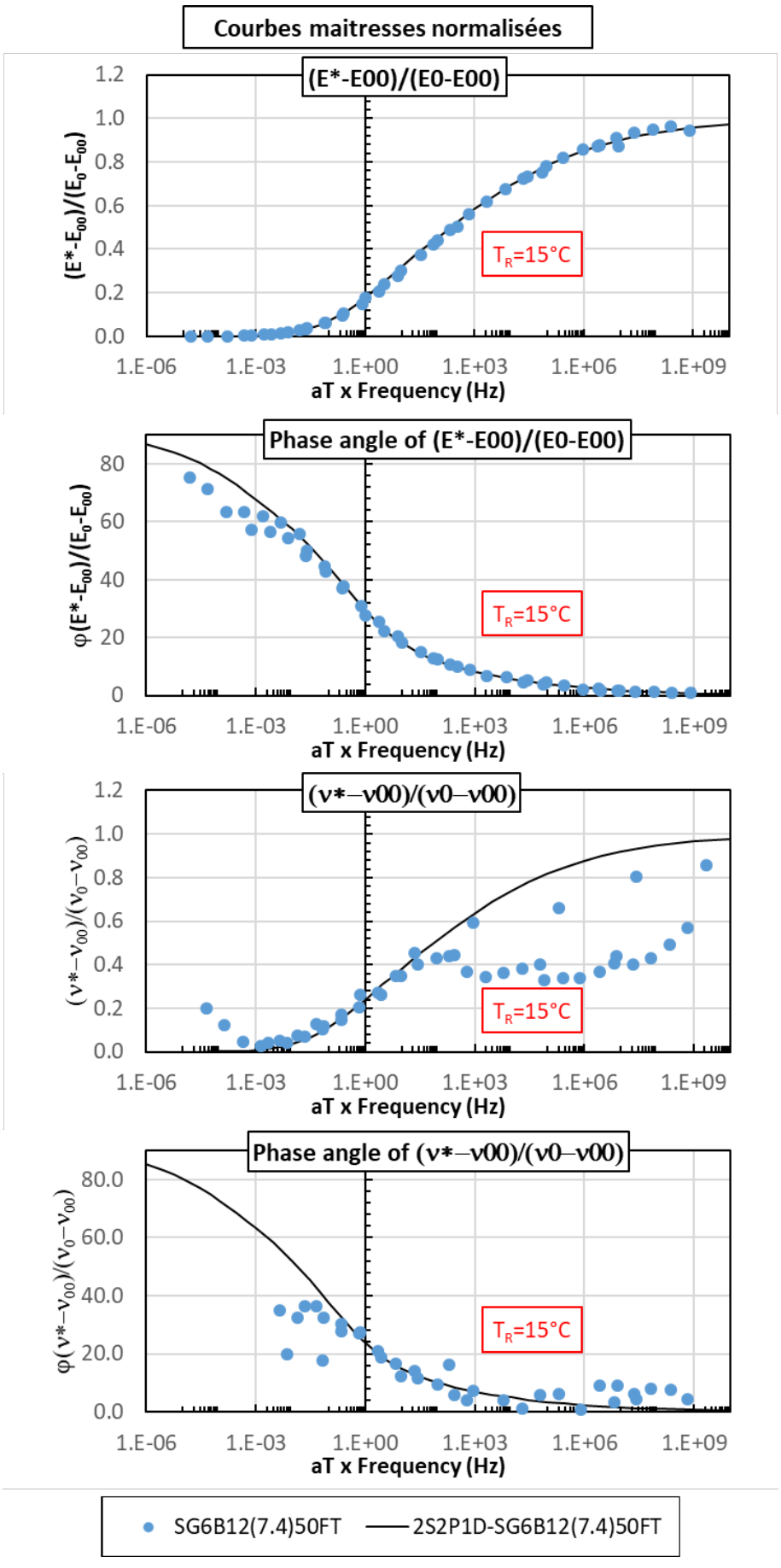


2.1.4.2. SG6B12(7.4)50FT


Isotherms E*
|E*| (MPa)
1.E+05
1.E+04
1.E+03
1.E+02
1.E+01
1.E-03
1.E-01
1.E+01
Frequency (Hz)
Isotherms phi E*
φE* (°)
60
50
40
30
20
10
0
Isotherms ν*
|ν*|
0.50
0.40
0.30
0.20
0.10
Isotherms phi ν*
φν* (°)
6
4
2
0
-2
-4
-6
-25.27
-15.45
-5.93
5.40
15.64
25.86
35.55
aT vs Temperature
aT
1.E+09
1.E+07
1.E+05
1.E+03
1.E+01
1.E-01
1.E-03
SG6B12(7.4)50FT
aT WLF
-40
-20
0
20
40
Temprature (°C)
τ vs Temperature
τ
1.E+07
1.E+05
1.E+03
1.E+01
1.E-01
1.E-03
1.E-05
SG6B12(7.4)50FT
TR=15°C

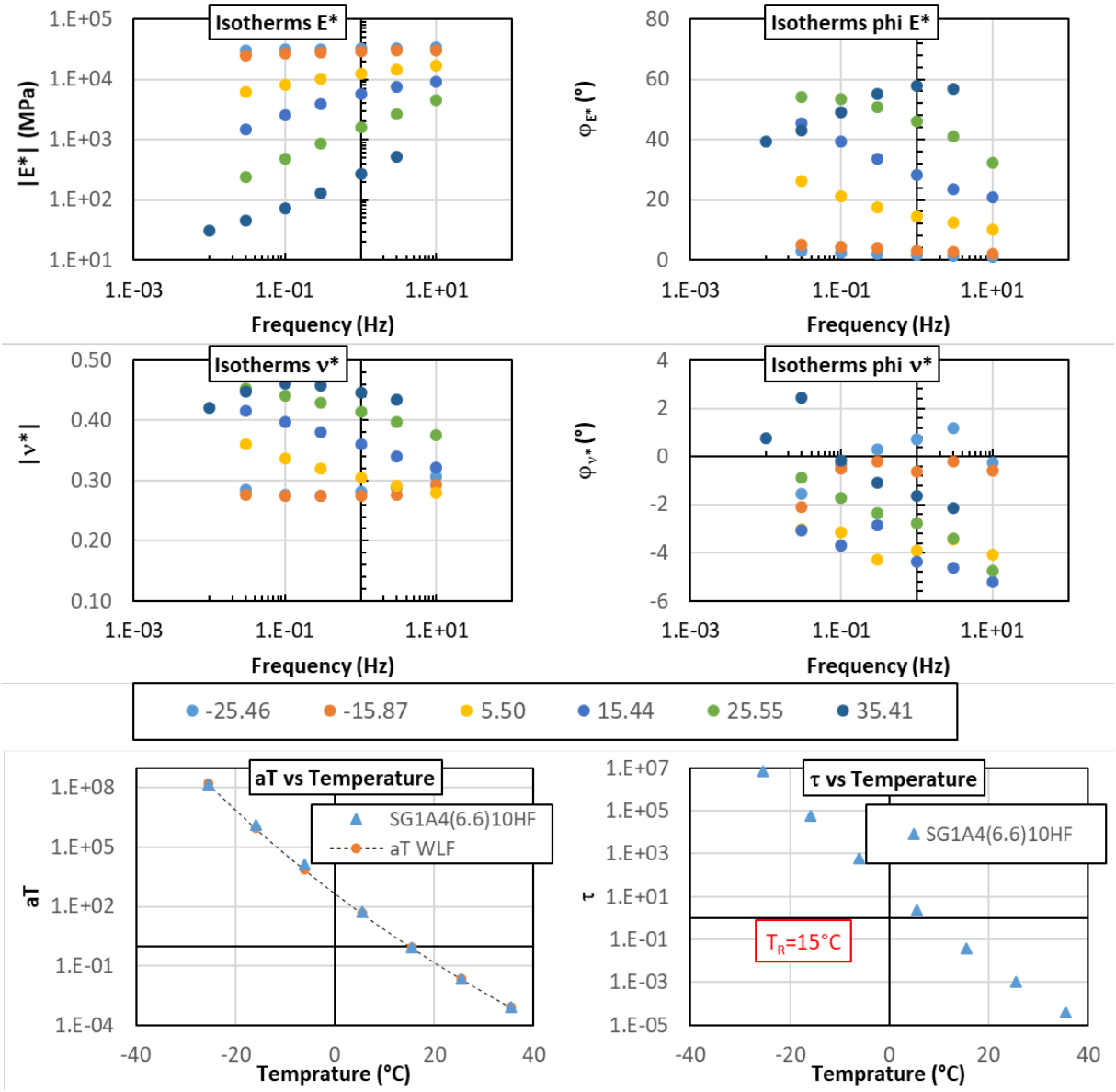

Plan Cole-Cole
E*
Imaginary (E*) (MPa)
Real (E*) (MPa)
Espace Black
E*
|E*| (MPa)
Phase angle E* (°)
ν*
Imaginary (ν*)
Real (ν*)
ν*
|ν*| (°)
Phase angle ν* (°)
(E*-E00)/(E0-E00)
Imaginary (E*nor)
Real (E*nor)
(E*-E00)/(E0-E00)
|E*nor|
Phase angle (E*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
Imaginary (ν*nor)
Real (ν*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
|ν*nor|
Phase angle (ν*nor)
SG6B12(7.4)50FT
2S2P1D-SG6B12(7.4)50FT

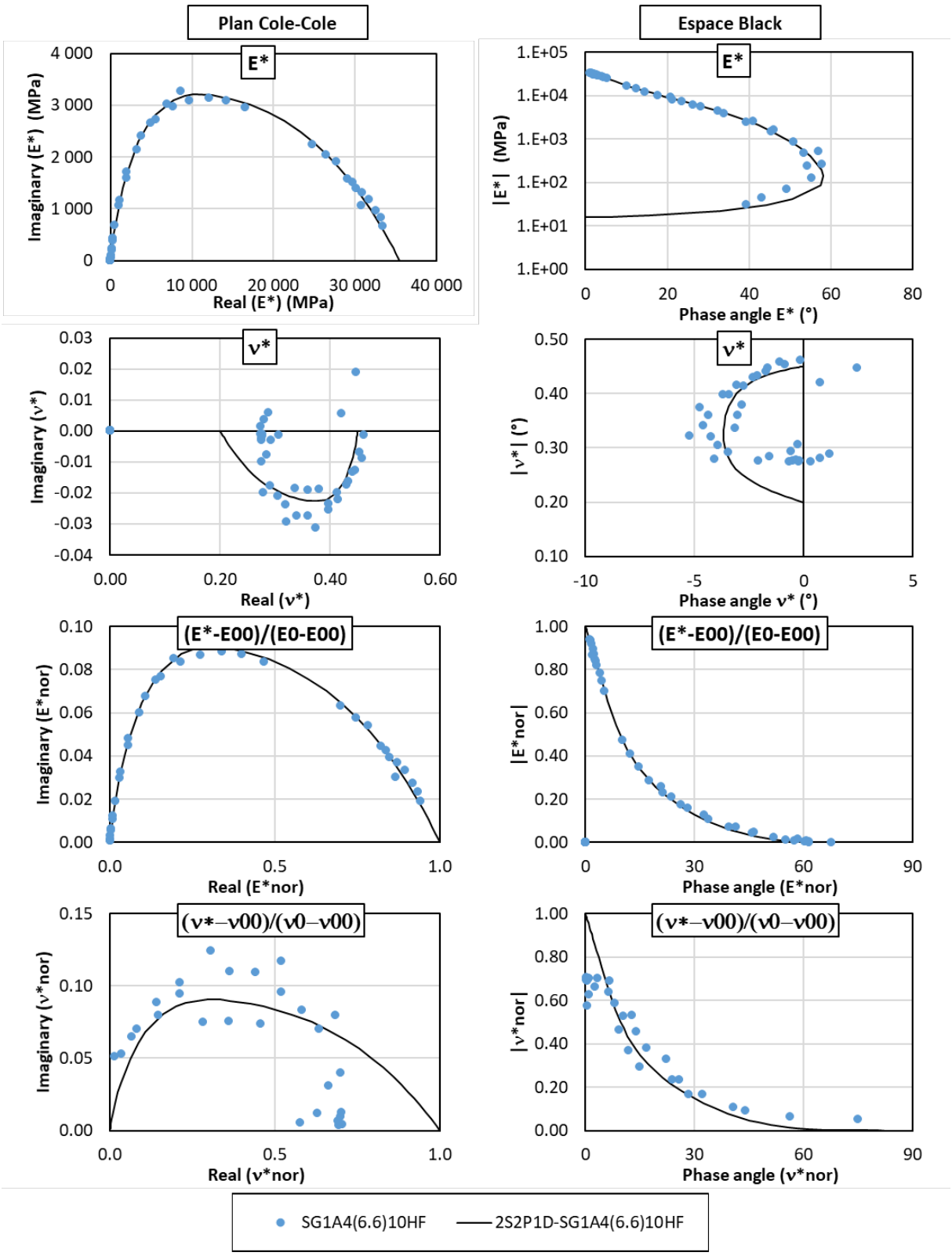

Courbes maitresses
E*
|E*| (MPa)
1.E+05
1.E+04
1.E+03
1.E+02
1.E+01
1.E+00
1.E-06
1.E-03
1.E+00
1.E+03
1.E+06
1.E+09
aT x Frequency (Hz)
T_R=15°C
Phase angle E*
φ_E* (°)
80
60
40
20
0
ν*
|ν*|
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
Phase angle ν*
φ_ν* (°)
6
4
2
0
-2
-4
-6
SG6B12(7.4)50FT
2S2P1D-SG6B12(7.4)50FT

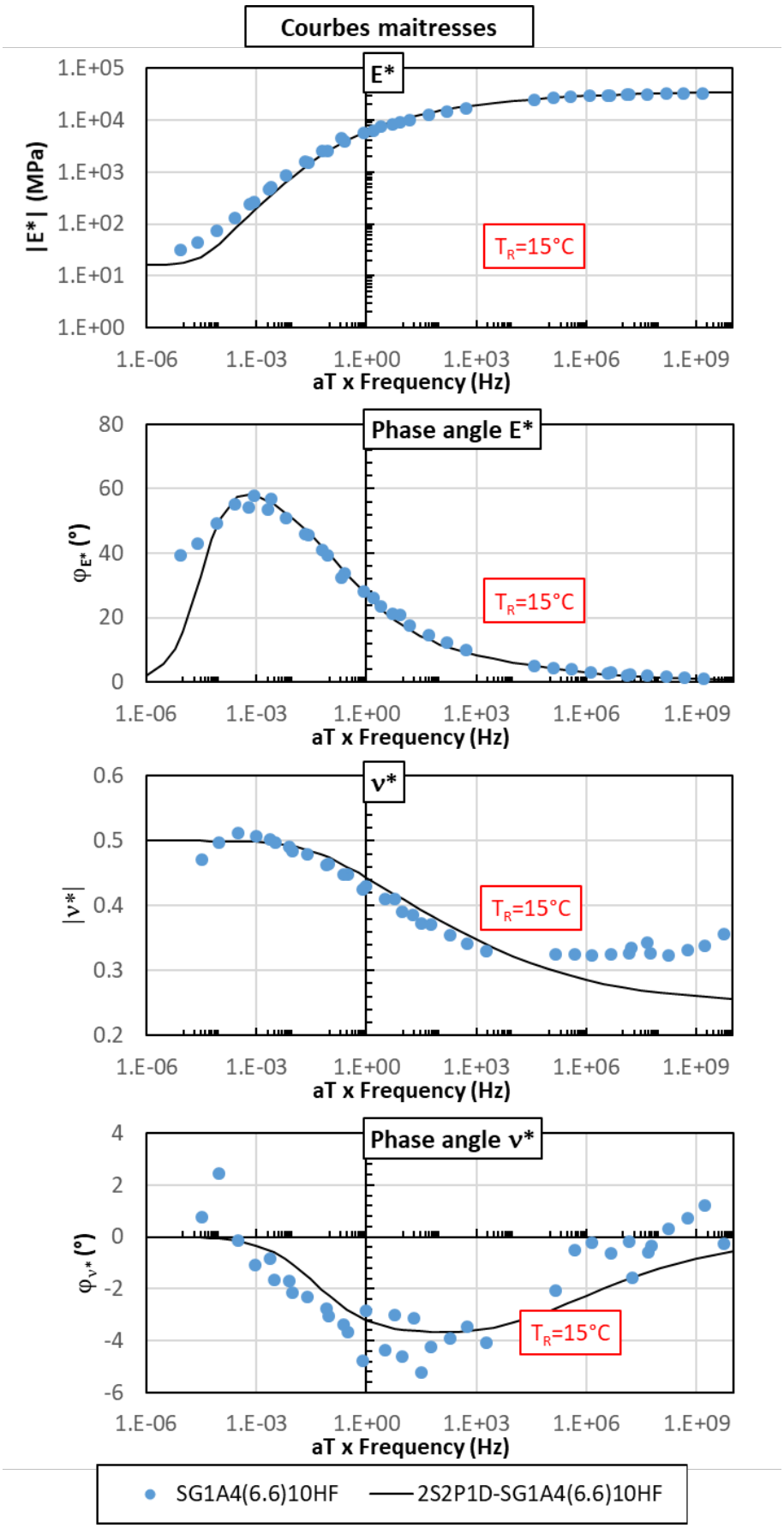


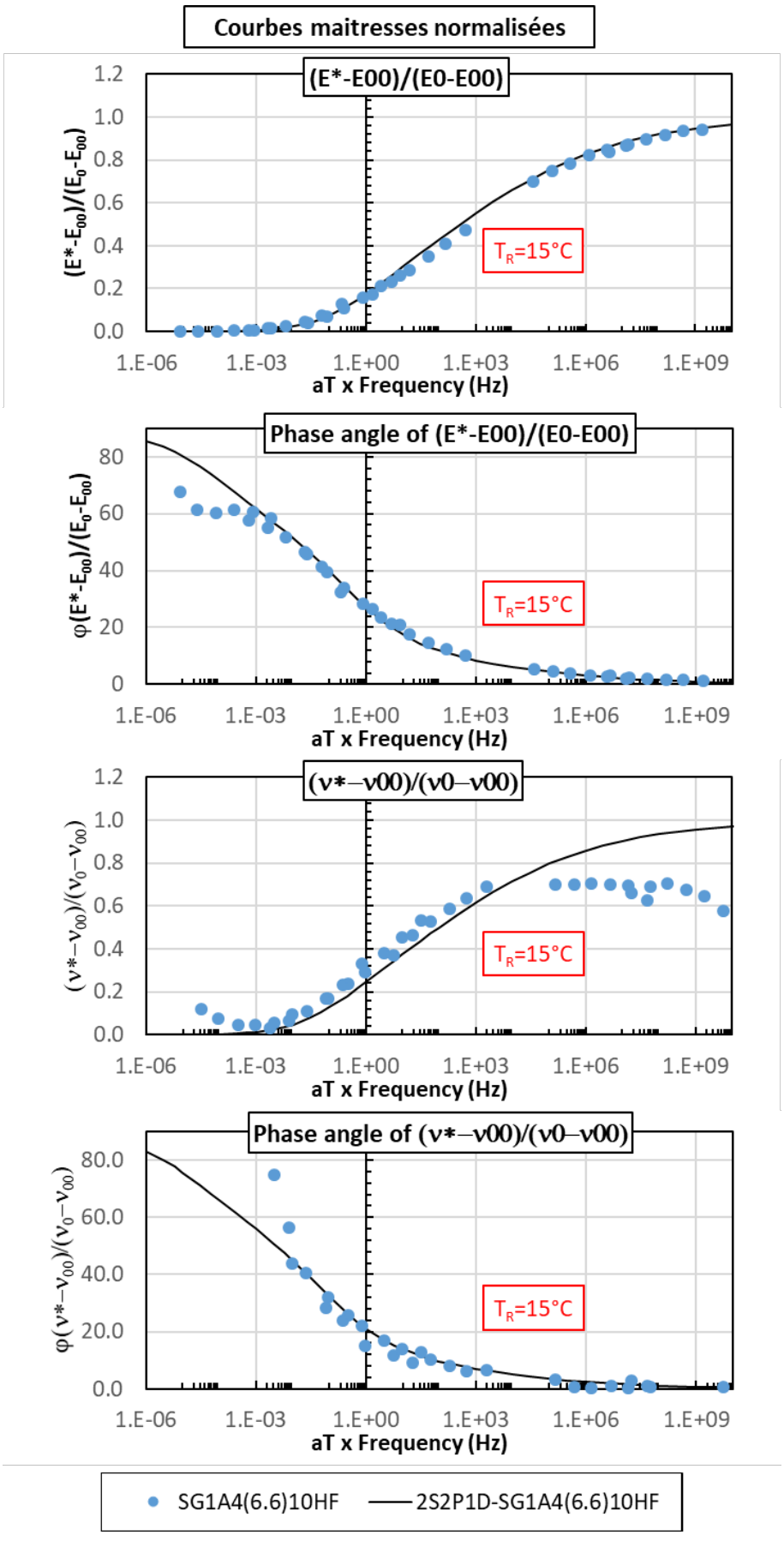
2.1.5. Eprouvettes non-vieillies avec 10 cycles HF testées à l'état sec (10HF.DRY)

2.1.5.1. SG1A4(6.6)10HF

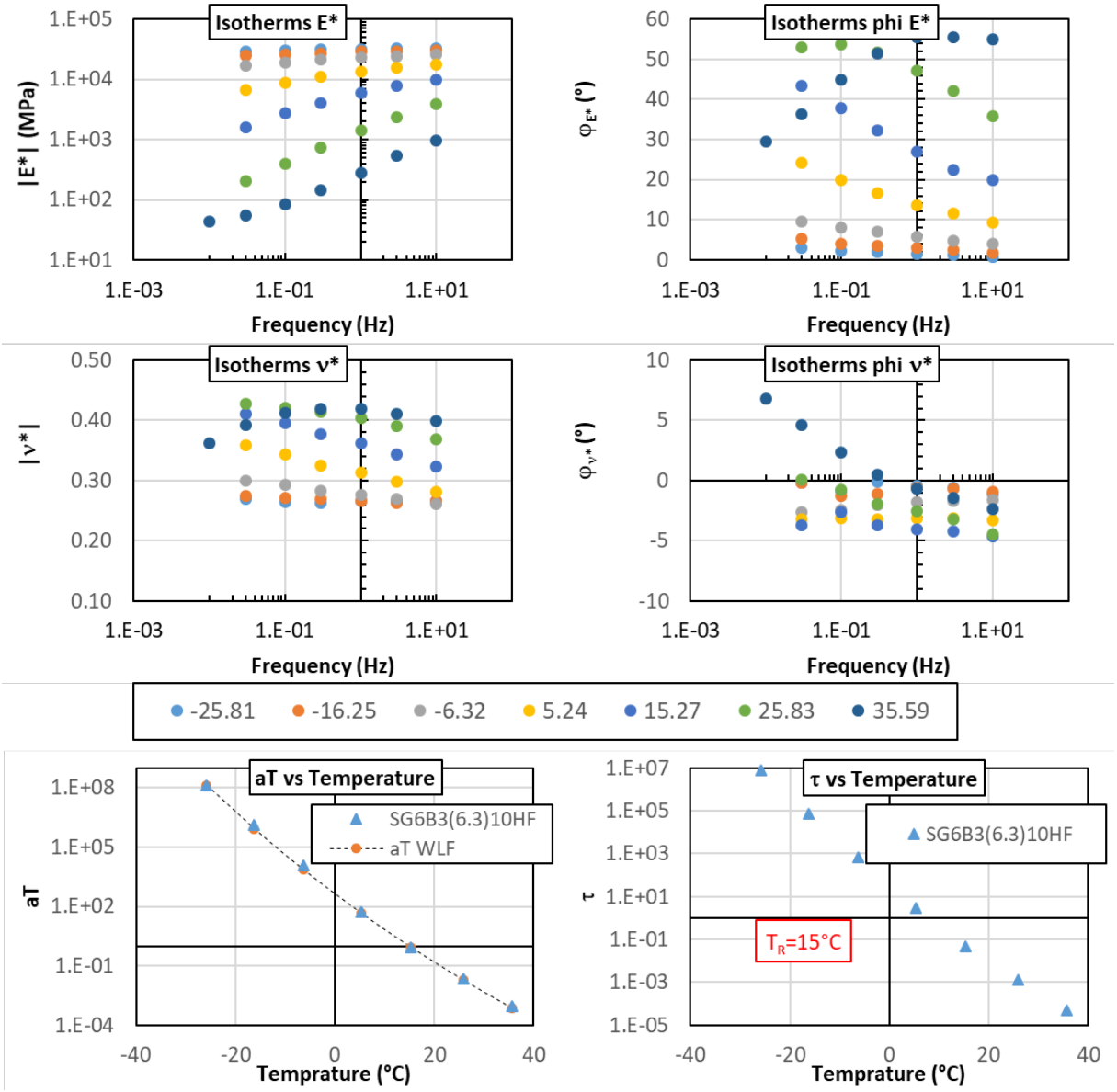


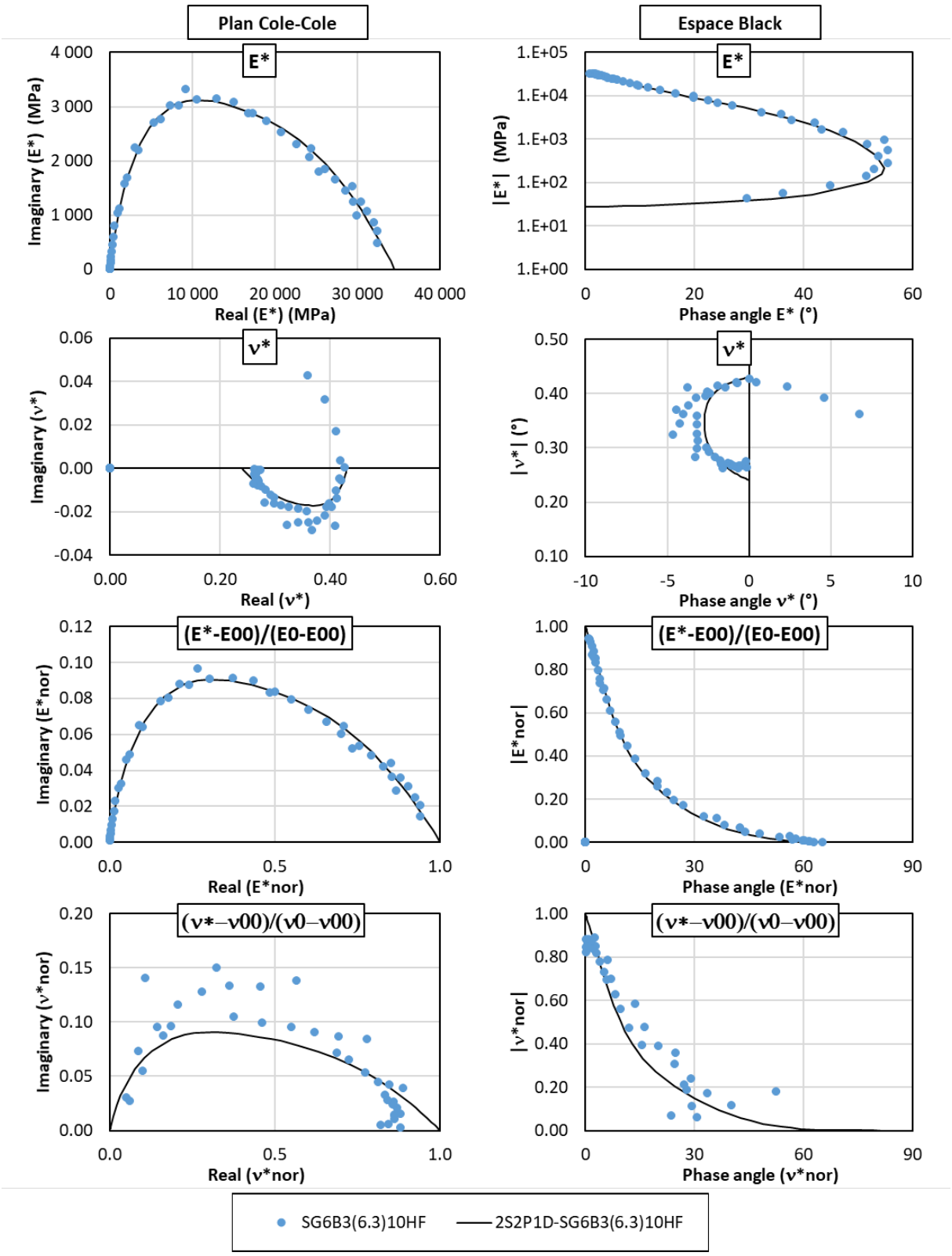

Plan Cole-Cole
E*
Imaginary (E*) (MPa)
Real (E*) (MPa)
Espace Black
E*
|E*| (MPa)
Phase angle E* (°)
ν*
Imaginary (ν*)
Real (ν*)
ν*
|ν*| (°)
Phase angle ν* (°)
(E*-E00)/(E0-E00)
Imaginary (E*nor)
Real (E*nor)
(E*-E00)/(E0-E00)
|E*nor|
Phase angle (E*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
Imaginary (ν*nor)
Real (ν*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
|ν*nor|
Phase angle (ν*nor)
SG1A4(6.6)10HF
2S2P1D-SG1A4(6.6)10HF

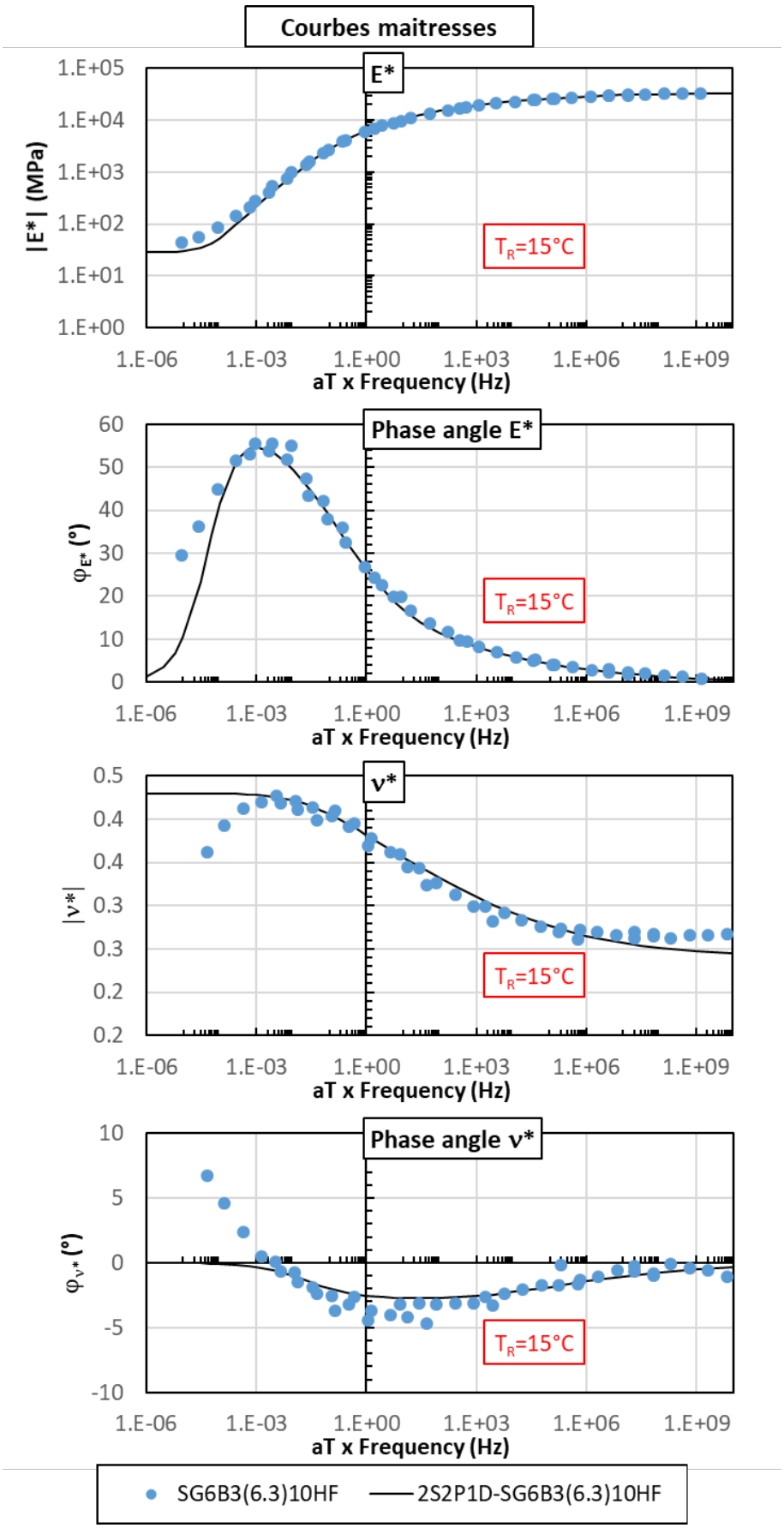

Courbes maitresses
E*
|E*| (MPa)
1.E+05
1.E+04
1.E+03
1.E+02
1.E+01
1.E+00
T_R=15°C
1.E-06
1.E-03
1.E+00
1.E+03
1.E+06
1.E+09
aT x Frequency (Hz)
Phase angle E*
φ_E* (°)
80
60
40
20
0
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
ν*
|ν*|
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle ν*
φ_ν* (°)
4
2
0
-2
-4
-6
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
SG1A4(6.6)10HF
2S2P1D-SG1A4(6.6)10HF

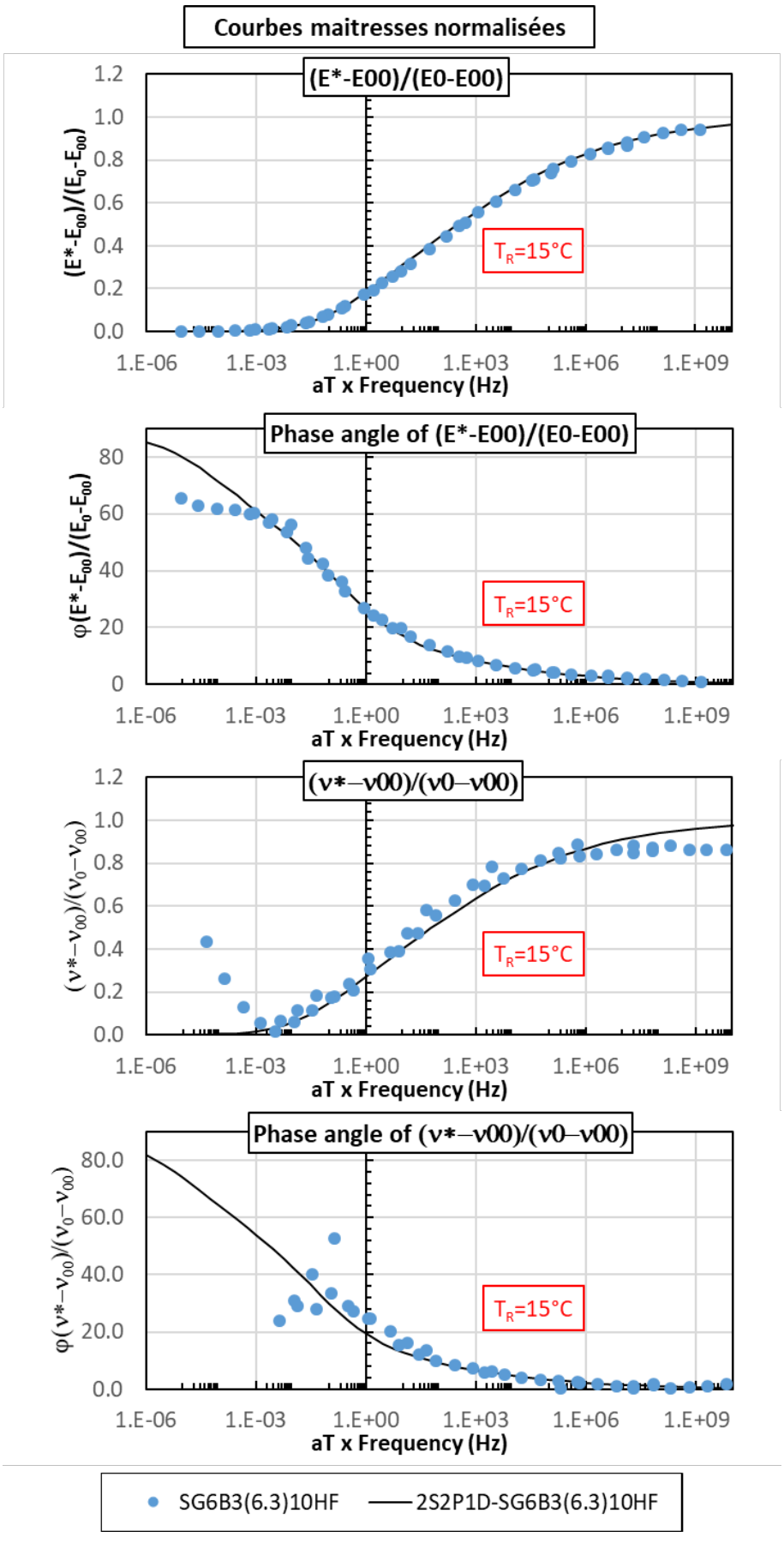

Courbes maitresses normalisées
(E*-E00)/(E0-E00)
(E*-E00)/(E0-E00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle of (E*-E00)/(E0-E00)
φ(E*-E00)/(E0-E00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
(ν*−ν00)/(ν0−ν00)
(ν*−ν00)/(ν0−ν00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle of (ν*−ν00)/(ν0−ν00)
φ(ν*−ν00)/(ν0−ν00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
SG1A4(6.6)10HF
2S2P1D-SG1A4(6.6)10HF

2.1.5.2. SG6B3(6.3)10HF

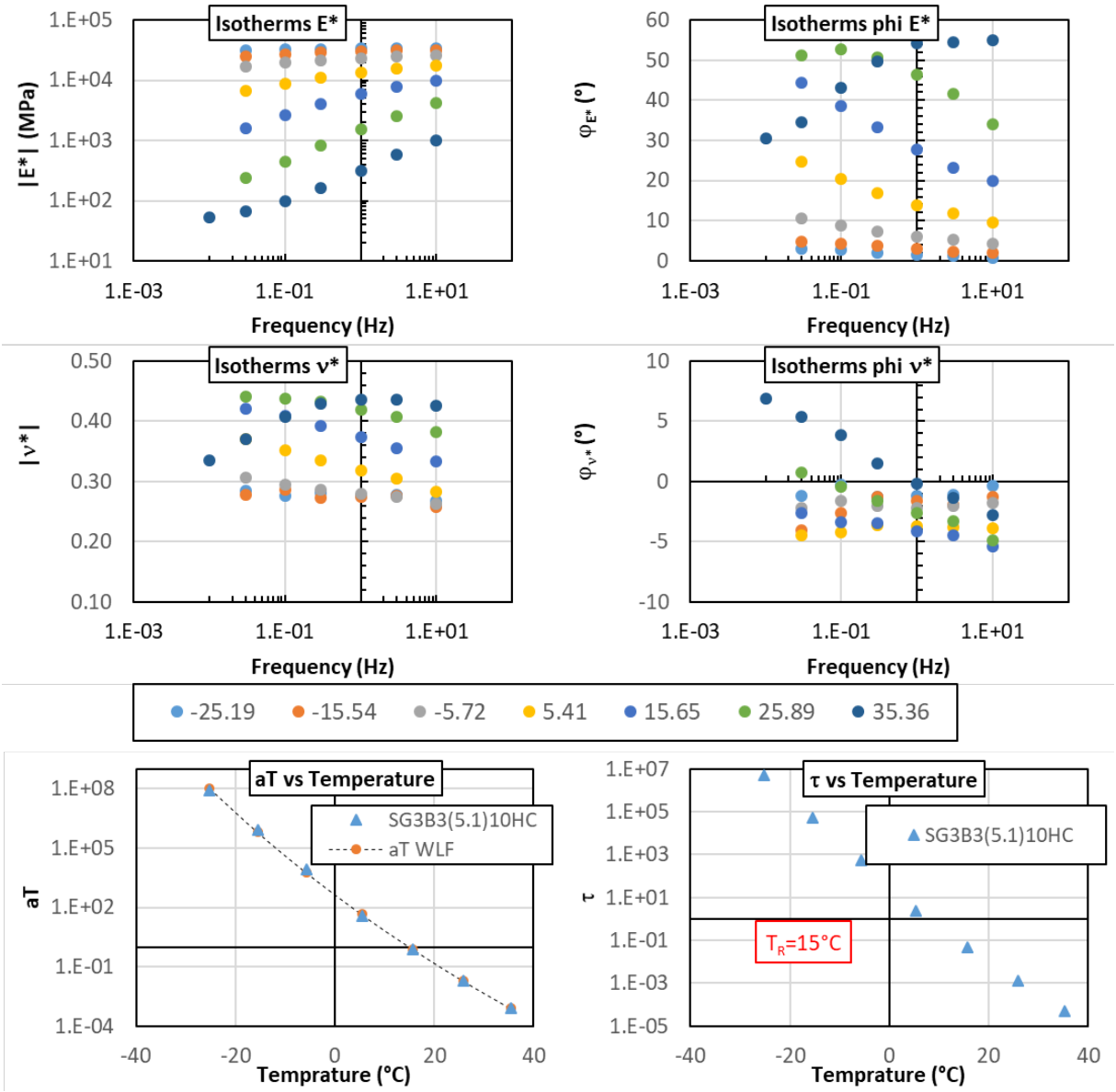


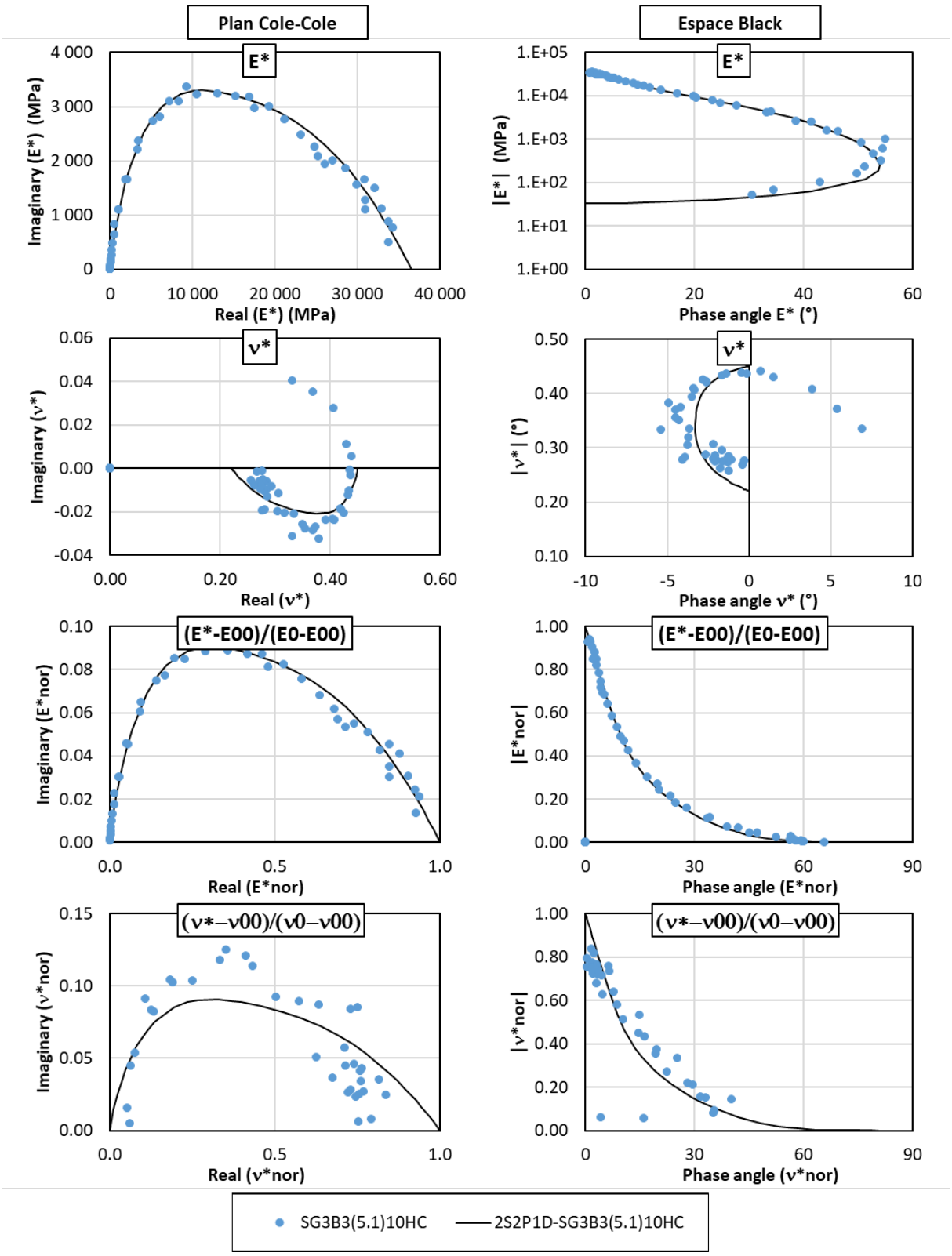

Plan Cole-Cole
E*
Imaginary (E*) (MPa)
Real (E*) (MPa)
Espace Black
E*
|E*| (MPa)
Phase angle E* (°)
ν*
Imaginary (ν*)
Real (ν*)
ν*
|ν*| (°)
Phase angle ν* (°)
(E*-E00)/(E0-E00)
Imaginary (E*nor)
Real (E*nor)
(E*-E00)/(E0-E00)
|E*nor|
Phase angle (E*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
Imaginary (ν*nor)
Real (ν*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
|ν*nor|
Phase angle (ν*nor)
SG6B3(6.3)10HF
2S2P1D-SG6B3(6.3)10HF

