

Projet National de recherche et développement

RAPPORT DE RECHERCHE N°2 (Révisé)

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

*Présentation de la campagne expérimentale et
premiers résultats*

Auteur(s) / Organisme(s) :

TRAN Duc Thang – ENTPE/Uni. de Lyon
SAUZEAT Cédric – ENTPE/Uni. de Lyon
DI BENEDETTO Hervé – ENTPE/Uni. de Lyon

Thème de rattachement :

Thème 1.5 – Mécanismes de dégradation des chaussées
Dégradations hivernales

DVDC/R/018

N° lettre de commande : LC/18/DVDC/45

Date : 12/06/2019

Site internet : www.dvdc.fr

Plateforme collaborative : www.omnispace.fr/dvdc

Président : Dominique JAUMARD

Directeurs : Christine LEROY et Simon POUGET

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

Sommaire

Sommaire	2
1 Résumé	4
2 Introduction	5
3 Campagnes expérimentales	6
3.1 Campagne principale	6
3.1.1 Paramètres étudiés	7
3.1.2 Conditionnements appliqués	8
3.2 Campagne complémentaire sur l'évolution des éprouvettes lors du conditionnement (Campagne X).....	10
4 Matériaux et éprouvettes	11
4.1 Matériau utilisé.....	11
4.1.1 Caractéristiques du liant	11
4.1.2 Filler, granulats et mélange d'enrobé	12
4.1.3 Procédure de vieillissement.....	13
4.2 Fabrication, stockage et caractéristiques géométriques des éprouvettes	14
4.3 Teneur en vide des éprouvettes et choix des éprouvettes.....	15
4.4 Nomenclature des éprouvettes.....	15
5 Description des essais réalisés	16
5.1 Dispositifs expérimentaux	16
5.2 Essai de module complexe	17
5.2.1 Module complexe (E^*) et coefficient de Poisson complexe (ν^*).....	18
5.2.2 Procédure de l'essai E^*	18
5.2.3 Analyse des résultats de l'essai E^*	19
5.3 Essai de retrait thermique empêché (TSRST)	21
6 Résultats expérimentaux	22
6.1 Evolution des éprouvettes lors du conditionnement (campagne X).....	22
6.1.1 Traitement des résultats	22
6.1.2 Evolution des éprouvettes lors des différents conditionnements	26
6.1.3 Etude de la phase de saturation.....	29
6.1.4 Etude de la phase des cycles GD	30
6.1.5 Etude de la phase de séchage	32
6.2 Essais E^*	35
6.2.1 Eprouvettes testées à l'état sec (matériaux non-vieillis)	36
6.2.2 Eprouvettes testées à l'état sec (matériaux vieillis).....	43

6.2.3	Effet du vieillissement sur les éprouvettes testées à sec.....	48
6.2.4	Eprouvette testée en condition partiellement saturée (40%)	52
6.3	Essais TSRST	57
6.3.1	Effet de la saturation lors de l'essai.....	58
6.3.2	Effet des cycles de gel/dégel.....	60
6.3.3	Ensemble des résultats de TSRST	61
7	Conclusions	65
	Bibliographie	Erreur ! Signet non défini.

1 Résumé

Résumé en français

Le 2^{ème} rapport présente les campagnes expérimentales menées dans le cadre de la thèse de doctorat de TRAN Duc Thang. L'effet de la saturation, l'effet de cycles de gel/dégel (GD) et l'effet du vieillissement sur les comportements étudiés de l'enrobé bitumineux sont analysés à partir des premiers résultats expérimentaux obtenus.

Abstract

The second report presents the experimental campaigns carried out during the PhD of TRAN Duc Thang. The effect of saturation, the effect of freeze / thaw cycles (FT) and the effect of aging on the different studied behaviors of bituminous mixtures are analyzed considering the first experimental results

2 Introduction

Suite à la validation du premier rapport (Tran, et al., 2018), ce deuxième rapport présente les travaux expérimentaux dans le cadre de la thèse de doctorat de TRAN Duc Thang, réalisée à l'École Nationale des Travaux Publics de l'État (ENTPE). Cette thèse traite de l'endommagement des enrobés bitumineux à l'eau et au gel. Elle est menée en collaboration avec l'entreprise EUROVIA et contribue aux travaux du sous-thème 1.5 « Dégradations hivernales » du projet national DVDC.

Ce rapport se compose de 7 parties.

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

La troisième partie donne une vue globale sur les campagnes expérimentales qui sont menées pendant la thèse. Les paramètres étudiés, les conditionnements appliqués ainsi que la fabrication des éprouvettes sont présentés.

La quatrième partie présente les matériaux et les procédures de fabrication des éprouvettes utilisées.

La cinquième partie est consacrée à la description des essais qui sont introduits dans les campagnes présentées à la troisième partie. Trois 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 aux amplitudes différentes pour le comportement à la fatigue et essai de retrait thermique empêché (TSRST) pour le couplage thermomécanique. Des essais complémentaires évaluant les changements caractéristiques des éprouvettes au cours du conditionnement sont aussi présentés dans cette partie.

La sixième partie présente les premiers résultats expérimentaux des essais E^* , TSRST et des essais complémentaires. Les effets de l'eau et de gel sur le comportement VEL sont évalués à l'aide du modèle 2S2P1D. Les résultats des essais complémentaires fournissent des informations intéressantes sur le changement physique d'éprouvettes lors du conditionnement.

Les premières conclusions sont données dans la septième partie.

Un document comprenant les annexes 1 à 4 complète ce rapport.

3 Campagnes expérimentales

Les structures routières sont soumises à diverses sollicitations mécaniques, thermiques et chimiques couplées. Durant la vie des chaussées, ces sollicitations peuvent se combiner et causer les détériorations dans les couches routières. Elles sont liées, d'une part, aux contraintes mécaniques générées par le passage des véhicules (effet du trafic), d'autre part, aux effets créés par les conditions climatiques.

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 pertes d'adhésivité et de cohésion au sein des matériaux. De plus, ces dégradations sont parfois accélérées par l'effet du vieillissement et des cycles de gel/dégel.

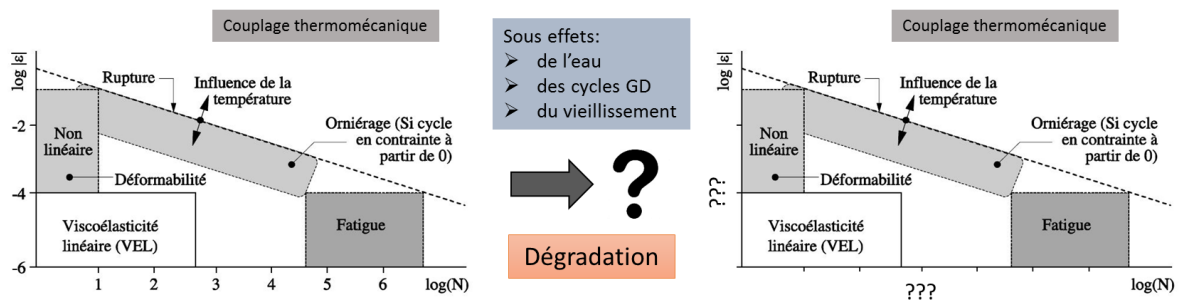


Figure 3-1. Question: comment les effets étudiés influencent-ils les différents types de comportements des enrobés bitumineux ?

Afin d'évaluer les effets de l'eau, du gel et du vieillissement (cf. Figure 3-1), deux campagnes expérimentales ont été initiées, une campagne principale et une campagne complémentaire.

3.1 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- Thermal Stress Restrained Specimen Test) sont réalisés afin d'évaluer les changements de comportements des matériaux étudiés.

La campagne se compose de 3 grandes étapes :

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

Le détail de chaque étape se trouve dans la partie de référence comme indiqué dans la Figure 3-2.

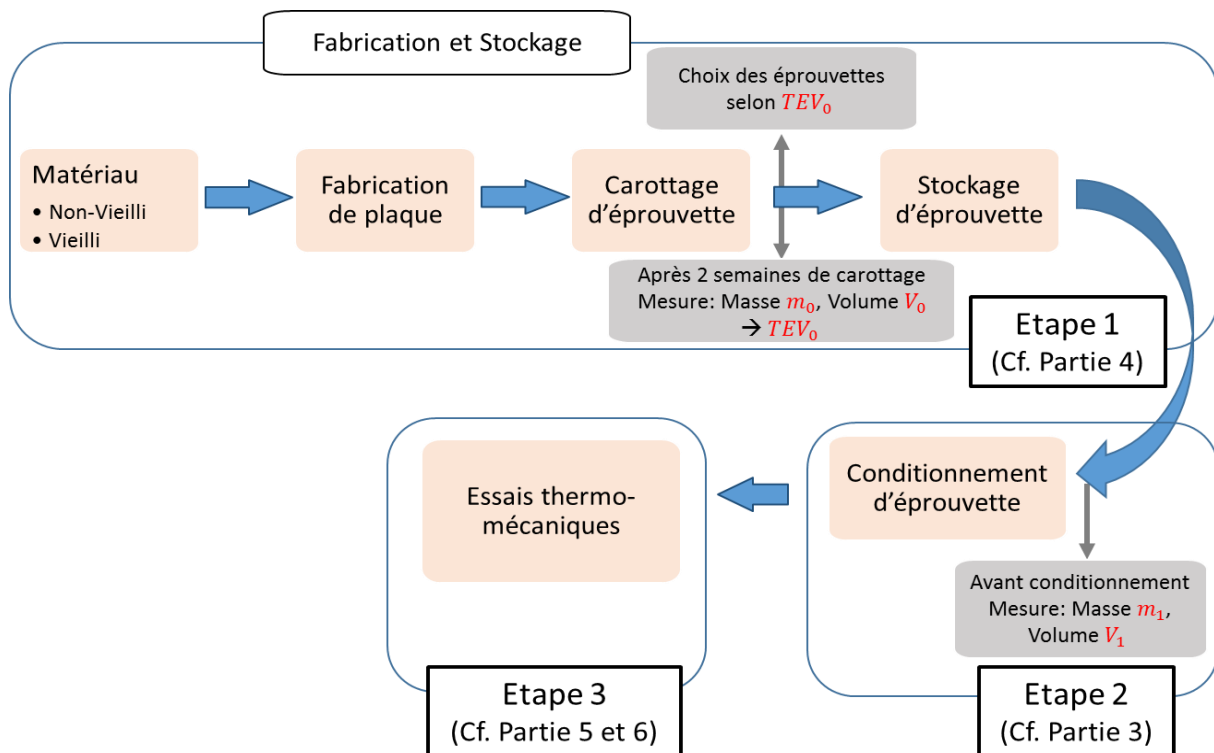


Figure 3-2. Les 3 étapes de la campagne principale

3.1.1 Paramètres étudiés

L'objectif de la thèse est d'étudier les influences de l'eau, des cycles gel/dégel (GD) et du vieillissement des matériaux en mettant en jeu les paramètres suivants :