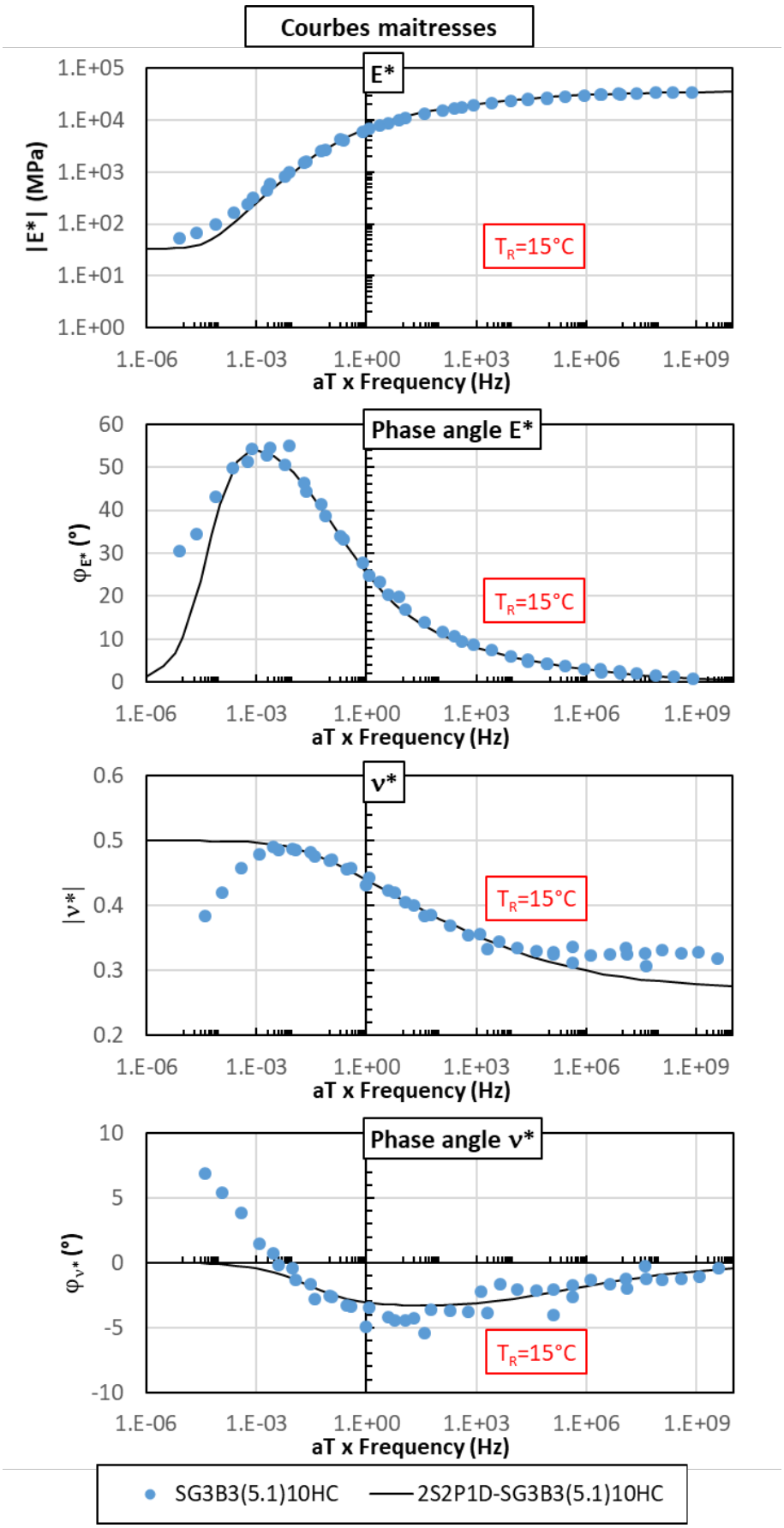

Courbes maitresses
E*
|E*| (MPa)
1.E+05
1.E+04
1.E+03
1.E+02
1.E+01
1.E+00
T_R=15°C
1.E-06
1.E-03
1.E+00
1.E+03
1.E+06
1.E+09
aT x Frequency (Hz)
Phase angle E*
φ_E* (°)
60
50
40
30
20
10
0
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
ν*
|ν*|
0.5
0.4
0.4
0.3
0.3
0.2
0.2
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle ν*
φ_ν* (°)
10
5
0
-5
-10
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
SG6B3(6.3)10HF
2S2P1D-SG6B3(6.3)10HF

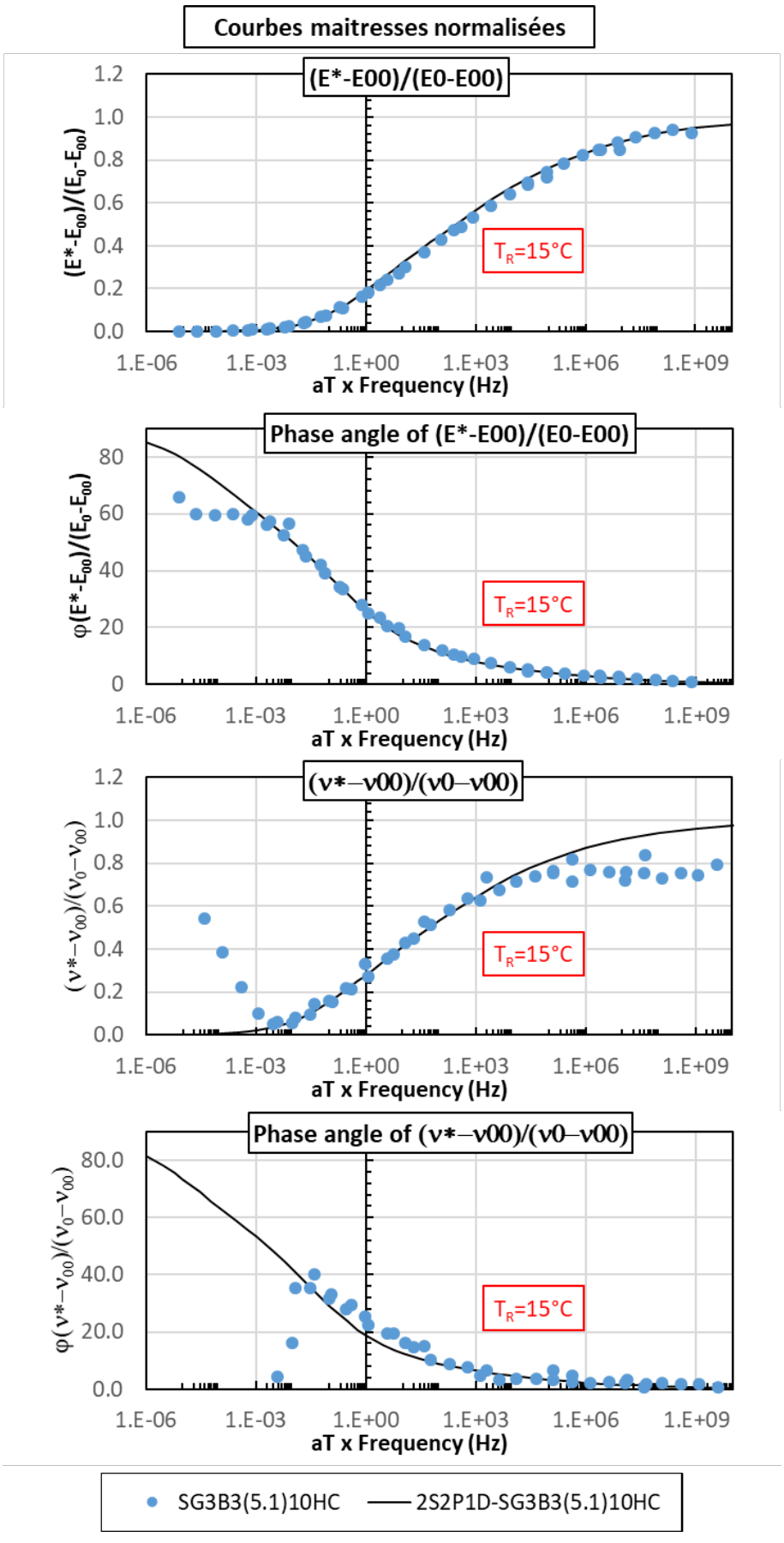

Courbes maitresses normalisées
(E*-E00)/(E0-E00)
(E*-E00)/(E0-E00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle of (E*-E00)/(E0-E00)
φ(E*-E00)/(E0-E00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle of (ν*–ν00)/(ν0–ν00)
φ(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
SG6B3(6.3)10HF
2S2P1D-SG6B3(6.3)10HF

2.1.6. Eprouvette non-vieillie avec 10 cycles HC testées à l'état sec (10HC.DRY) – SG3B3(5.1)10HC




Plan Cole-Cole
E*
Imaginary (E*) (MPa)
Real (E*) (MPa)
Espace Black
E*
|E*| (MPa)
Phase angle E* (°)
ν*
Imaginary (ν*)
Real (ν*)
ν*
|ν*| (°)
Phase angle ν* (°)
(E*-E00)/(E0-E00)
Imaginary (E*nor)
Real (E*nor)
(E*-E00)/(E0-E00)
|E*nor|
Phase angle (E*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
Imaginary (ν*nor)
Real (ν*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
|ν*nor|
Phase angle (ν*nor)
SG3B3(5.1)10HC
2S2P1D-SG3B3(5.1)10HC

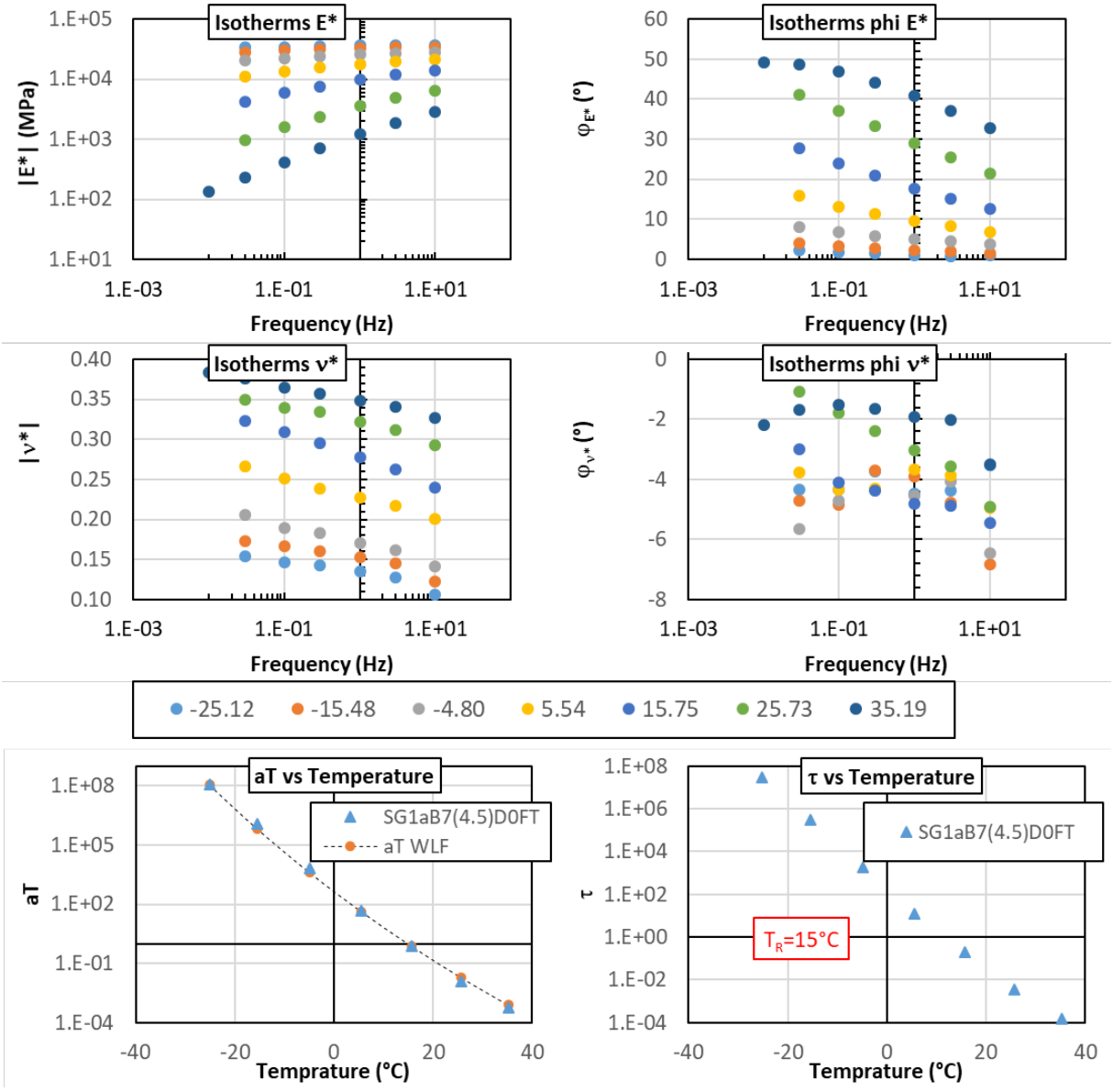

Courbes maitresses
E*
|E*| (MPa)
1.E+05
1.E+04
1.E+03
1.E+02
1.E+01
1.E+00
T_R=15°C
1.E-06
1.E-03
1.E+00
1.E+03
1.E+06
1.E+09
aT x Frequency (Hz)
Phase angle E*
φ_E* (°)
60
50
40
30
20
10
0
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
ν*
|ν*|
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle ν*
φ_ν* (°)
10
5
0
-5
-10
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
SG3B3(5.1)10HC
2S2P1D-SG3B3(5.1)10HC

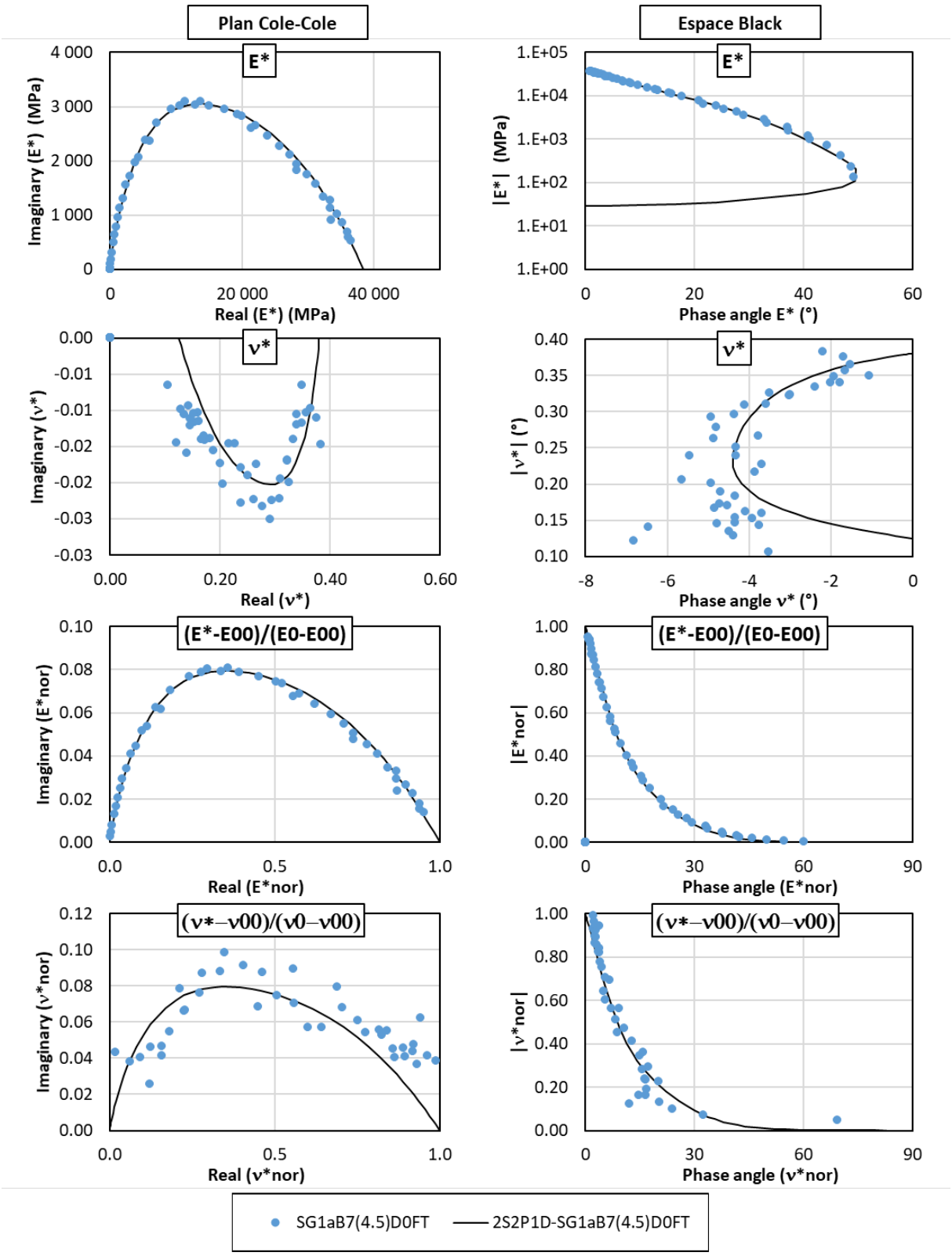

Courbes maitresses normalisées
(E*-E00)/(E0-E00)
(E*-E00)/(E0-E00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle of (E*-E00)/(E0-E00)
φ(E*-E00)/(E0-E00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
(ν*−ν00)/(ν0−ν00)
(ν*−ν00)/(ν0−ν00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle of (ν*−ν00)/(ν0−ν00)
φ(ν*−ν00)/(ν0−ν00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
SG3B3(5.1)10HC
2S2P1D-SG3B3(5.1)10HC

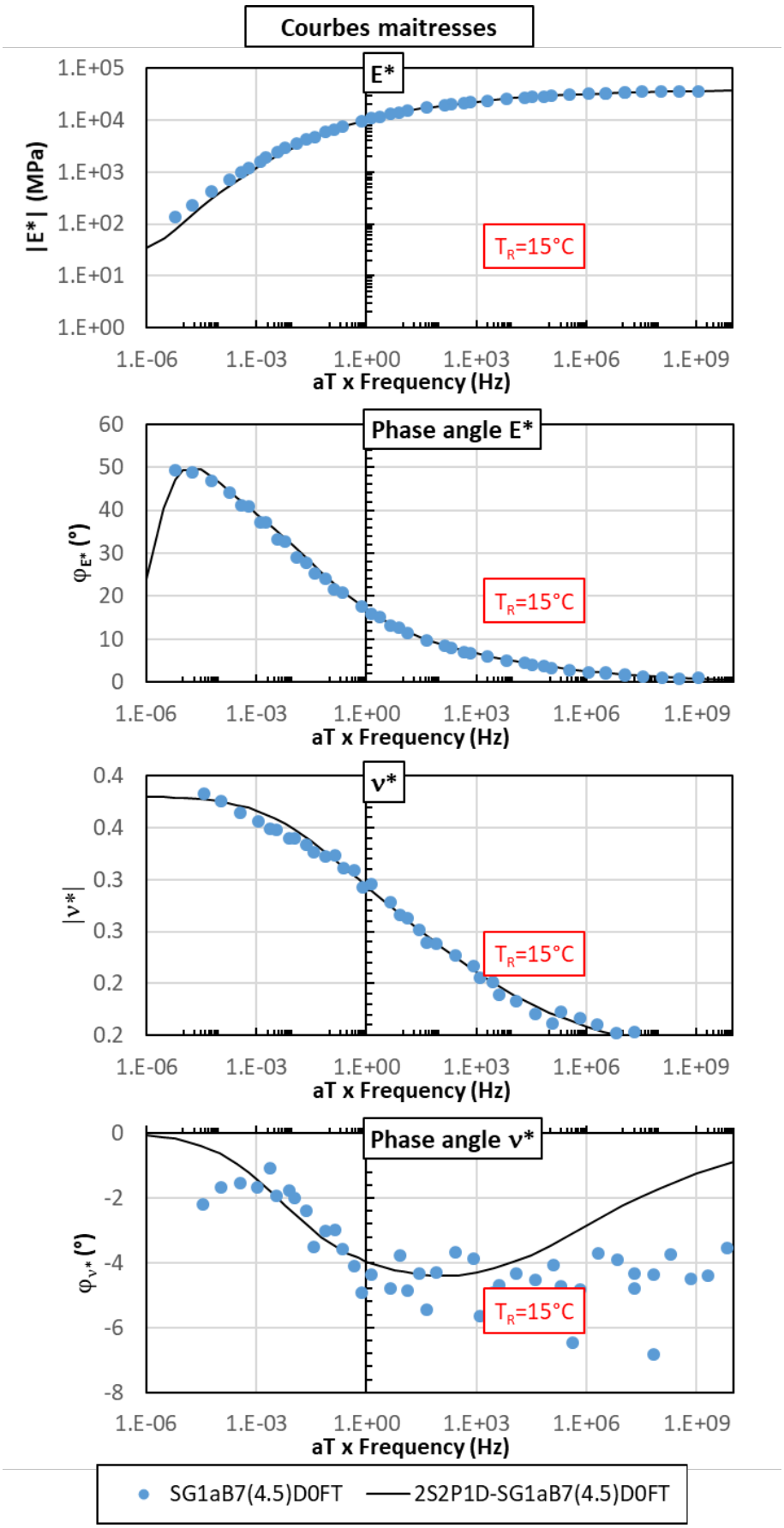
2.2. Eprouvettes vieillies

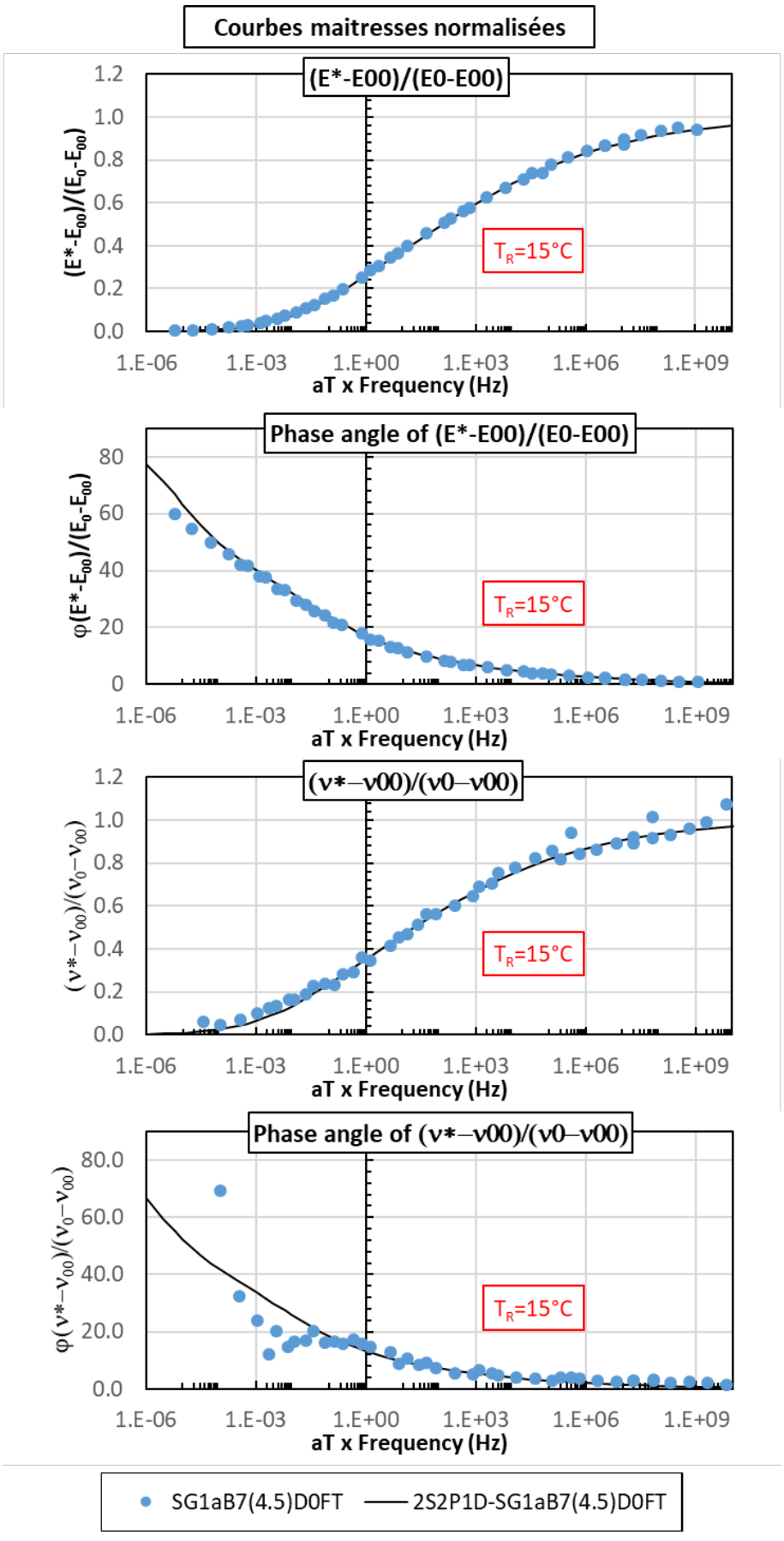
2.2.1. Eprouvettes vieillies sans cycle FT testées à l'état sec (A.0FT.DRY)

2.2.1.1. SG1aB7(4.5)D0FT

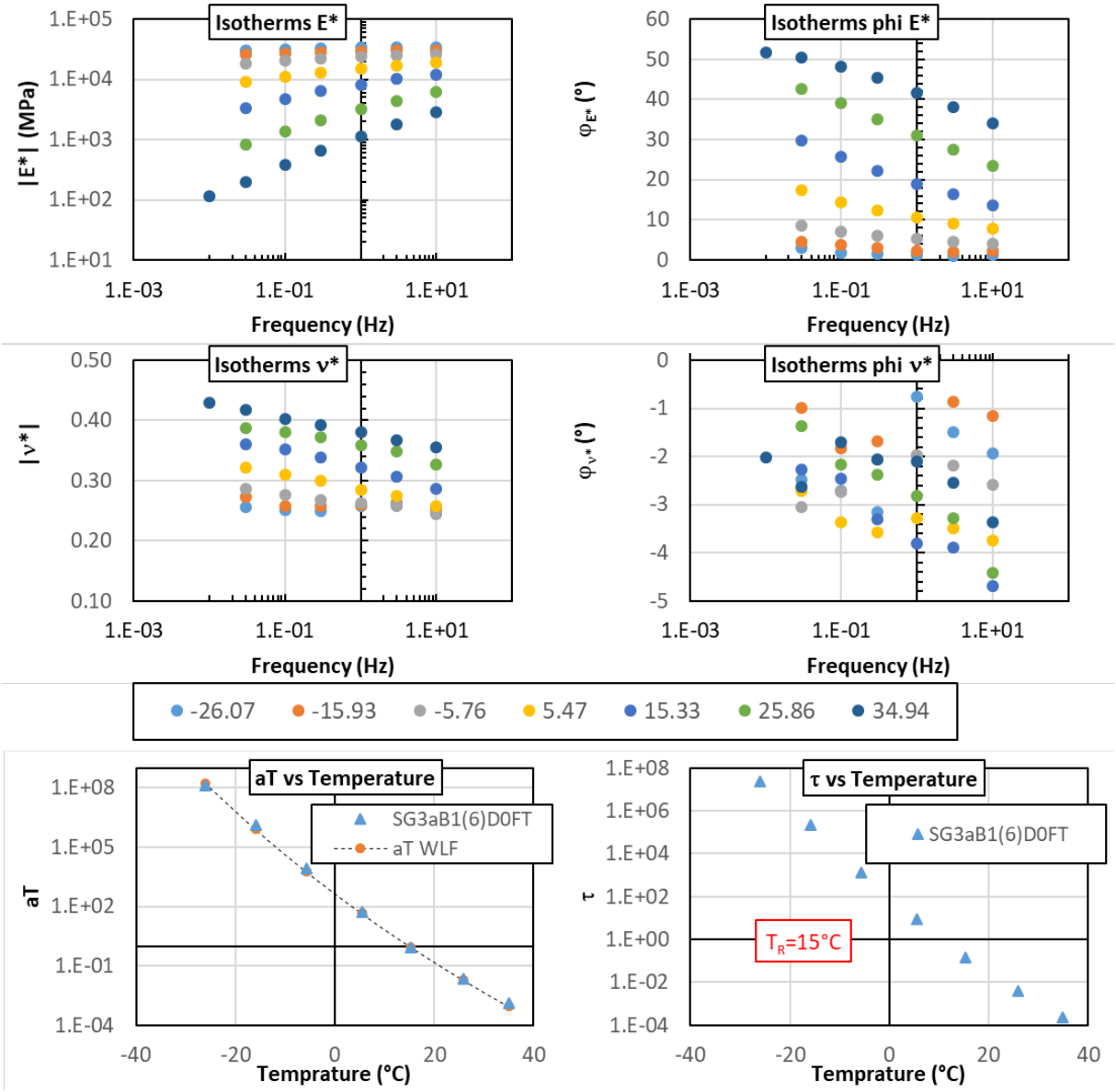


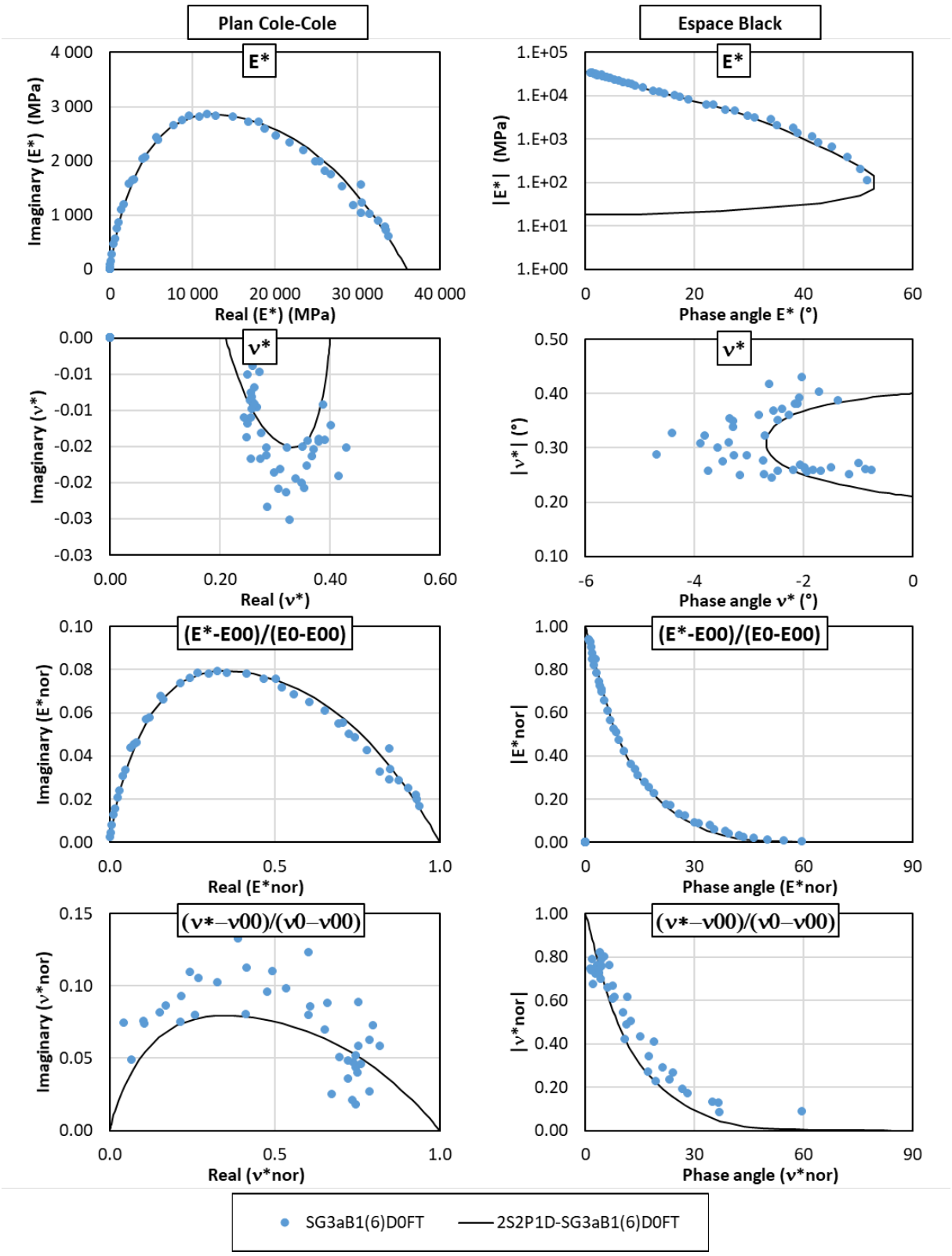

Plan Cole-Cole
E*
Imaginary (E*) (MPa)
Real (E*) (MPa)
Espace Black
E*
|E*| (MPa)
Phase angle E* (°)
ν*
Imaginary (ν*)
Real (ν*)
ν*
|ν*| (°)
Phase angle ν* (°)
(E*-E00)/(E0-E00)
Imaginary (E*nor)
Real (E*nor)
(E*-E00)/(E0-E00)
|E*nor|
Phase angle (E*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
Imaginary (ν*nor)
Real (ν*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
|ν*nor|
Phase angle (ν*nor)
SG1aB7(4.5)D0FT
2S2P1D-SG1aB7(4.5)D0FT

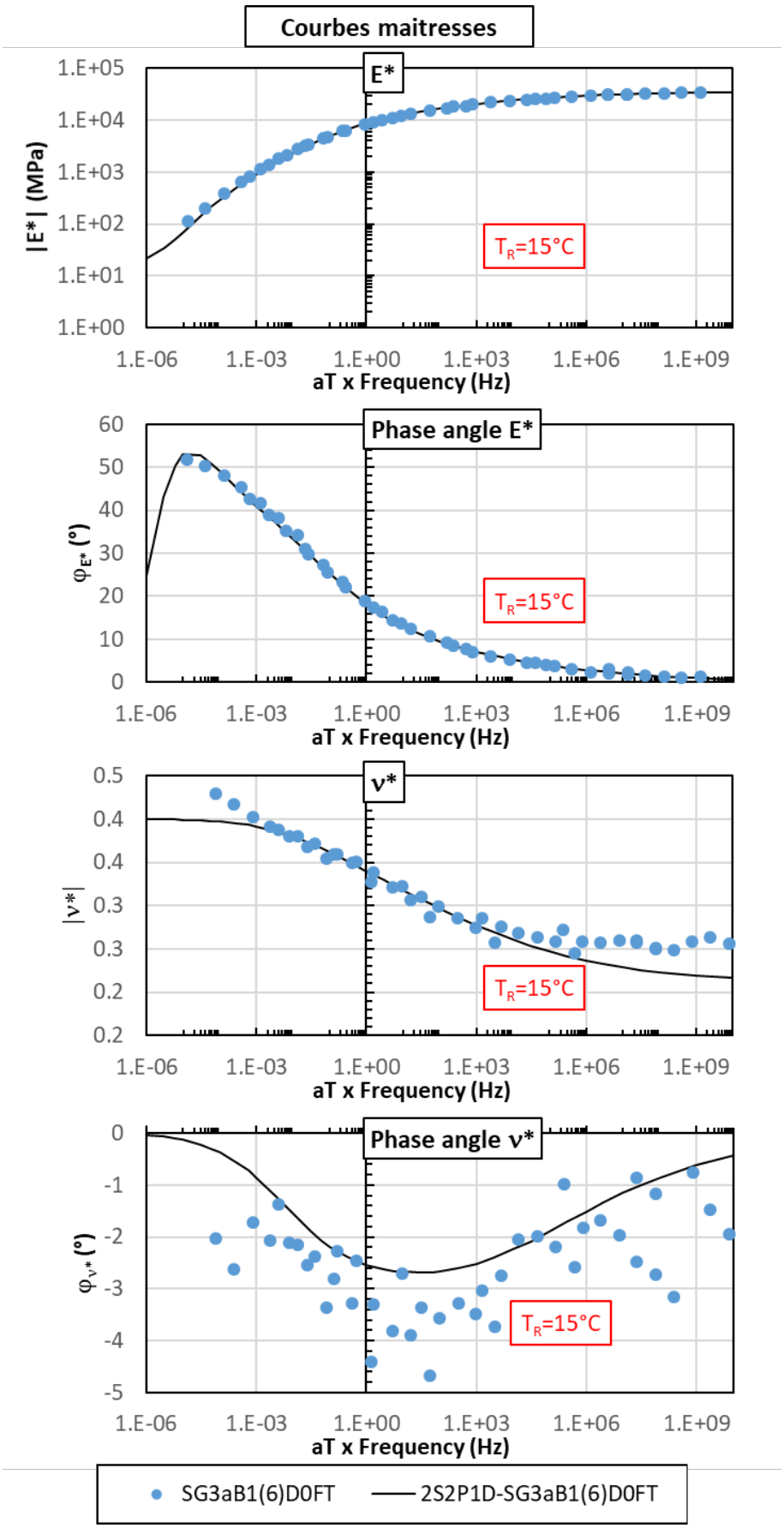

Courbes maitresses
E*
|E*| (MPa)
1.E+05
1.E+04
1.E+03
1.E+02
1.E+01
1.E+00
T_R=15°C
1.E-06
1.E-03
1.E+00
1.E+03
1.E+06
1.E+09
aT x Frequency (Hz)
Phase angle E*
φ_E* (°)
60
50
40
30
20
10
0
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
ν*
|ν*|
0.4
0.4
0.3
0.3
0.2
0.2
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle ν*
φ_ν* (°)
0
-2
-4
-6
-8
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
SG1aB7(4.5)D0FT
2S2P1D-SG1aB7(4.5)D0FT

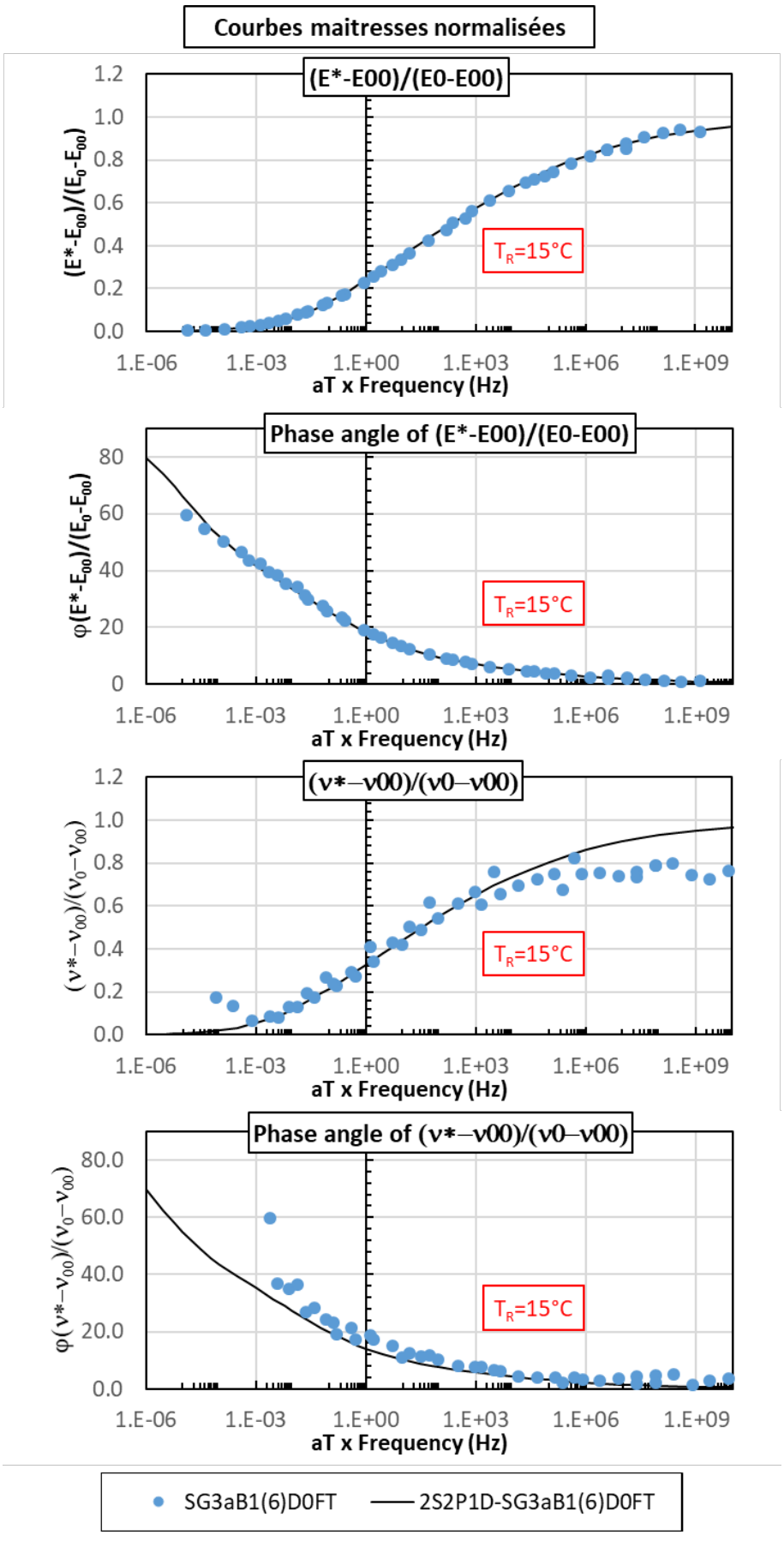

Courbes maitresses normalisées
(E*-E00)/(E0-E00)
(E*-E00)/(E0-E00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle of (E*-E00)/(E0-E00)
φ(E*-E00)/(E0-E00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle of (ν*–ν00)/(ν0–ν00)
φ(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
SG1aB7(4.5)D0FT
2S2P1D-SG1aB7(4.5)D0FT

2.2.1.2. SG3aB1(6)D0FT



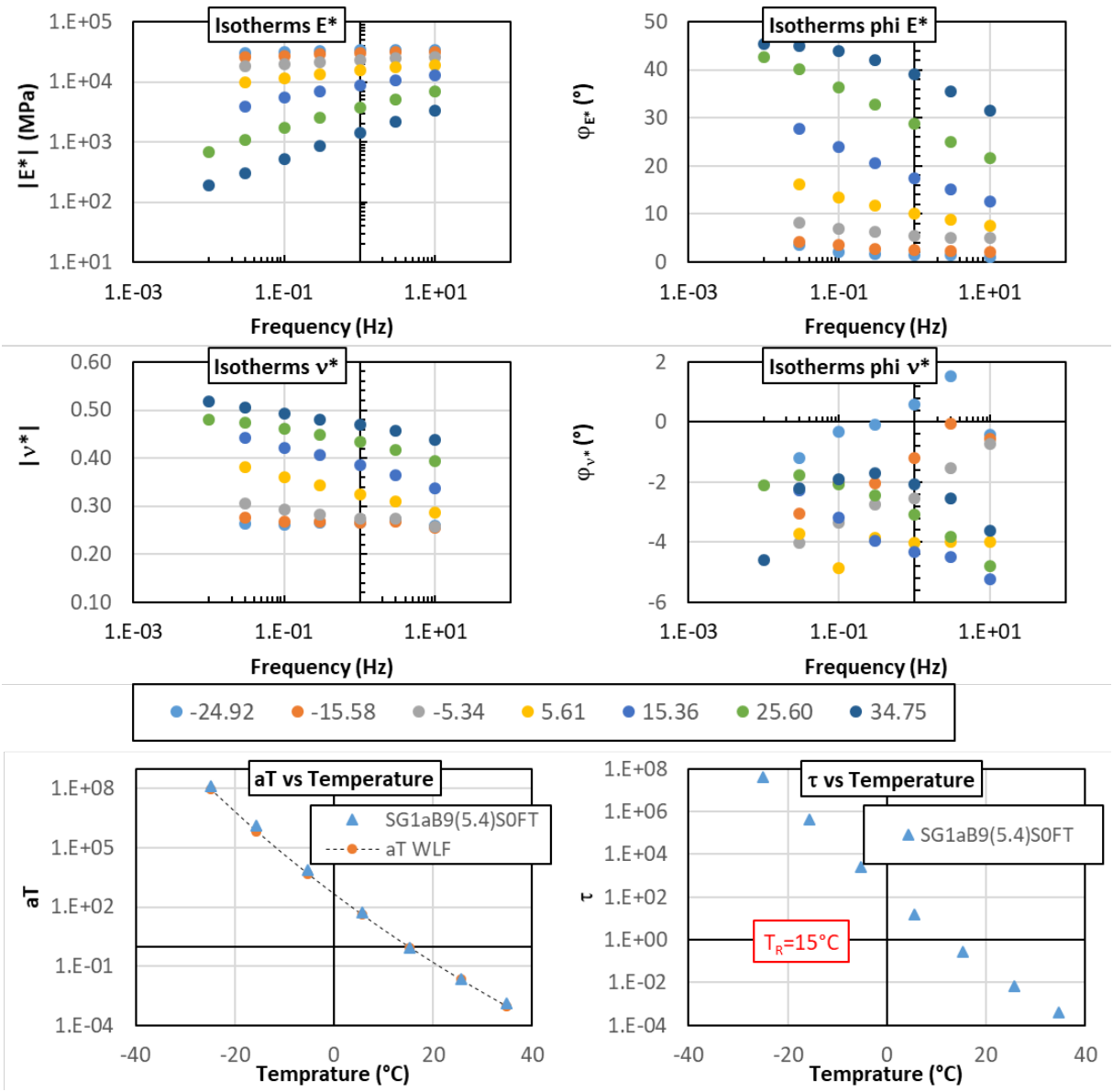

Plan Cole-Cole
E*
Imaginary (E*) (MPa)
Real (E*) (MPa)
Espace Black
E*
|E*| (MPa)
Phase angle E* (°)
ν*
Imaginary (ν*)
Real (ν*)
ν*
|ν*| (°)
Phase angle ν* (°)
(E*-E00)/(E0-E00)
Imaginary (E*nor)
Real (E*nor)
(E*-E00)/(E0-E00)
|E*nor|
Phase angle (E*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
Imaginary (ν*nor)
Real (ν*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
|ν*nor|
Phase angle (ν*nor)
SG3aB1(6)D0FT
2S2P1D-SG3aB1(6)D0FT

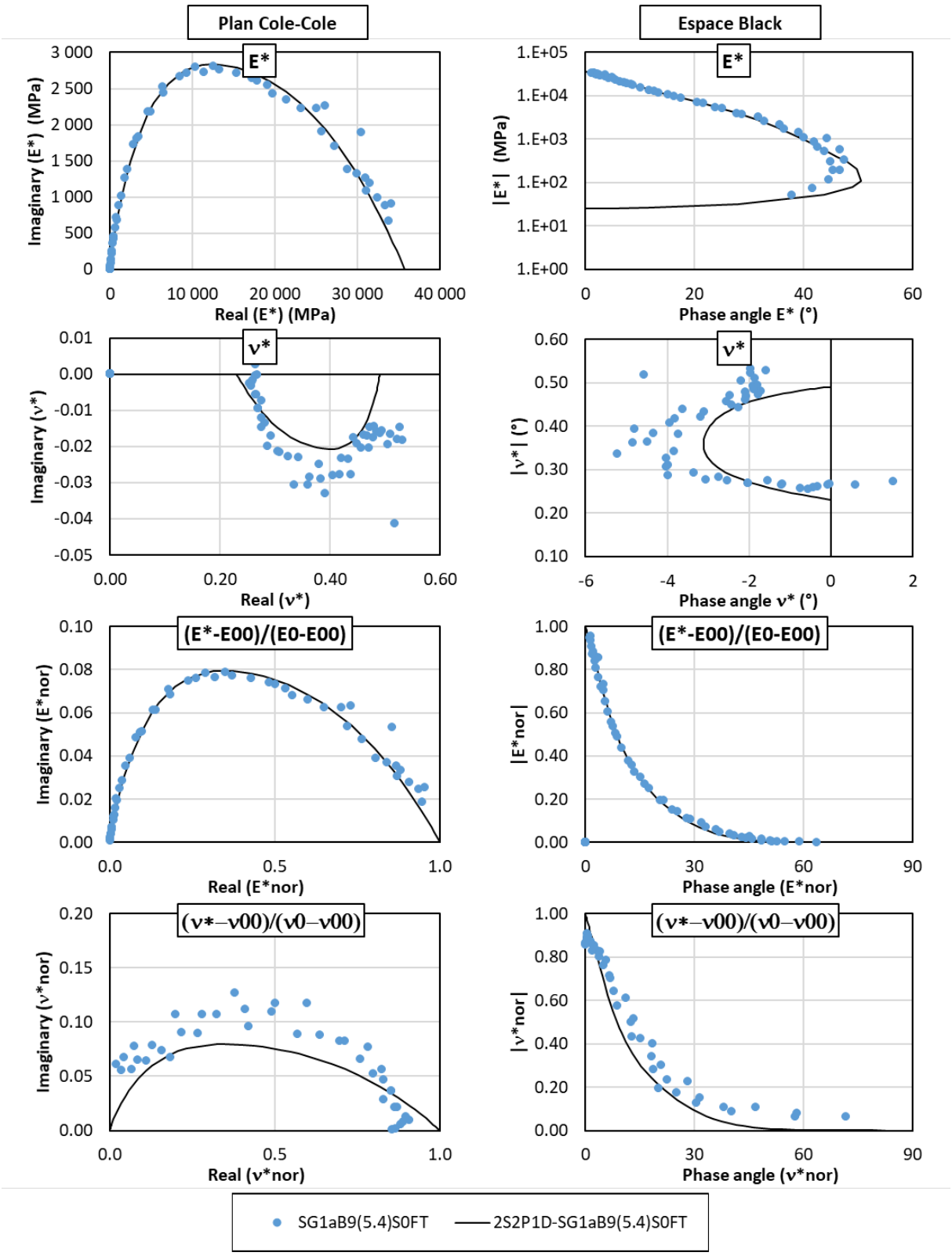

Courbes maitresses
E*
|E*| (MPa)
1.E+05
1.E+04
1.E+03
1.E+02
1.E+01
1.E+00
T_R=15°C
1.E-06
1.E-03
1.E+00
1.E+03
1.E+06
1.E+09
aT x Frequency (Hz)
Phase angle E*
φ_E* (°)
60
50
40
30
20
10
0
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
ν*
|ν*|
0.5
0.4
0.4
0.3
0.3
0.2
0.2
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle ν*
φ_ν* (°)
0
-1
-2
-3
-4
-5
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
SG3aB1(6)D0FT
2S2P1D-SG3aB1(6)D0FT

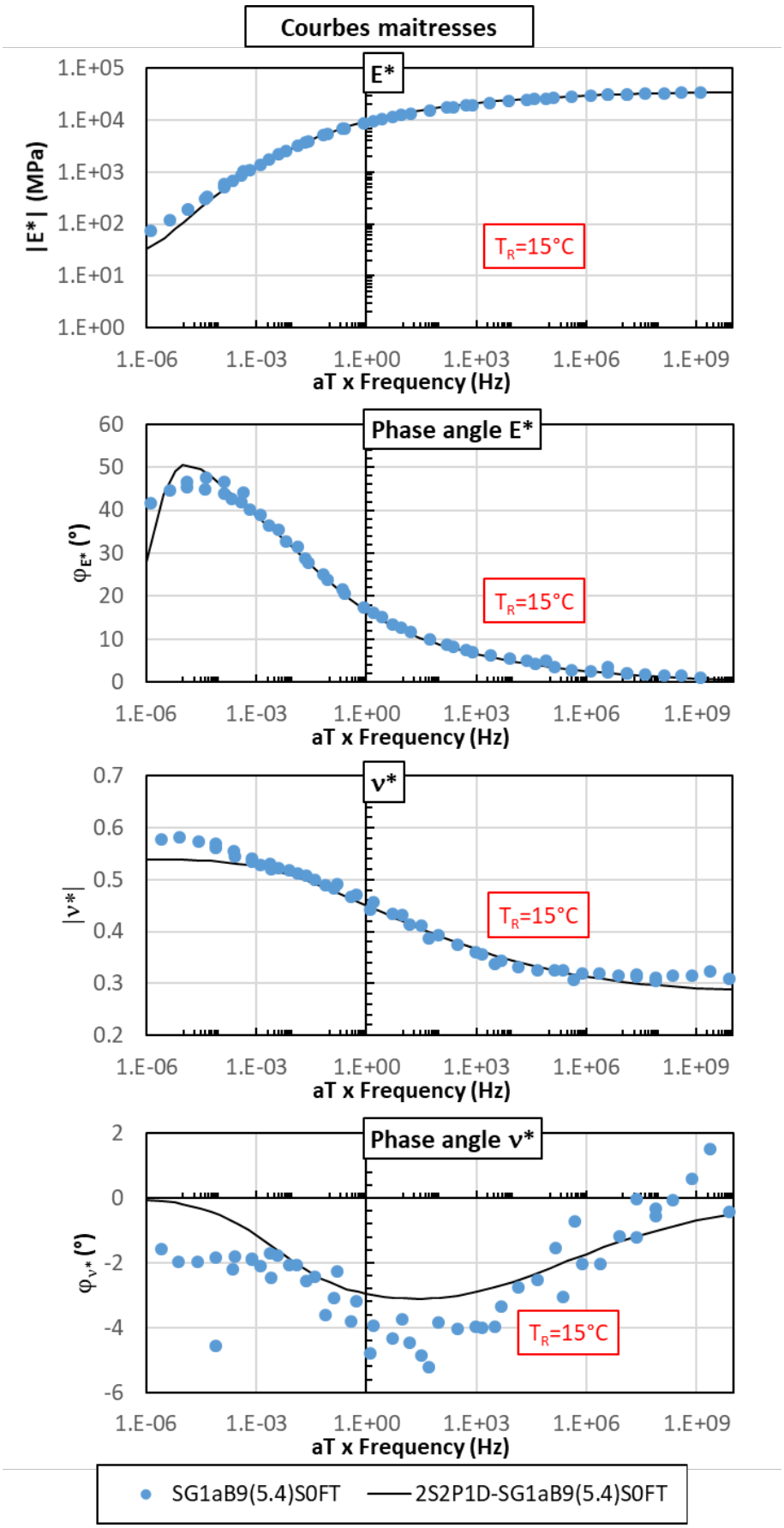

Courbes maitresses normalisées
(E*-E00)/(E0-E00)
(E*-E00)/(E0-E00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle of (E*-E00)/(E0-E00)
φ(E*-E00)/(E0-E00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle of (ν*–ν00)/(ν0–ν00)
φ(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
SG3aB1(6)D0FT
2S2P1D-SG3aB1(6)D0FT

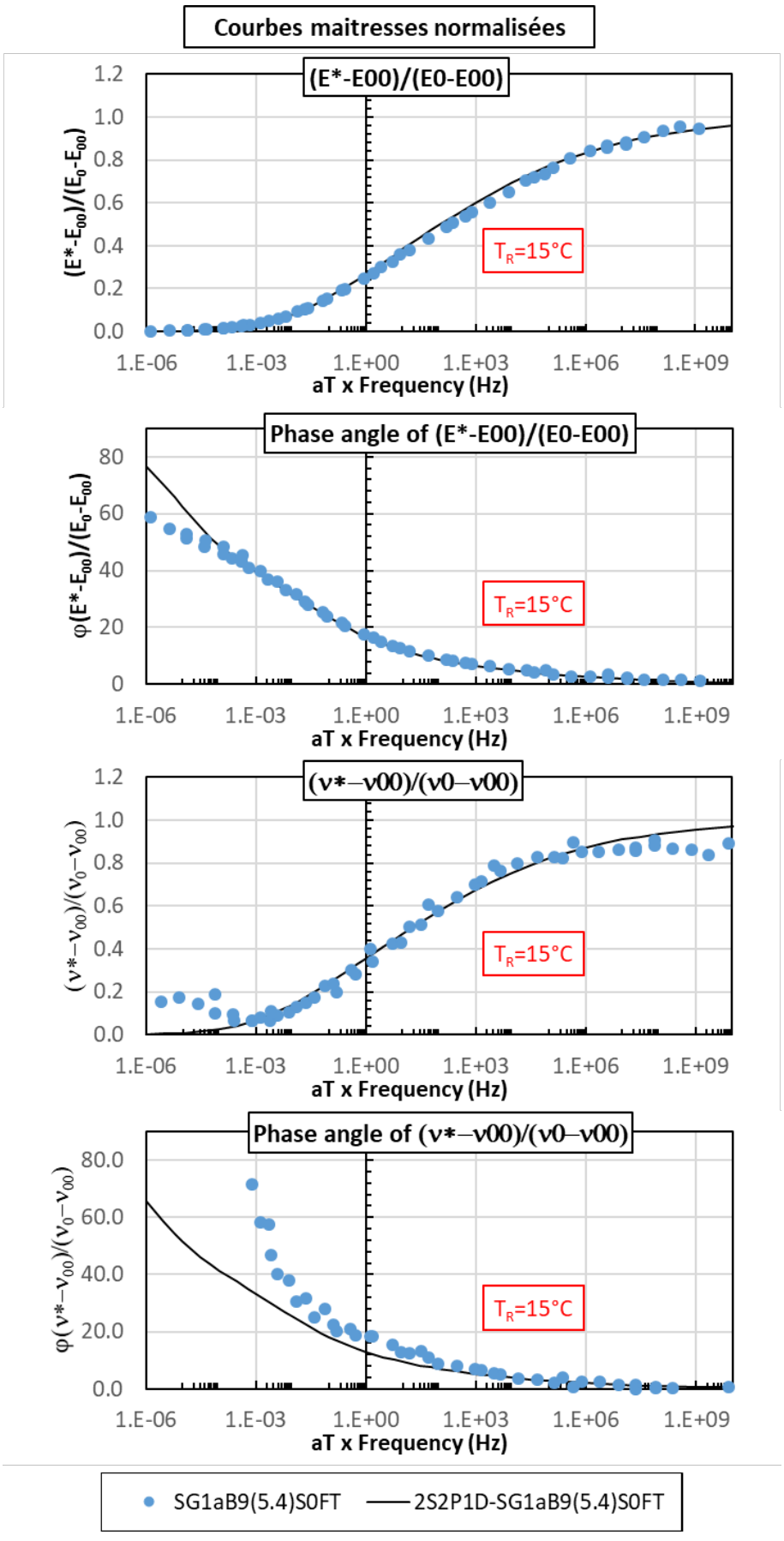
2.2.2. Eprouvettes vieillies saturées sans cycle FT testées à l'état sec (A.0FT(sat).DRY)

2.2.2.1. SG1aB9(5.4)S0FT

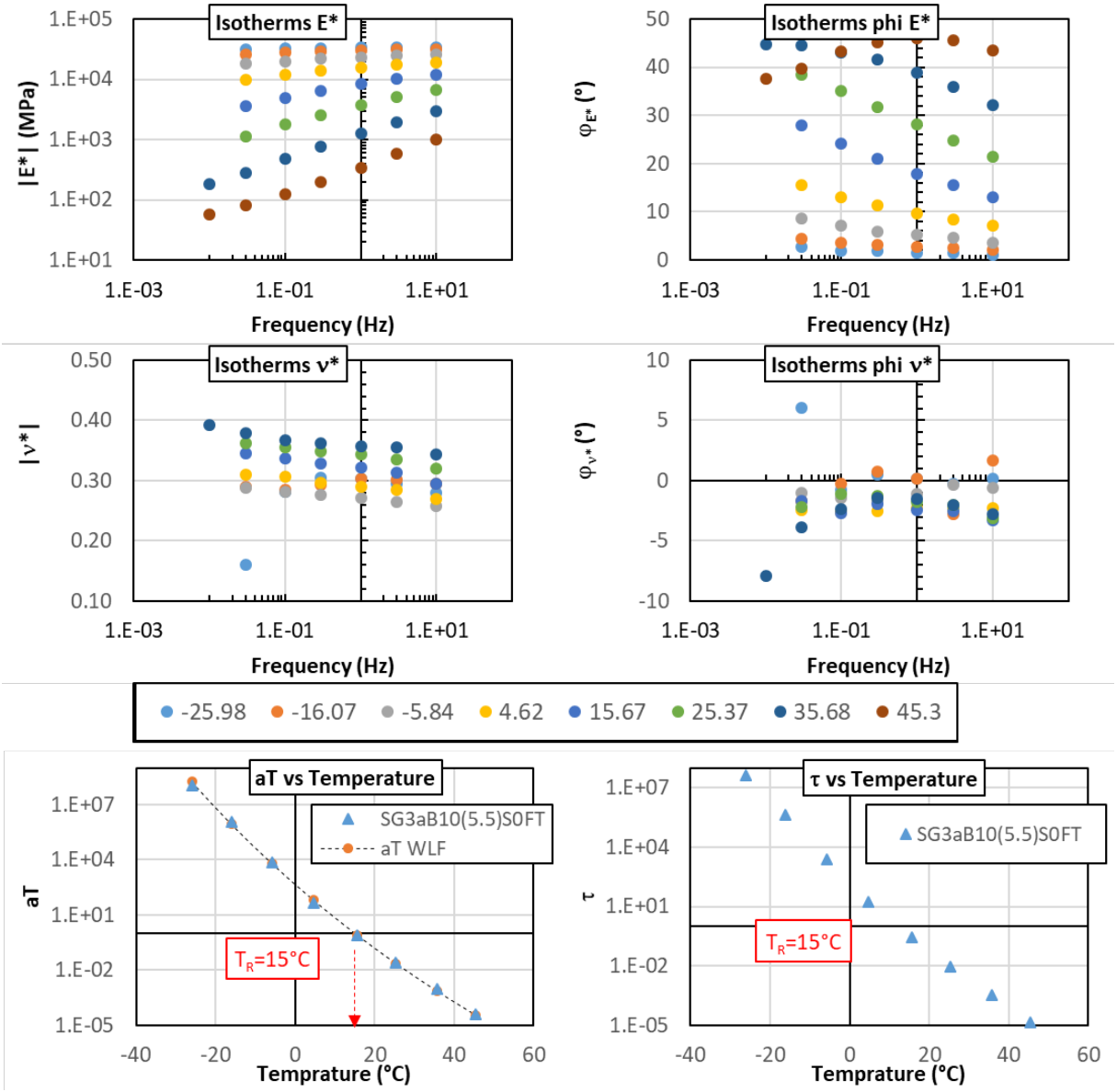


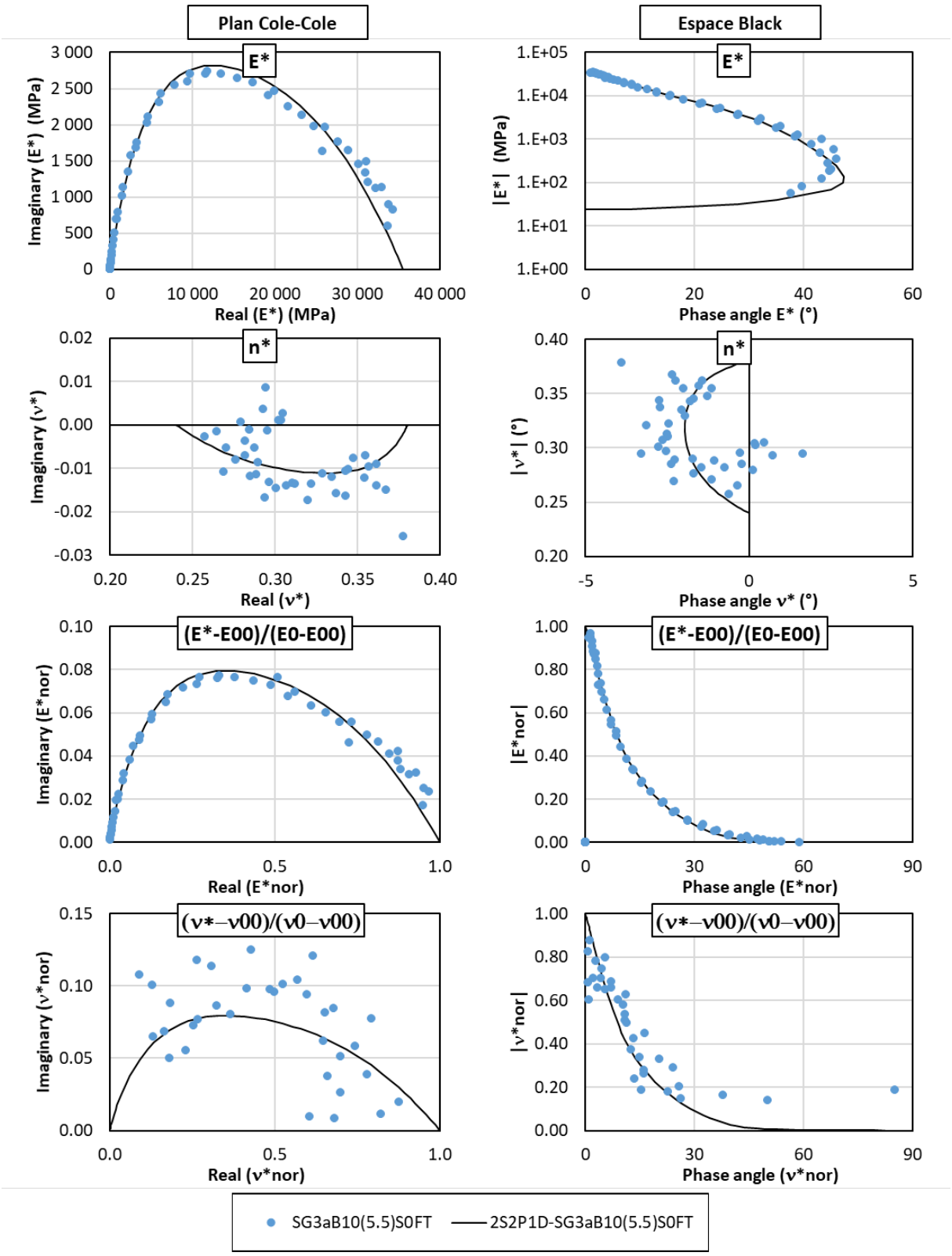

Plan Cole-Cole
E*
Imaginary (E*) (MPa)
Real (E*) (MPa)
Espace Black
E*
|E*| (MPa)
Phase angle E* (°)
ν*
Imaginary (ν*)
Real (ν*)
ν*
|ν*| (°)
Phase angle ν* (°)
(E*-E00)/(E0-E00)
Imaginary (E*nor)
Real (E*nor)
(E*-E00)/(E0-E00)
|E*nor|
Phase angle (E*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
Imaginary (ν*nor)
Real (ν*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
|ν*nor|
Phase angle (ν*nor)
SG1aB9(5.4)SOFT
2S2P1D-SG1aB9(5.4)SOFT

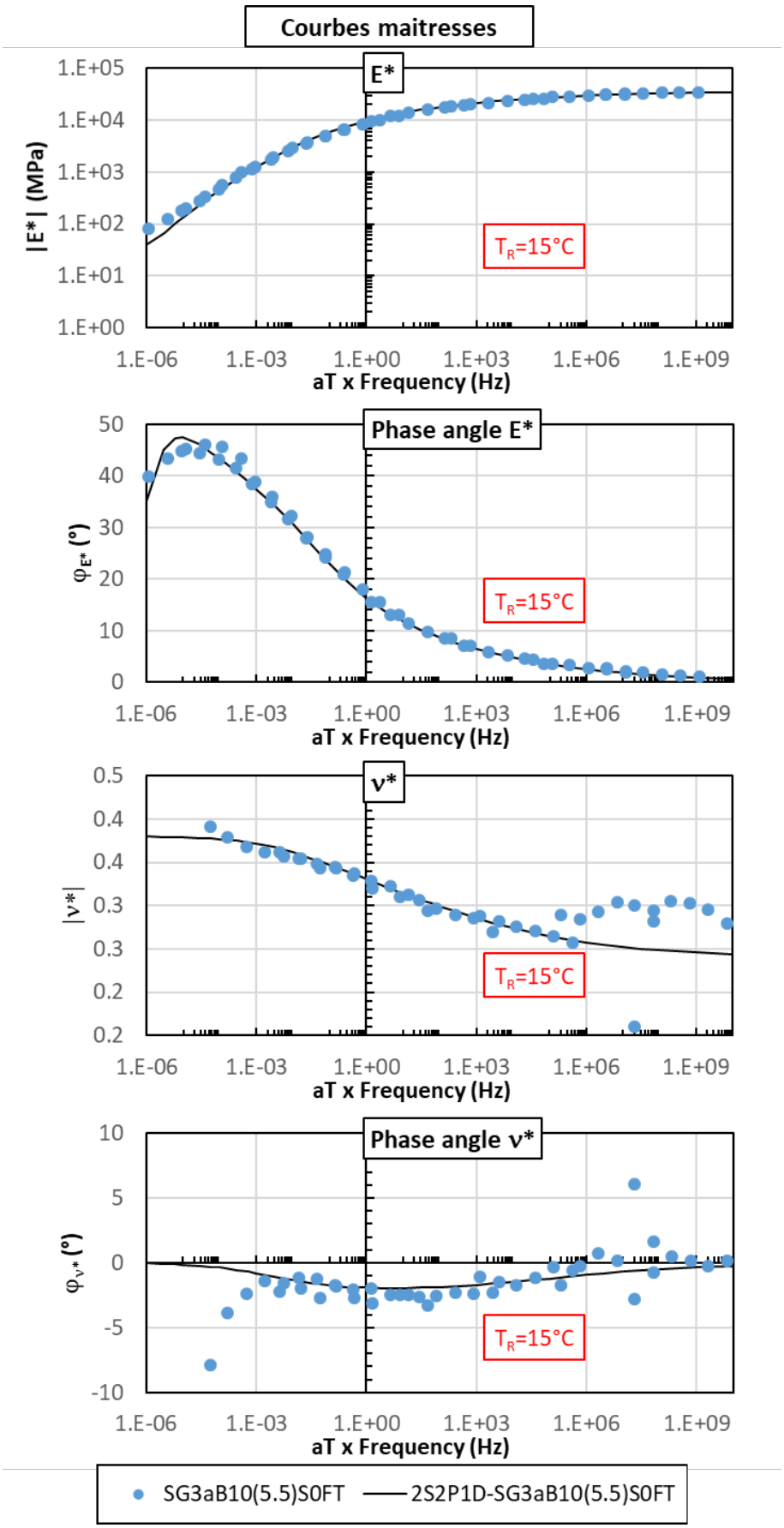

Courbes maitresses
E*
|E*| (MPa)
1.E+05
1.E+04
1.E+03
1.E+02
1.E+01
1.E+00
T_R=15°C
1.E-06
1.E-03
1.E+00
1.E+03
1.E+06
1.E+09
aT x Frequency (Hz)
Phase angle E*
φ_E* (°)
60
50
40
30
20
10
0
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
ν*
|ν*|
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle ν*
φ_ν* (°)
2
0
-2
-4
-6
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
SG1aB9(5.4)S0FT
2S2P1D-SG1aB9(5.4)S0FT

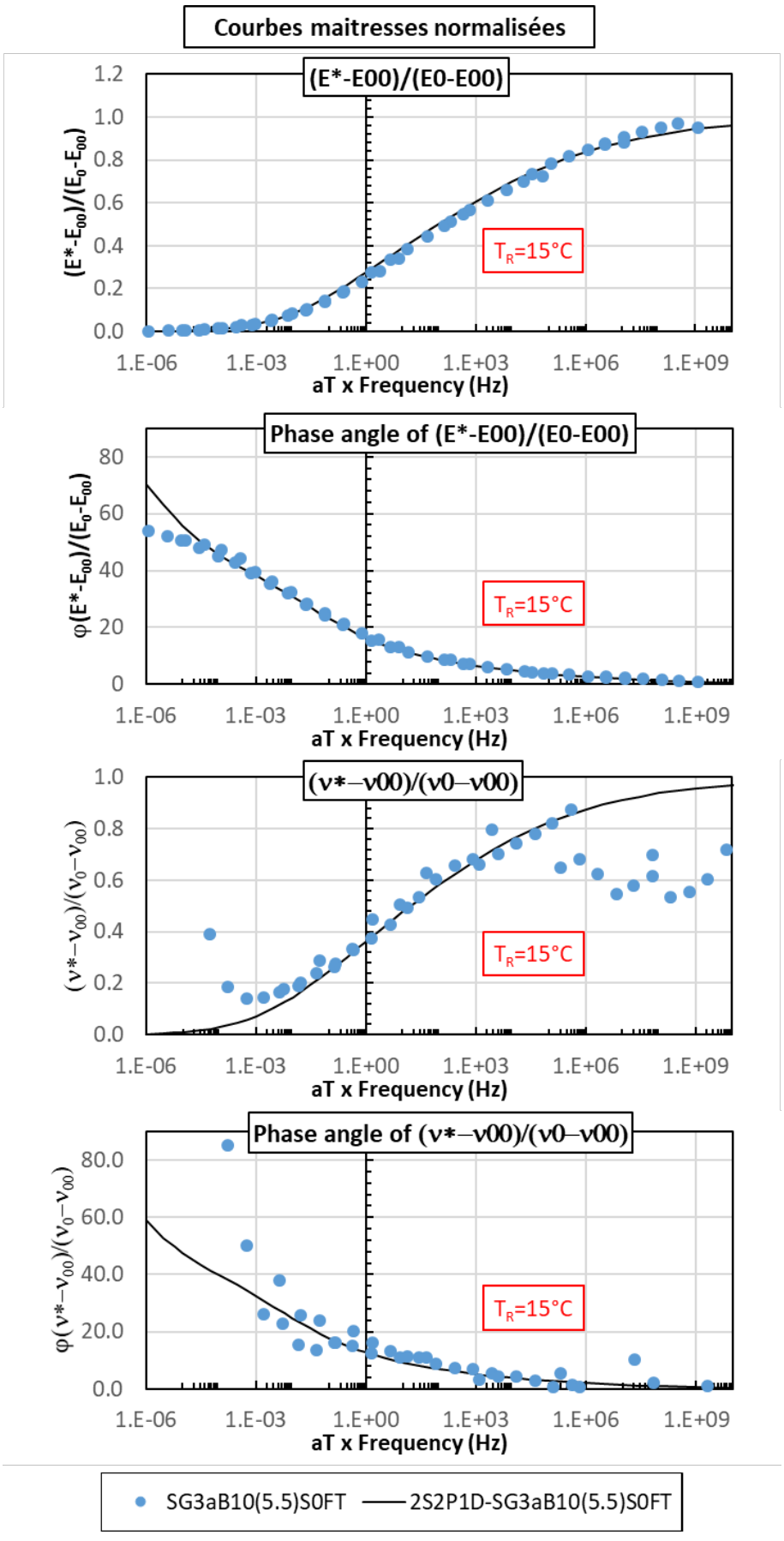

Courbes maitresses normalisées
(E*-E00)/(E0-E00)
(E*-E00)/(E0-E00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle of (E*-E00)/(E0-E00)
φ(E*-E00)/(E0-E00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle of (ν*–ν00)/(ν0–ν00)
φ(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
SG1aB9(5.4)S0FT
2S2P1D-SG1aB9(5.4)S0FT

2.2.2.2. SG3aB10(5.5)S0FT



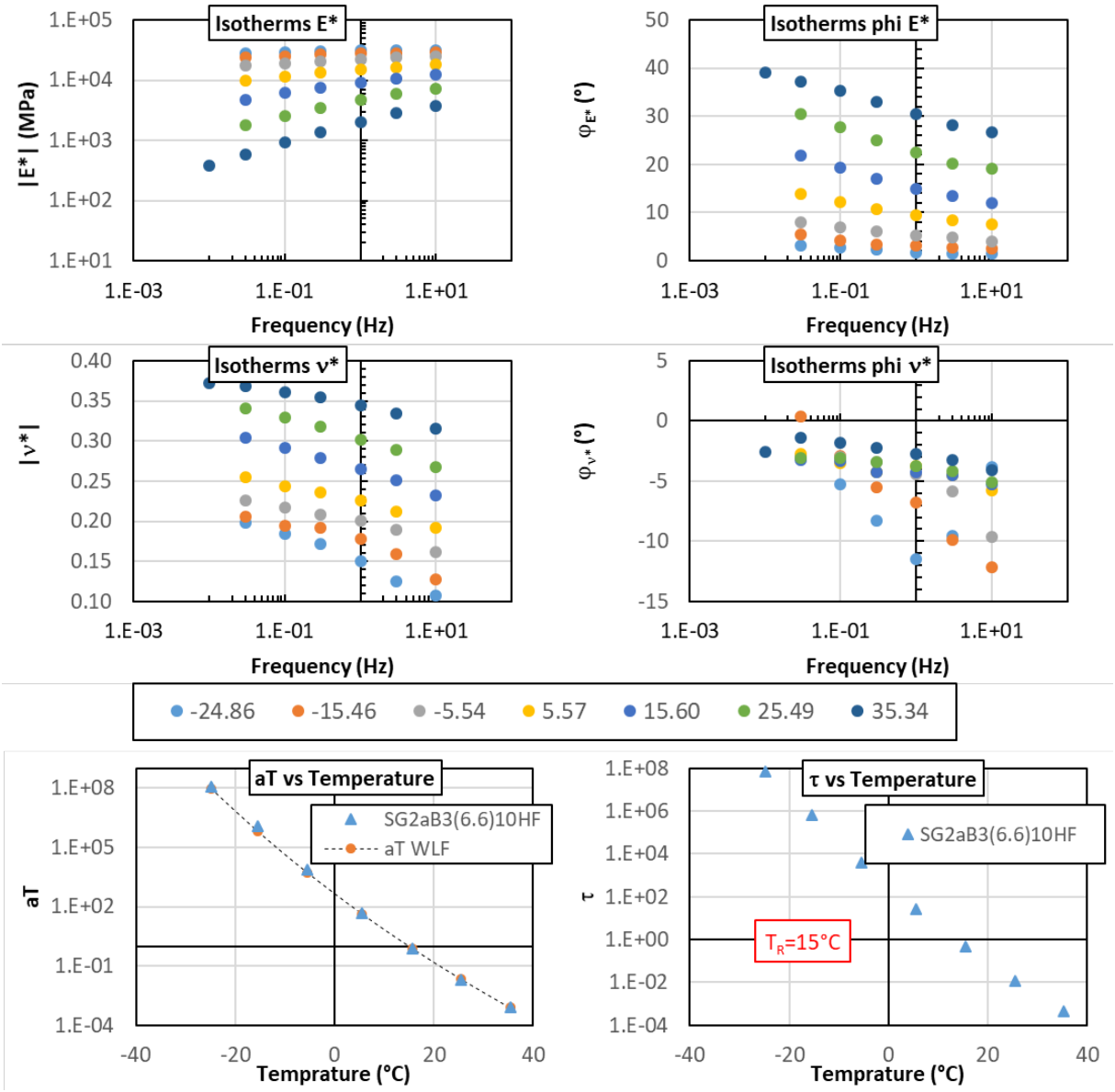

Plan Cole-Cole
E*
Imaginary (E*) (MPa)
Real (E*) (MPa)
Espace Black
E*
|E*| (MPa)
Phase angle E* (°)
n*
Imaginary (ν*)
Real (ν*)
n*
|ν*| (°)
Phase angle ν* (°)
(E*-E00)/(E0-E00)
Imaginary (E*nor)
Real (E*nor)
(E*-E00)/(E0-E00)
|E*nor|
Phase angle (E*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
Imaginary (ν*nor)
Real (ν*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
|ν*nor|
Phase angle (ν*nor)
SG3aB10(5.5)S0FT
2S2P1D-SG3aB10(5.5)S0FT

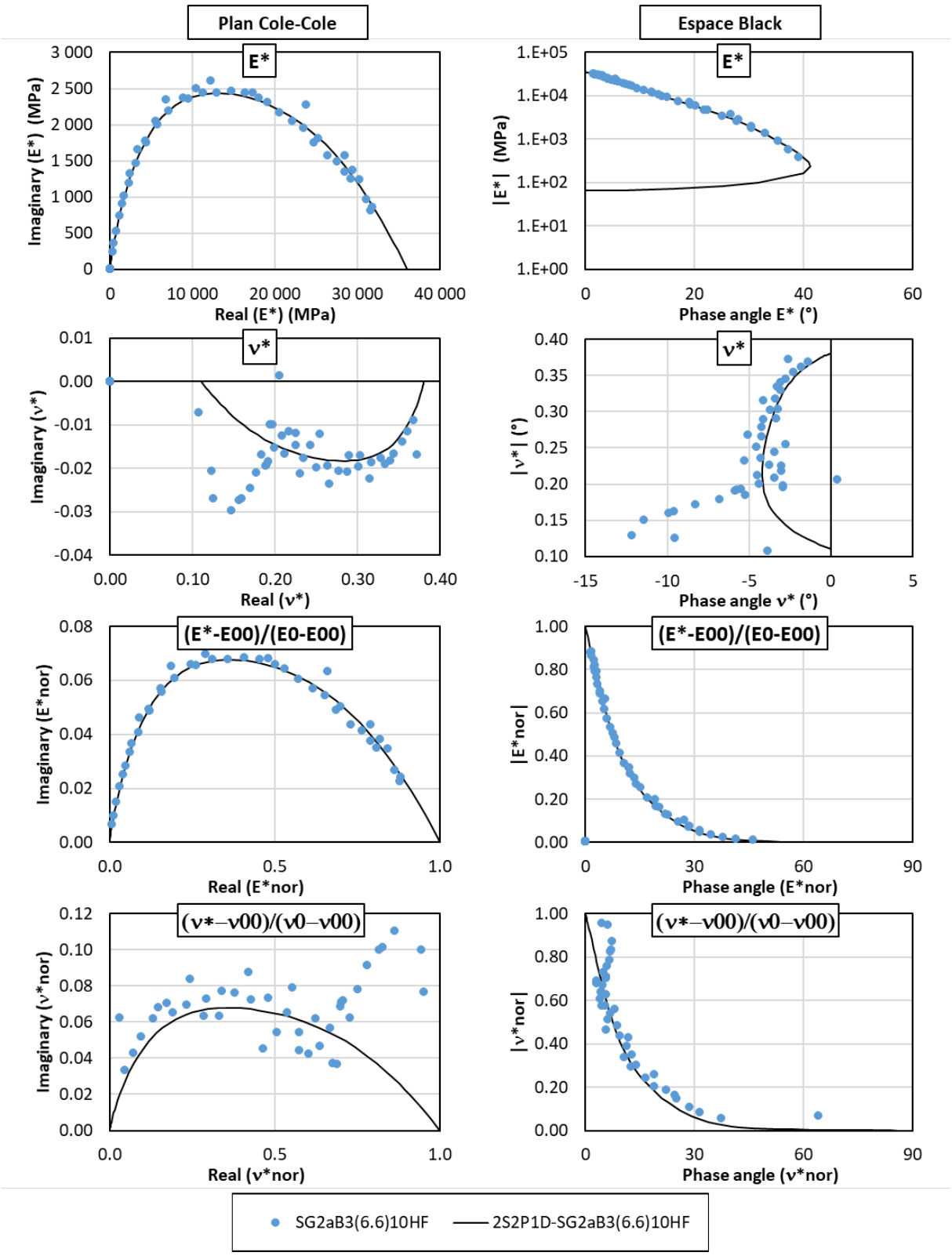

Courbes maitresses
E*
|E*| (MPa)
1.E+05
1.E+04
1.E+03
1.E+02
1.E+01
1.E+00
T_R=15°C
1.E-06
1.E-03
1.E+00
1.E+03
1.E+06
1.E+09
aT x Frequency (Hz)
Phase angle E*
φ_E* (°)
50
40
30
20
10
0
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
ν*
|ν*|
0.5
0.4
0.4
0.3
0.3
0.2
0.2
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle ν*
φ_ν* (°)
10
5
0
-5
-10
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
SG3aB10(5.5)S0FT
2S2P1D-SG3aB10(5.5)S0FT