1. Nombre des cycles GD appliqués : 10 cycles GD ou 50 cycles GD,
2. Amplitude des cycles GD : cycle GD à grande amplitude (de -15°C à 10°C) et à petite amplitude (de -5°C et 10°C),
3. Effet d'une saturation en eau : Eprouvettes sèches et éprouvettes saturées,
4. Effet du vieillissement : matériau initialement non-vieilli et matériau vieilli avant compactage de l'enrobé.

La Figure 3-3 résume les paramètres de conditionnement utilisés avant de tester les éprouvettes.

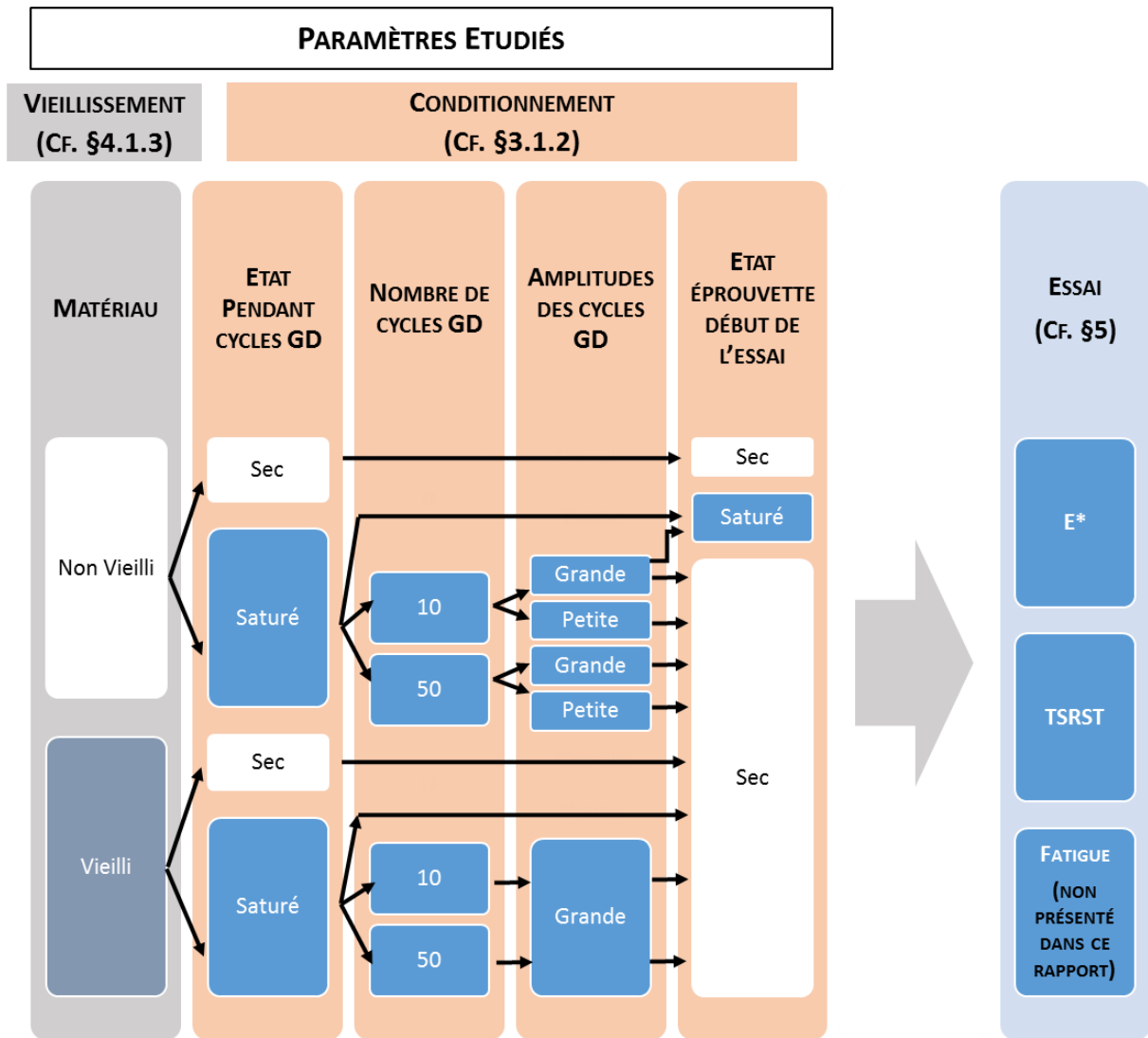


Figure 3-3. Conditionnement et types d'essai de la campagne expérimentale principale

3.1.2 Conditionnements appliqués

Les procédures de conditionnement des éprouvettes (saturation, cycles de gel/dégel et de conservation) sont décrites dans les parties ci-après.

3.1.2.1 Procédure de saturation sous vide

En se basant sur l'étude des différentes procédures de saturation (Tran, et al., 2018), la procédure de saturation sous vide a été choisie afin d'obtenir un degré de saturation maximal de l'éprouvette. Un système de saturation à 2 dessiccateurs connectés a été utilisé. Le dispositif nécessaire pour ce système est présenté sur la Figure 3-4. Il se compose de deux dessiccateurs en série connectés à un venturi assurant le vide grâce à une valve V1. Le dessiccateur D1 contient les éprouvettes et le dessiccateur D2 contient une réserve d'eau. Deux manomètres M1 et M2 aident à mesurer les vides dans les deux dessiccateurs.

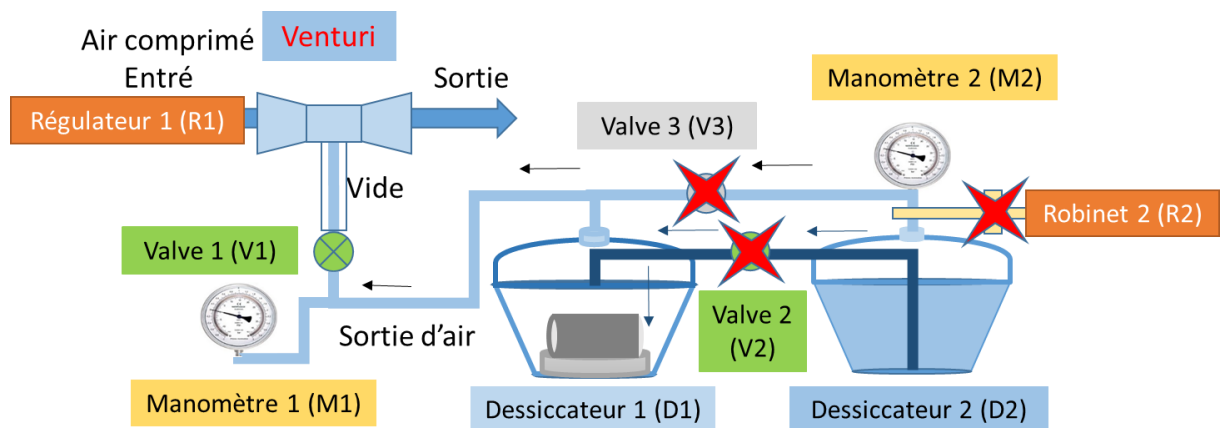


Figure 3-4. Système de saturation sous vide

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 a pour but d'éliminer tous les bulles d'air existant dans l'éprouvette et dans l'eau afin d'obtenir le degré maximal de saturation sous vide.

3.1.2.2 Cycles gel/dégel

Différentes procédures d'application des cycles de GD existantes dans la littérature ont été analysées et sont détaillées dans le 1^{er} rapport DVDC (Tran, et al., 2018).

En se basant sur cette étude, les cycles de GD à appliquer sont décrits ci-dessous (Figure 3-5):

- Pour les cycles de grande amplitude, variant 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 (30 min de baisse et 30 min d'augmentation de la température).
- Pour les cycles de petite amplitude, variant entre -5°C et 10°C : les durées sont identiques et seule la température inférieure change.