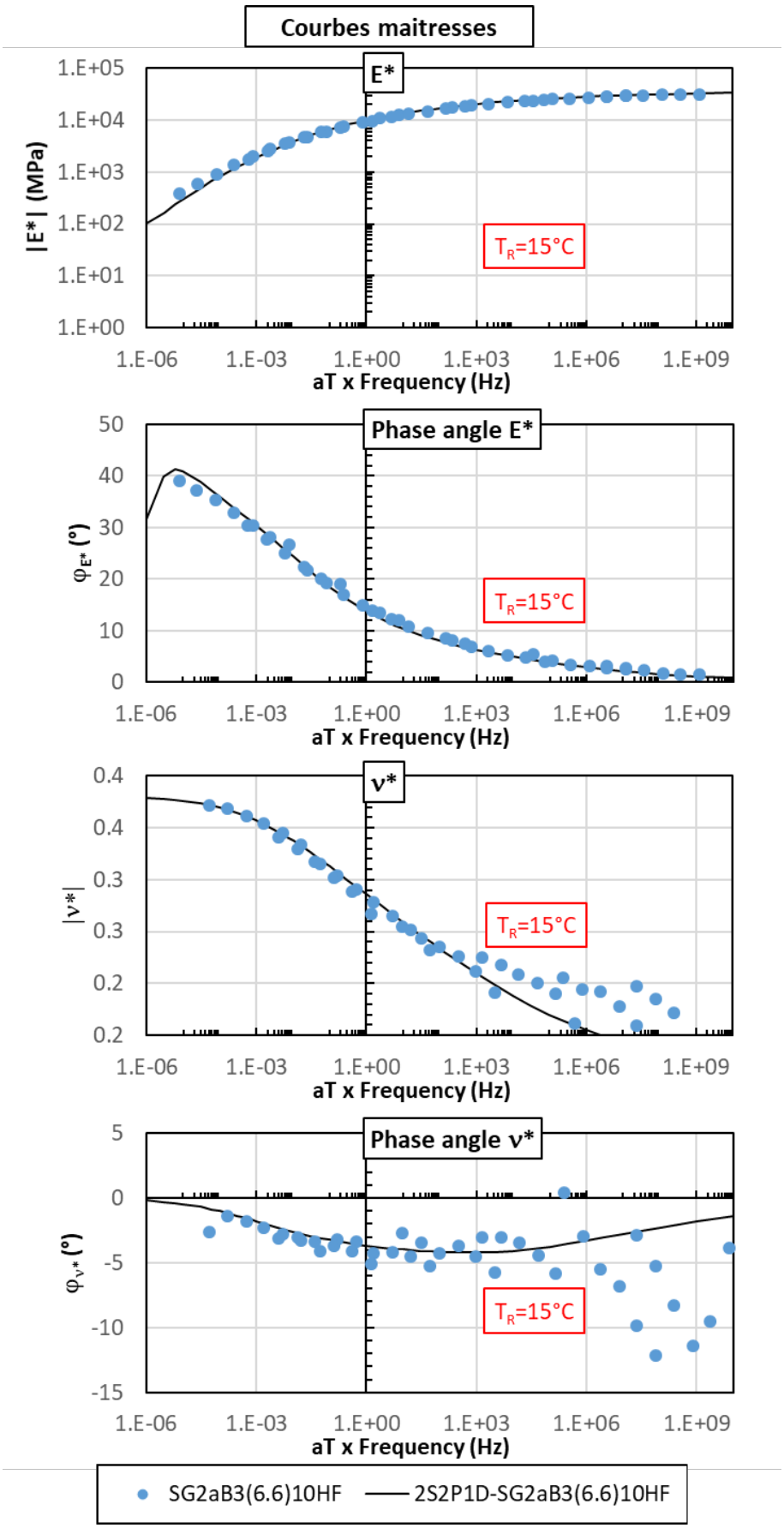

Courbes maitresses normalisées
(E*-E00)/(E0-E00)
(E*-E00)/(E0-E00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle of (E*-E00)/(E0-E00)
φ(E*-E00)/(E0-E00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle of (ν*–ν00)/(ν0–ν00)
φ(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
SG3aB10(5.5)S0FT
2S2P1D-SG3aB10(5.5)S0FT

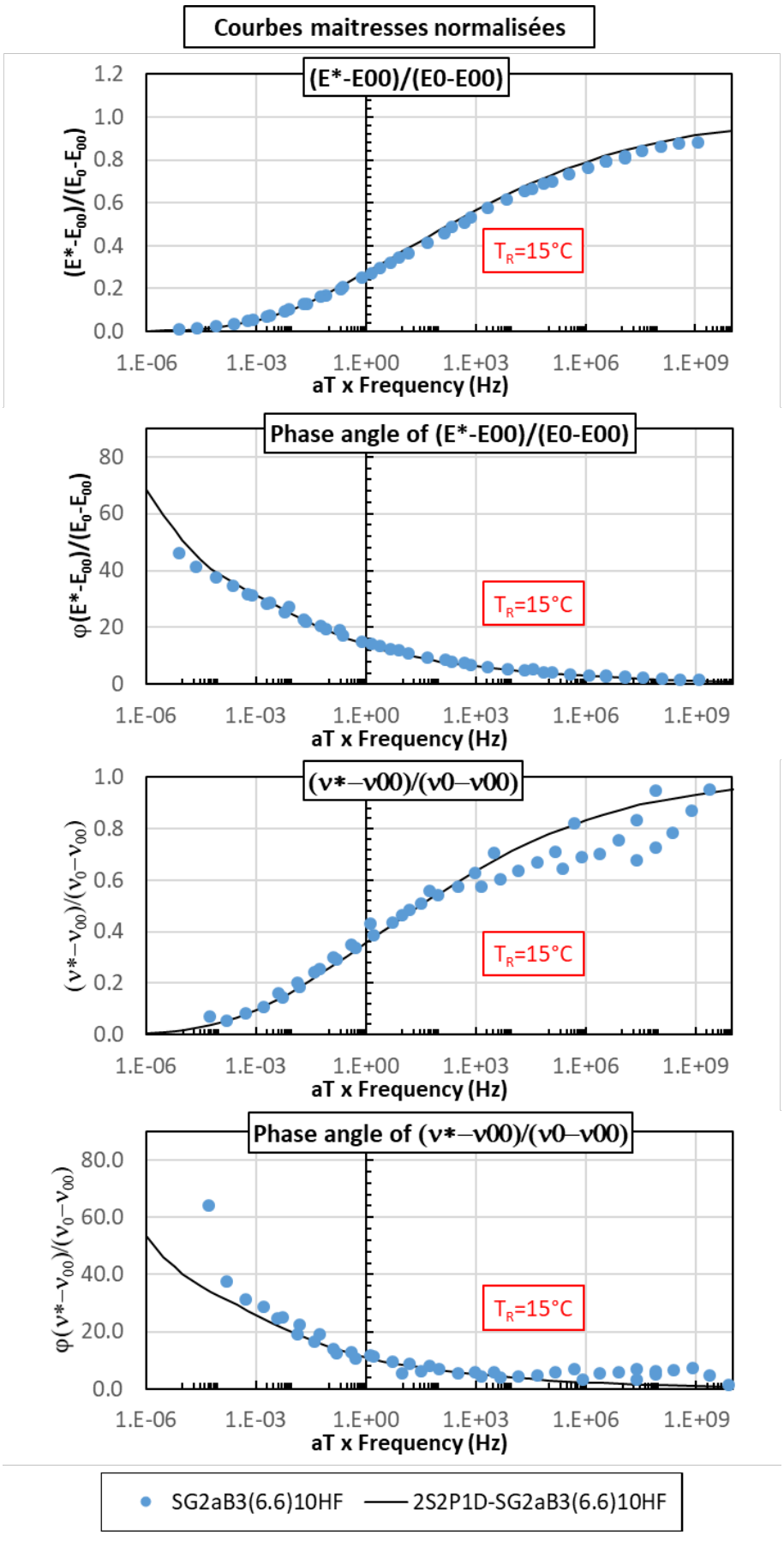
2.2.3. Eprouvettes vieillies avec 10 cycles HF testées à l'état sec (A.10HF.DRY)

2.2.3.1. SG2aB3(6.6)10HF

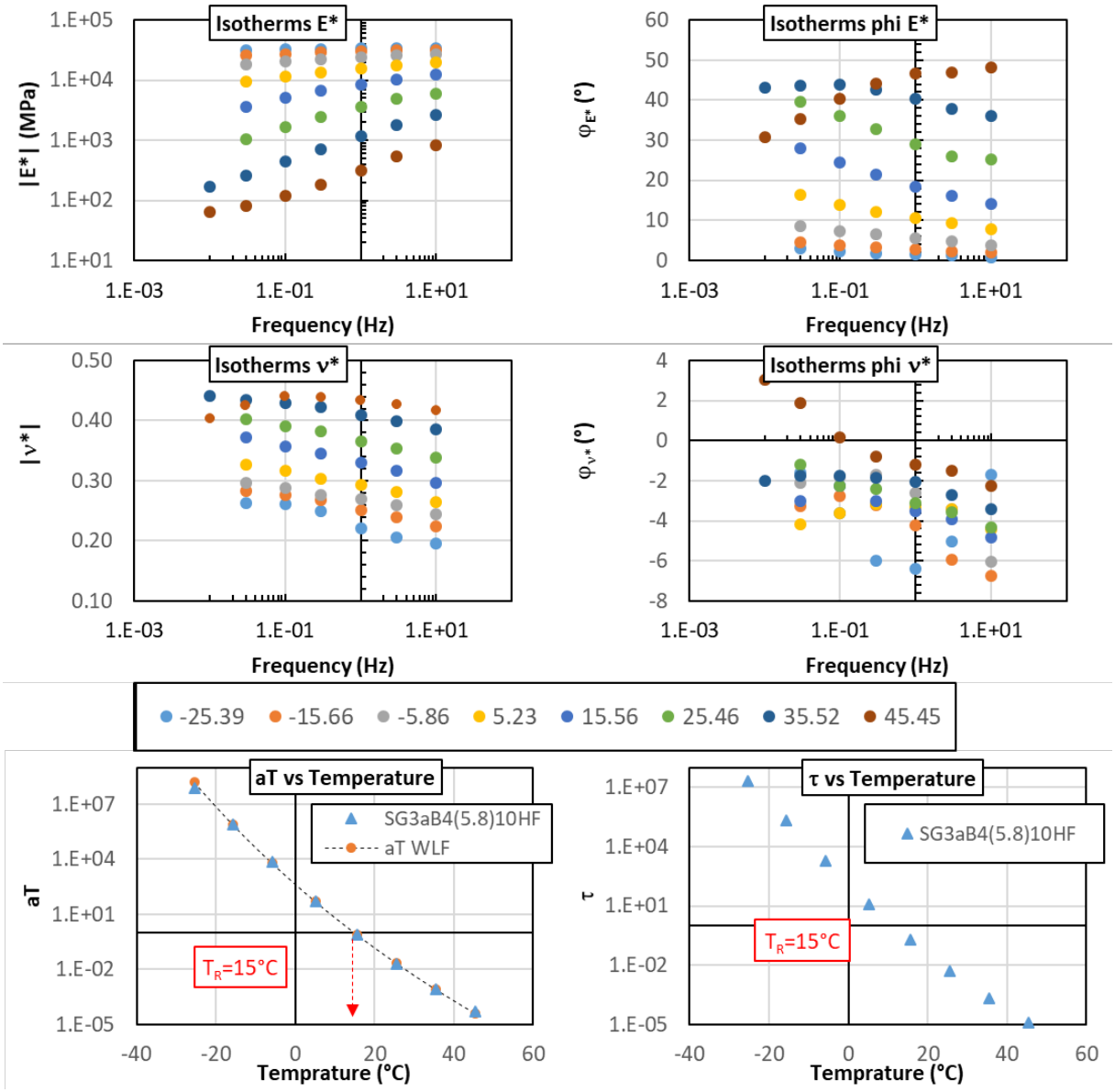


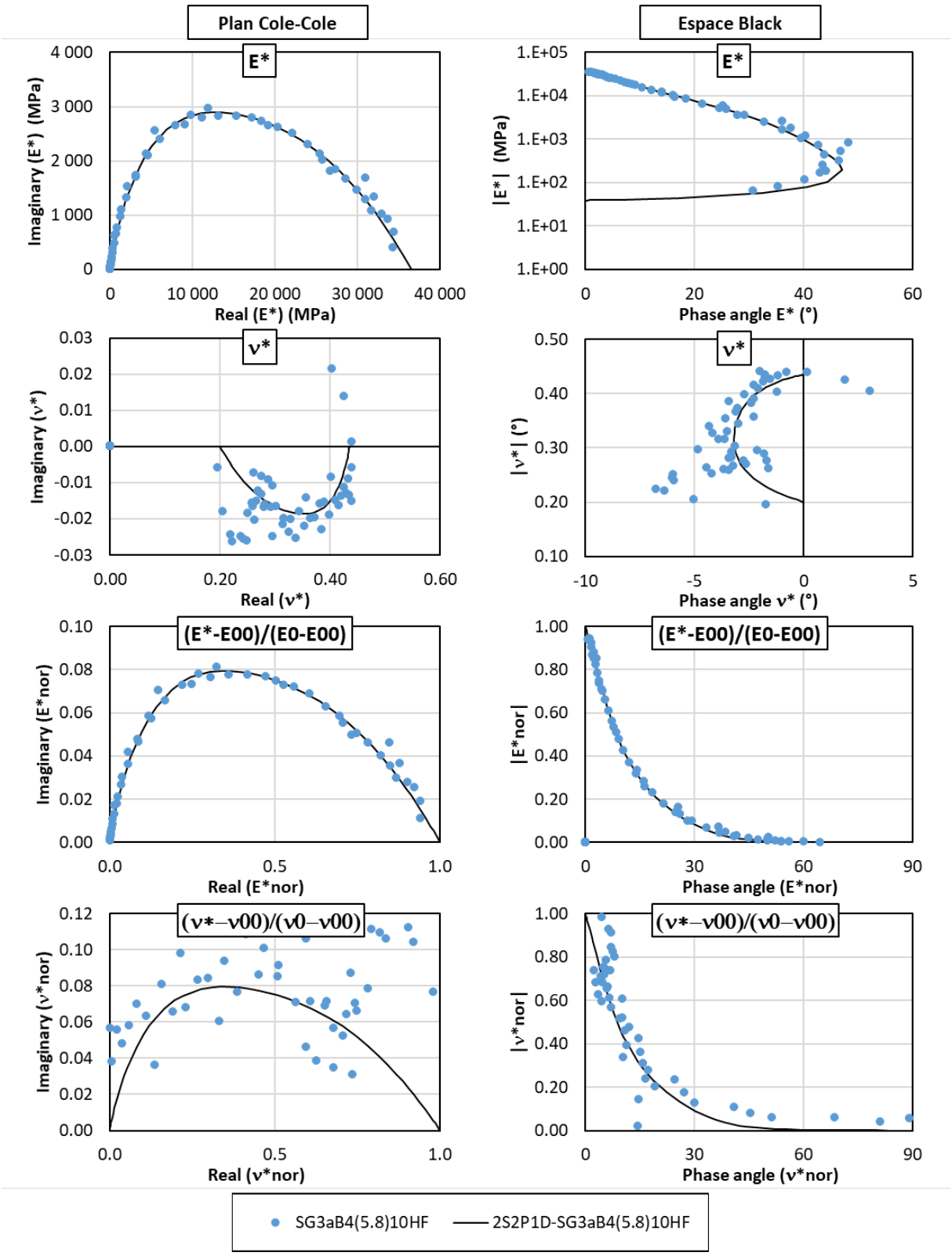

Plan Cole-Cole
E*
Imaginary (E*) (MPa)
Real (E*) (MPa)
Espace Black
E*
|E*| (MPa)
Phase angle E* (°)
ν*
Imaginary (ν*)
Real (ν*)
ν*
|ν*| (°)
Phase angle ν* (°)
(E*-E00)/(E0-E00)
Imaginary (E*nor)
Real (E*nor)
(E*-E00)/(E0-E00)
|E*nor|
Phase angle (E*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
Imaginary (ν*nor)
Real (ν*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
|ν*nor|
Phase angle (ν*nor)
SG2aB3(6.6)10HF
2S2P1D-SG2aB3(6.6)10HF

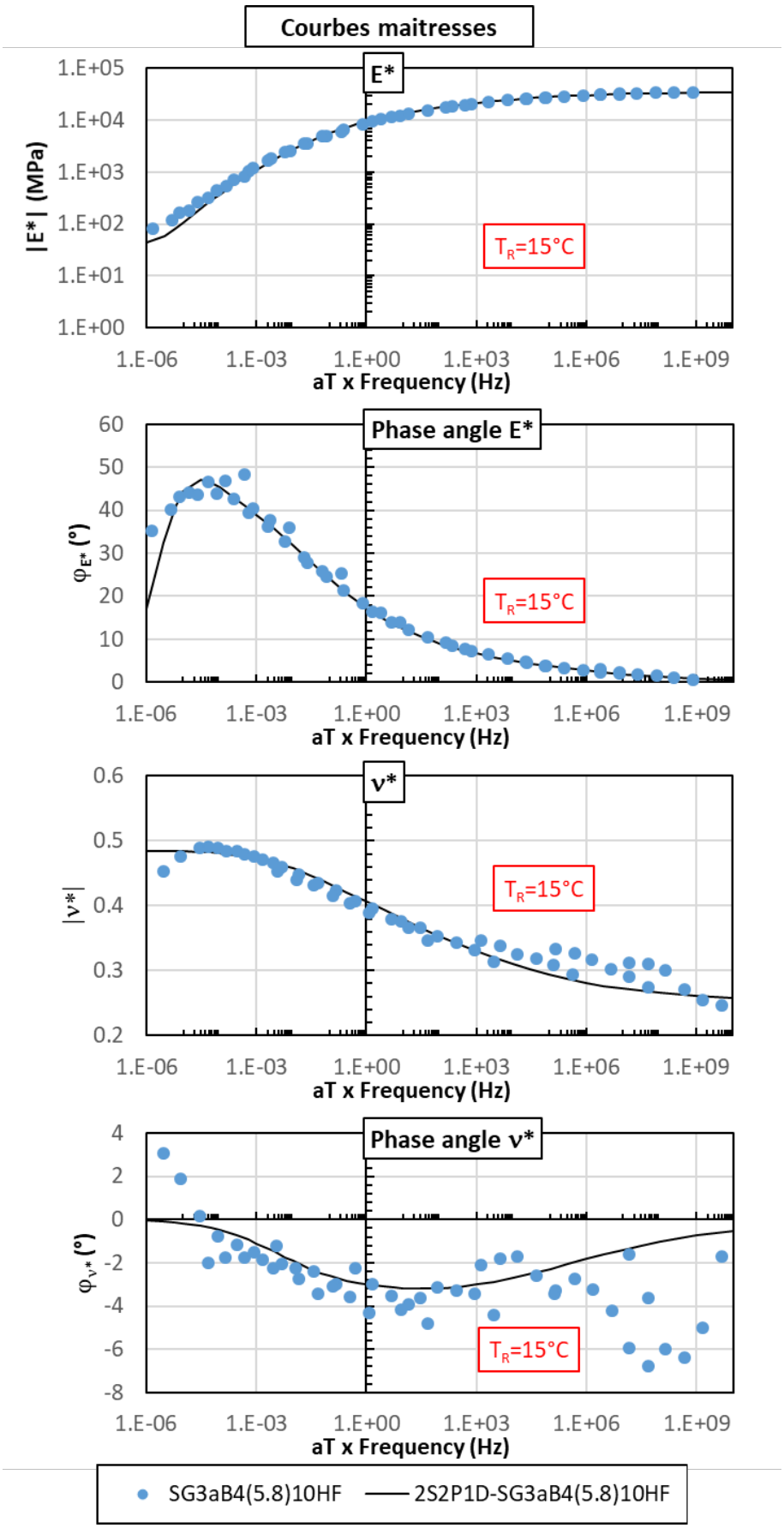

Courbes maitresses
E*
|E*| (MPa)
1.E+05
1.E+04
1.E+03
1.E+02
1.E+01
1.E+00
T_R=15°C
1.E-06
1.E-03
1.E+00
1.E+03
1.E+06
1.E+09
aT x Frequency (Hz)
Phase angle E*
φ_E* (°)
50
40
30
20
10
0
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
ν*
|ν*|
0.4
0.4
0.3
0.3
0.2
0.2
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle ν*
φ_ν* (°)
5
0
-5
-10
-15
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
SG2aB3(6.6)10HF
2S2P1D-SG2aB3(6.6)10HF

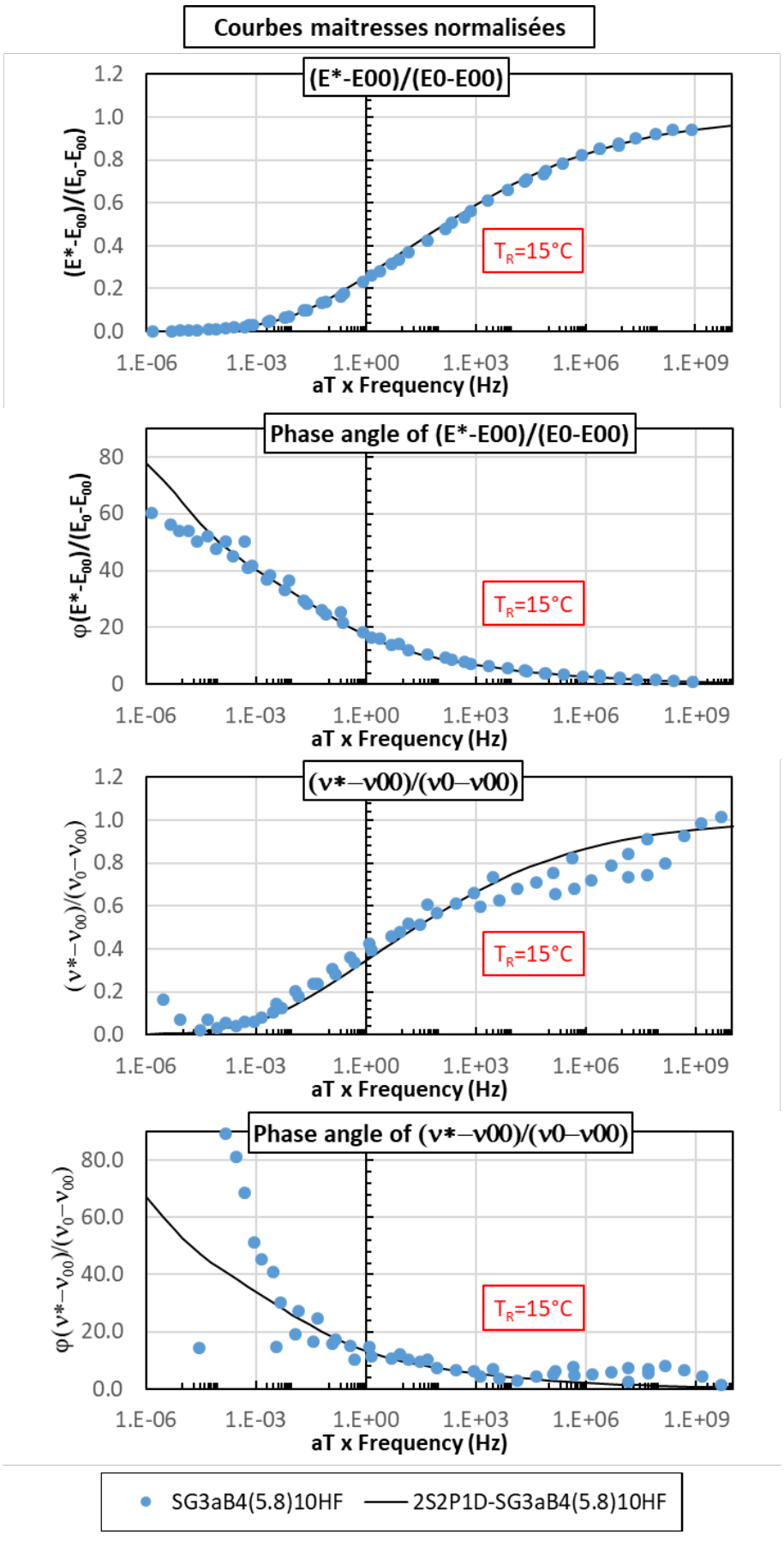

Courbes maitresses normalisées
(E*-E00)/(E0-E00)
(E*-E00)/(E0-E00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle of (E*-E00)/(E0-E00)
φ(E*-E00)/(E0-E00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle of (ν*–ν00)/(ν0–ν00)
φ(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
SG2aB3(6.6)10HF
2S2P1D-SG2aB3(6.6)10HF

2.2.3.2. SG3aB4(5.8)10HF



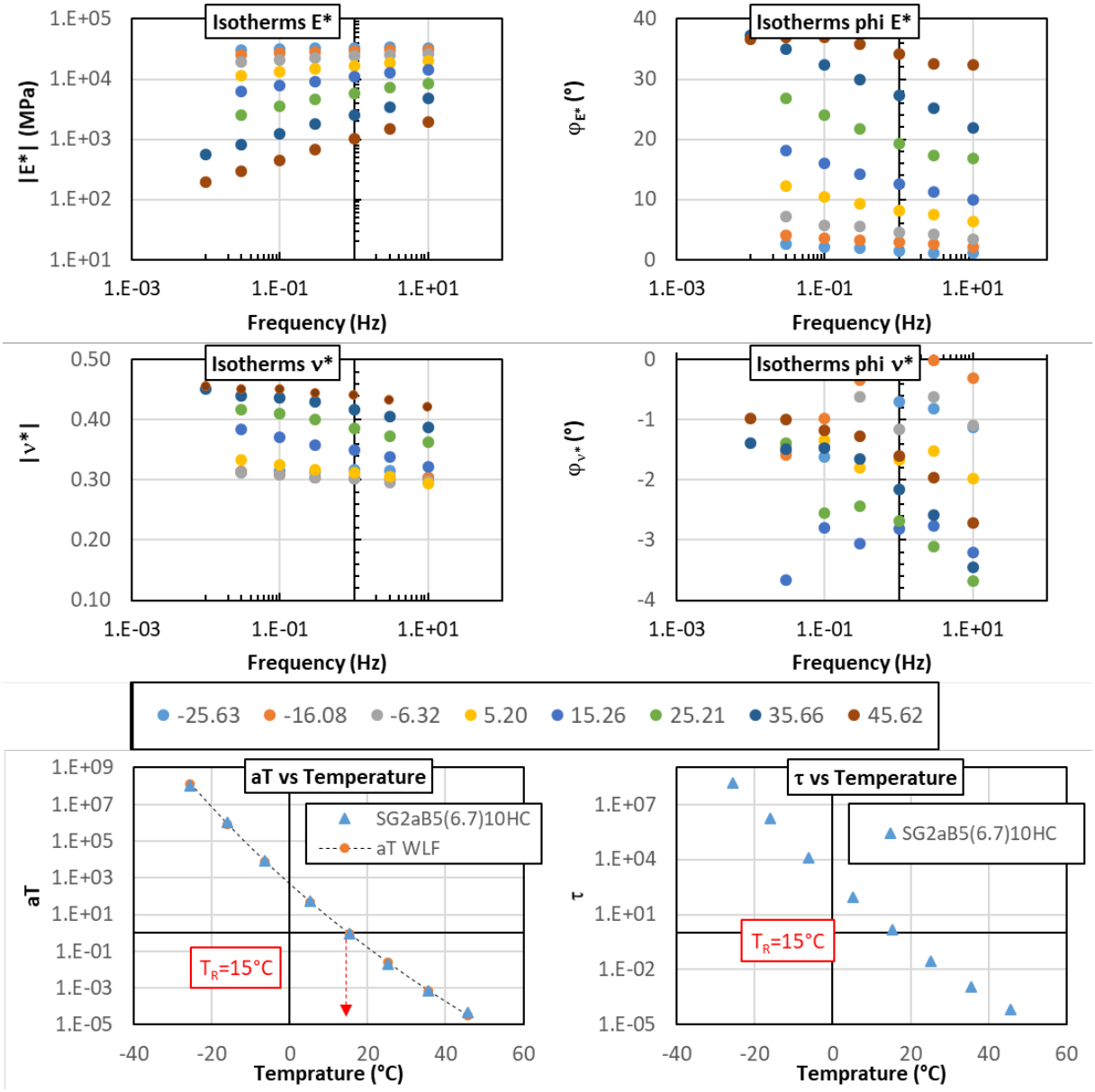

Plan Cole-Cole
E*
Imaginary (E*) (MPa)
Real (E*) (MPa)
Espace Black
E*
|E*| (MPa)
Phase angle E* (°)
ν*
Imaginary (ν*)
Real (ν*)
ν*
|ν*| (°)
Phase angle ν* (°)
(E*-E00)/(E0-E00)
Imaginary (E*nor)
Real (E*nor)
(E*-E00)/(E0-E00)
|E*nor|
Phase angle (E*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
Imaginary (ν*nor)
Real (ν*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
|ν*nor|
Phase angle (ν*nor)
SG3aB4(5.8)10HF
2S2P1D-SG3aB4(5.8)10HF

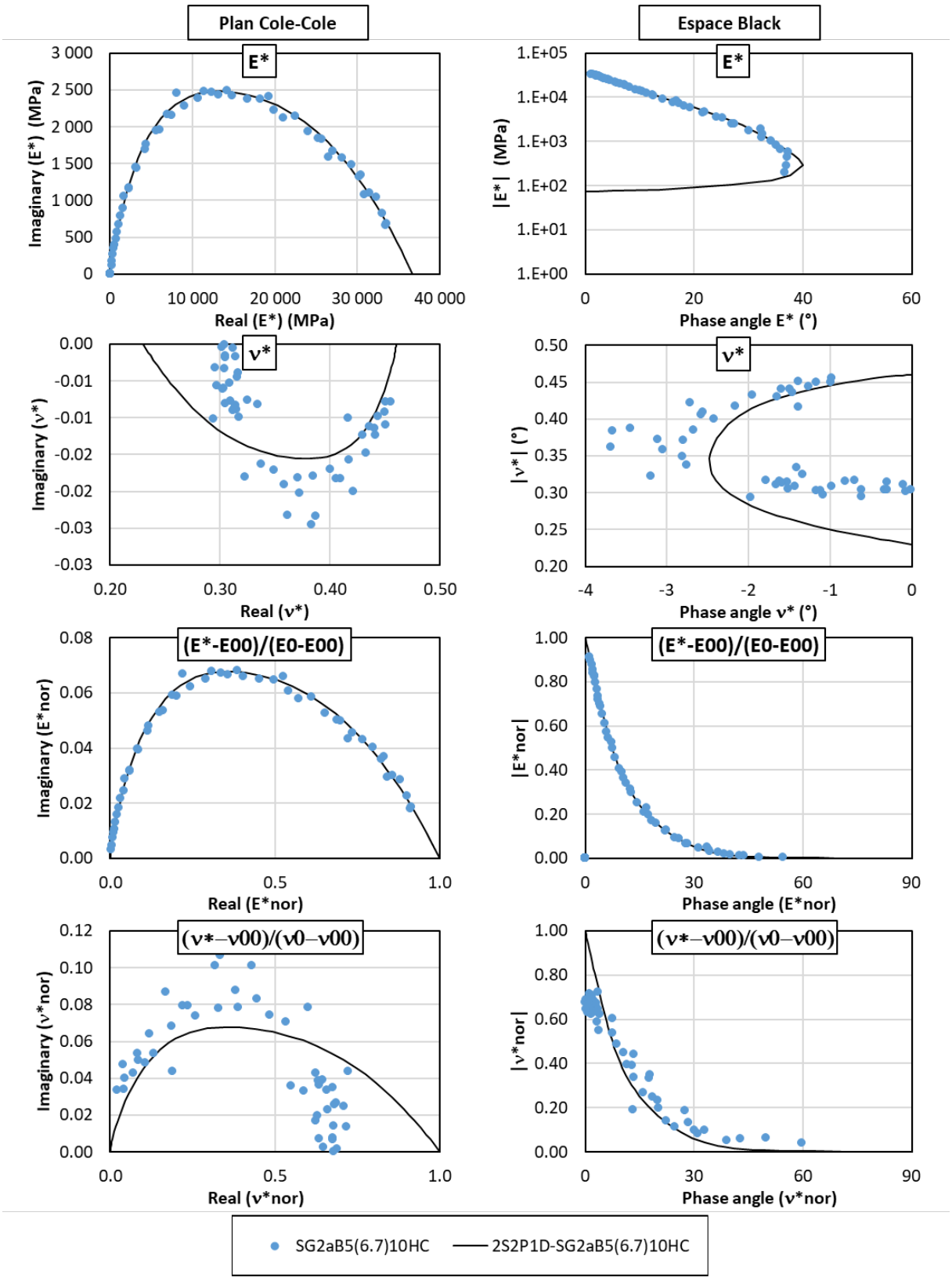

Courbes maitresses
E*
|E*| (MPa)
1.E+05
1.E+04
1.E+03
1.E+02
1.E+01
1.E+00
T_R=15°C
1.E-06
1.E-03
1.E+00
1.E+03
1.E+06
1.E+09
aT x Frequency (Hz)
Phase angle E*
φ_E* (°)
60
50
40
30
20
10
0
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
ν*
|ν*|
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle ν*
φ_ν* (°)
4
2
0
-2
-4
-6
-8
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
SG3aB4(5.8)10HF
2S2P1D-SG3aB4(5.8)10HF

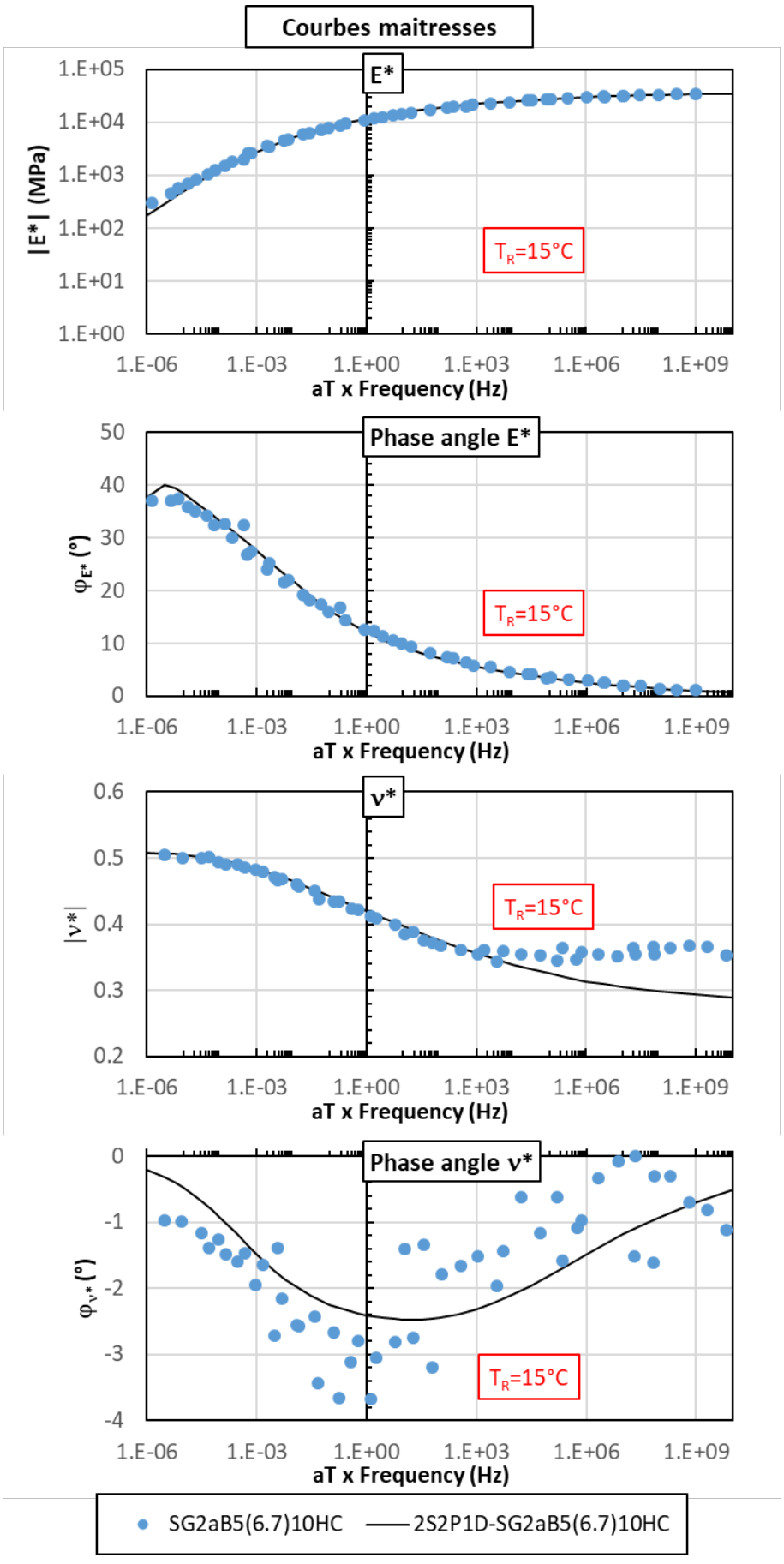


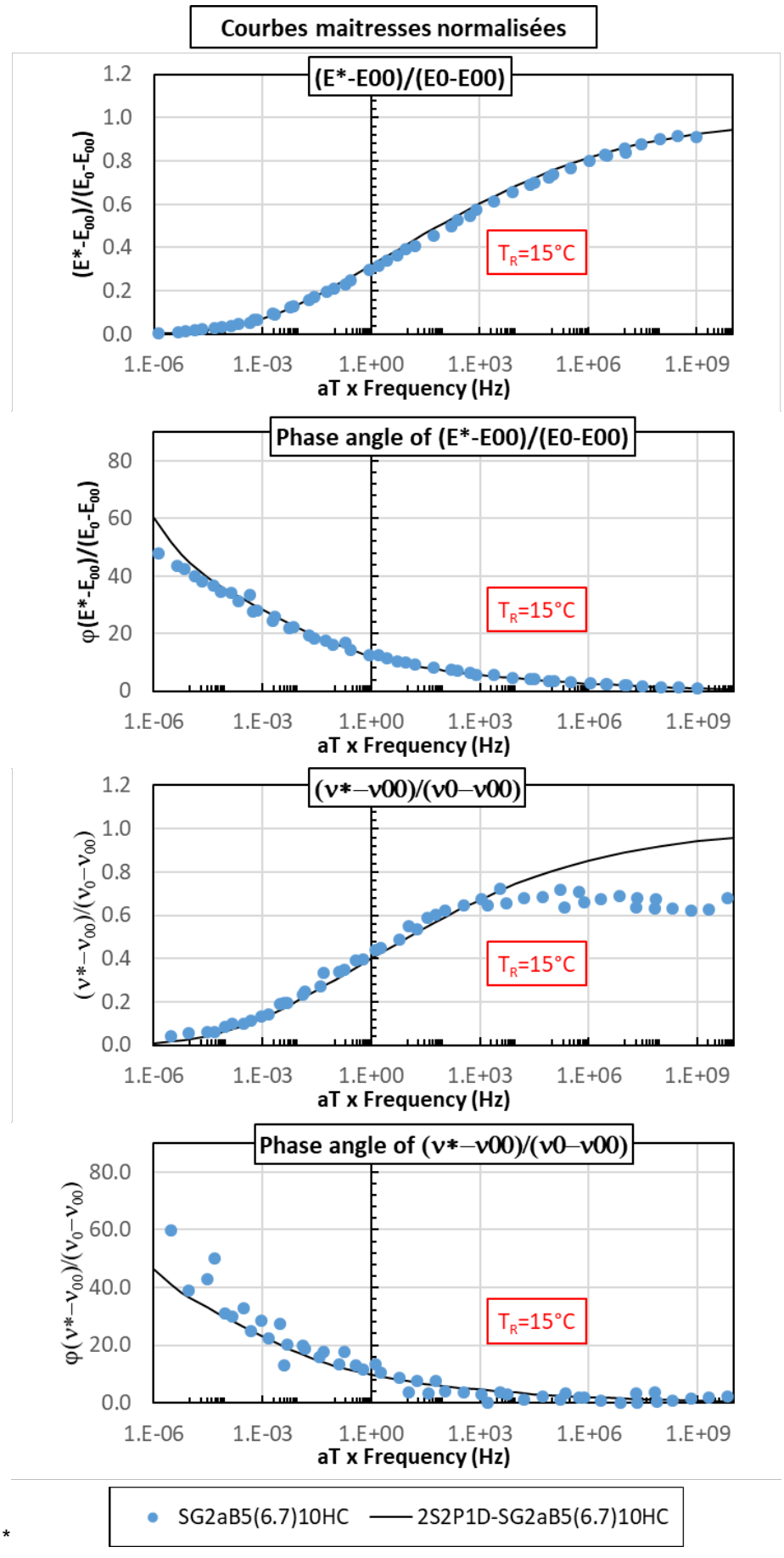
2.2.4. Eprouvettes vieillies avec 10 cycles HC testées à l'état sec (A.10HC.DRY)

2.2.4.1. SG2aB5(6.7)10HC


Isotherms E*
|E*| (MPa)
Frequency (Hz)
Isotherms phi E*
φE* (°)
Frequency (Hz)
Isotherms ν*
|ν*|
Frequency (Hz)
Isotherms phi ν*
φν* (°)
Frequency (Hz)
-25.63 -16.08 -6.32 5.20 15.26 25.21 35.66 45.62
aT vs Temperature
aT
SG2aB5(6.7)10HC
aT WLF
TR=15°C
Temprature (°C)
τ vs Temperature
τ
SG2aB5(6.7)10HC
TR=15°C
Temprature (°C)

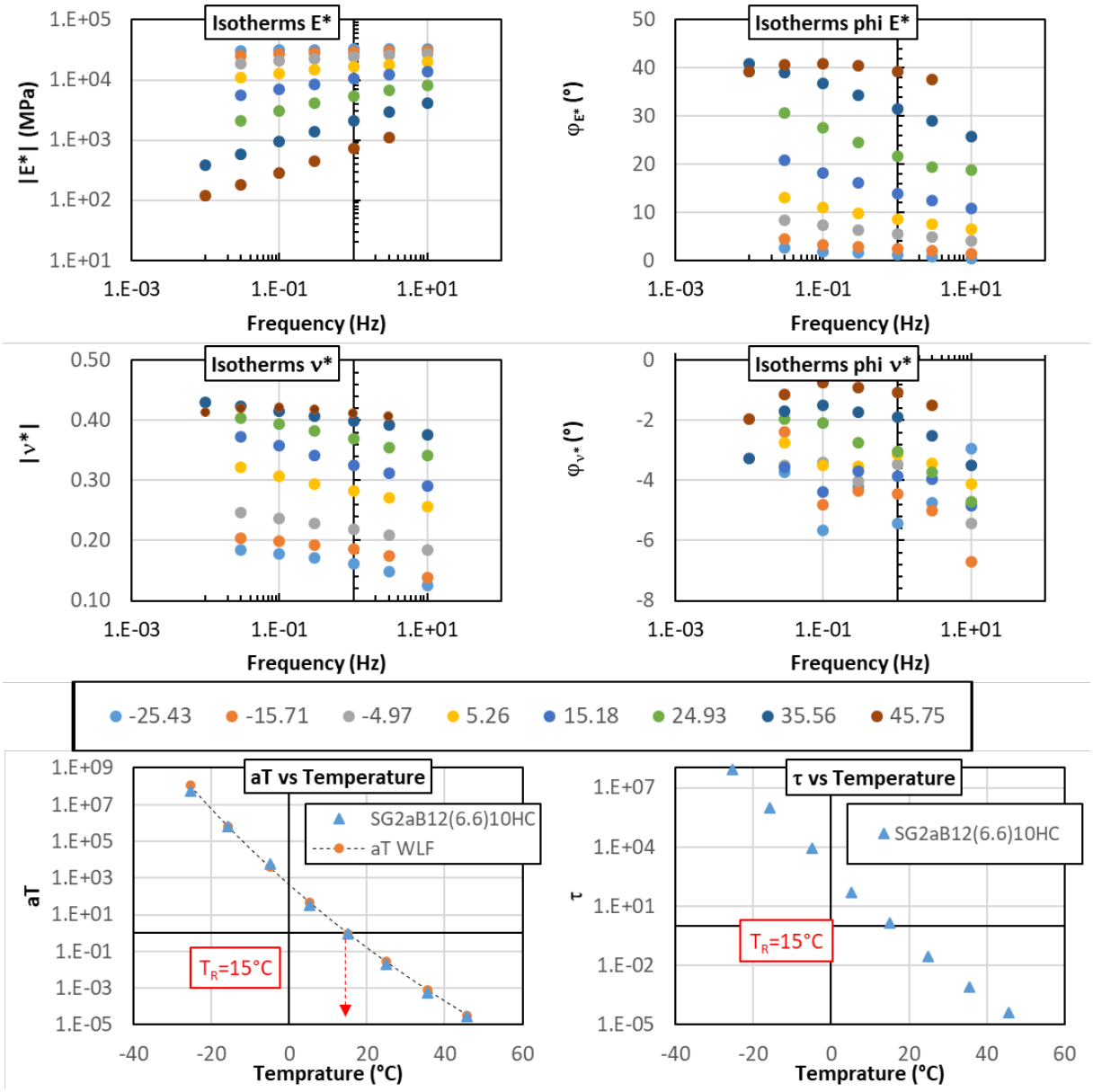

Plan Cole-Cole
E*
Imaginary (E*) (MPa)
Real (E*) (MPa)
Espace Black
E*
|E*| (MPa)
Phase angle E* (°)
ν*
Imaginary (ν*)
Real (ν*)
ν*
|ν*| (°)
Phase angle ν* (°)
(E*-E00)/(E0-E00)
Imaginary (E*nor)
Real (E*nor)
(E*-E00)/(E0-E00)
|E*nor|
Phase angle (E*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
Imaginary (ν*nor)
Real (ν*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
|ν*nor|
Phase angle (ν*nor)
SG2aB5(6.7)10HC
2S2P1D-SG2aB5(6.7)10HC

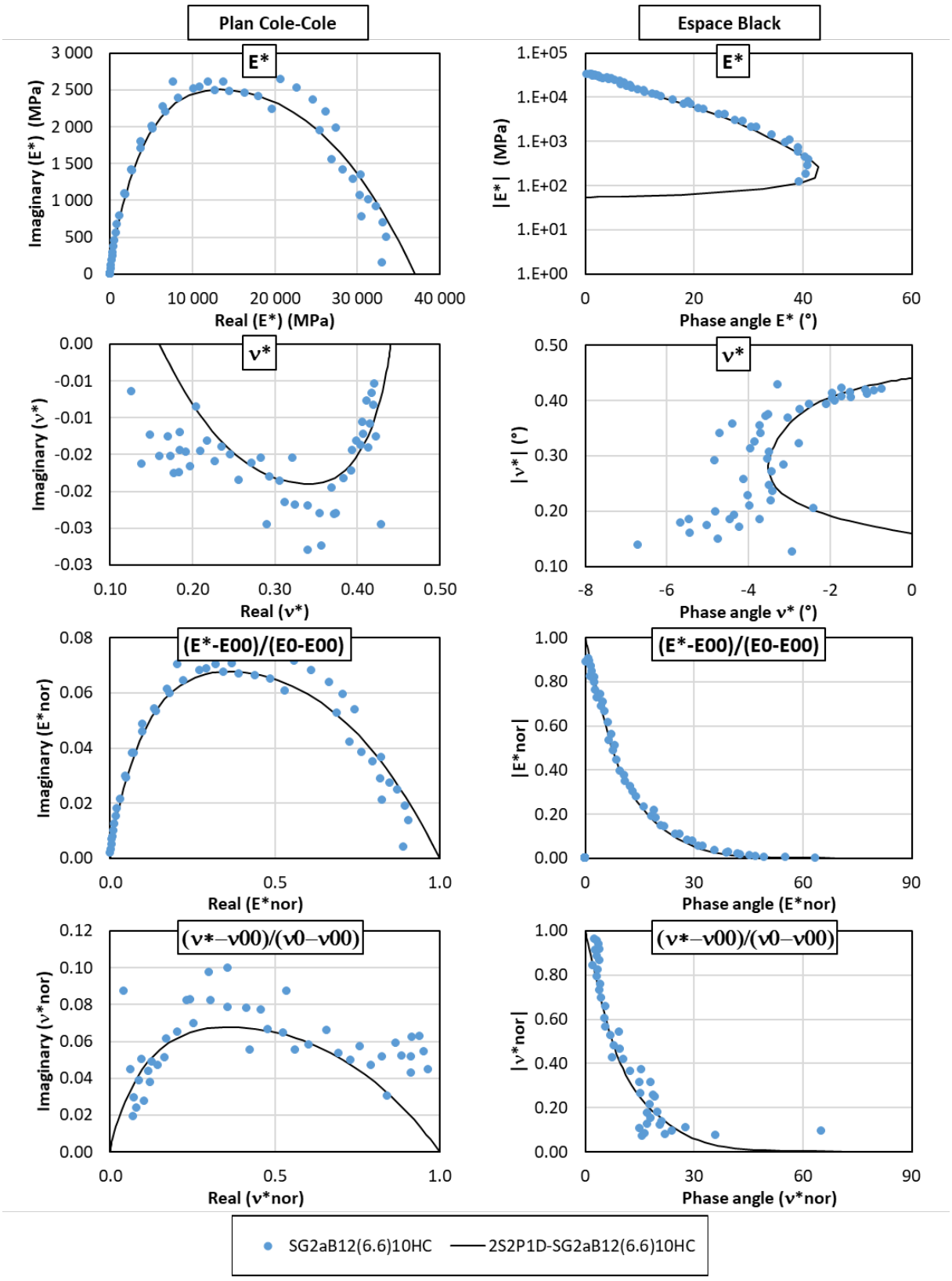

Courbes maitresses
E*
|E*| (MPa)
1.E+05
1.E+04
1.E+03
1.E+02
1.E+01
1.E+00
1.E-06
1.E-03
1.E+00
1.E+03
1.E+06
1.E+09
aT x Frequency (Hz)
T_R=15°C
Phase angle E*
φ_E* (°)
50
40
30
20
10
0
ν*
|ν*|
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
Phase angle ν*
φ_ν* (°)
0
-1
-2
-3
-4
SG2aB5(6.7)10HC
2S2P1D-SG2aB5(6.7)10HC

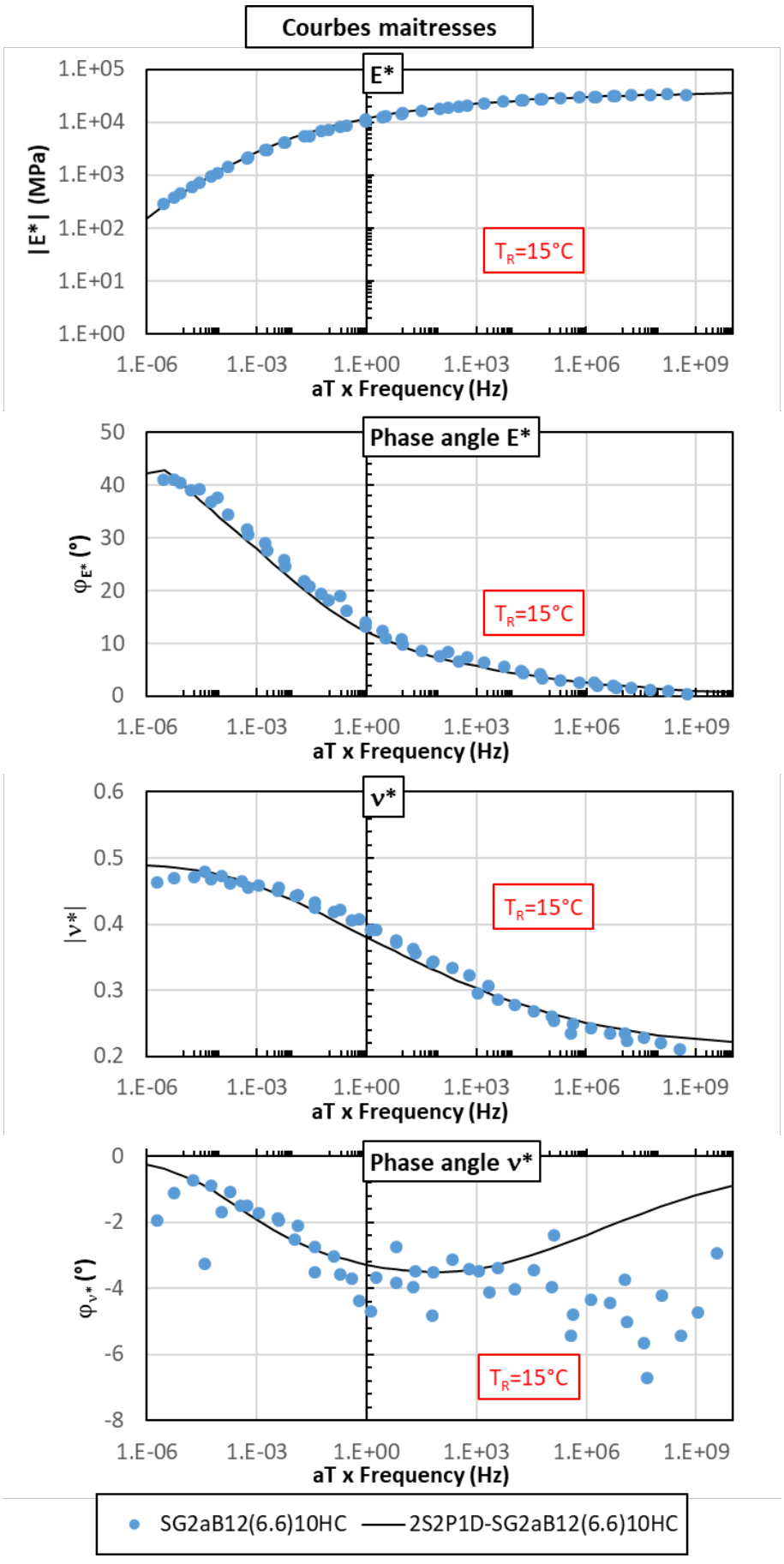

Courbes maitresses normalisées
(E*-E00)/(E0-E00)
(E*-E00)/(E0-E00)
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle of (E*-E00)/(E0-E00)
φ(E*-E00)/(E0-E00)
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle of (ν*–ν00)/(ν0–ν00)
φ(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
SG2aB5(6.7)10HC
2S2P1D-SG2aB5(6.7)10HC

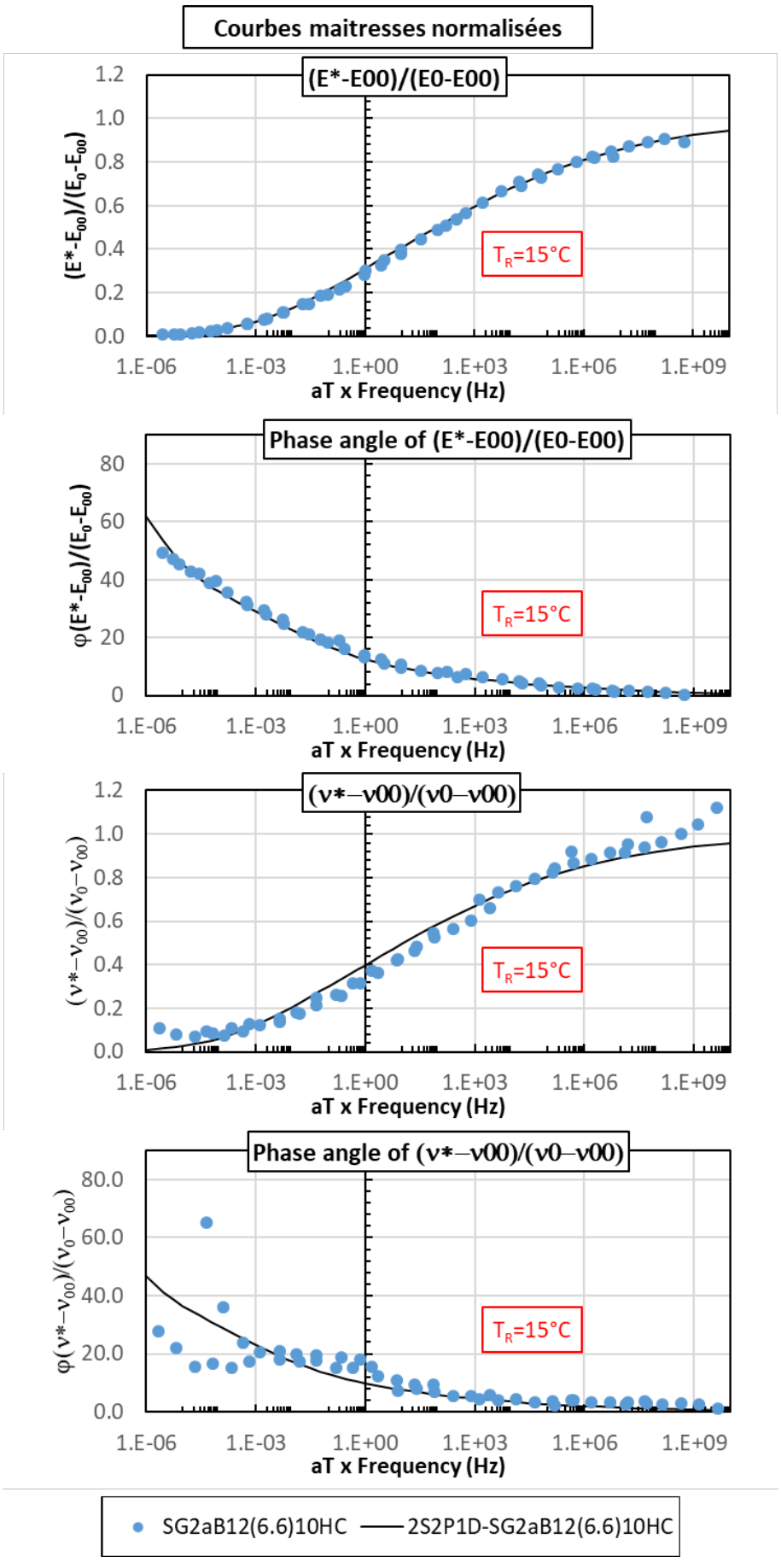
*

2.2.4.2. SG2aB12(6.6)10HC



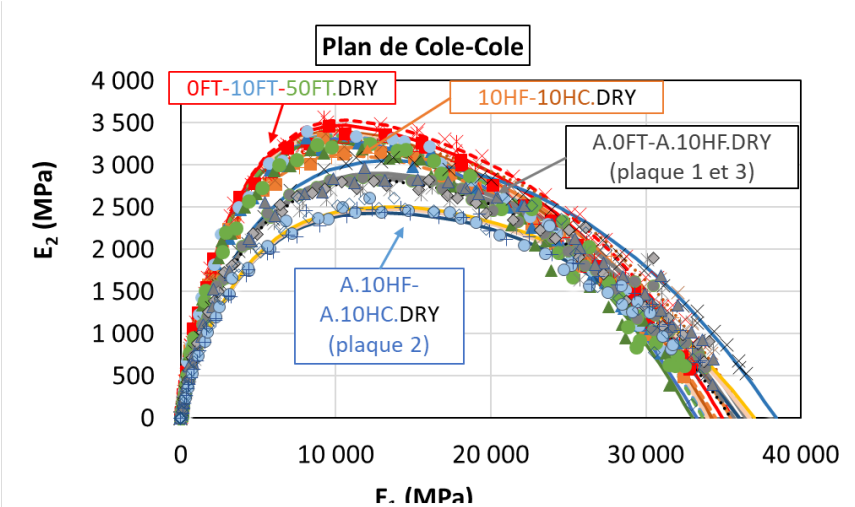

Plan Cole-Cole
E*
Imaginary (E*) (MPa)
Real (E*) (MPa)
Espace Black
E*
|E*| (MPa)
Phase angle E* (°)
ν*
Imaginary (ν*)
Real (ν*)
ν*
|ν*| (°)
Phase angle ν* (°)
(E*-E00)/(E0-E00)
Imaginary (E*nor)
Real (E*nor)
(E*-E00)/(E0-E00)
|E*nor|
Phase angle (E*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
Imaginary (ν*nor)
Real (ν*nor)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
|ν*nor|
Phase angle (ν*nor)
SG2aB12(6.6)10HC
2S2P1D-SG2aB12(6.6)10HC

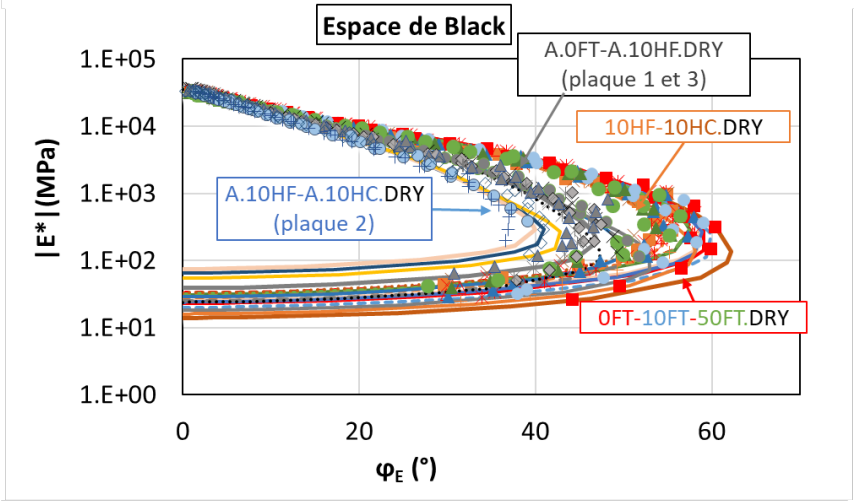

Courbes maitresses
E*
|E*| (MPa)
1.E+05
1.E+04
1.E+03
1.E+02
1.E+01
1.E+00
T_R=15°C
1.E-06
1.E-03
1.E+00
1.E+03
1.E+06
1.E+09
aT x Frequency (Hz)
Phase angle E*
φ_{E^*} (°)
50
40
30
20
10
0
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
ν*
|ν*|
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle ν*
φ_{ν^*} (°)
0
-2
-4
-6
-8
T_R=15°C
aT x Frequency (Hz)
SG2aB12(6.6)10HC
2S2P1D-SG2aB12(6.6)10HC

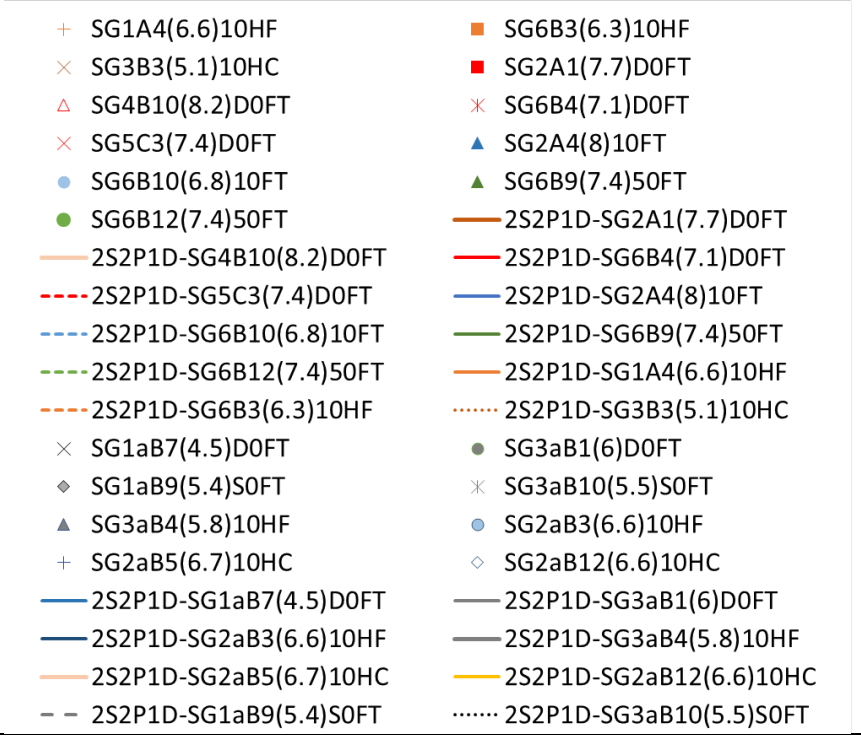

Courbes maitresses normalisées
(E*-E00)/(E0-E00)
(E*-E00)/(E0-E00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle of (E*-E00)/(E0-E00)
φ(E*-E00)/(E0-E00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
Phase angle of (ν*–ν00)/(ν0–ν00)
φ(ν*–ν00)/(ν0–ν00)
TR=15°C
aT x Frequency (Hz)
1.E-06
1.E-03
1.E+00
1.E+03
1.E+06
1.E+09
SG2aB12(6.6)10HC
2S2P1D-SG2aB12(6.6)10HC

2.3. Ensemble des résultats sur les éprouvettes (non-vieilli et vieilli) testées à l'état sec

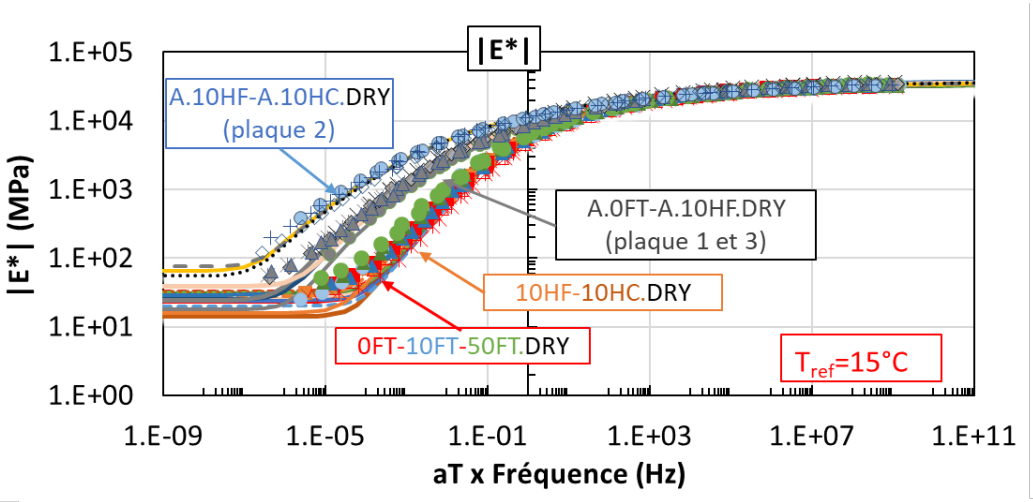
2.3.1. Résultats dans le plan de Cole-Cole et dans l'espace de Black

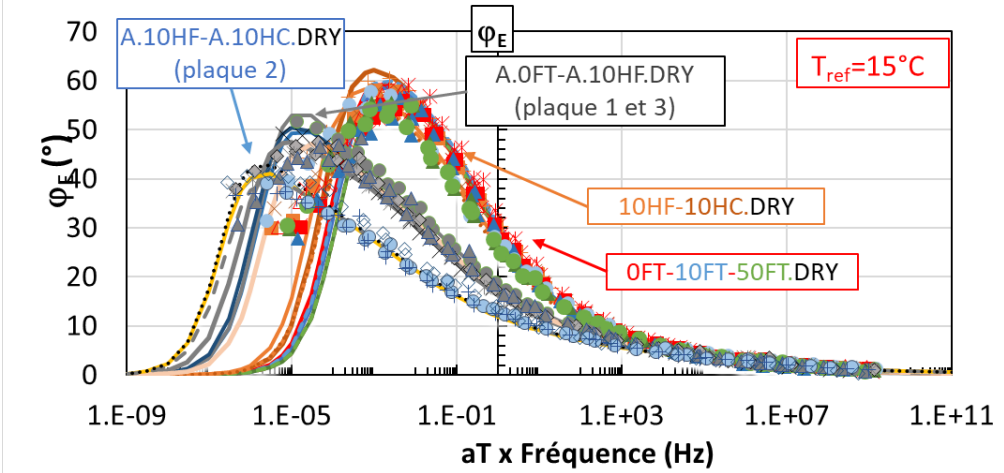


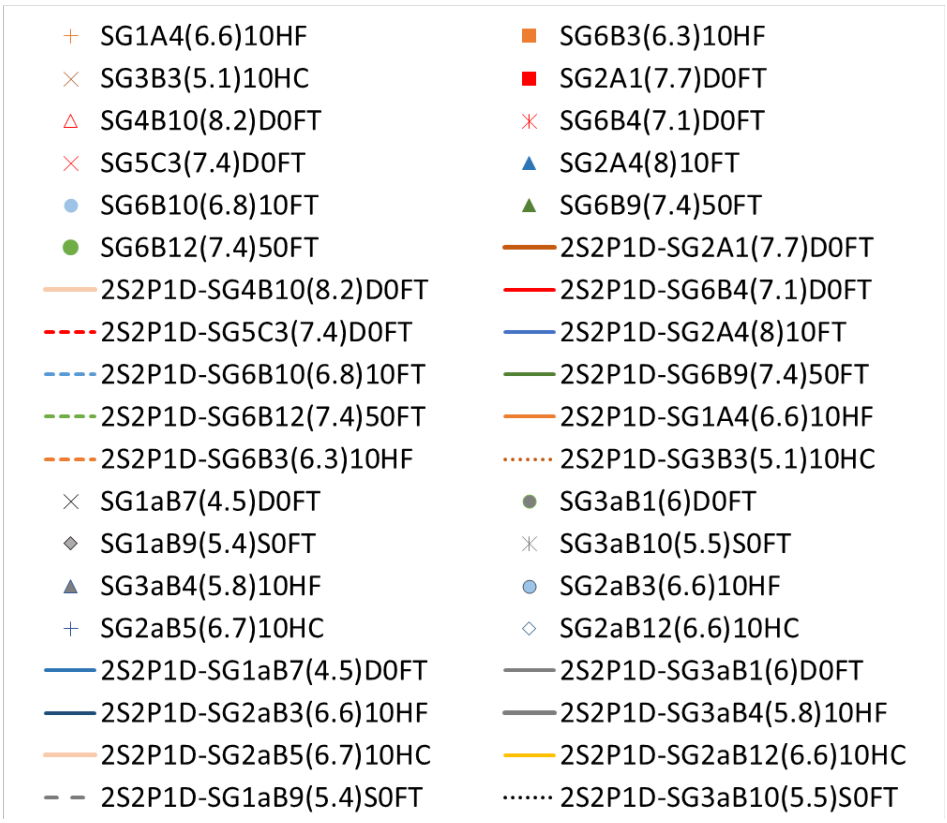




2.3.2. Courbes maîtresses à 15°C



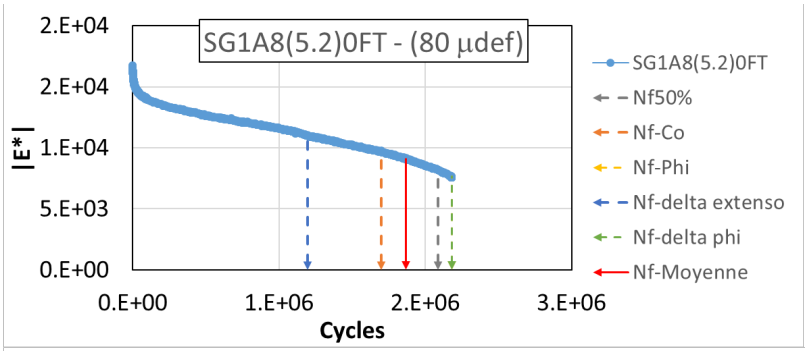


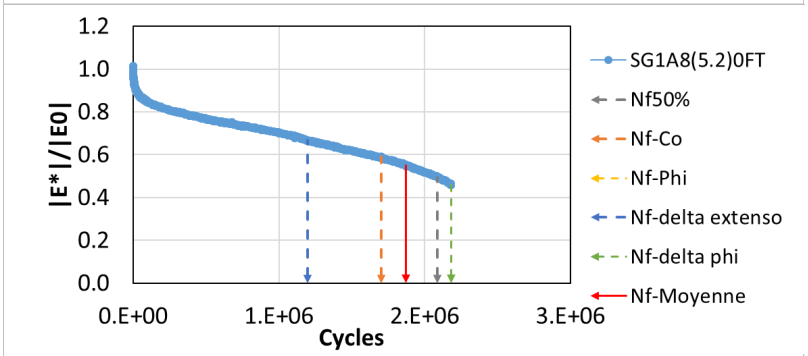


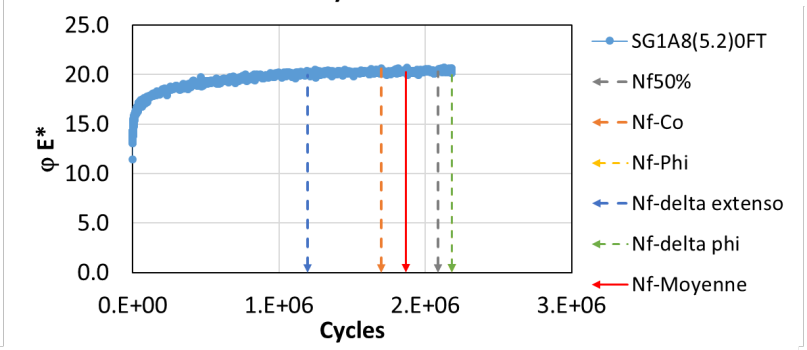
3. Essais de fatigue

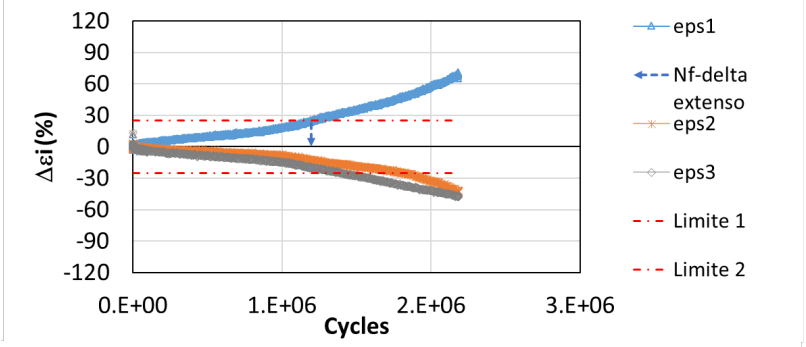
3.1. Eprouvettes non-vieillies sans cycle FT testées à l'état sec (0FT.DRY)