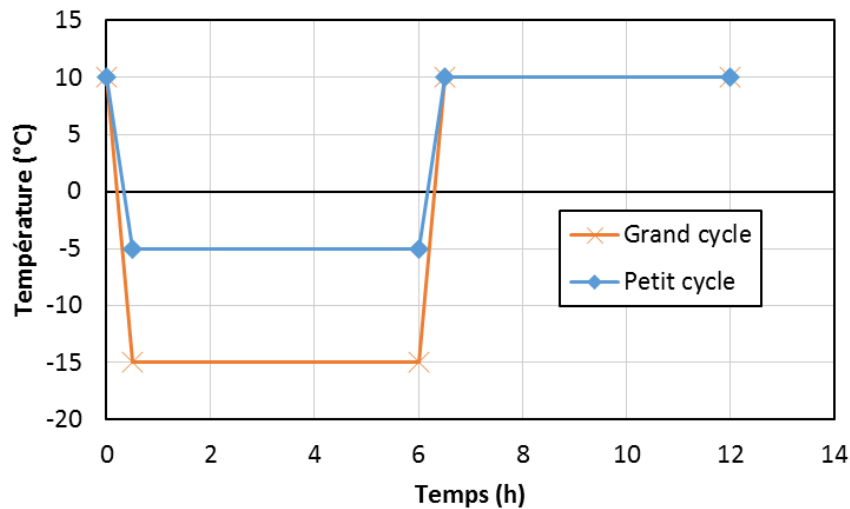


Figure 3-5. Un cycle gel/dégel (Courbe bleu – Grand cycle GD ; Courbe orange – Petit cycle GD)

La procédure d'application de ces cycles 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 son degré de saturation
- 2) Mettre l'éprouvette sur un lit de sable dans l'enceinte thermique utilisée pour les cycles GD
- 3) Appliquer les cycles GD à l'aide d'une enceinte thermique programmable

3.1.2.3 Procédure de séchage

Les éprouvettes testées à l'état sec sont séchées dans un dessiccateur sous vide (8kPa de pression absolue) avec du gel de silice pendant une durée de 7 jours au minimum.

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

3.2 Campagne complémentaire sur l'évolution des éprouvettes lors du conditionnement (Campagne X)

Une campagne d'essais complémentaires (Campagne X) a été décidée afin d'évaluer comment le volume, le degré de saturation, et la teneur en vide évoluent lors du conditionnement. La campagne X se compose 5 sous-campagnes : X.a, X.b, X.c, X.d, X.e. (Figure 3-6).

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

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

La sous campagne X.d n'applique aucun cycle de GD afin d'apprécier l'influence des cycles de GD lors du conditionnement des éprouvettes, comparativement aux 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 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 après de la sollicitation des cycles GD (m_3, V_3); plusieurs mesures

réalisées pendant la phase de séchage (m_{3i}, V_{3i}) (i indiquant la $i^{\text{ème}}$ mesure dans cette phase, $i \geq 1$). La dernière mesure m_{sec} est réalisée après séchage dans une étuve à 105 °C pendant 2h (Cf. Figure 3-6).

Il faut noter que :

- Dans la campagne X.d, il n’y a pas de conditionnement de cycle de GD $\rightarrow m_2 = m_3$ et $V_2 = V_3$
- Dans la campagne X.e, il n’y a pas de conditionnement de saturation et de cycle de GD $\rightarrow m_1 = m_2 = m_3$ et $V_1 = V_2 = V_3$

L’analyse des résultats de la campagne X est détaillée dans la partie 6.1.

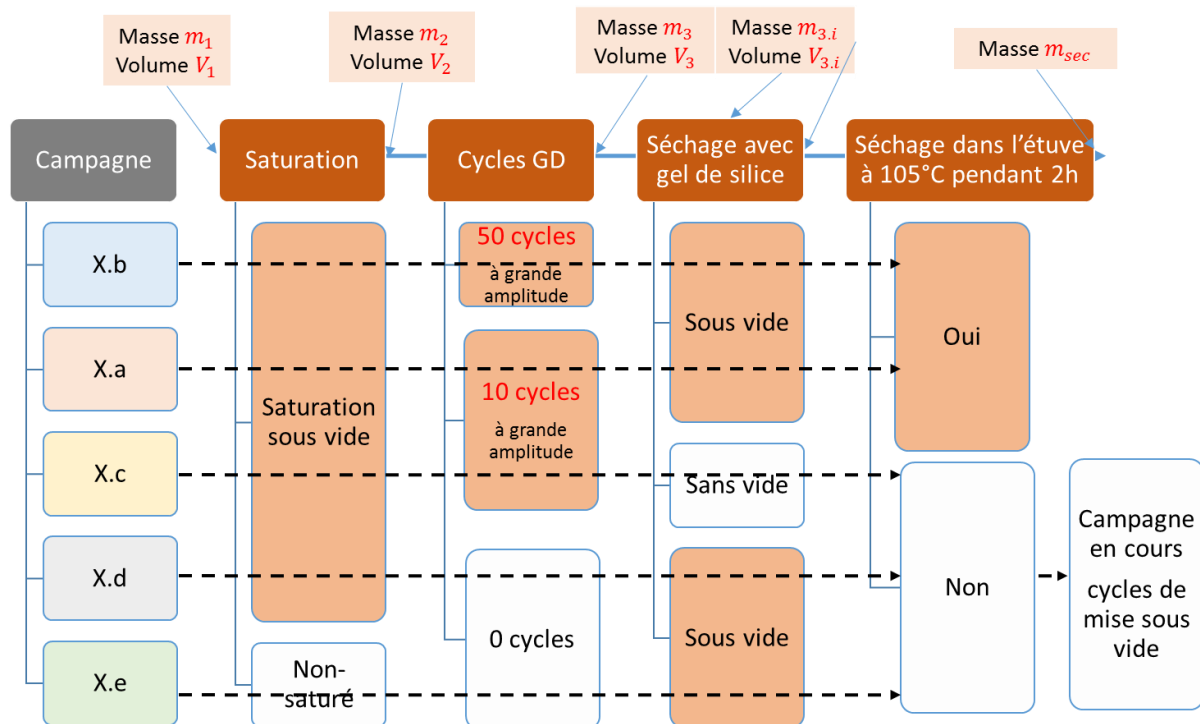


Figure 3-6. Campagne X des essais complémentaires

4 Matériaux et éprouvettes

4.1 Matériau utilisé

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

4.1.1 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 4-1.

Tableau 4-1. Caractérisation du bitume 50/70

Essai	PEN (1/10 mm)			TBA (°C)	
	1	2	3	1	2
Numéro d'échantillons					
Valeur exp.	56.5	55.0	55.8	48.4	48.8
Valeur moyenne	55.8			48.6	

4.1.2 Filler, granulats et mélange d'enrobé

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

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

Tableau 4-2. Masse volumique réelle des granulats

Matériau	MVR (kg/m ³)
Granulat 0/4	2650
Granulat 4/6	2660
Granulat 6/10	2630

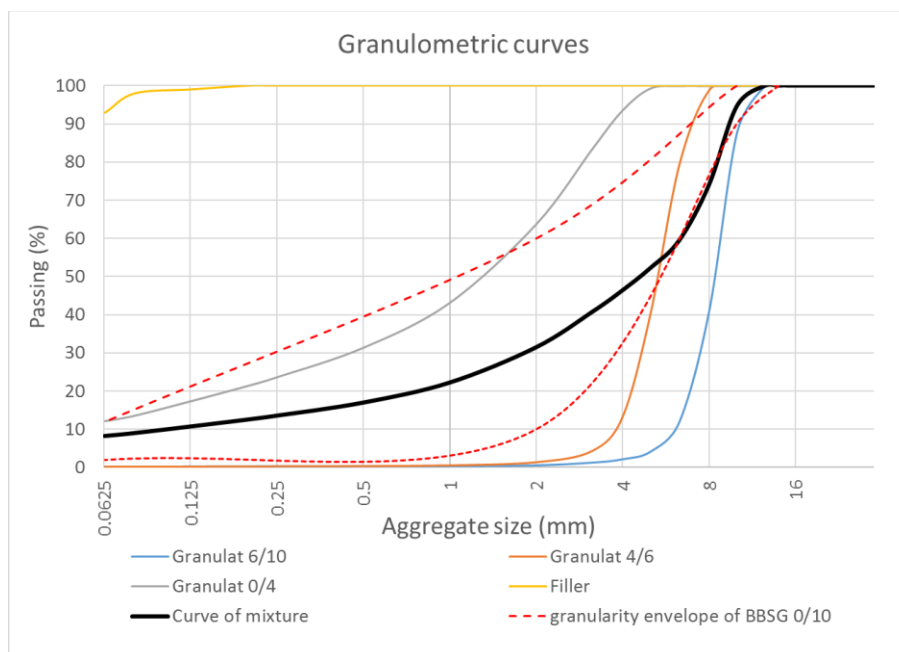


Figure 4-1. Courbes granulométriques du filler, des granulats et du mélange

La composition du BBSG 0/10 étudié est donnée dans le Tableau 4-3, et sa courbe granulométrique en Figure 4-1.

Sa formule a été vérifiée par l'essai à Presse à Cisaillement Giratoire (PCG) (NF EN 12697-31, 2007). Le résultat de l'essai PCG est présenté sur la Figure 4-2.