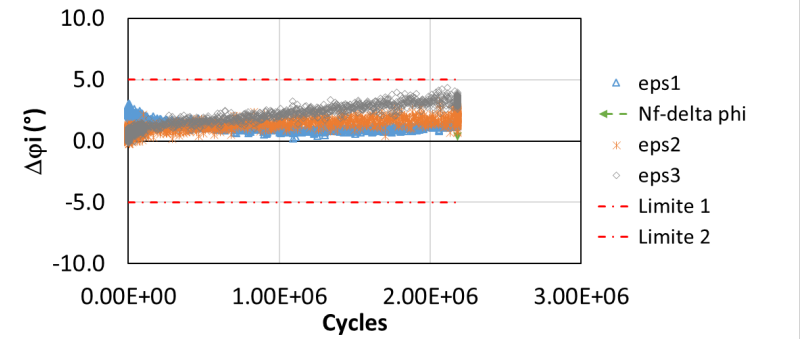
3.1.1. SG1A8(5.2)0FT - 80µm/m



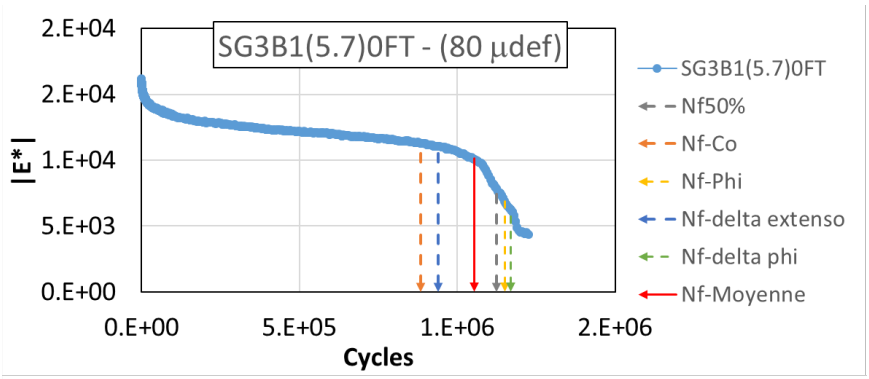


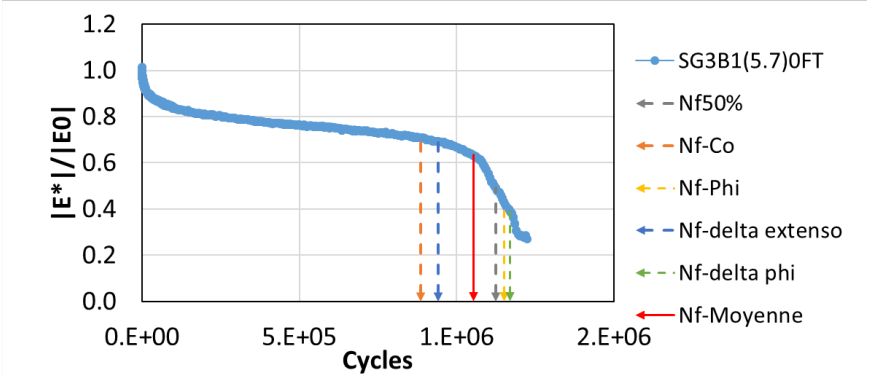


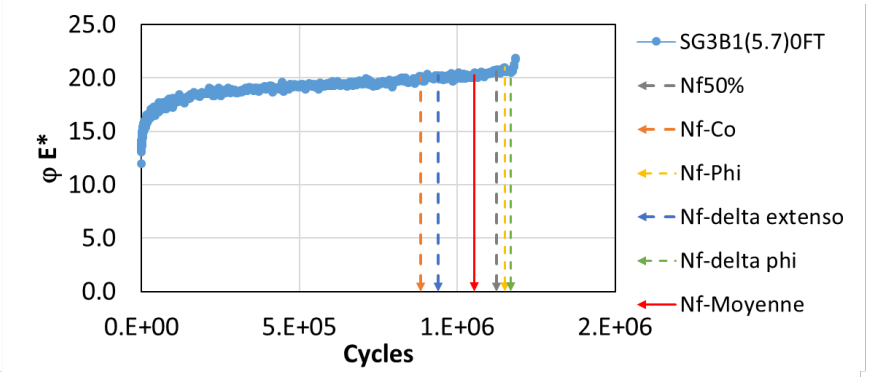


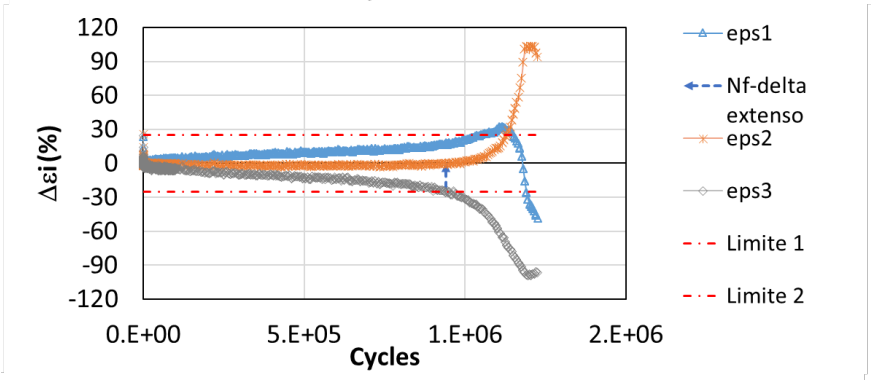


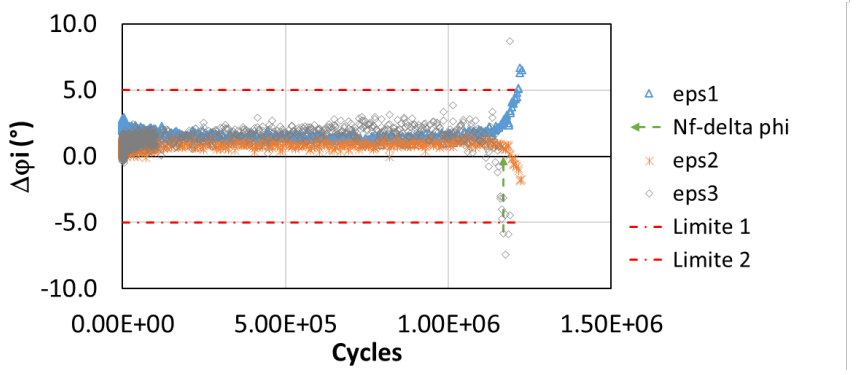
3.1.2. SG3B1(5.7)0FT - 80µm/m



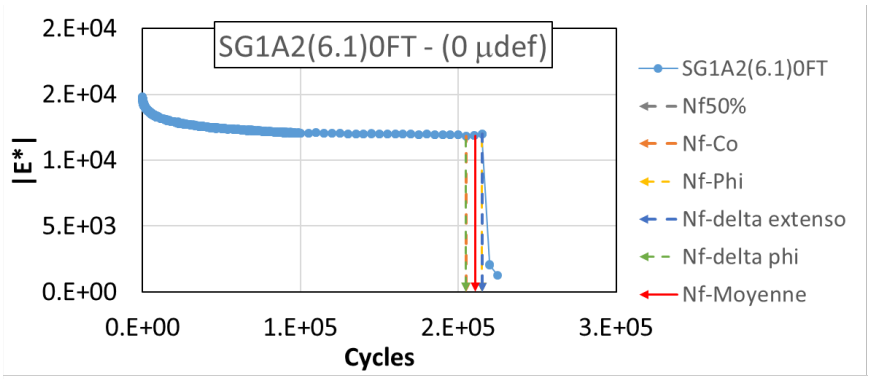


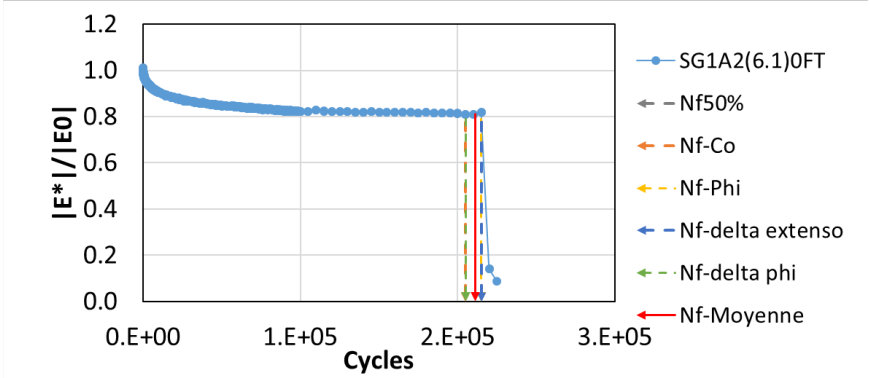


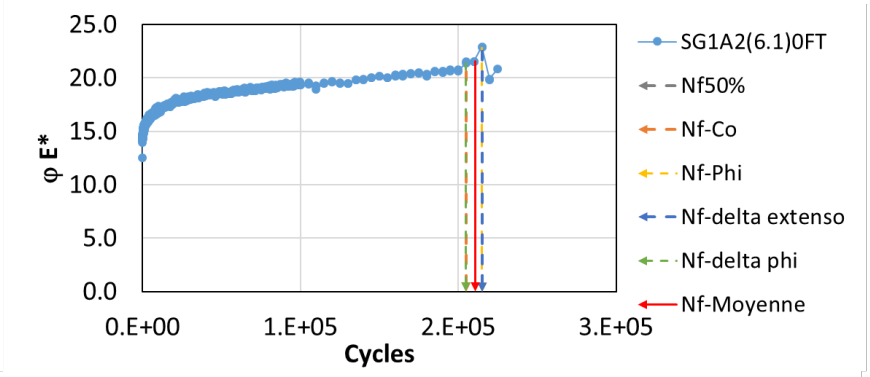


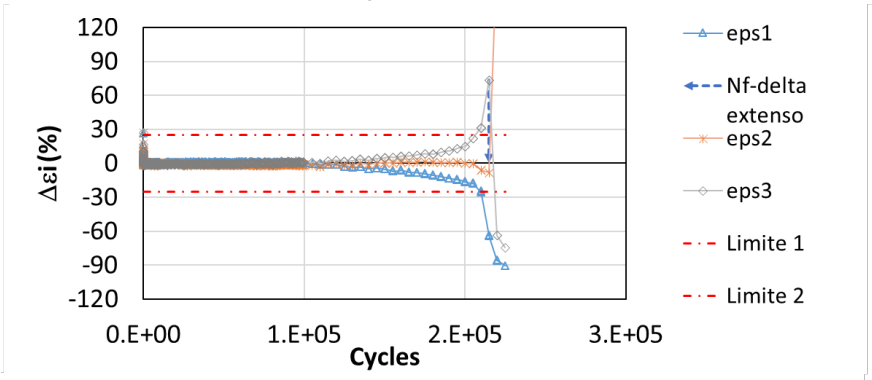


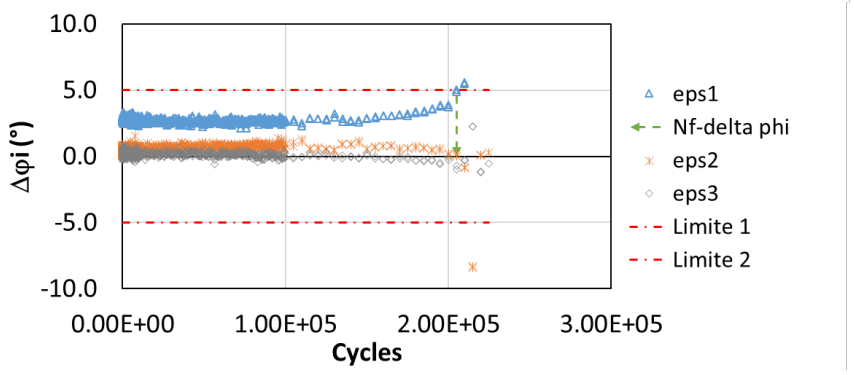
3.1.3. SG1A2(6.1)0FT - 90µm/m



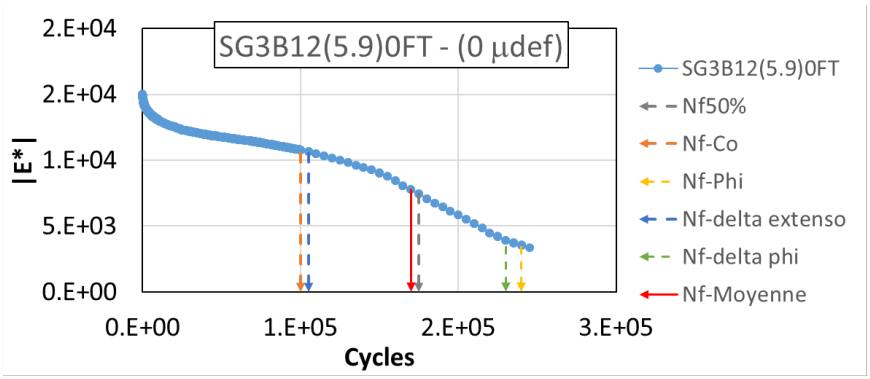


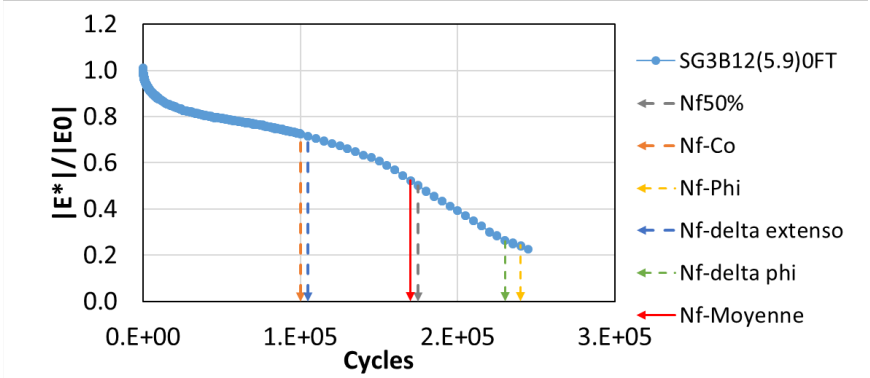


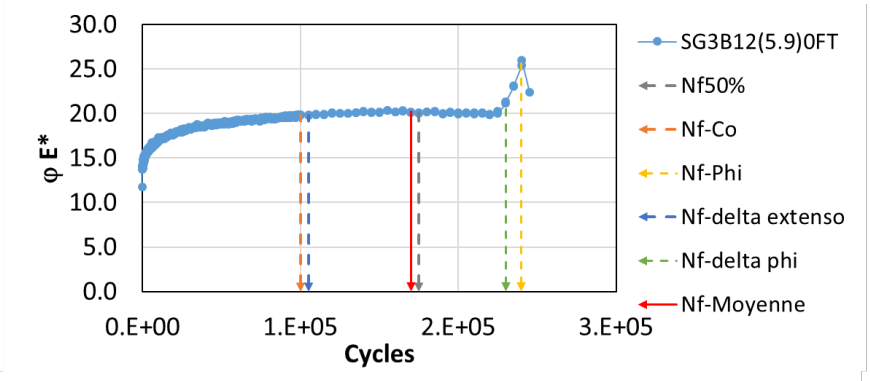


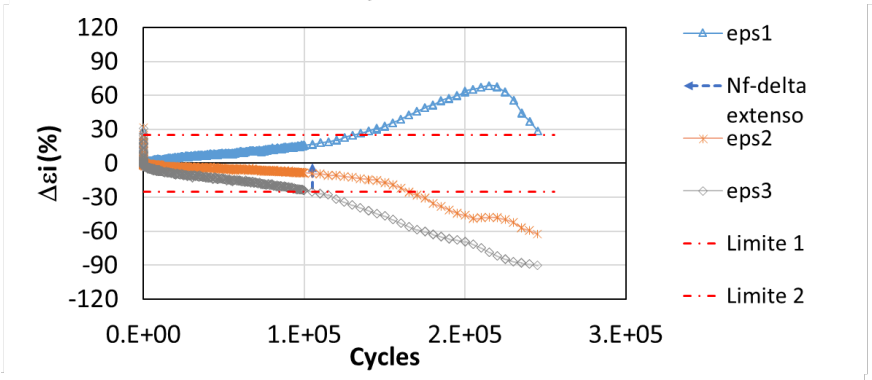


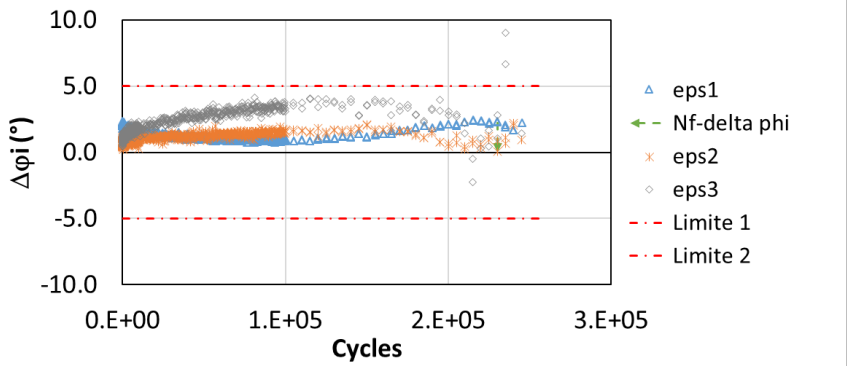
3.1.4. SG3B12(5.9)0FT - 100µm/m



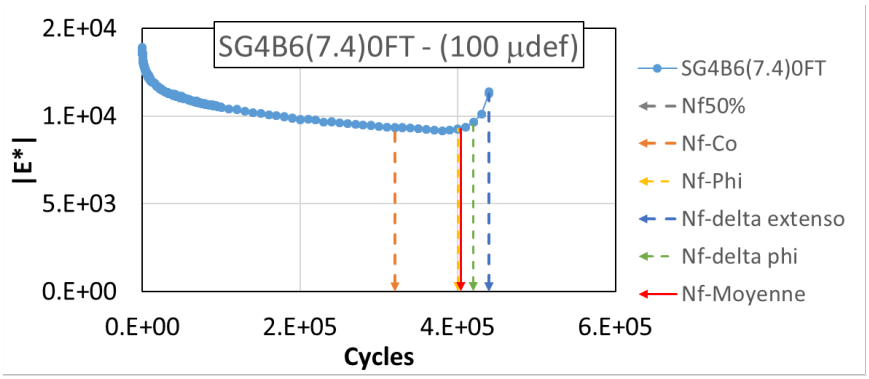


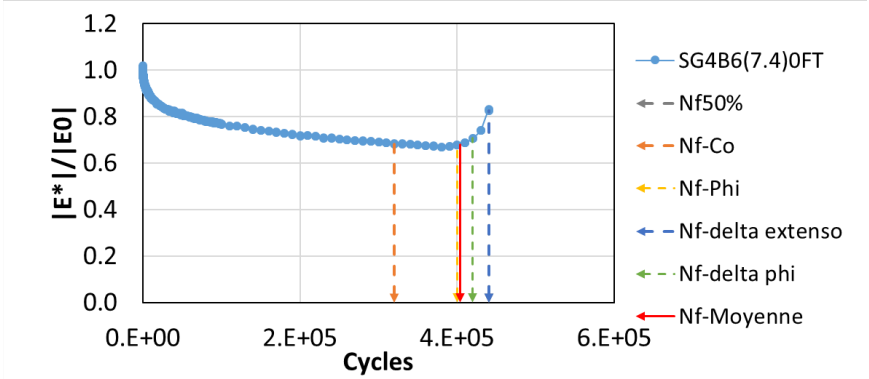


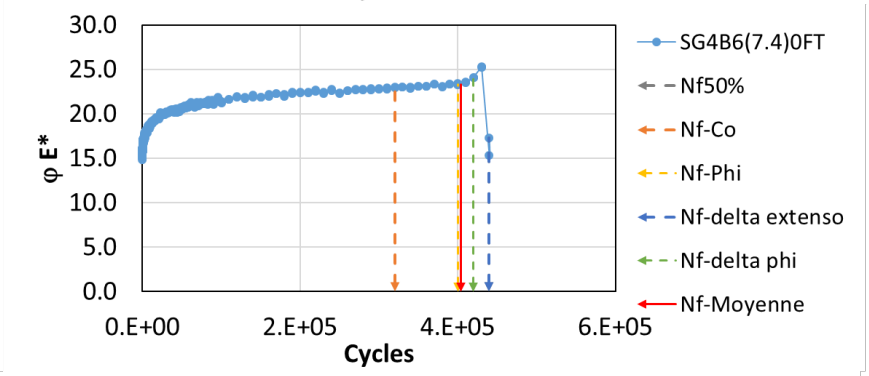


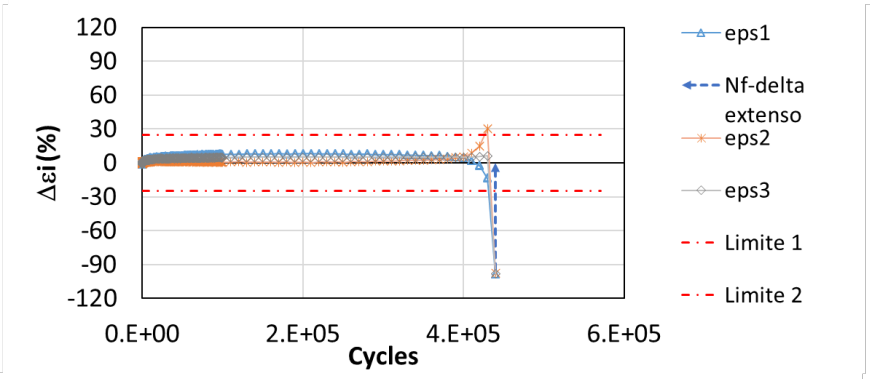


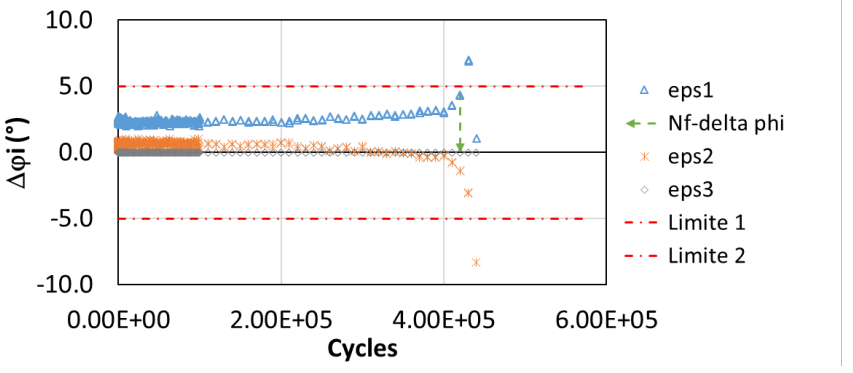
3.1.5. SG4B6(7.4)0FT - 100µm/m



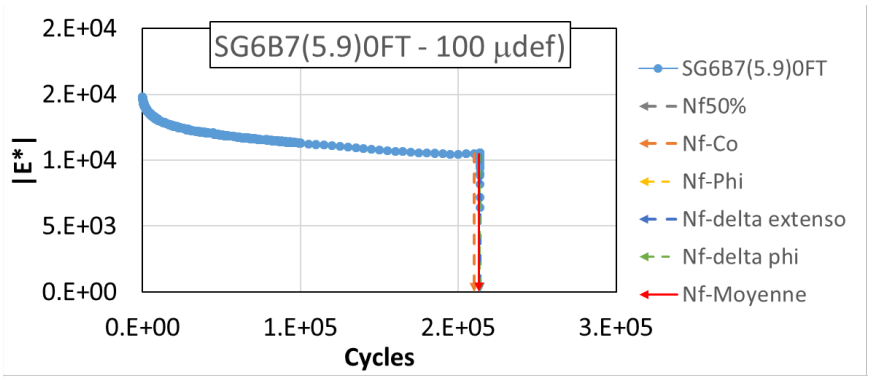


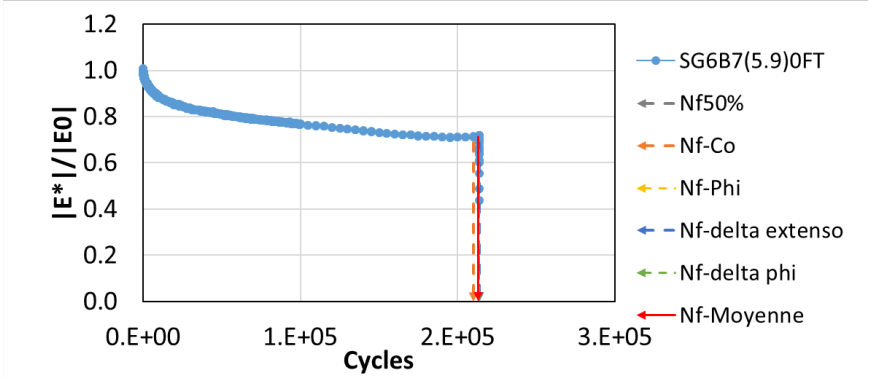


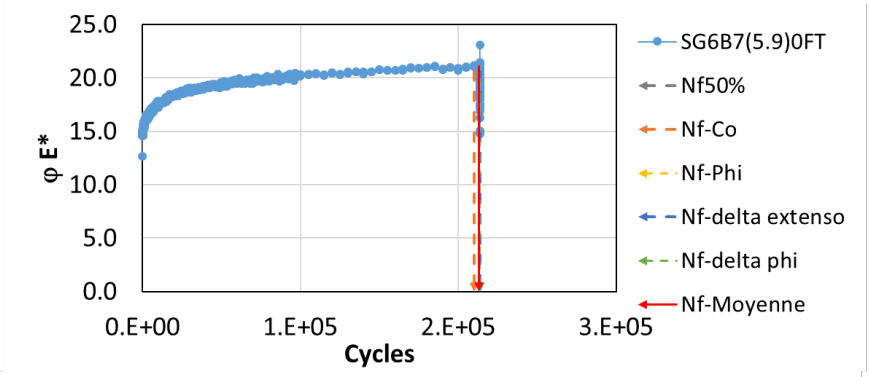


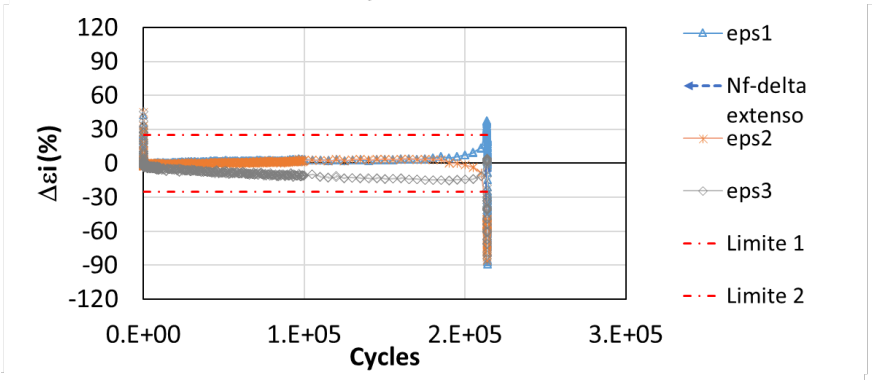


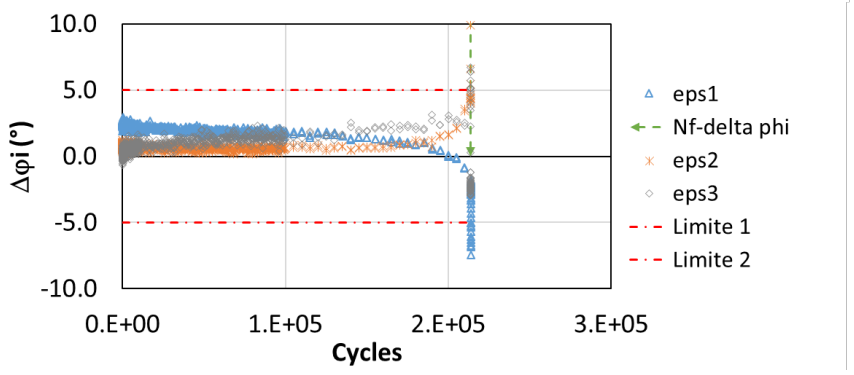
3.1.6. SG6B7(7.4)0FT - 100µm/m



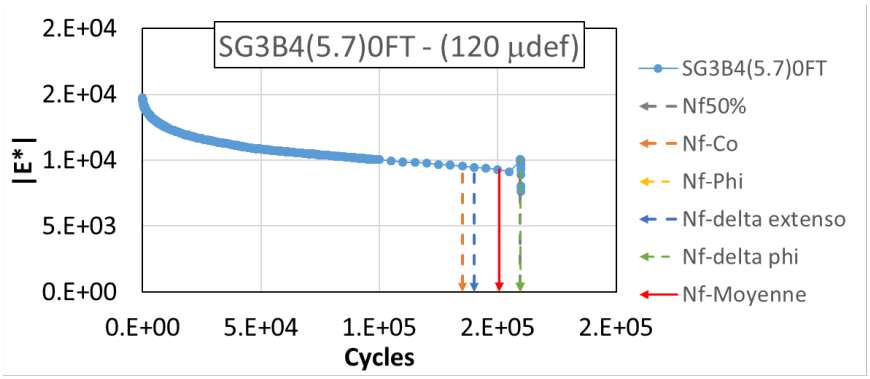


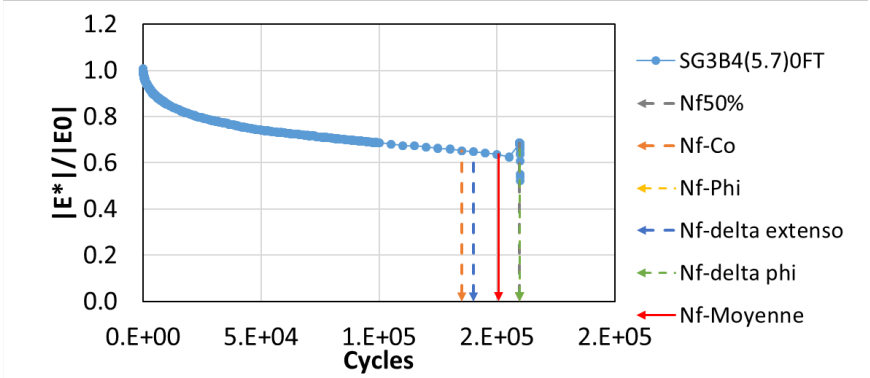


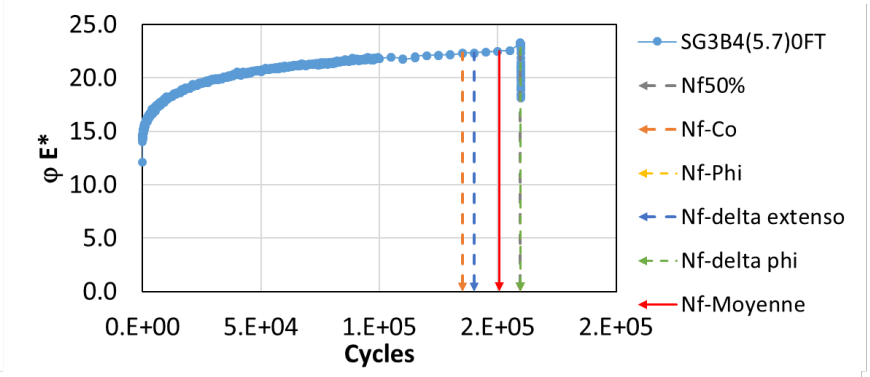


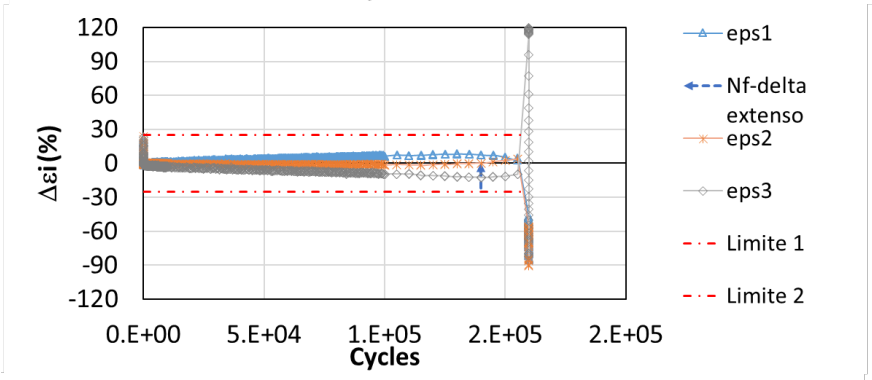


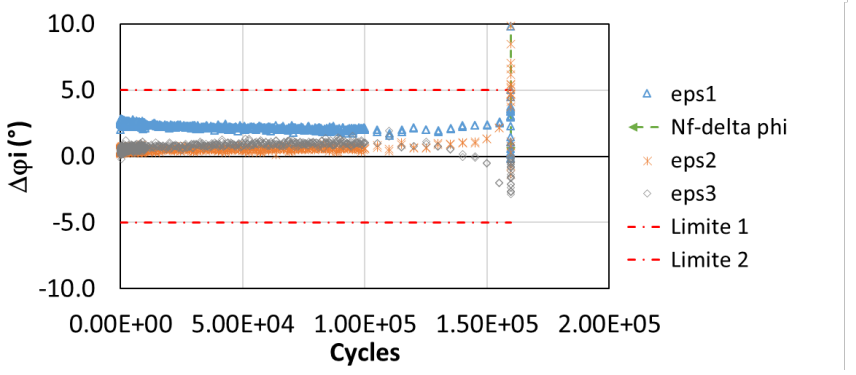
3.1.7. SG3B4(5.7)0FT - 120µm/m





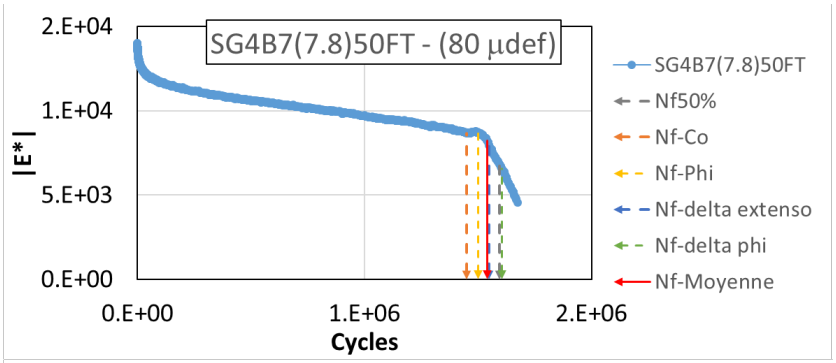


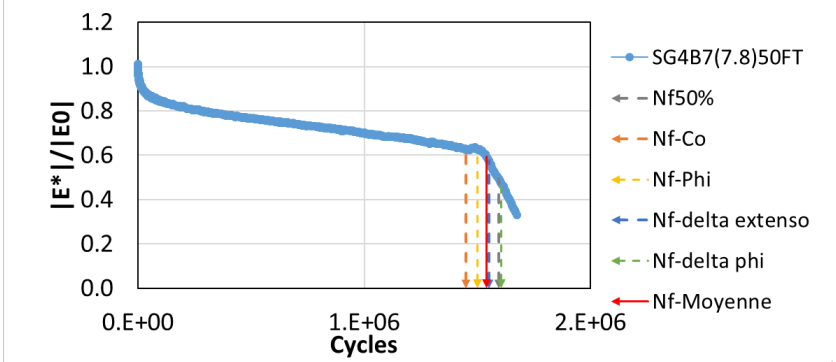


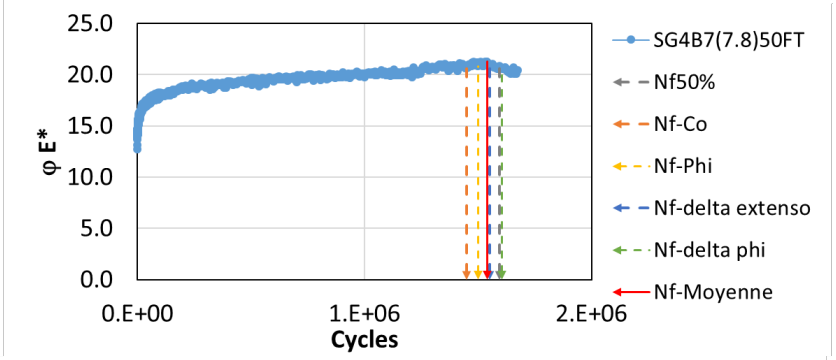


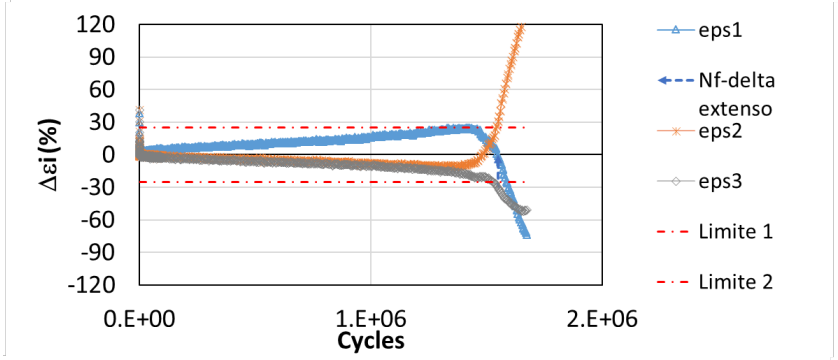
3.1.Eprouvettes non-vieillies avec 50 cycles FT (50FT.DRY)

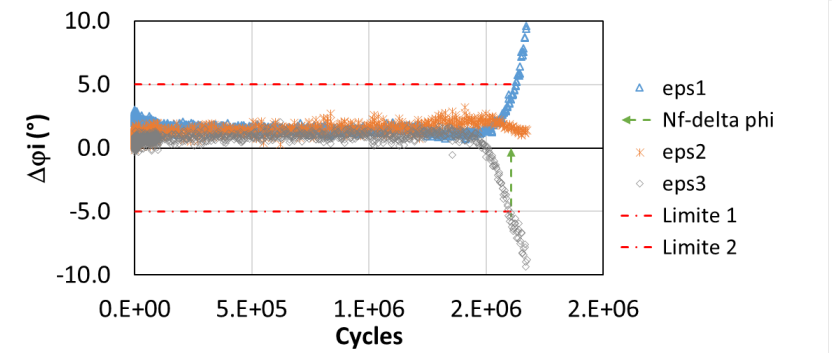
3.1.1. SG4B7(7.8)50FT – 80µm/m



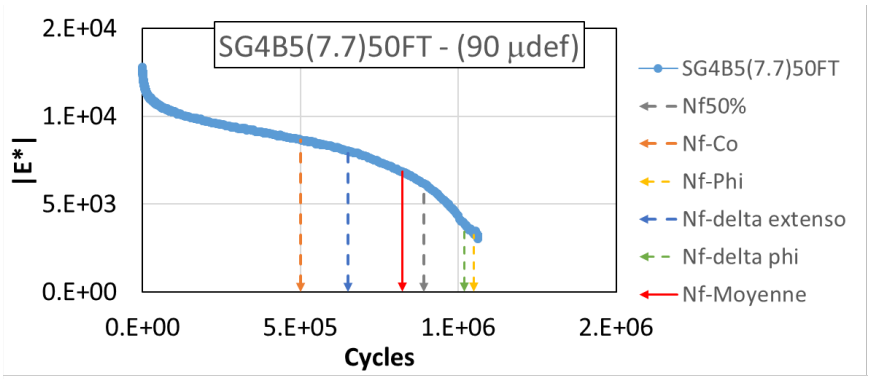


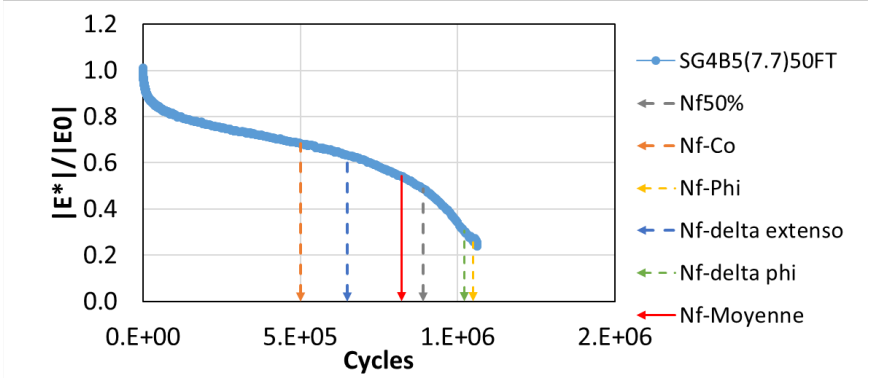


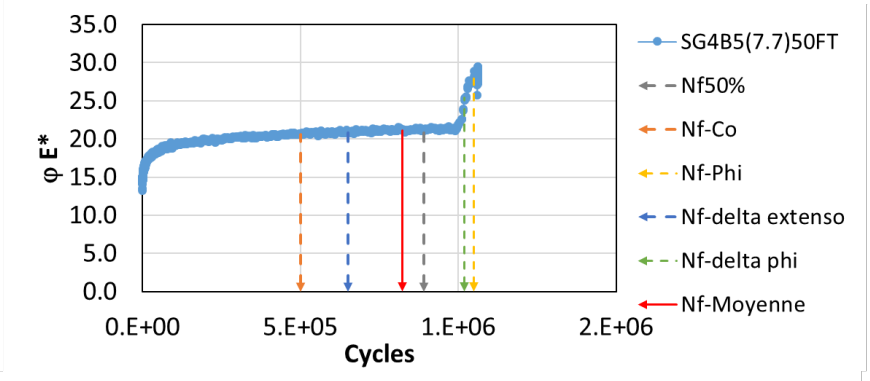


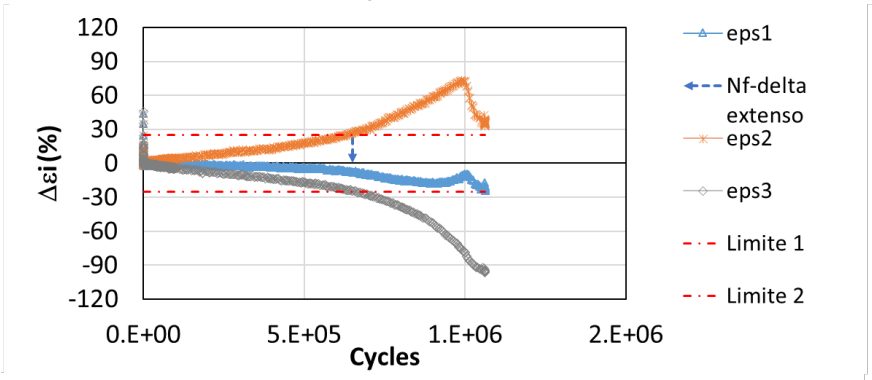


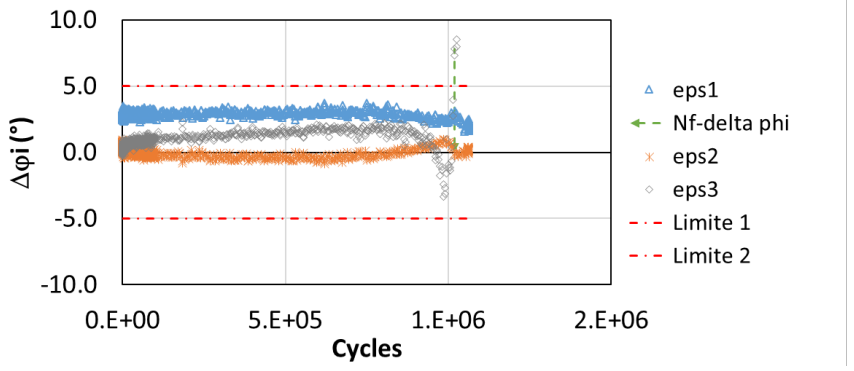
3.1.2. SG4B5(7.7)50FT – 90µm/m



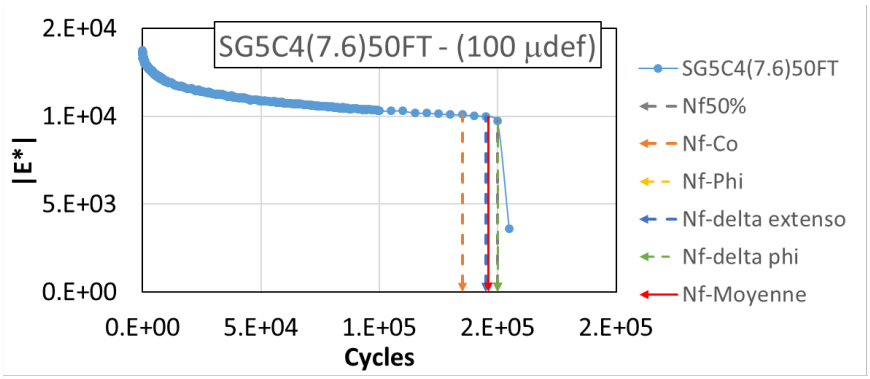


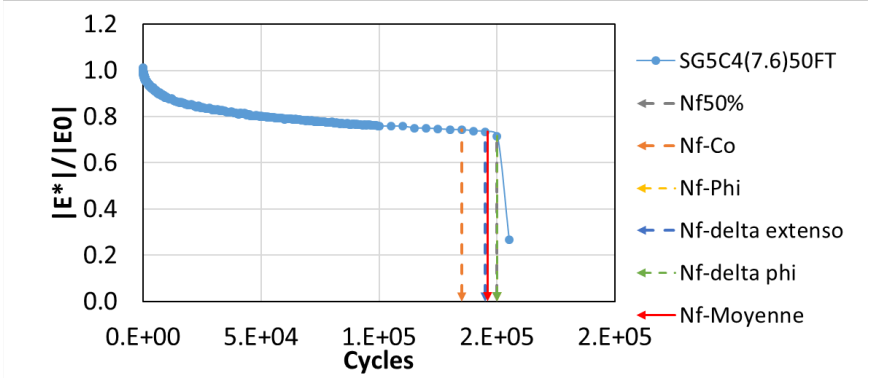


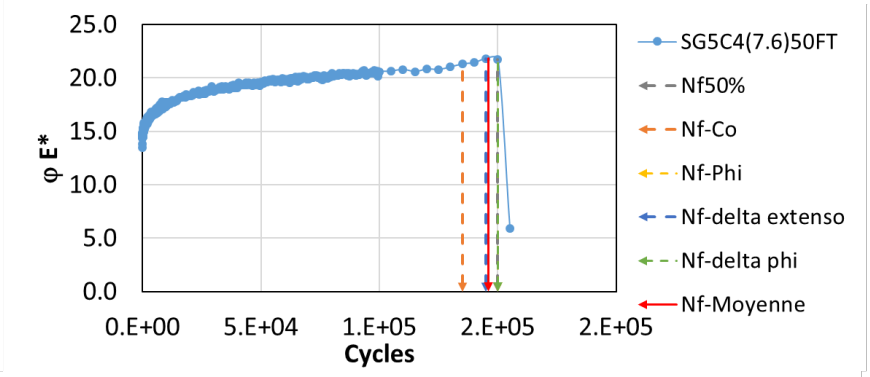


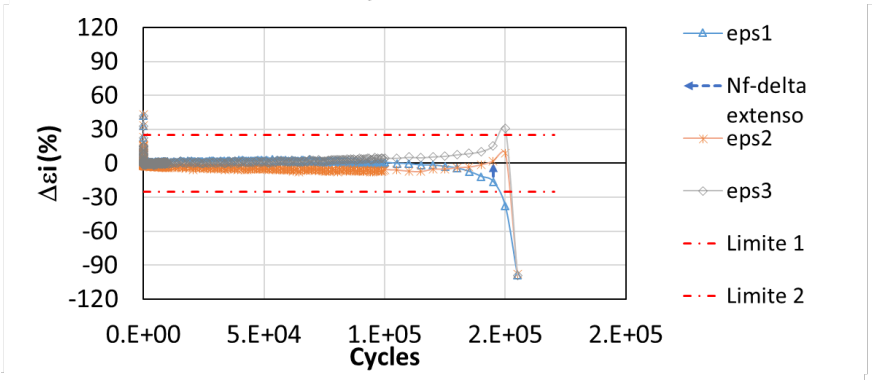


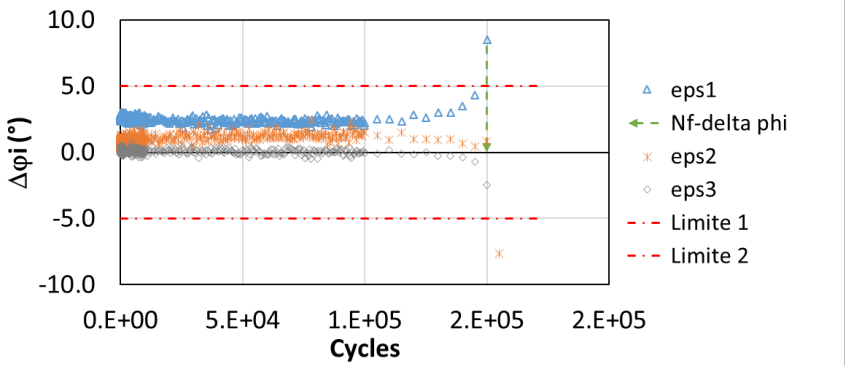
3.1.3. SG5C4(7.6)50FT – 100µm/m



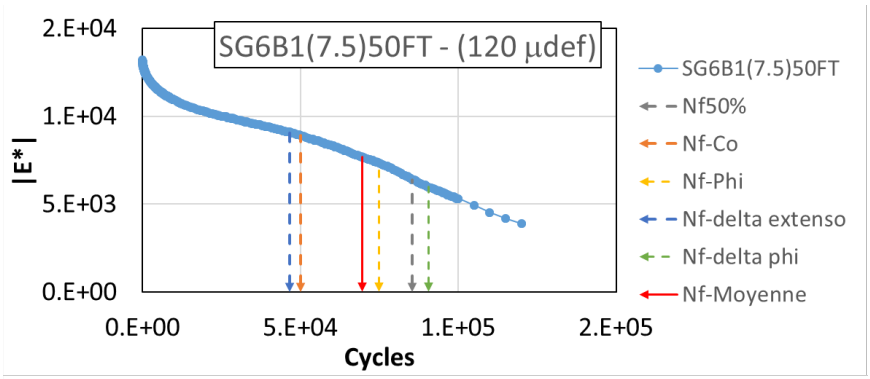


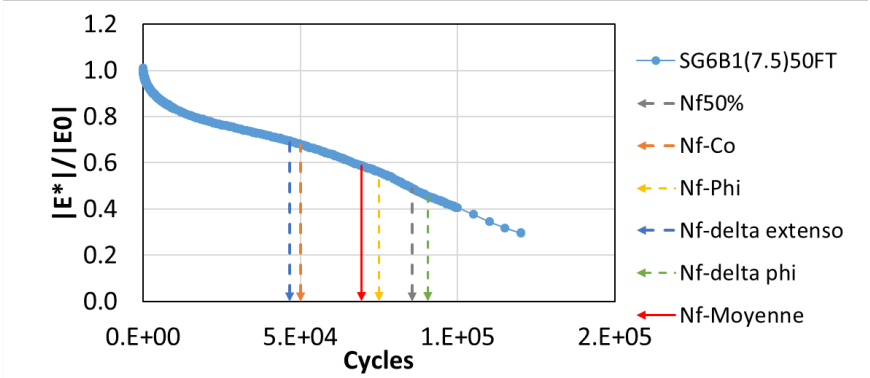


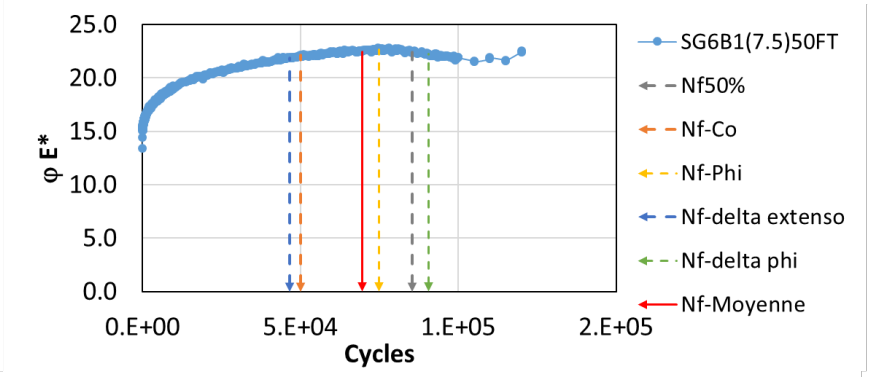


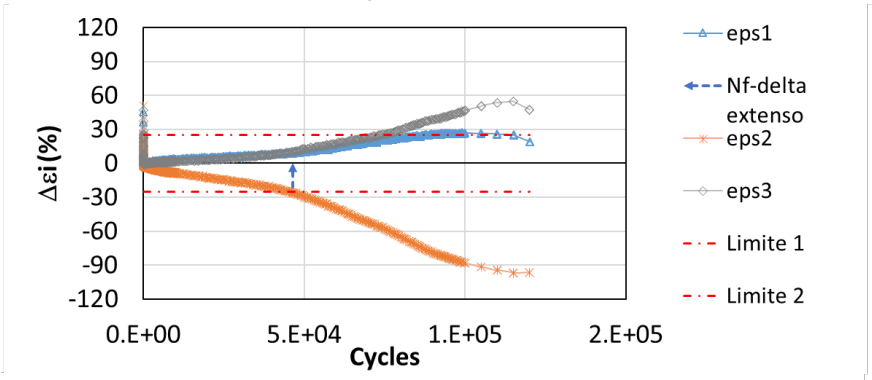


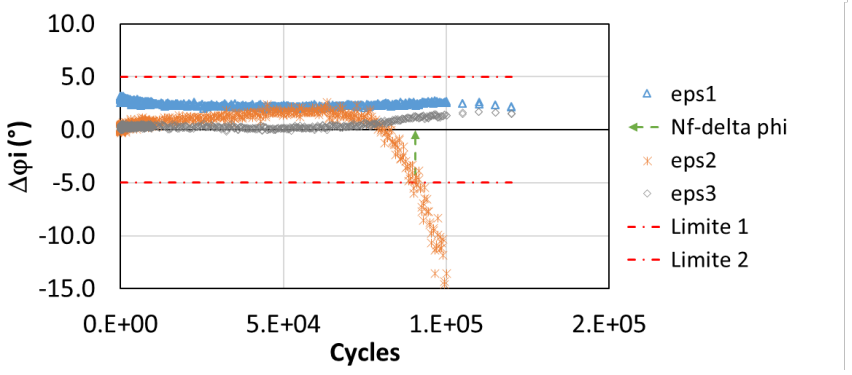
3.1.4. SG6B1(7.5)50FT – 120µm/m





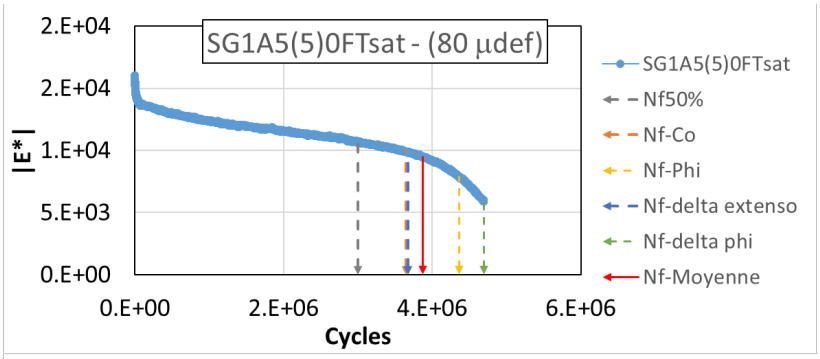


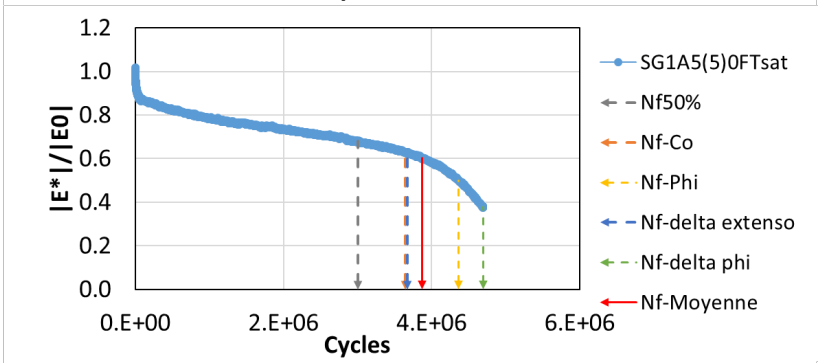


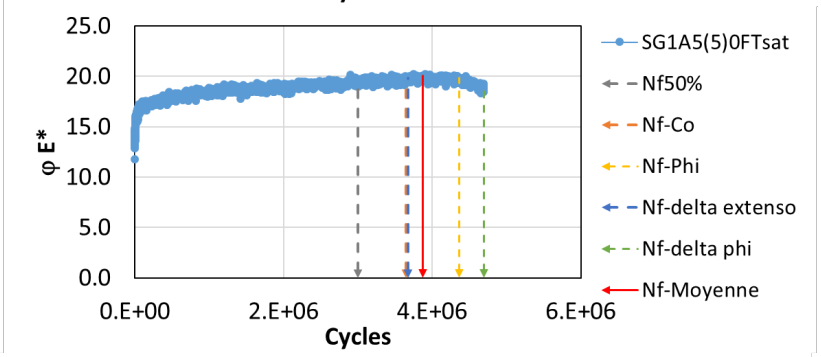


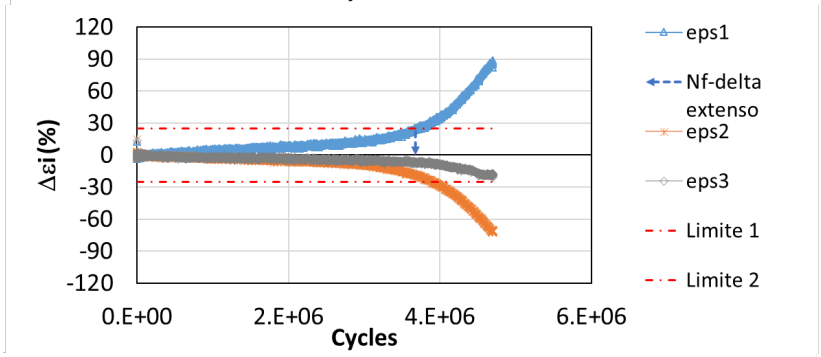
3.2. Eprouvettes non-vieillies testées à l'état partiellement saturé sans cycle FT (0FT.SAT)

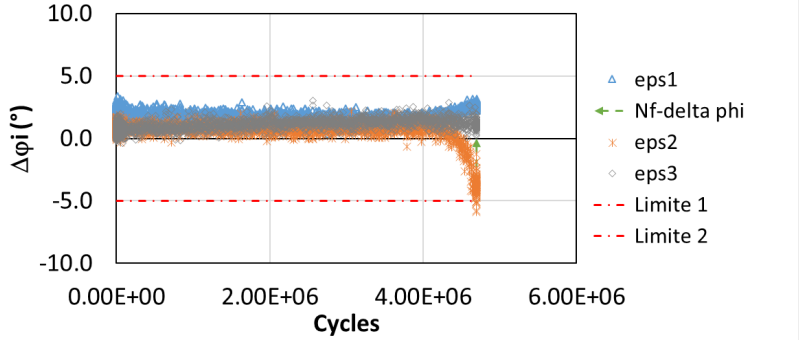
3.2.1. SG1A5(5)0FTsat – 80µm/m



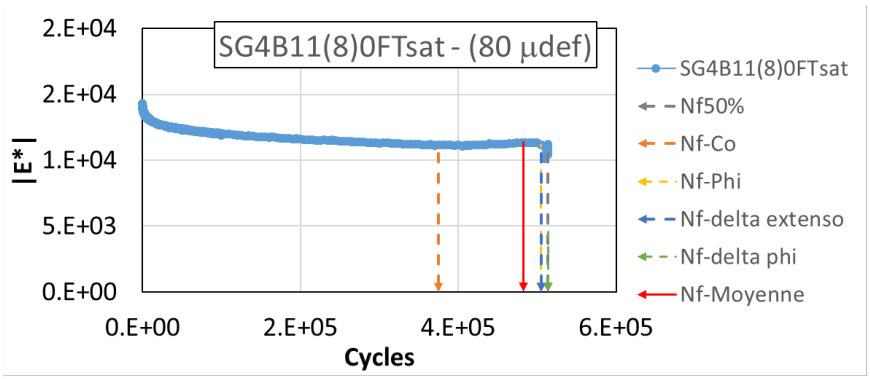


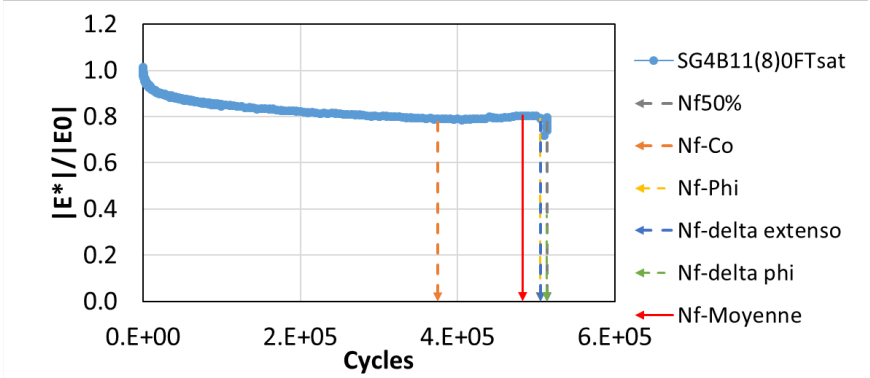


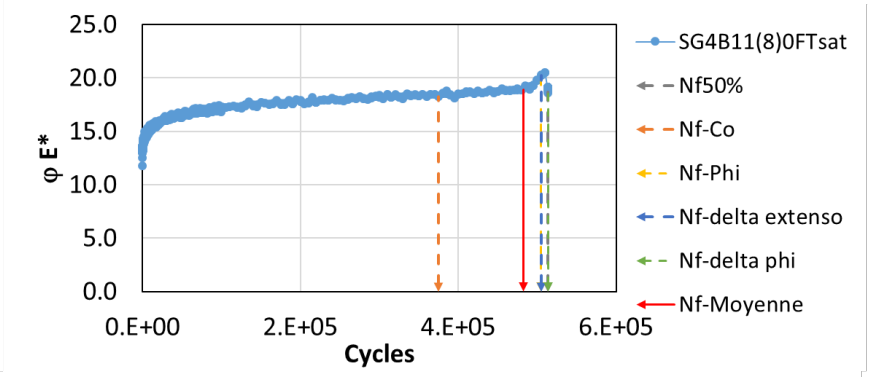


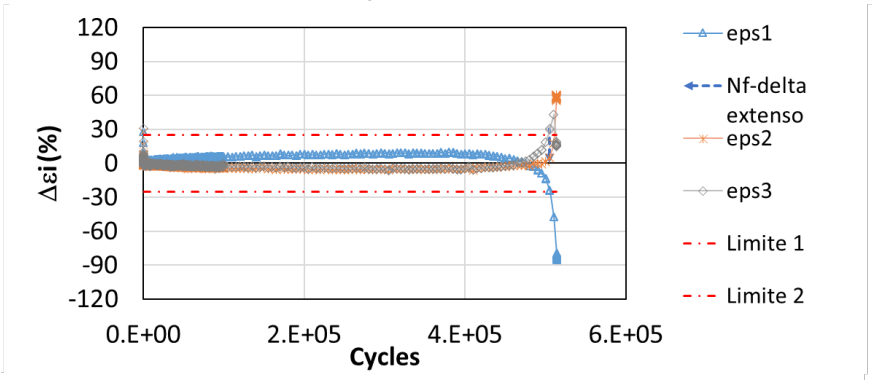


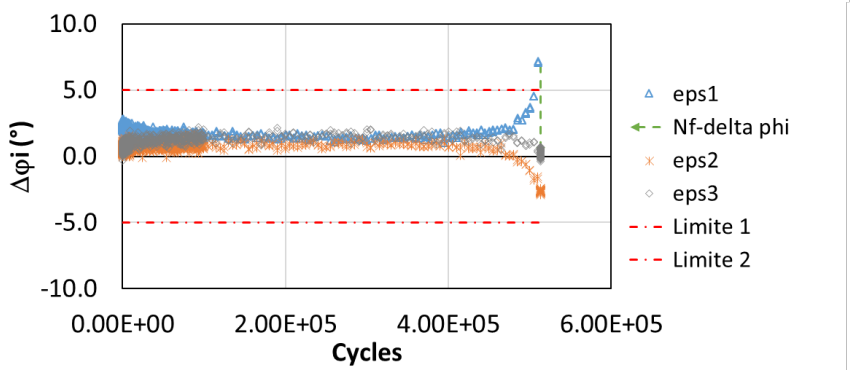
3.2.2. SG4B11(8)0FTsat – 80µm/m



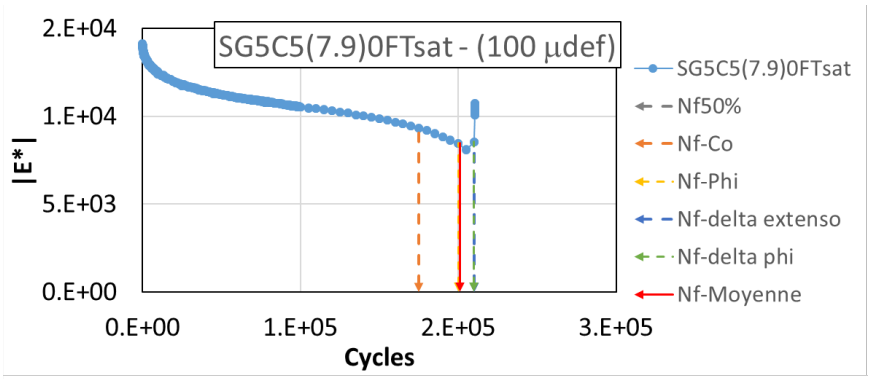


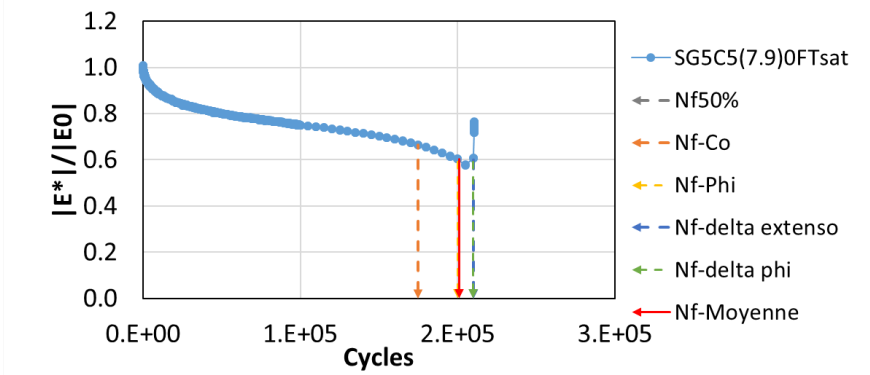


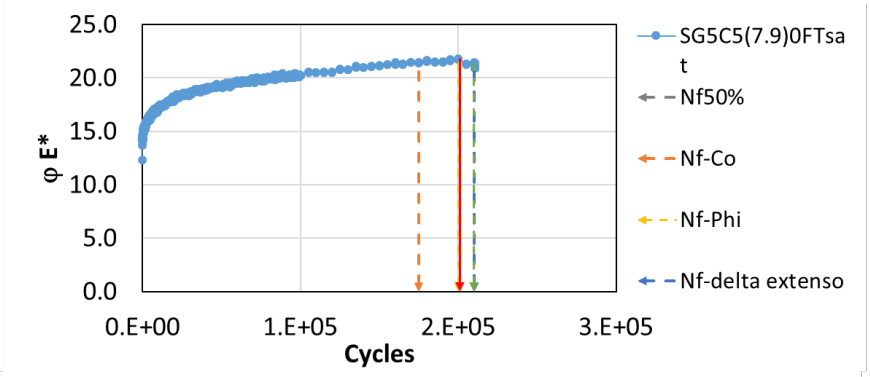


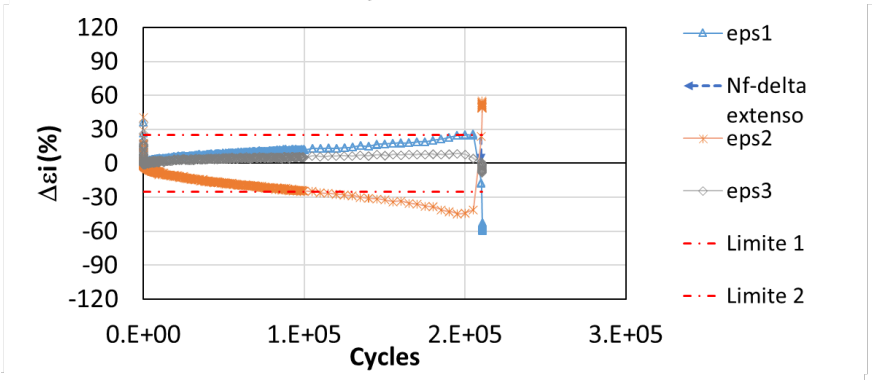


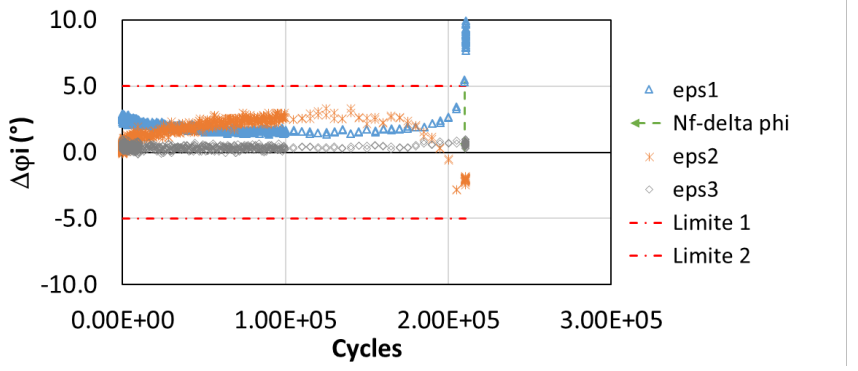
3.2.3. SG5C5(7.9)0FTsat – 100µm/m



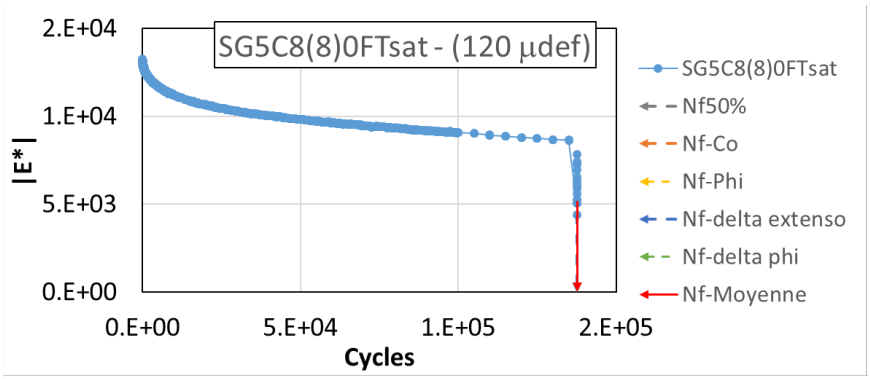


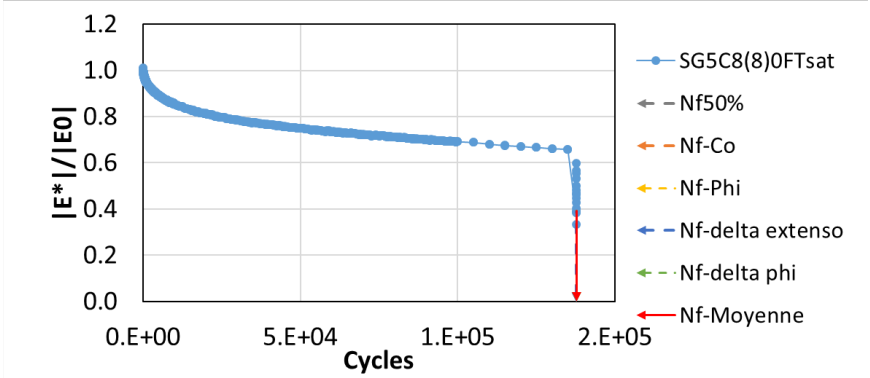


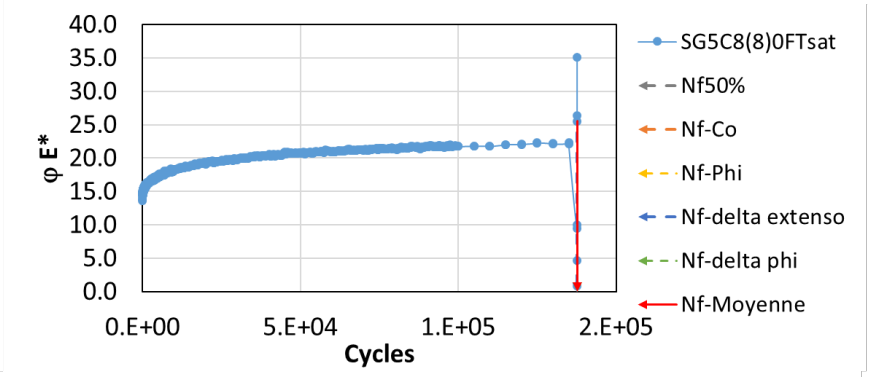


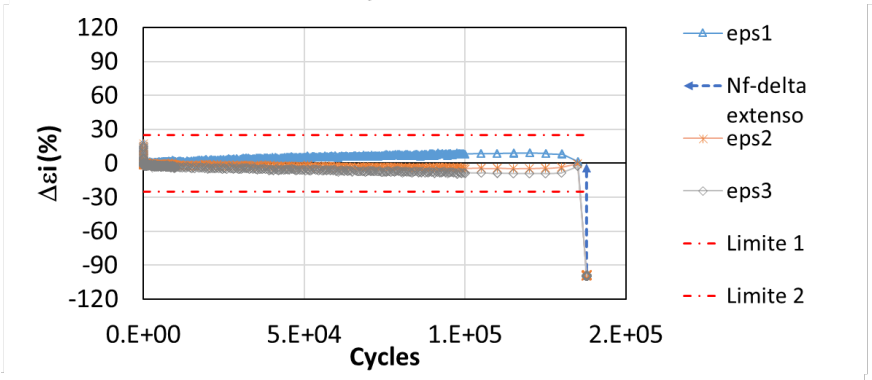


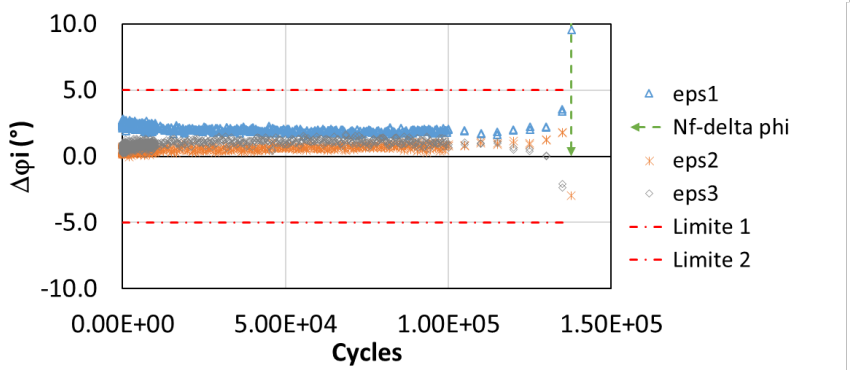
3.2.4. SG5C8(7.9)0FTsat – 120µm/m











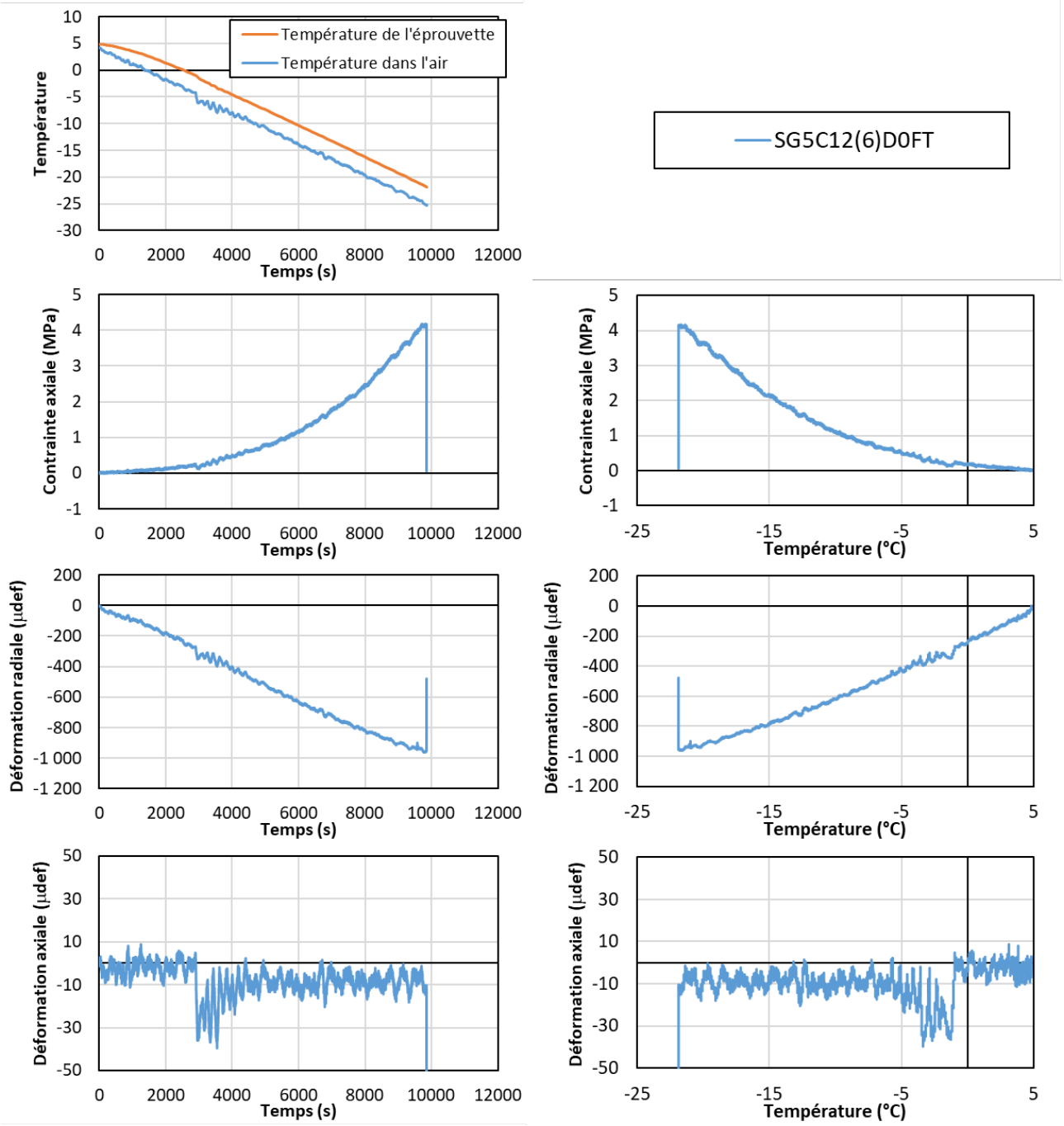
4. Essais TSRST

Dans les parties suivantes, les valeurs de contraintes axiales, déformations radiales sont tracées en fonction de la température mesurée à la surface des éprouvettes.

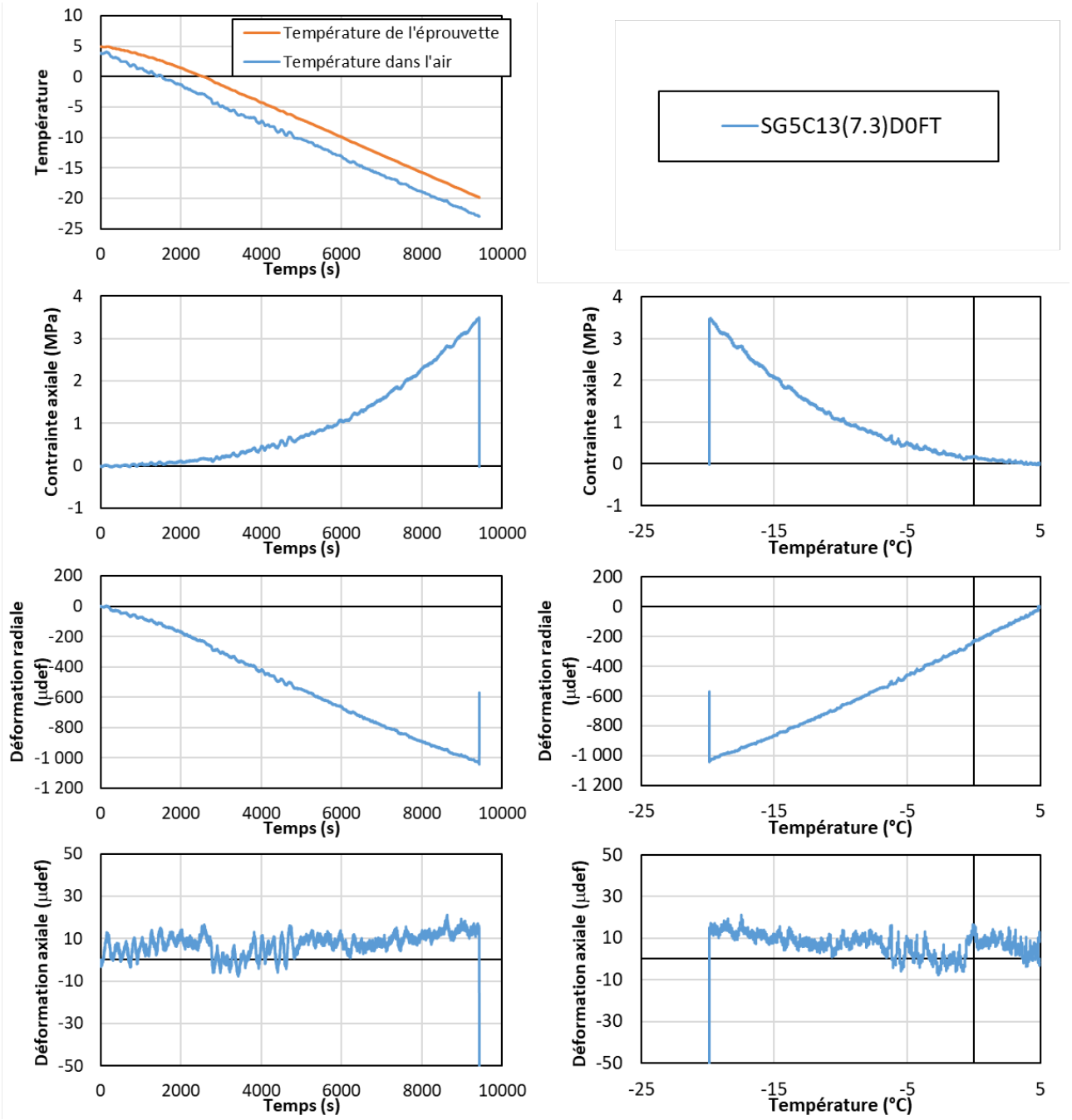
4.1. Eprouvettes non-vieillies

4.1.1. Eprouvettes non-vieillies sans cycle FT testées à l'état sec (0FT.DRY)

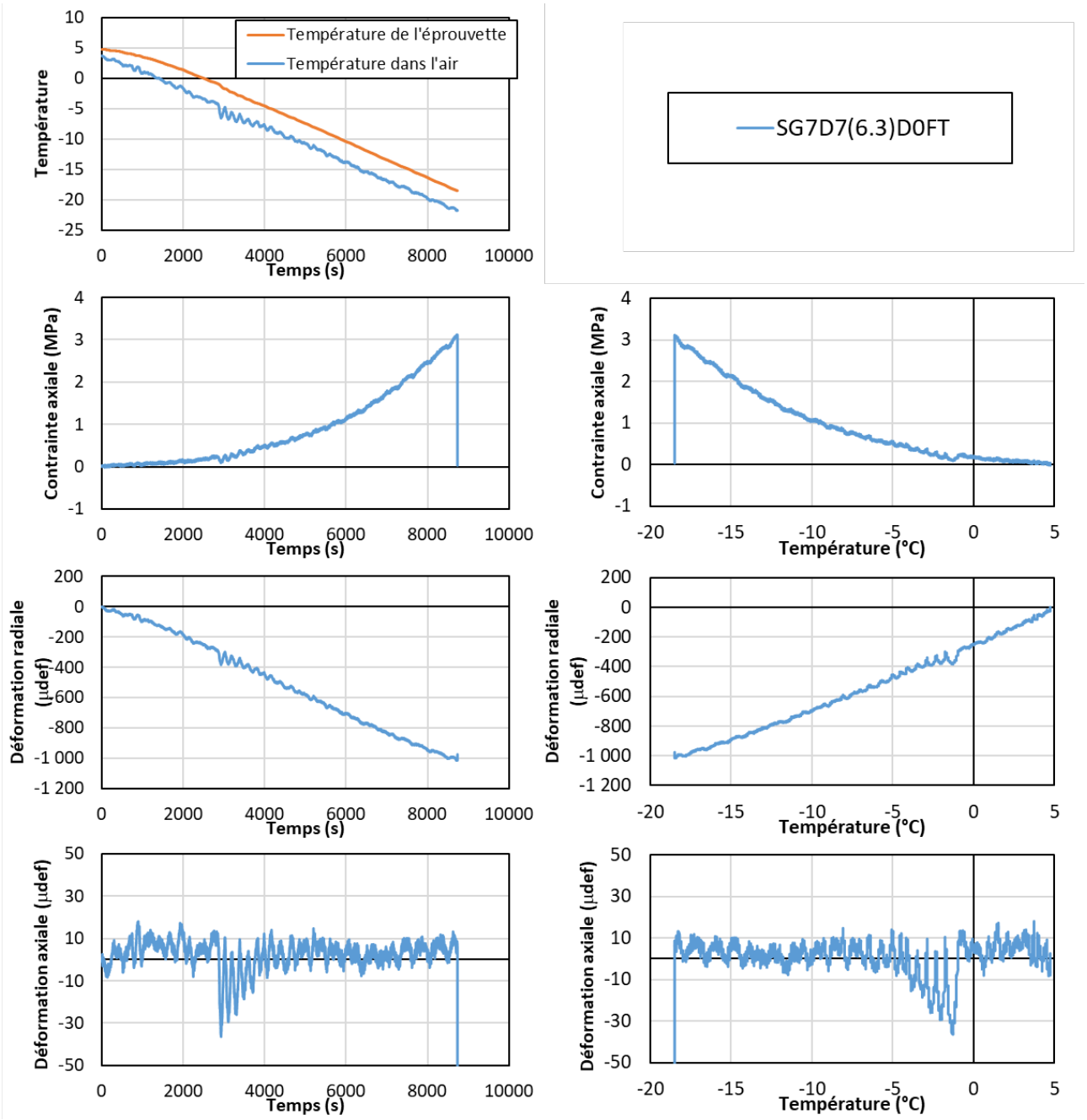
4.1.1.1. SG5C12(6)D0FT



4.1.1.2. SG5C13(7.3)D0FT

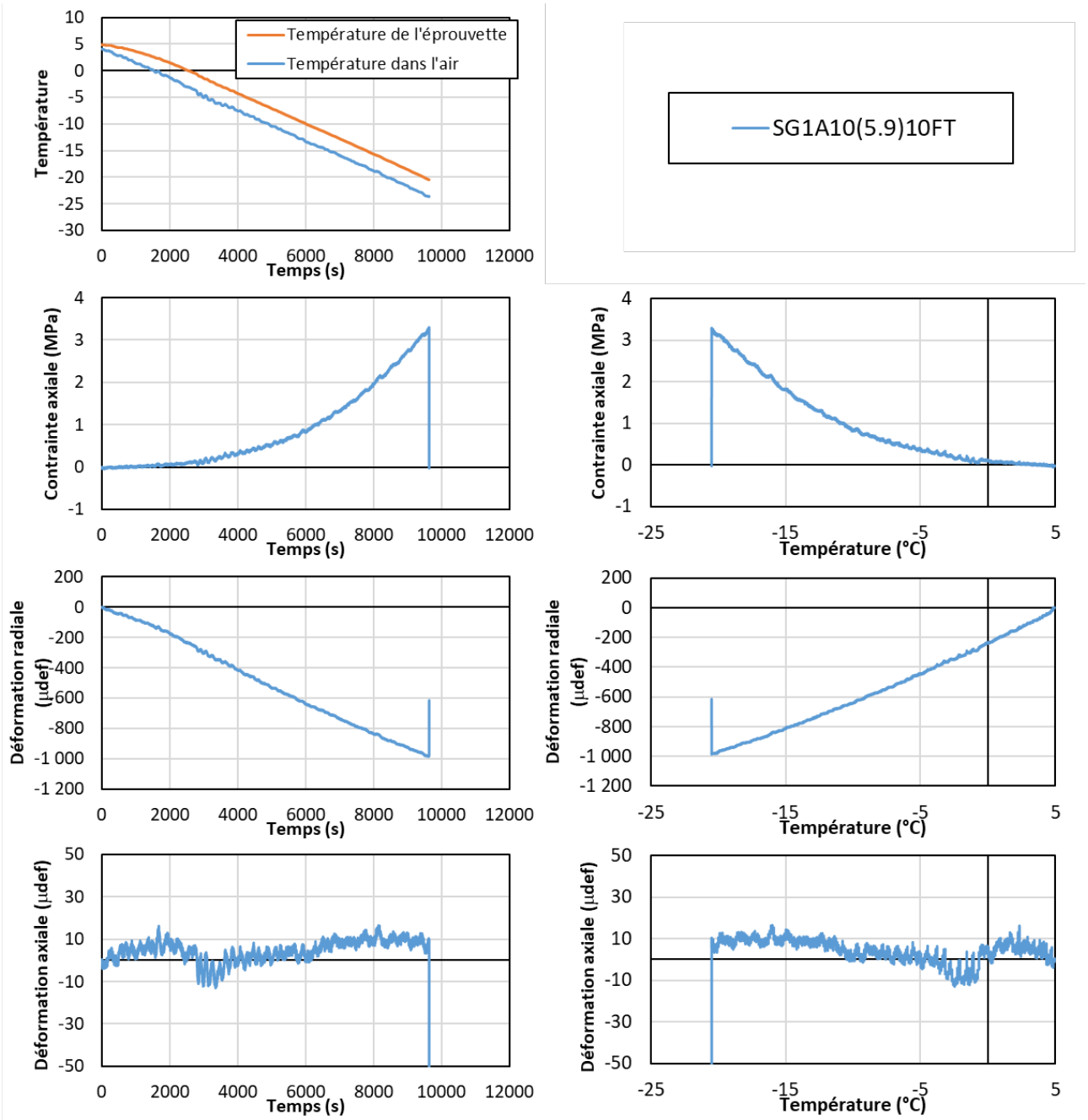


4.1.1.3. SG7D7(6.3)D0FT

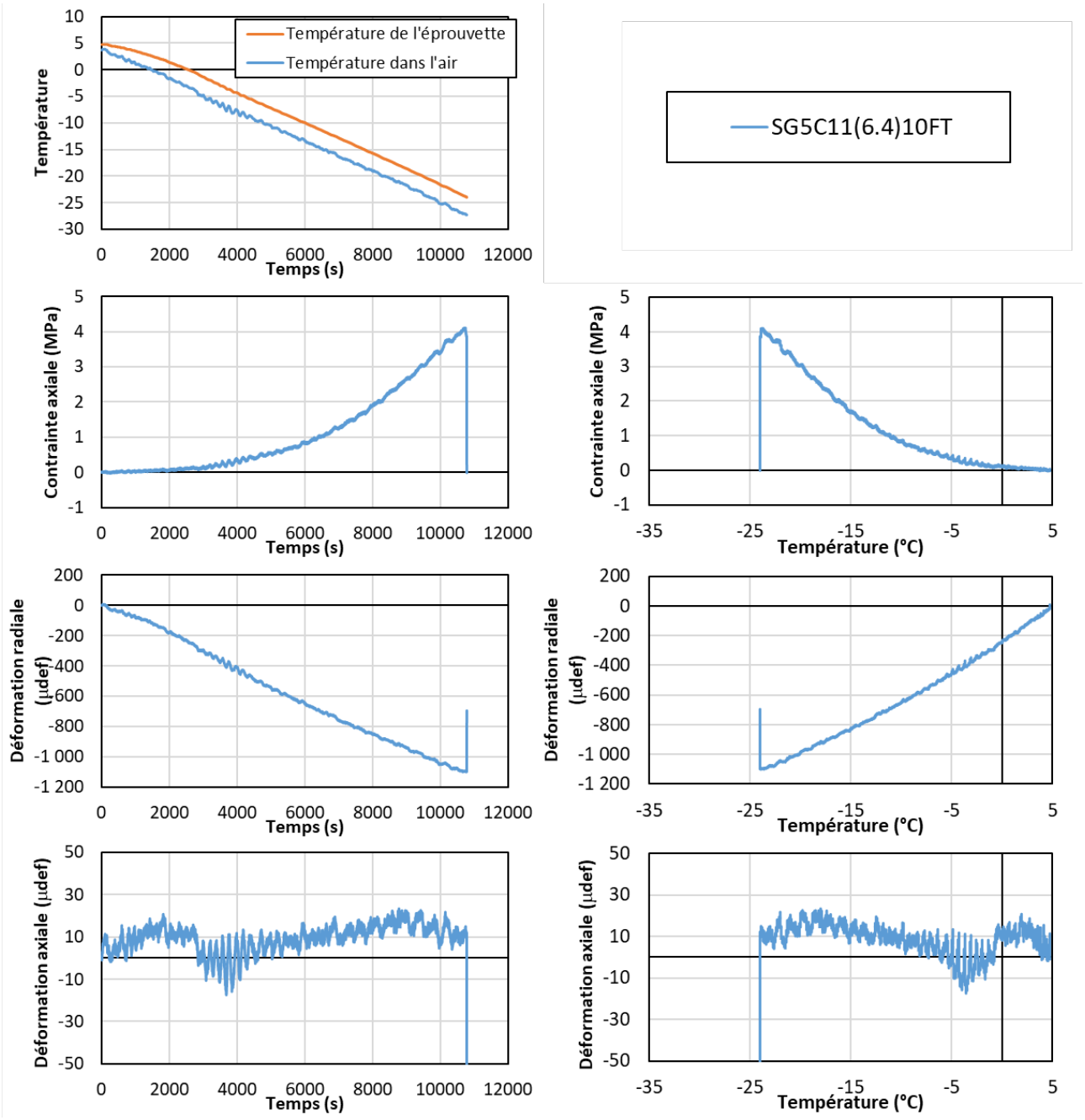

Température de l'éprouvette
Température dans l'air
Température
Temps (s)
SG7D7(6.3)D0FT
Contrainte axiale (MPa)
Température (°C)
Déformation radiale (µdef)
Déformation axiale (µdef)