Tableau 4-3. Composition du mélange

Matériaux	Granulat			Filler	Bitume
	6/10	4/6	0/4		
Fraction en masse (%)	41.67	8.52	41.67	2.84	5.3
Total (%)	100				
MVR	2441 kg/m ³				

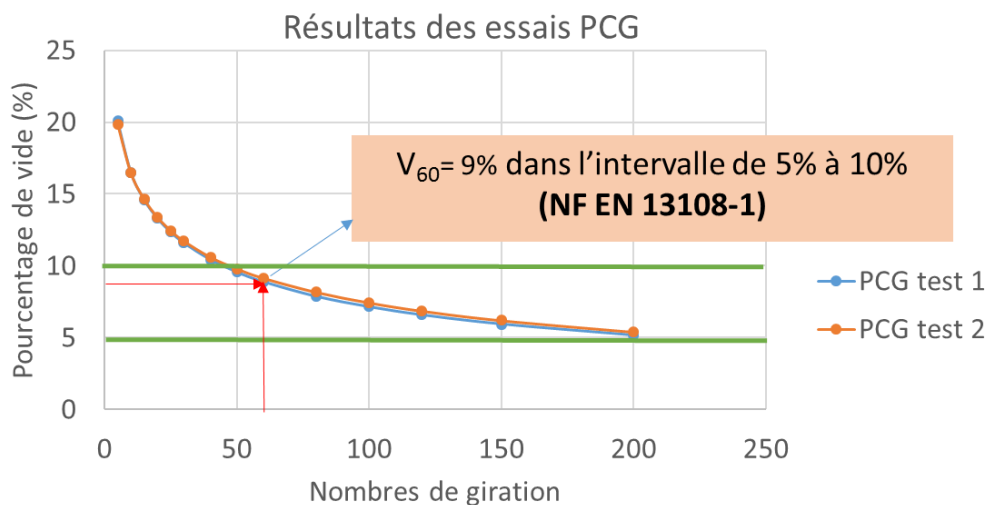


Figure 4-2. Résultats de l'essai PCG

4.1.3 Procédure de vieillissement

Plusieurs méthodes de vieillissement des enrobés bitumineux ont été développées (Tran, et al., 2018). 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. C'est la raison pour laquelle la méthode RILEM a 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 (Figure 4-3):

- 1) Vieillissement à court terme : l'enrobé foisonné est placé dans un plateau avec une épaisseur de 5 à 6 cm et mis dans une enceinte ventilée à 135 °C pendant 4 h.
- 2) Vieillissement à long terme : le matériau qui a subi le vieillissement à court terme est placé foisonné en 5 (à 6) cm 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 pendant une minute afin d'assurer un vieillissement homogène.

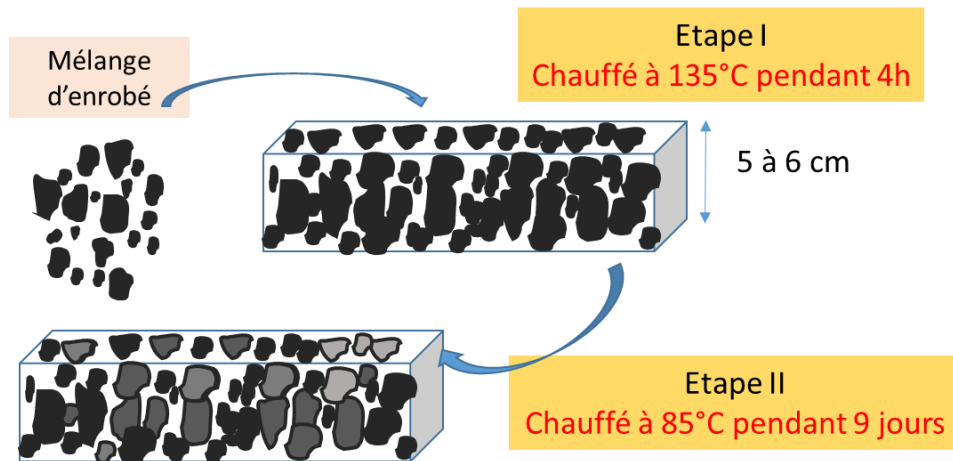


Figure 4-3. Etapes de vieillissement des matériaux (Procédure RILEM)

4.2 Fabrication, stockage et caractéristiques géométriques des éprouvettes

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 600 mm en longueur, 400 mm en largeur, 150 mm (ou 120 mm ou 100 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 140 mm en hauteur et 75 mm en diamètre. Les dimensions des éprouvettes de type TSRST sont de 225 mm en hauteur et 65 mm en diamètre.

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

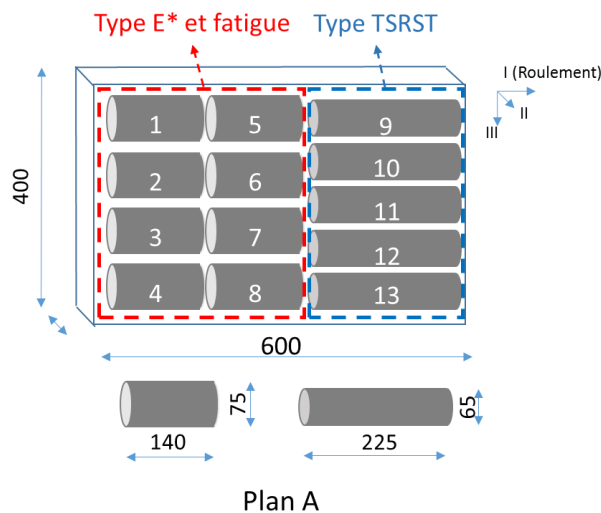


Figure 4-4. Plan A de sciage et de carottage

Différents plans de carottage sont utilisés (Cf. Annexe page 1-7). La Figure 4-4 présente le plan A de sciage et de carottage. Les axes I, II, III (I - direction de roulement, II - direction verticale de la charge du compactage, III - direction transversale au roulement de la roue du compactage) sont aussi détaillées. Ces directions sont repérées sur les éprouvettes.

4.3 Teneur en vide des éprouvettes et choix des éprouvettes

Après 2 semaines de carottage et sciage, « TEV0 » est la teneur en vide déterminée avec la première mesure de masse m_0 et de volume V_0 (méthode géométrique (NF EN 12697-29, 2003)) de l'éprouvette. Elle est calculée selon la formule suivante.

$$TEV0 = \left(1 - \frac{MVA_0}{MVR}\right) \times 100\% \quad \text{Eq. 4-1}$$

Où

- $MVA_0 = \frac{m_0}{V_0}$:Masse Volumique Apparente à la première mesure (cf. Figure 3-2)
- $MVR = 2.441g/cm^3$:Masse Volumique Réelle (calculé à partir la formulation du mélange)

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

7 plaques d'enrobé non-vieilli et 3 plaques d'enrobé vieilli ont été carottées. 121 éprouvettes ont été fabriquées dont 60 éprouvettes non-vieillies et 36 éprouvettes vieillies de type E* et fatigue ainsi que 25 éprouvettes non-vieillies de type TSRST. La teneur en vide des éprouvettes varie de 4% à 9% (Cf. Annexe 1). En accord avec la norme (NF EN 13108-1, 2007), toutes les éprouvettes de 5% à 8% de TEV0 seront utilisées pour les essais E*, fatigue et TSRST. Les autres éprouvettes seront utilisées pour les essais complémentaires. Les conditions de choix des éprouvettes sont indiquées dans l'Annexe 1.

4.4 Nomenclature des éprouvettes

La nomenclature choisie 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 (Cf. Figure 4-5)

Par exemple : l'éprouvette SG1A10(5.9)10LFT provient de l'enrobé type BBSG, est carottée depuis la plaque numéro 1 du matériau non-vieilli à la position numéro 10 selon le plan A de sciage. Sa teneur en vide mesurée après 2 semaines depuis le carottage est de 5.9%. Cette éprouvette est saturée, puis soumise à 10 grands cycles gel/dégel, ensuite séchée sous vide dans le dessiccateur avant d'être testée à l'état sec.

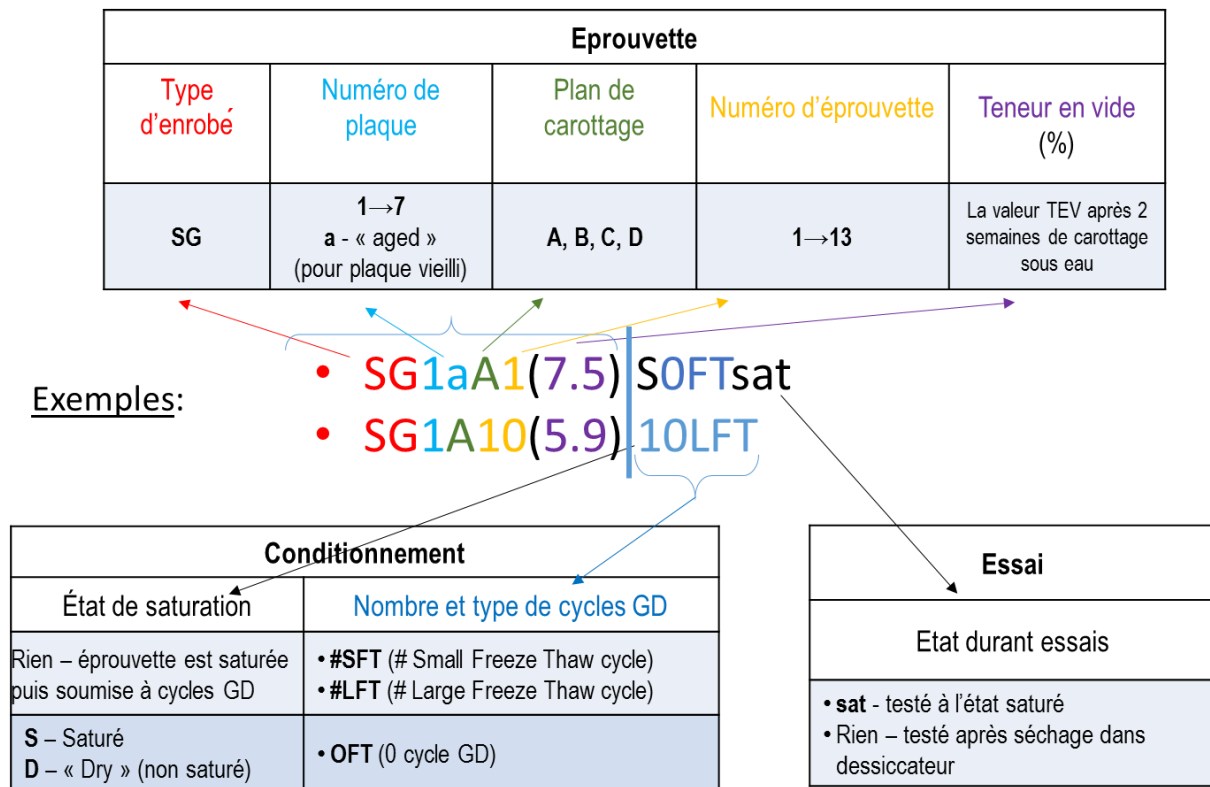


Figure 4-5. Nomenclature des éprouvettes

5 Description des essais réalisés

5.1 Dispositifs expérimentaux

Les sollicitations cycliques de traction-compression sont utilisées pour les essais de module complexe et de fatigue sur éprouvettes cylindriques de 140mmx75mm (Hauteur x Diamètre). Les essais de retrait thermique empêché (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-dessous.

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 peut être 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 de l'éprouvette (rapport entre la force mesurée et la section de l'éprouvette de diamètre D) selon Eq. 5-1.

$$\sigma = \frac{F}{\pi \left(\frac{D}{2}\right)^2} \tag{Eq. 5-1}$$

La déformation axiale est mesurée à l'aide de 3 extensomètres placés à 120° autour de l'éprouvette (Cf. Figure 5-1). La déformation axiale est calculée comme étant la moyenne des déformations mesurées par ces 3 extensomètres. L'amplitude de mesure des extensomètres

est de $\pm 1.5\text{mm}$ avec une précision de $0.2\mu\text{m}$ sur une longueur entre couteaux choisie égale à 75mm pour essais de traction-compression (100mm pour essais TSRST)

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{3} \quad \text{Eq. 5-2}$$

Où

- ε : la déformation axiale moyenne
- ε_i avec ($i=1, 2$ ou 3) : les déformations axiales mesurées par les 3 extensomètres

Les déplacements radiaux sont mesurés à l'aide de deux capteurs sans contact à courants de Foucault ayant une étendue de mesure de $500\mu\text{m}$. Ces capteurs sont placés à mi-hauteur de l'éprouvette et sont diamétralement opposés (Cf. Figure 5-1). Chaque capteur vise une cible en papier aluminium collée sur l'éprouvette. La déformation radiale est calculée selon Eq. 5-3.

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta l_{r1} + \Delta l_{r2}}{D} \quad \text{Eq. 5-3}$$

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 est de -40°C à 70°C .

Une sonde PT100 mesurant la température sur la surface de l'éprouvette est toujours utilisée. Pour les essais TSRST, 3 sondes de type thermocouple sont placées à côté des 3 extensomètres. Ils permettent de mesurer la température dans l'air proche des positions des extensomètres. Ces températures mesurées sont utilisées pour calculer la vitesse de variation thermique dans l'enceinte qui peut varier par rapport à la consigne.

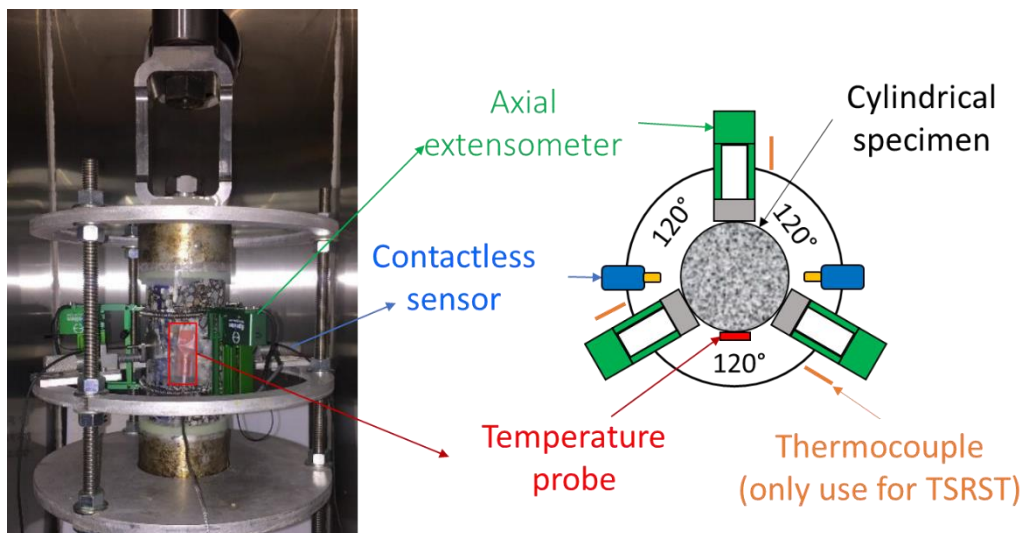


Figure 5-1. Disposition des capteurs

5.2 Essai de module complexe

L'essai de module complexe consiste à appliquer des sollicitations sinusoïdales axiales en déformation (ou en contrainte) à l'éprouvette cylindrique $140\text{mm} \times 75\text{mm}$ (Hauteur x Diamètre) à différentes fréquences et à différentes températures.

5.2.1 Module complexe (E^*) et coefficient de Poisson complexe (ν^*)

Si on applique une déformation sinusoïdale 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 $\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t + \varphi)$. La réponse en déformation radiale (direction II, III) est de la forme $\varepsilon_r(t) = \varepsilon_{r0} \sin(\omega t + \pi + \varphi_\nu)$ (Cf. Figure 5-2). (φ et $\pi + \varphi_\nu$ sont les angles de déphasage entre les signaux mesurés).

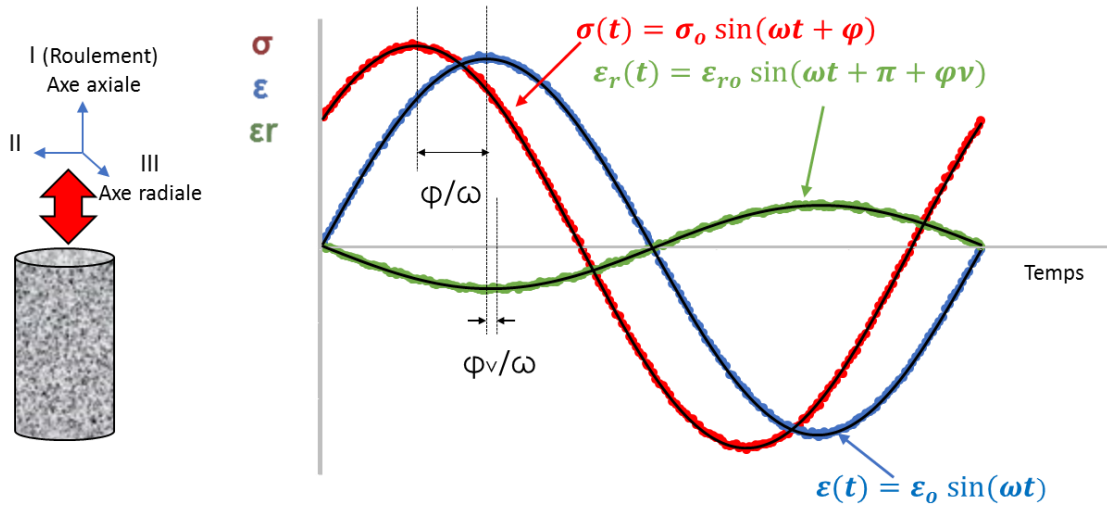


Figure 5-2. Mesure de module complexe sur éprouvette cylindrique

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

Le module complexe E^* et le coefficient de Poisson complexe ν^* sont calculés selon les équations Eq. 5-4 et Eq. 5-5.

$$E^* = \frac{\sigma^*(\omega t + \varphi)}{\varepsilon^*(\omega t)} = \frac{\sigma_0 e^{i(\omega t + \varphi)}}{\varepsilon_0 e^{i\omega t}} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} e^{i\varphi} = |E^*| e^{i\varphi} = E_1 + iE_2 \tag{Eq. 5-4}$$

$$\nu^* = -\frac{\varepsilon_r^*(\omega t + \pi + \varphi_\nu)}{\varepsilon^*(\omega t)} = -\frac{\varepsilon_{r0} e^{i(\omega t + \pi + \varphi_\nu)}}{\varepsilon_0 e^{i\omega t}} = -\frac{\varepsilon_{r0}}{\varepsilon_0} e^{i(\pi + \varphi_\nu)} = |\nu^*| e^{i\varphi_\nu} = \nu_1 + i\nu_2 \tag{Eq. 5-5}$$

5.2.2 Procédure de l'essai E^*

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 5-3.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 de matériaux testés sur une gamme aussi large que possible (Cf. Figure 5-3.b).

L'essai est réalisé en mode de pilotage de déformation. L'amplitude de la déformation axiale pendant le chargement cyclique est de $50 \times 10^{-6} \text{m/m}$. 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 a été appliquée entre deux périodes successives de chargement cyclique (c'est à dire, entre chaque

changement de fréquence). Cela représente une durée d'essai de 38 minutes environ pour 5 températures (de -25°C à 25°C avec 3 essais à 15°C) et de 66 minutes environ à 2 températures (35°C et 45°C). 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 maintenue à 0MPa.