4.1.2. Eprouvettes non-vieillies avec 10 cycles FT testées à l'état sec (10FT.DRY)

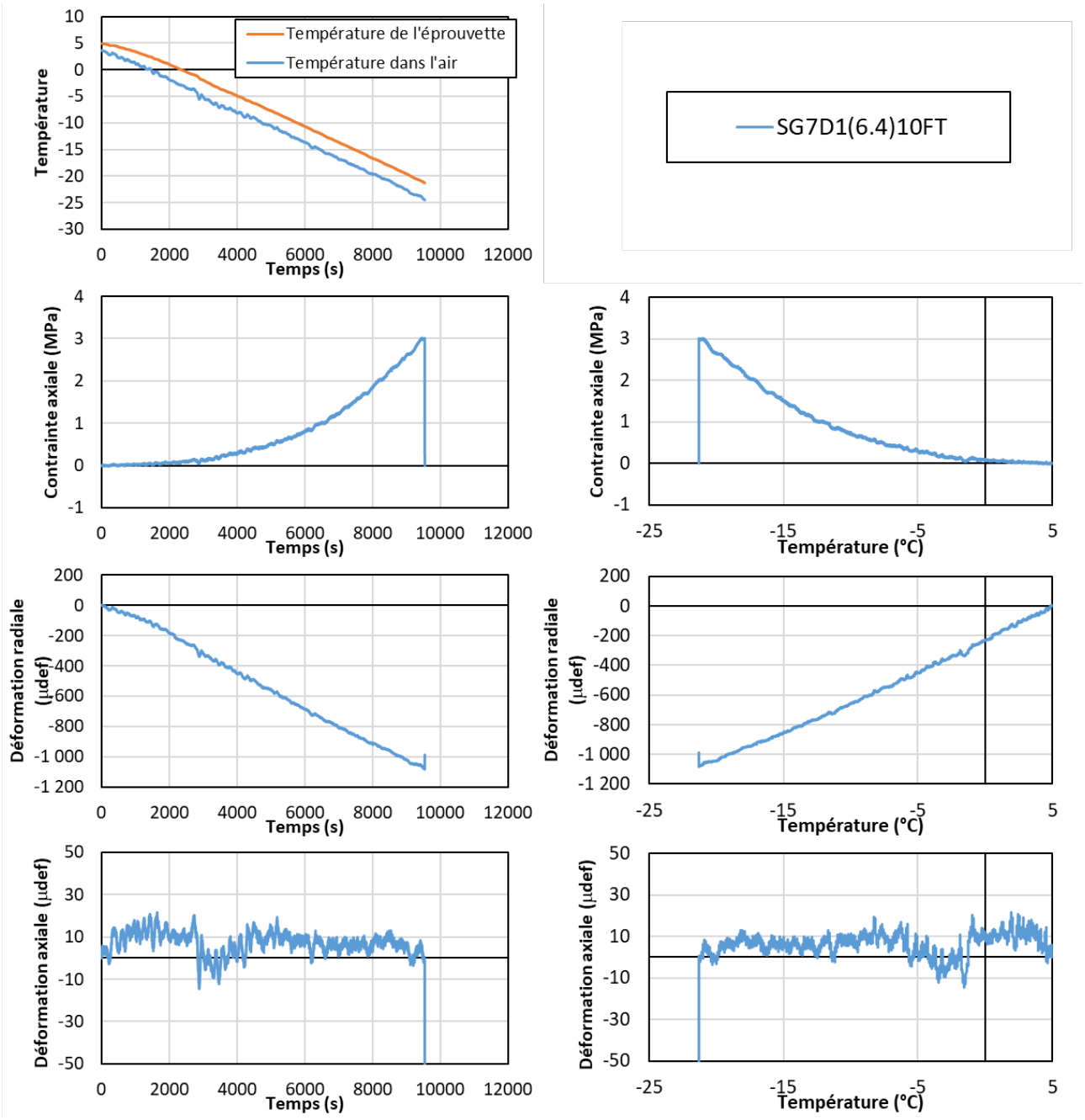
4.1.2.1. SG1A10(5.9)10FT



4.1.2.2. SG5C11(6.4)10FT

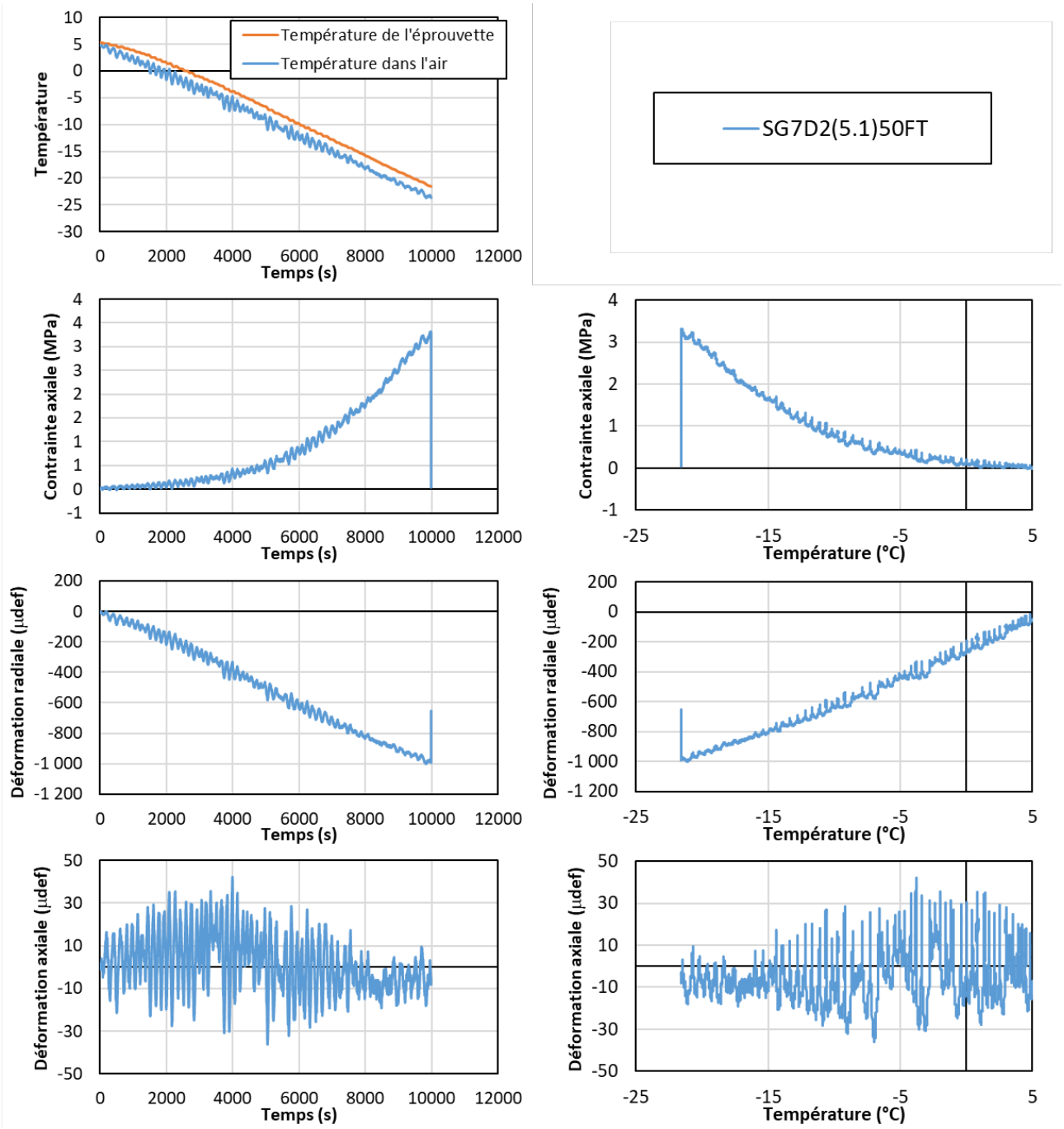


4.1.2.3. SG7D1(6.4)10FT

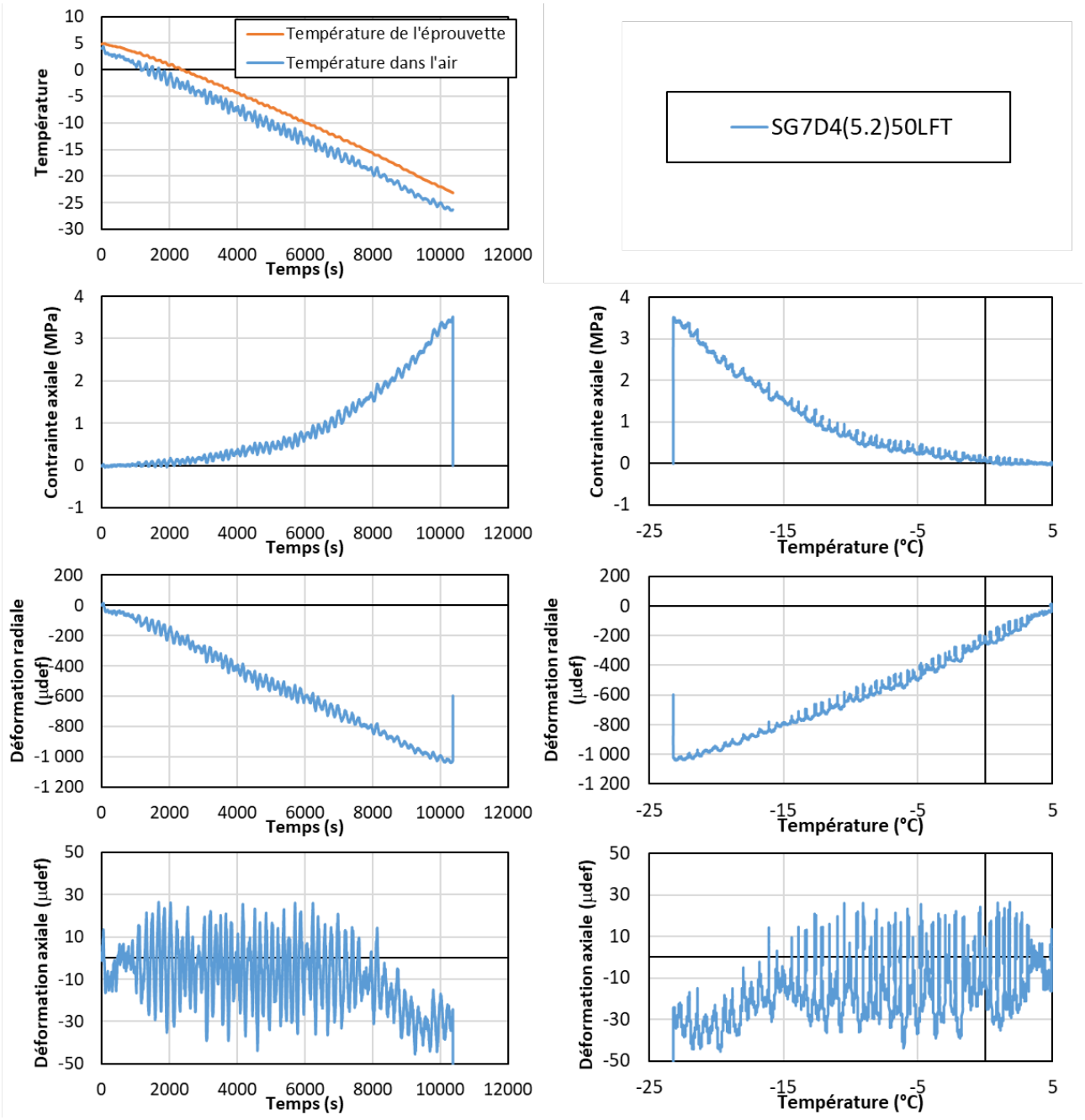


4.1.3. Eprouvettes non-vieillies avec 50 cycles FT testées à l'état sec (50FT.DRY)

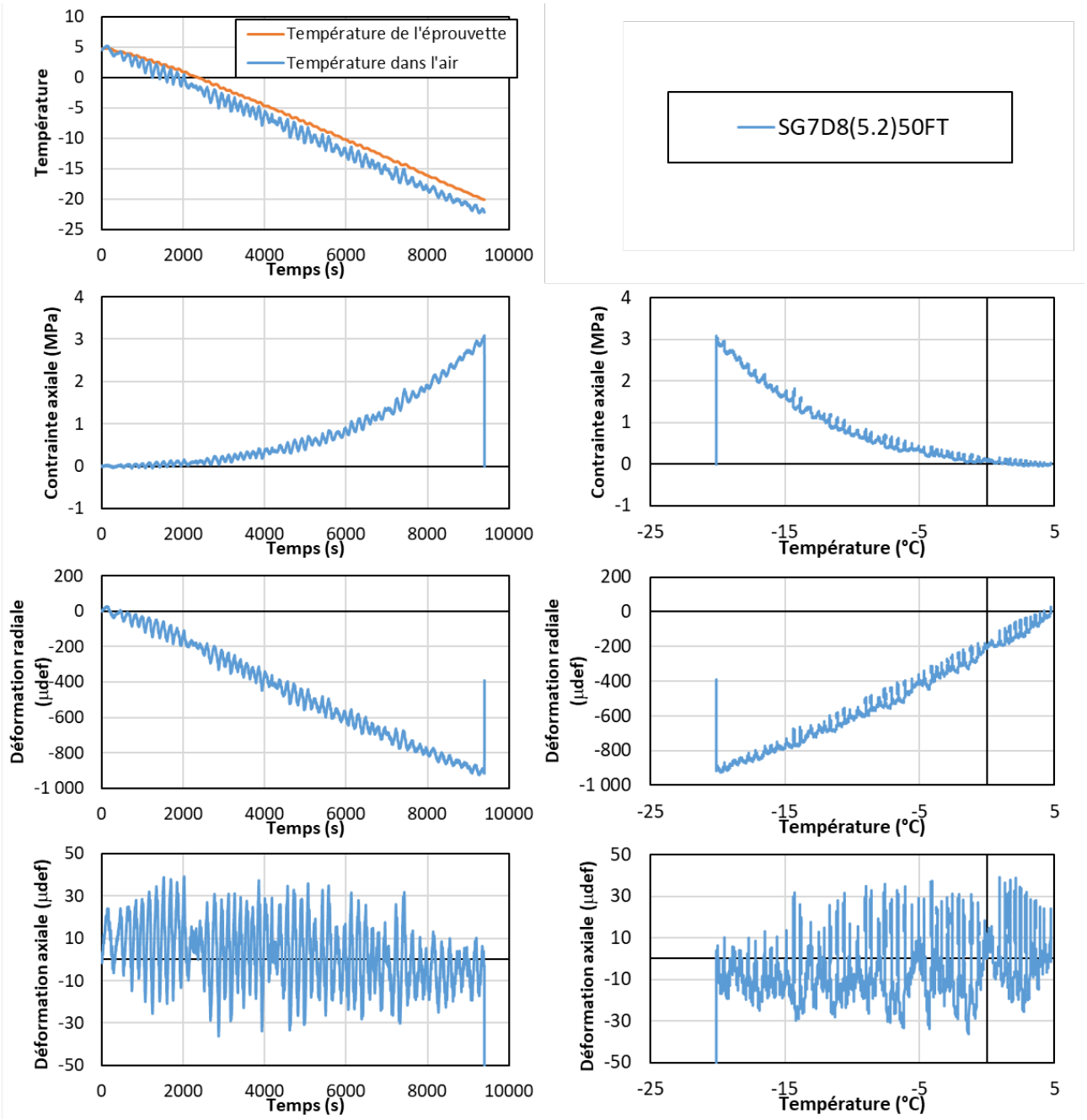
4.1.3.1. SG7D2(5.1)50FT



4.1.3.2. SG7D4(5.2)50FT

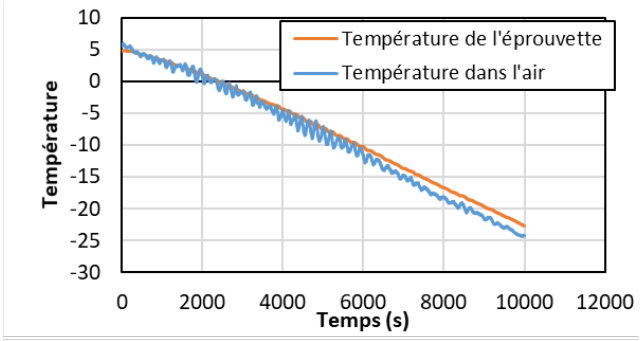


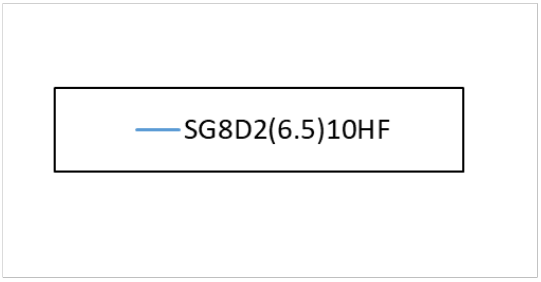
4.1.3.3. SG7D8(5.2)50FT

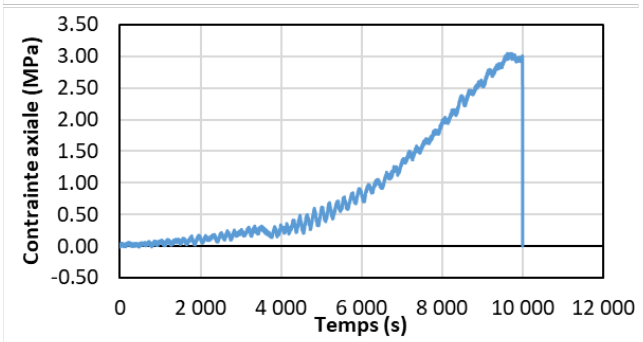


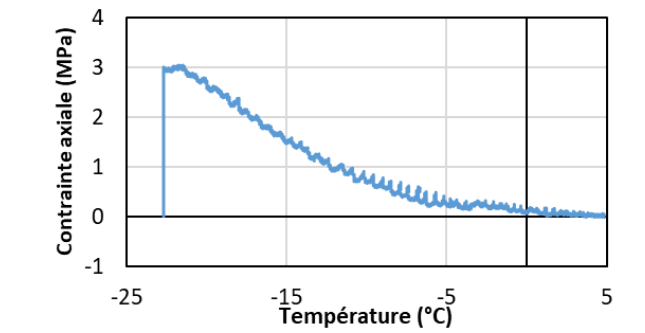
4.1.4. Eprouvettes non-vieillies avec 10 cycles HF testées à l'état sec (10HF.DRY)

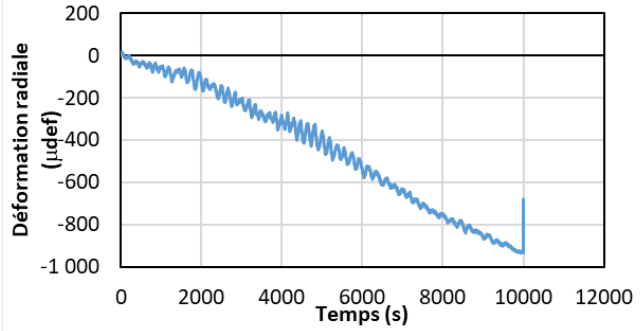
4.1.4.1. SG8D2(6.5)10HF

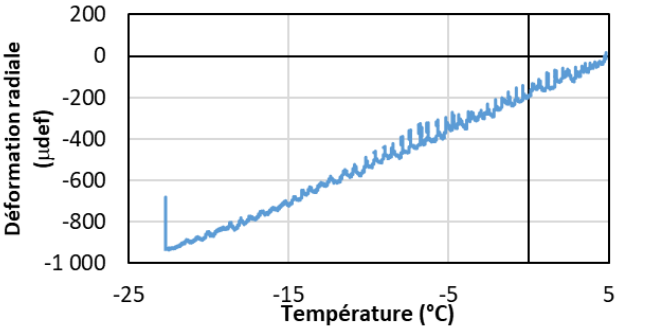


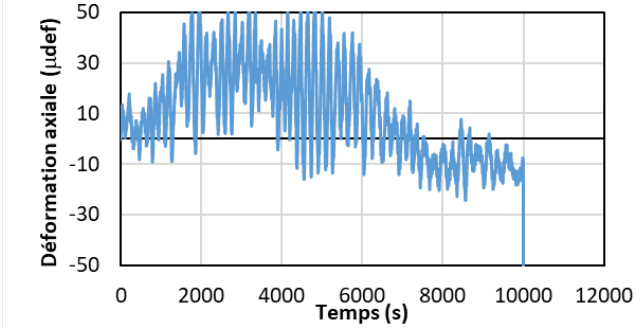


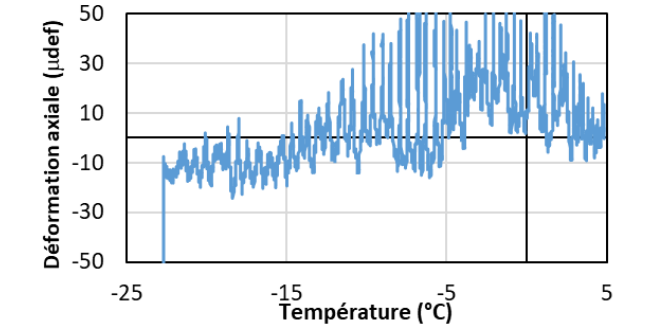




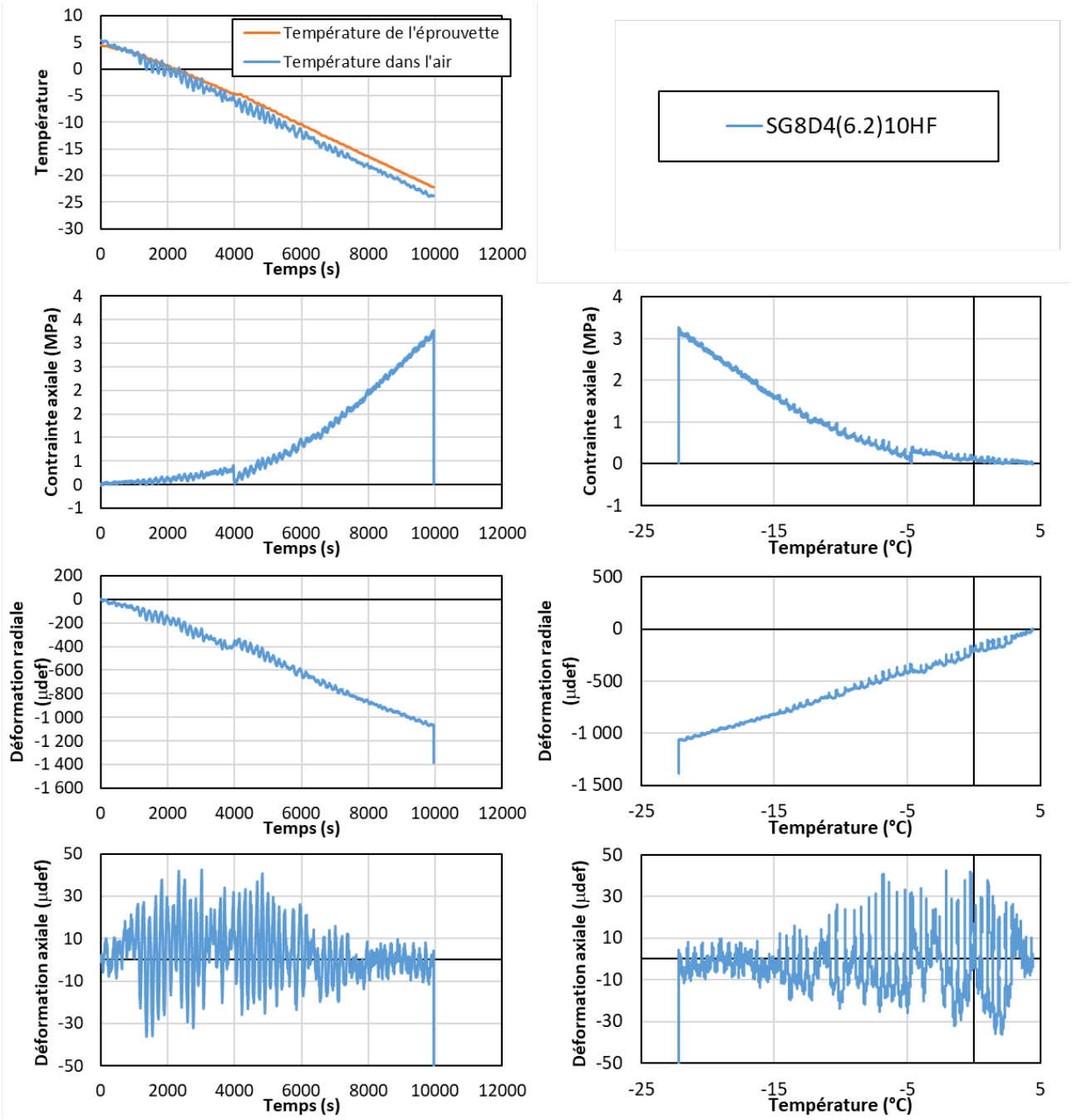








4.1.4.2. SG8D4(6.2)10HF



5. Annexe de la campagne X

5.1. Sous-campagne X.a

SG1A7(4.6)10LFT (X.a)										
Numéro		Jours	Moyennes (mm)		Volume (cm3)	Delta V/V	Volume de vide (cm3)	Dégrée de saturation	TEV(%)	TEV-TEV0
			H	D	V	V (microdef)				
1	Début d'essai	0.00	141.93	75.50	635.4	0.0	26.2	1.5	4.1	-0.5
2	Saturation	0.10	141.95	75.58	636.9	2385.3	27.7	69.1	4.4	-0.2
3	10GD	5.81	142.35	75.65	639.8	6983.9	30.6	67.5	4.8	0.2
3.1		9.96	142.60	76.17	649.7	22578.4	40.6	8.3	6.2	1.6
3.2		10.98	142.60	76.23	650.9	24369.3	41.7	7.0	6.4	1.8
3.3		11.96	142.53	76.28	651.4	25174.0	42.2	6.1	6.5	1.9
3.4		17.02	142.35	76.47	653.7	28842.7	44.5	2.9	6.8	2.2
3.5		17.98	142.20	76.55	654.5	29999.9	45.3	2.6	6.9	2.3
3.6		19.04	142.15	76.55	654.2	29637.7	45.0	2.2	6.9	2.3
3.7		24.06	141.85	76.45	651.1	24782.1	42.0	1.4	6.4	1.8
3.8		25.96	141.83	76.45	651.0	24601.4	41.8	1.0	6.4	1.8
3.9		27.96	141.80	76.52	652.0	26208.3	42.9	0.9	6.6	2.0
m séché	Etuve 105°C pendant 2h	28.77	141.80	76.52	652.0	26208.3	42.9	0.0	6.6	2.0

SG4B3(8.6)10LFT (X.a)										
Numéro		Jours	Moyennes (mm)		Volume (cm3)	Delta V/V	Volume de vide (cm3)	Dégrée de saturation	TEV(%)	TEV-TEV0
			H	D	V	V (microdef)				
1	Début d'essai	0.00	140.65	73.75	600.8	0.0	53.9	0.8	9.0	0.4
2	Saturation	0.10	140.50	73.65	598.6	-3773.6	51.7	75.7	8.6	0.0
3	10GD	5.81	140.85	73.87	603.6	4592.8	56.7	69.8	9.4	0.8
3.1		9.96	140.83	74.52	614.2	22169.3	67.3	9.3	11.0	2.4
3.2		10.98	140.83	74.53	614.4	22626.5	67.5	7.4	11.0	2.4
3.3		11.96	140.80	74.50	613.8	21530.7	66.9	6.1	10.9	2.3
3.4		17.02	140.65	74.72	616.7	26386.5	69.8	1.2	11.3	2.7
3.5		17.98	140.45	74.70	615.5	24469.8	68.6	1.0	11.2	2.6
3.6		19.04	140.38	74.70	615.2	23922.7	68.3	0.9	11.1	2.5
3.7		24.06	140.15	74.68	613.9	21825.4	67.1	0.5	10.9	2.3
3.8		25.96	140.10	74.68	613.7	21460.9	66.8	0.4	10.9	2.3
3.9		27.96	139.95	74.65	612.5	19456.6	65.6	0.5	10.7	2.1
m séché	Etuve 105°C pendant 2h	28.77	139.95	74.65	612.5	19456.6	65.6	0.0	10.7	2.1

5.2.Sous-campagne X.b

SG4B4(8.9)50LFT (X.b)

Numéro		Jours	Moyennes (mm)		Volume (cm3)	Delta V/V	Volume de vide (cm3)	Dégrée de saturation	TEV(%)	TEV-TEV0
			H	D	V	V (microdef)				
1	Début d'essai	0.00	141.73	73.70	604.6	0.0	54.0	1.2	8.9	0.0
2	Saturation	0.10	141.68	73.67	603.8	-1256.8	53.3	77.1	8.8	-0.1
3		26.77	142.40	74.02	612.7	13415.6	62.2	66.1	10.1	1.2
3.1		31.96	142.25	74.58	621.5	27908.4	70.9	4.4	11.4	2.5
3.2		33.02	142.13	74.68	622.6	29761.0	72.0	3.0	11.6	2.7
3.3		34.06	141.50	74.25	612.7	13369.7	62.1	3.3	10.1	1.2
3.4		34.98	141.60	74.38	615.3	17731.2	64.8	2.9	10.5	1.6
3.5		37.96	141.53	74.58	618.3	22669.5	67.8	1.3	11.0	2.1
3.6	50GD	40.00	141.35	74.57	617.3	20948.5	66.7	1.1	10.8	1.9
3.7		41.02	141.33	74.57	617.2	20767.9	66.6	1.1	10.8	1.9
3.8		42.00	141.25	74.57	616.8	20226.2	66.3	1.0	10.7	1.8
3.9		45.96	141.03	74.60	616.4	19512.0	65.8	0.9	10.7	1.8
3.1		47.00	141.00	74.58	616.0	18875.8	65.5	0.8	10.6	1.7
3.11		49.00	140.88	74.57	615.2	17517.6	64.6	0.8	10.5	1.6
3.12		51.98	140.73	74.60	615.1	17343.2	64.5	0.8	10.5	1.6
3.13		52.77	140.70	74.58	614.7	16708.0	64.2	0.8	10.4	1.5
m séché	Etuve 105°C pendant 2h	52.98	140.70	74.58	614.7	16708.0	64.2	0.0	10.4	1.5

SG3B6(4.8)50LFT (X.b)

Numéro		Jours	Moyennes (mm)		Volume (cm3)	Delta V/V	Volume de vide (cm3)	Dégrée de saturation	TEV(%)	TEV-TEV0
			H	D	V	V (microdef)				
1	Début d'essai	0.00	141.33	75.48	632.4	0.0	27.9	1.6	4.4	-0.4
2	Saturation	0.10	141.18	75.53	632.6	262.4	28.1	72.4	4.4	-0.4
3		26.77	141.63	75.75	638.3	9215.8	33.7	76.7	5.3	0.5
3.1		31.96	141.83	76.17	646.2	21789.8	41.7	5.8	6.5	1.7
3.2		33.02	141.68	76.22	646.4	22049.6	41.9	4.5	6.5	1.7
3.3		34.06	141.18	75.95	639.6	11328.4	35.1	5.2	5.5	0.7
3.4		34.98	141.08	76.05	640.8	13275.1	36.3	4.6	5.7	0.9
3.5		37.96	141.08	76.18	643.1	16831.2	38.6	2.5	6.0	1.2
3.6		40.00	141.00	76.22	643.3	17180.2	38.8	1.8	6.0	1.2
3.7	50GD	41.02	140.98	76.18	642.6	16110.4	38.1	1.7	5.9	1.1
3.8		42.00	140.88	76.20	642.4	15834.0	37.9	1.6	5.9	1.1
3.9		45.96	140.73	76.33	644.0	18306.6	39.5	1.3	6.1	1.3
3.1		47.00	140.68	76.33	643.8	17944.8	39.3	1.2	6.1	1.3
3.11		49.00	140.55	76.30	642.6	16152.3	38.1	1.2	5.9	1.1
3.12		51.98	140.43	76.18	640.1	12146.2	35.6	1.2	5.6	0.8
3.13		52.77	140.40	76.23	640.8	13294.8	36.3	1.1	5.7	0.9
m séché	Etuve 105°C pendant 2h	52.98	140.40	76.23	640.8	13294.8	36.3	0.0	5.7	0.9

5.3.Sous-campagne X.c

G4B2(8.6)10LFT sans vide (X.c											
Numéro		Jours	Moyennes (mm)		Volume (cm3)	Delta V/V	Volume de vide (cm3)	Dégrée de saturation	TEV(%)	TEV-TEV0
			H	D	V	V (microdef)				
1	Début d'essai	0.00	139.03	73.62	591.745662	0	49.1	0.0	8.3	-0.2
2	Saturation	0.10	139.05	73.60	591.584114	-273.002401	49.0	77.4	8.3	-0.2
3		5.75	139.53	73.92	598.72399	11792.7829	56.1	70.3	9.4	0.9
3.1		6.00	139.45	73.93	598.672038	11704.9882	56.0	53.6	9.4	0.9
3.2		6.96	139.38	73.98	599.15964	12528.994	56.5	48.3	9.4	0.9
3.3		9.92	139.23	73.98	598.514804	11439.2767	55.9	41.8	9.3	0.8
3.4		10.94	139.23	73.98	598.514804	11439.2767	55.9	40.5	9.3	0.8
3.5		11.96	139.18	73.97	598.030324	10620.5466	55.4	39.8	9.3	0.8
3.6		13.94	139.13	73.98	598.084914	10712.7985	55.5	37.9	9.3	0.8
3.7		17.01	139.10	73.95	597.438723	9620.79052	54.8	36.2	9.2	0.7
3.8		19.01	139.18	73.97	598.030324	10620.5466	55.4	34.6	9.3	0.8
3.9		20.04	139.10	73.95	597.438723	9620.79052	54.8	34.4	9.2	0.7
3.1		20.94	139.10	73.92	596.900247	8710.81239	54.3	34.2	9.1	0.6
3.11	10GD	23.96	139.05	73.90	596.416639	7893.5559	53.8	33.2	9.0	0.5
3.12		25.04	139.13	73.92	597.007526	8892.10477	54.4	32.4	9.1	0.6
3.13		25.96	139.13	73.88	596.469197	7982.37343	53.8	32.4	9.0	0.5
3.14		27.77	139.04	73.90	596.298504	7693.91728	53.7	31.9	9.0	0.5
3.15		32.06	139.04	73.91	596.535158	8093.84276	53.9	30.3	9.0	0.5
3.16		33.10	139.13	73.91	596.899841	8710.12567	54.3	29.8	9.1	0.6
3.17		34.92	139.26	73.91	597.457591	9652.67601	54.8	29.0	9.2	0.7
3.18		37.96	138.94	73.94	596.514879	8059.57272	53.9	28.7	9.0	0.5
3.19		39.06	138.92	73.94	596.482789	8005.34326	53.9	28.4	9.0	0.5
3.2		40.75	138.88	73.93	596.171213	7478.80584	53.5	28.1	9.0	0.5
3.21		42.02	139.07	73.93	596.911533	8729.88473	54.3	27.5	9.1	0.6
3.22		45.00	139.01	73.93	596.783076	8512.80324	54.2	26.9	9.1	0.6
3.23		46.08	138.89	73.93	596.267905	7642.20734	53.6	27.0	9.0	0.5

5.4.Sous-campagne X.d

SG4B12(8.5) Sat.Vide (X.d)

Numéro		Jours	Moyennes (mm)		Volume (cm3)	Delta V/V	Volume de vide (cm3)	Dégrée de saturation	TEV(%)	TEV-TEV0
			H	D	V	V (microdef)				
1	Début d'essai	0.00	139.48	75.55	625.3	0.0	53.4	0.0	8.5	0.0
2	Saturation	0.10	139.43	75.52	624.5	-1240.4	52.7	77.0	8.4	-0.1
3		0.15	139.43	75.52	624.5	-1240.4	52.7	13.1	8.4	-0.1
3.1		0.27	139.53	75.48	624.4	-1406.2	52.6	10.4	8.4	-0.1
3.2		1.11	139.48	75.52	624.7	-882.2	52.9	4.8	8.5	0.0
3.3		2.11	139.45	75.53	624.9	-620.3	53.1	3.2	8.5	0.0
3.4		3.18	139.45	75.55	625.1	-179.2	53.3	2.6	8.5	0.0
3.5		4.14	139.45	75.55	625.1	-179.2	53.3	2.1	8.5	0.0
3.6		7.09	139.55	75.60	626.4	1862.5	54.6	1.3	8.7	0.2
3.7		8.11	139.55	75.62	626.7	2304.3	54.9	1.1	8.8	0.3
3.8		9.14	139.50	75.65	627.0	2828.7	55.2	1.0	8.8	0.3
3.9		11.11	139.50	75.65	627.0	2828.7	55.2	0.7	8.8	0.3
3.1		14.19	139.55	75.65	627.2	3188.2	55.4	0.4	8.8	0.3
3.11		16.19	139.65	75.68	628.2	4791.9	56.4	0.3	9.0	0.5
3.12		17.22	139.63	75.68	628.1	4612.0	56.3	0.2	9.0	0.5
3.13	Sechange sous vide	18.11	139.53	75.72	628.2	4777.0	56.4	0.1	9.0	0.5
3.14		21.14	139.55	75.72	628.4	4957.1	56.5	0.0	9.0	0.5
3.15		22.22	139.50	75.75	628.7	5481.7	56.9	0.0	9.0	0.5
3.16		23.14	139.58	75.72	628.5	5137.1	56.7	-0.1	9.0	0.5
3.17		24.95	139.53	75.77	629.1	6104.5	57.3	-0.1	9.1	0.6
3.18		29.24	139.53	75.78	629.4	6583.2	57.6	-0.2	9.1	0.6
3.19		30.26	139.58	75.82	630.1	7793.8	58.3	-0.2	9.3	0.8
3.2		32.09	139.55	75.82	630.1	7754.4	58.3	-0.2	9.3	0.8
3.21		35.14	139.49	75.81	629.6	6966.9	57.8	-0.3	9.2	0.7
3.22		36.24	139.45	75.84	629.9	7511.1	58.1	-0.3	9.2	0.7
3.23		37.93	139.51	75.88	630.9	9096.8	59.1	-0.4	9.4	0.9
3.24		39.20	139.59	75.91	631.7	10260.3	59.9	-0.4	9.5	1.0
3.25		42.18	139.58	75.90	631.6	10099.2	59.8	-0.4	9.5	1.0
3.26		43.26	139.57	75.90	631.5	9974.3	59.7	-0.3	9.5	1.0

5.5.Sous-campagne X.e

SG4B8(8.5) Sec.Vide (X.e)									
Numéro		Jours	Moyennes (mm)		Volume (cm3)	Volume (cm3)	me de vide (rée de satura	TEV(%)	TEV-TEV0
			H	D	V	V			
1	Début d'essai	0.00	137.85	73.68	587.8	0.0	50.9	0.0	8.7	0.2
2		0.10	137.85	73.68	587.8	0.0	50.9	0.0	8.7	0.2
3		0.15	137.85	73.68	587.8	0.0	50.9	0.0	8.7	0.2
3.1		0.27	137.88	73.68	587.9	181.4	51.0	0.0	8.7	0.2
3.2		1.11	137.88	73.68	587.9	181.4	51.0	0.0	8.7	0.2
3.3		2.11	137.88	73.68	587.9	181.4	51.0	0.0	8.7	0.2
3.4		3.18	137.88	73.68	587.9	181.4	51.0	-0.1	8.7	0.2
3.5		4.14	137.95	73.68	588.2	725.4	51.3	-0.1	8.7	0.2
3.6		7.09	137.95	73.70	588.5	1178.2	51.6	-0.1	8.8	0.3
3.7		8.11	137.95	73.72	588.8	1631.1	51.9	-0.1	8.8	0.3
3.8		9.14	137.93	73.73	588.9	1902.4	52.0	-0.1	8.8	0.3
3.9		11.11	137.95	73.73	589.0	2084.0	52.1	-0.1	8.9	0.4
3.1		14.19	138.03	73.77	589.9	3535.6	53.0	-0.1	9.0	0.5
3.11		16.19	138.13	73.82	591.1	5624.5	54.2	-0.1	9.2	0.7
3.12	Sechange sous vide	17.22	138.03	73.83	591.0	5350.3	54.1	-0.2	9.1	0.6
3.13		18.11	137.98	73.83	590.7	4986.1	53.8	-0.2	9.1	0.6
3.14		21.14	138.03	73.82	590.7	4896.5	53.8	-0.2	9.1	0.6
3.15		22.22	138.03	73.85	591.2	5804.2	54.3	-0.1	9.2	0.7
3.16		23.14	138.00	73.85	591.1	5622.0	54.2	-0.2	9.2	0.7
3.17		24.95	137.98	73.87	591.4	6075.3	54.5	-0.1	9.2	0.7
3.18		29.24	138.00	73.87	591.4	6076.0	54.5	-0.2	9.2	0.7
3.19		30.26	138.00	73.88	591.6	6493.6	54.7	-0.2	9.3	0.8
3.2		32.09	137.99	73.92	592.2	7419.8	55.3	-0.2	9.3	0.8
3.21		35.14	137.95	73.89	591.6	6437.8	54.7	-0.2	9.2	0.7
3.22		36.24	137.96	73.93	592.3	7564.2	55.4	-0.3	9.3	0.8
3.23		37.93	137.97	73.94	592.4	7818.9	55.5	-0.3	9.4	0.9
3.24		39.20	138.09	73.99	593.7	10005.8	56.8	-0.2	9.6	1.1
3.25		42.18	138.03	73.96	593.0	8893.7	56.1	-0.2	9.5	1.0
3.26		43.26	137.99	73.95	592.7	8274.2	55.8	-0.3	9.4	0.9