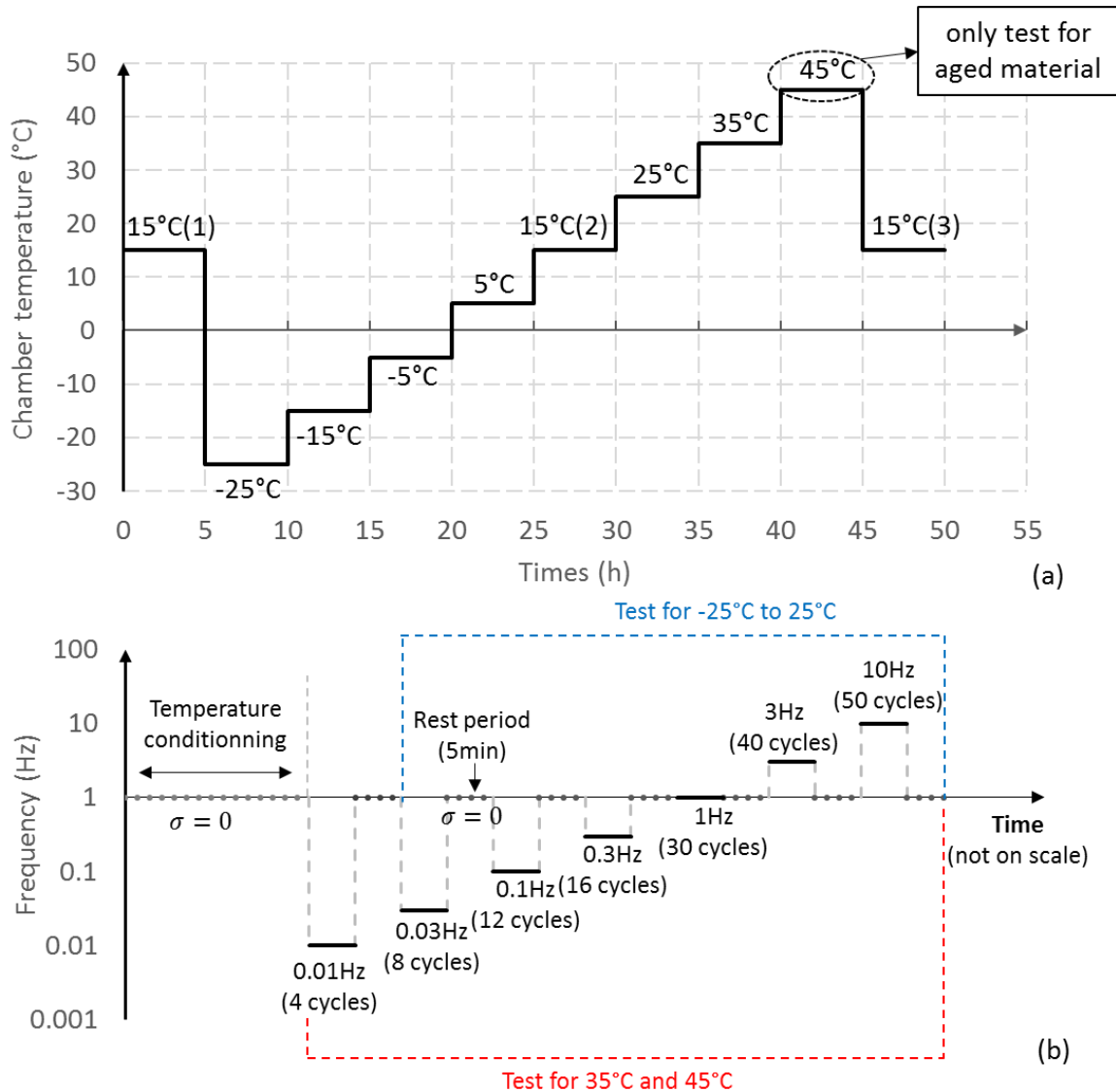


Figure 5-3. (a) Chronologie de températures et (b) Chronologie de fréquences à chaque température durant l'essai E*

5.2.3 Analyse des résultats de l'essai E*

5.2.3.1 Présentation des résultats E* et ν^*

Les résultats des essais E* sont d'abord présentés dans le plan Cole-Cole et dans l'espace de Black. Si les points expérimentaux forment des courbes uniques dans ces deux plans, le principe d'équivalence temps-température (PETT) est appliqué afin de construire les courbes maîtresses de la norme et l'angle de phase du module complexe ainsi que celles du coefficient de Poisson complexe à l'aide des coefficients de translation aT.(Cf. Annexe Partie 2 : Module complexe page 11-66)

5.2.3.2 Modélisation à l'aide du modèle 2S2P1D (E^* , ν^* , et E^*_{norm} , ν^*_{norm})

La simulation du comportement VEL est réalisée à l'aide du modèle 2S2P1D développé à l'ENTPE. (Olard & Di Benedetto, 2003) (Di Benedetto, et al., 2004) (Delaporte, et al., 2007) (Pham, et al., 2015))

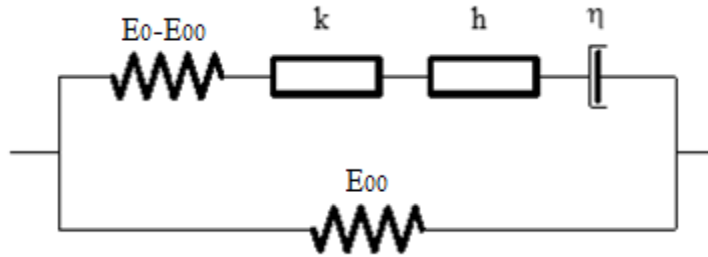


Figure 5-4. Représentation du modèle 2S2P1D

Ce modèle se compose de deux branches en parallèle (Cf. Figure 5-4) :

1. La première branche est assemblée en série d'un ressort, deux éléments paraboliques et un amortisseur
2. La deuxième branche est formée par un seul amortisseur

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

$$E^*(i\omega) = E_{00} + \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}} \tag{Eq. 5-6}$$

$$\nu^*(i\omega) = \nu_{00} + \frac{\nu_0 - \nu_{00}}{1 + \delta(i\omega\tau_\nu)^{-k} + (i\omega\tau_\nu)^{-h} + (i\omega\beta\tau_\nu)^{-1}} \tag{Eq. 5-7}$$

Où

- i : nombre complexe défini par $i^2 = -1$
- ω : la pulsation
- E_0, ν_0 : module vitreux et coefficient de Poisson vitreux quand $\omega \rightarrow \infty$
- E_{00}, ν_{00} : module statique et coefficient de Poisson vitreux quand $\omega \rightarrow 0$
- $\eta = \beta\tau(E_0 - E_{00})$: 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 et $\tau(T) = a_T\tau_0(T_R)$ avec a_T coefficient de translation calculé par la formule WLF

La formule analytique la plus utilisée pour le calcul de translation $\log(a_T)$ est la formule de Williams, Landel et Ferry (WLF) (William, et al., 1955):

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T - T_r)}{(T - T_r) + C_2} \tag{Eq. 5-8}$$

où :

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

T Températures testées (°C)

Les courbes du module complexe normalisé sont construites grâce aux formules suivantes

$$E_{nor}^* = \frac{E^* - E_{00}}{E_0 - E_{00}} \tag{Eq. 5-9}$$

$$\nu_{nor}^* = \frac{\nu^* - \nu_{00}}{\nu_0 - \nu_{00}} \tag{Eq. 5-10}$$

Les courbes maîtresses et les courbes dans le plan Cole-Cole et dans l'espace de Black du module complexe normalisé et du coefficient de Poisson normalisé sont aussi présentées.

5.3 Essai de retrait thermique empêché (TSRST)

L'essai TSRST consiste à maintenir constante la longueur d'un échantillon cylindrique d'enrobé 225mm x 65mm (Hauteur x Diamètre) alors que celui-ci est soumis à un taux de refroidissement constant (-10°C/h) et ce, jusqu'à atteindre la rupture de l'échantillon. La température de démarrage de l'essai est fixée à 5°C.

Trois caractéristiques principales sont exploitées à partir les résultats des essais TSRST: la température T_{rup} , la contrainte σ_{rup} et la déformation radiale $\epsilon_{r.rup}$ de l'éprouvette au moment de la rupture (cf. Figure 5-5)

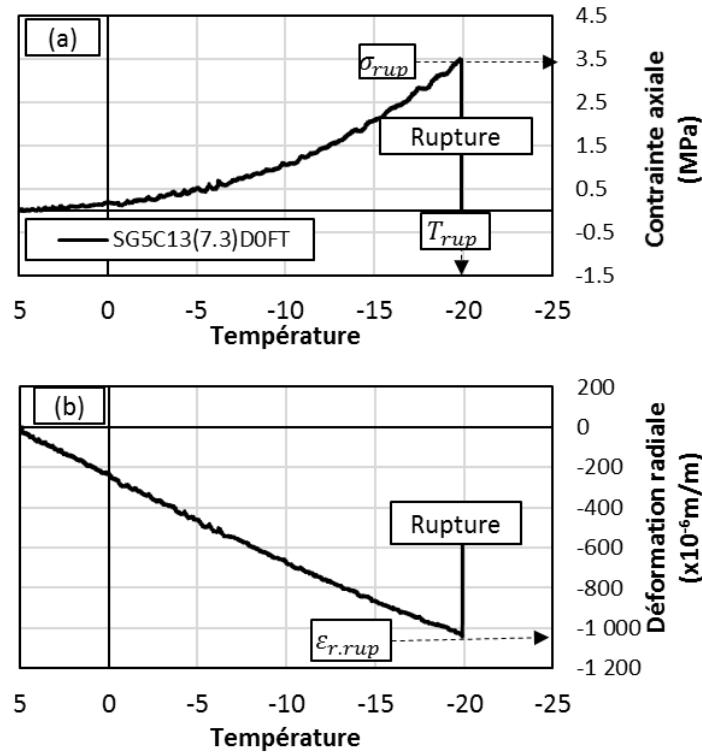


Figure 5-5. Evolution de la contrainte axiale (a) et de la déformation radiale (b) en fonction de la température lors de l'essai TSRST sur l'éprouvette SG5C13(7.3)D0FT

Afin de réaliser un essai TSRST les dérives des capteurs dues à la température doivent être corrigées. Ces corrections sont présentées dans l'Annexe 3 (page 64).

6 Résultats expérimentaux

6.1 Evolution des éprouvettes lors du conditionnement (campagne X)

7 éprouvettes ont été utilisées pour la campagne X. Les éprouvettes et les conditionnements appliqués sur chaque éprouvette sont présentés dans le Tableau 6-1.

Tableau 6-1. 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 campagne X (Cf. partie 3.2 - page 10), 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.

6.1.1 Traitement des résultats

6.1.1.1 Principe de calcul de teneur en vide et de degré de saturation à la $k^{\text{ème}}$ mesure

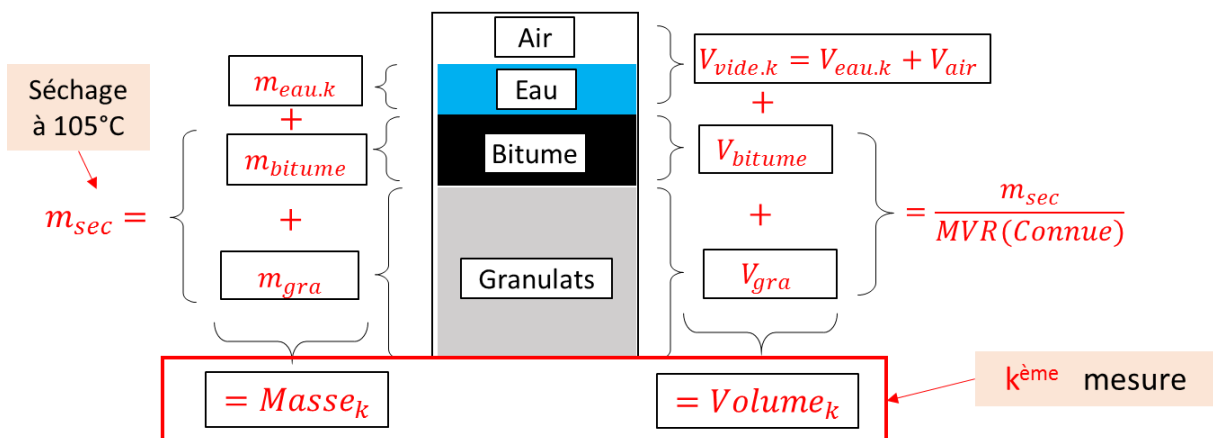


Figure 6-1. Composition de l'éprouvette et Principe d'analyse des résultats de la campagne X

Pendant la campagne X, plusieurs mesures de masse et de volume sont réalisées afin de déterminer la variation de teneur en vide (TEV) ainsi que le degré de saturation (DS) des éprouvettes au cours des essais (Figure 6-1).

La figure 6.2 présente la procédure de traitement des résultats de la campagne X.

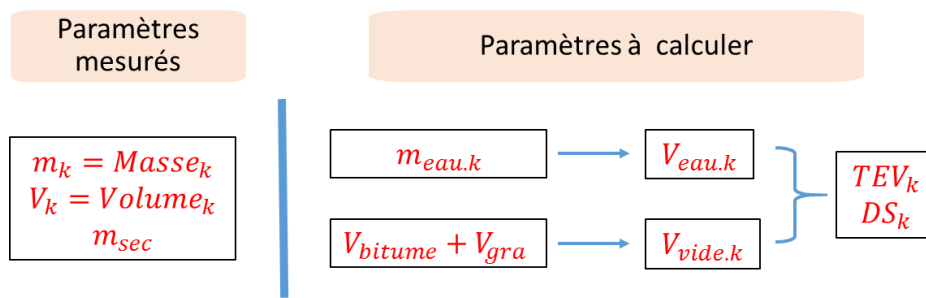


Figure 6-2. Procédure de traitement des données de la campagne X
 Les formules de calcul de ces paramètres se trouvent dans Le Tableau 6-2.

Tableau 6-2. Paramètres des essais 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 vide à la k ^{ème} mesure	$V_{vide.k}$	Calcul	$V_{vide.k} = V_{total} - (V_{bitume} + V_{granulats})$
Masse volumique réelle	MVR	Calcul à partir de la formulation de l'enrobé bitumineux	$MVR = 2.441g/cm^3$
Masse volumique apparente à la k ^{ème} mesure	MVA_k	Calcul	$MVA_k = \frac{m_{sec}}{V_{total.k}}$
Teneur en vide 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	$DS_k = \frac{V_{eau.k}}{V_{vide.k}} \times 100\%$

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 6-3). Cet écart correspond environ à une d'erreur de 0.05% de teneur en vide et de 2% de degré de saturation. Cette erreur est acceptable par rapport aux incertitudes de mesure qui sont présentées dans la partie suivante.

Tableau 6-3. 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 V1 (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	-----	-----

6.1.1.2 Calcul d'incertitude de mesure

Les mesures géométriques sont faites avec un pied à coulisse de précision $\pm 0.02\text{mm}$. Ces mesures peuvent donc varier avec une incertitude évaluée à $\pm 0.05\text{mm}$. En utilisant le développement de Taylor, on peut approximer les incertitudes de mesures par les formules suivantes (Tableau 6-4):

Tableau 6-4. Formules de calcul des incertitudes

Nom	Formule	Incertaince
Hauteur	H	$\Delta H = 0.05mm$
Déformation axiale	$\varepsilon_H = \frac{dH}{H}$	$\Delta\varepsilon_H = \frac{\Delta H}{H}$ (varie entre 300 μ def et 700 μ def)
Diamètre	D	$\Delta D = 0.05mm$
Déformation radiale	$\varepsilon_D = \frac{dD}{D}$	$\Delta\varepsilon_D = \frac{\Delta D}{D}$ (varie entre 300 μ def et 700 μ def)
Volume	$V = \frac{\pi D^2 H}{4}$	$\Delta V = \frac{\pi D^2}{4} \times \Delta H + \frac{\pi D H}{2} \times \Delta D \approx 1cm^3$
Volume de vide	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 1300 μ def et 1700 μ def)
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 vide	$TEV = \frac{V_{vide}}{V_{total}}$	$\Delta TEV = \frac{1}{V_{total}} \times \Delta V_{vide} - \frac{\Delta V_{total}}{V_{total}^2} \times V_{vide} \approx 0.15\%$

6.1.2 Evolution des éprouvettes lors des différents conditionnements

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 vide et le degré de saturation. Les résultats des essais sont illustrés dans les figures suivantes.

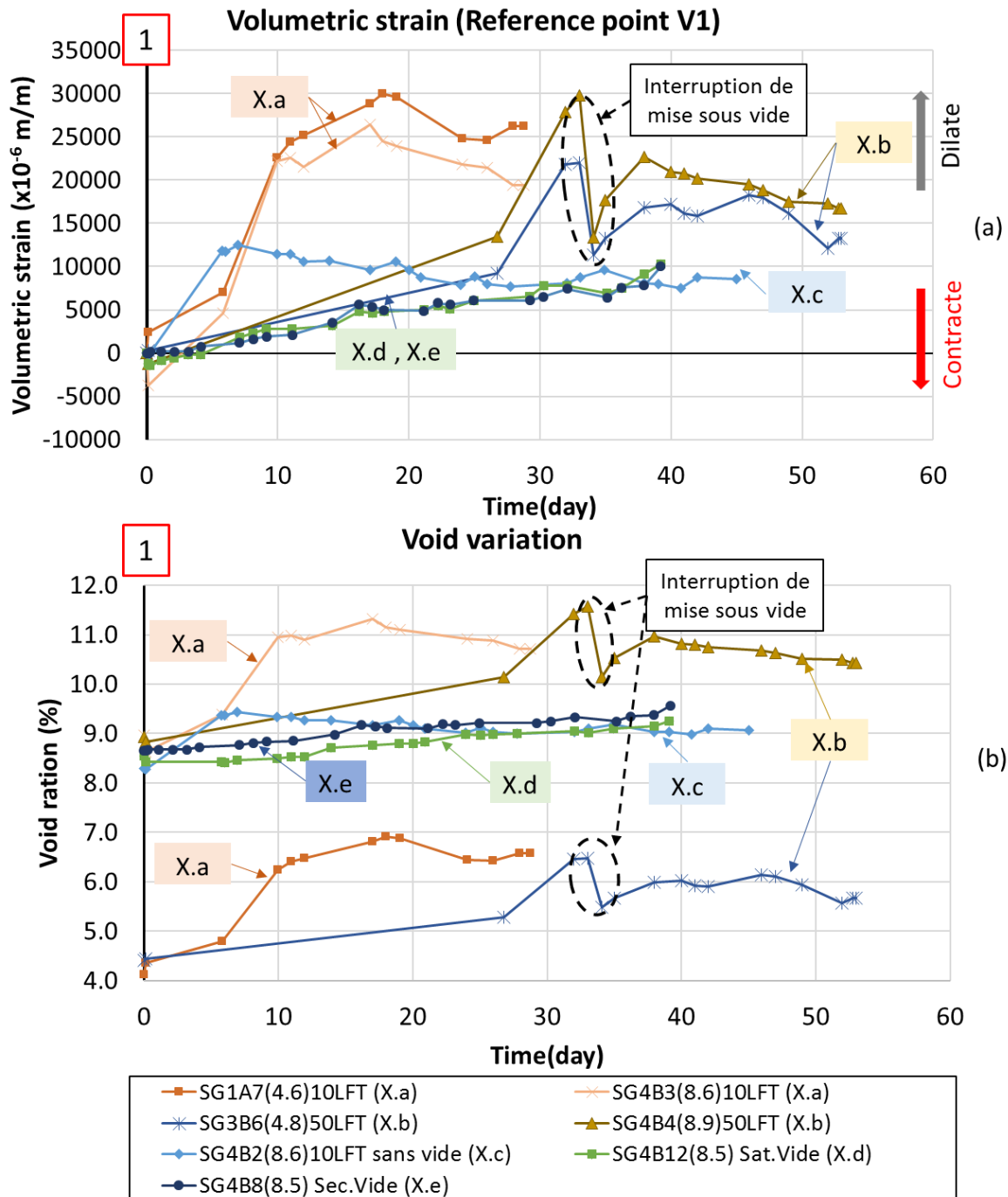


Figure 6-3. Déformation volumique (a) et Variation de teneur en vide (b) en fonction du temps au cours des différentes phases de conditionnement (le point 1 correspond à la mesure effectuée juste avant le début du conditionnement des éprouvettes)

Concernant la déformation volumique et le degré de saturation, le résultat montre que les éprouvettes séchées sous vide augmentent toujours de volume et donc de teneur en vide (Figure 6-3). En particulier, la teneur en vide des éprouvettes de la campagne X.a et X.b augmente significativement environ de 2% (Cf. Annexe) par rapport à la teneur en vide mesurée au début du conditionnement des éprouvettes. Une correction de 2% de teneur en vide est donc nécessaire lors de l'analyse des résultats expérimentaux des éprouvettes conditionnées ayant subi des cycles de GD et séchées sous vide.

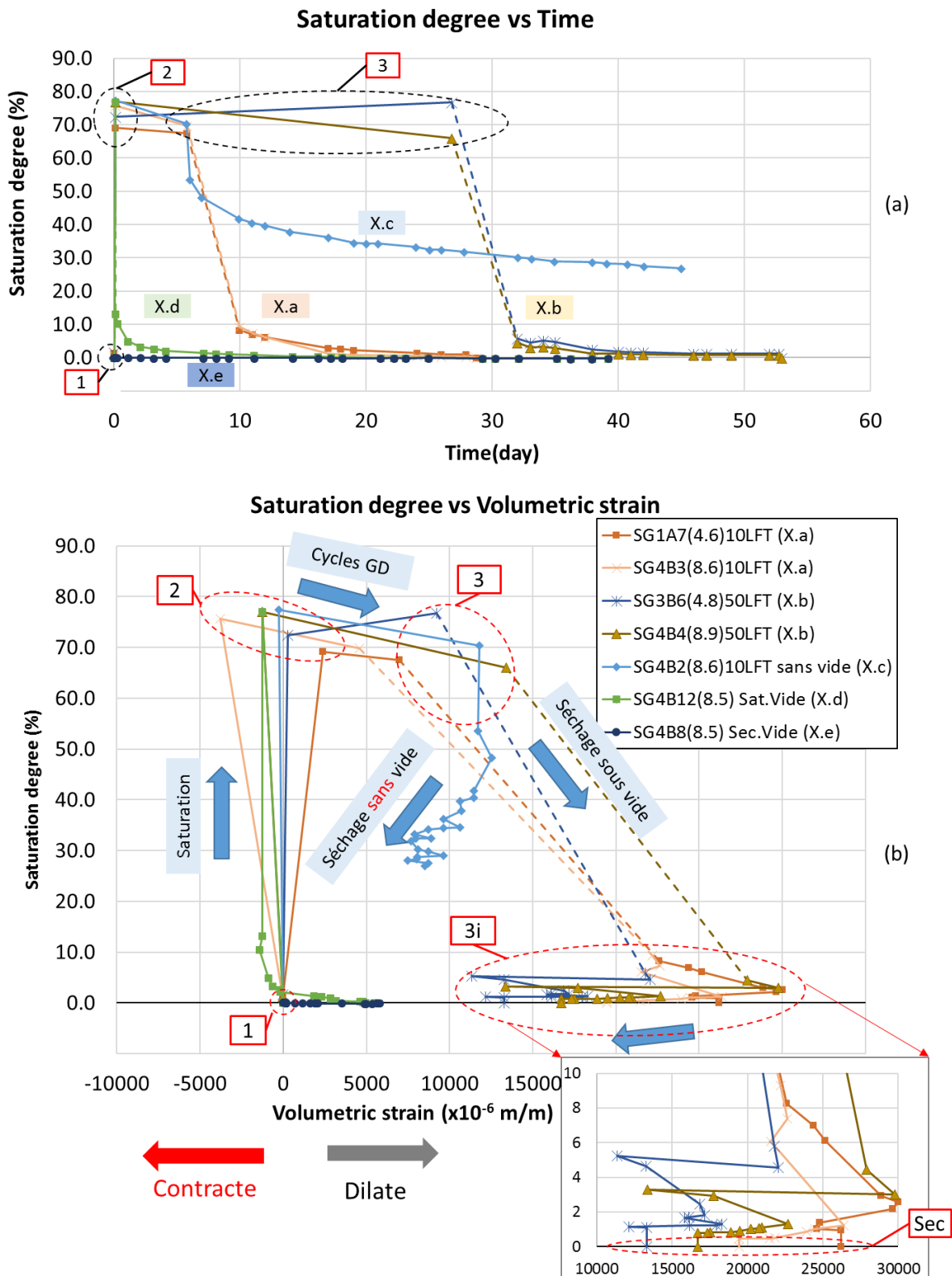


Figure 6-4. Degré de saturation en fonction du temps (a) et Degré de saturation en fonction de la déformation volumique (b) au cours des différentes phases de conditionnement ((1) avant la saturation, (2) après de la saturation, (3) après des cycles GD, (3i) pendant le séchage)

Concernant le degré de saturation, selon les résultats obtenus, les éprouvettes sont désaturées 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%.

→ L'éprouvette stockée 6 mois dans un bureau est complètement sèche (DS au tour de 0%) (Campagne X.e)

6.1.3 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 6-5). On peut donc conclure qu'il n'y a pas de changement volumique au cours de la saturation sous vide.

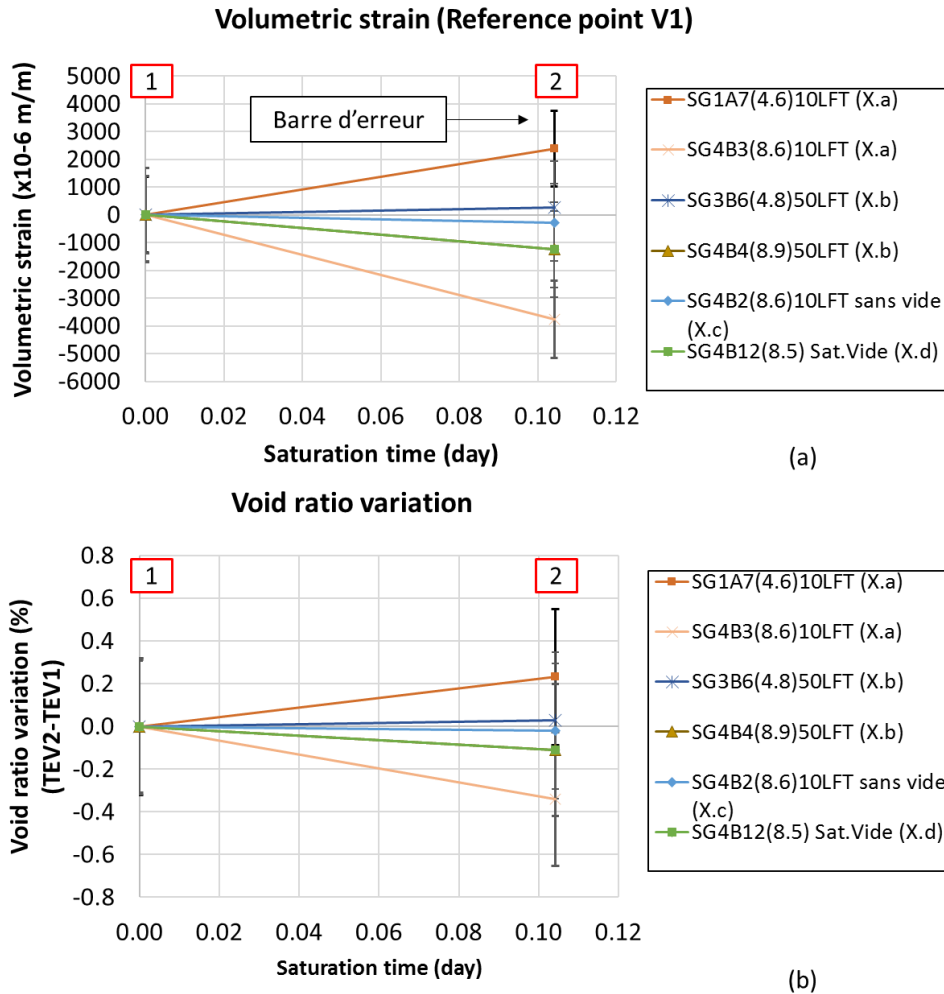


Figure 6-5. Déformation volumique (a) et Variation de teneur en vide (b) en fonction du temps ((1) avant la saturation, (2) après de la saturation)

La Figure 6-6 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.

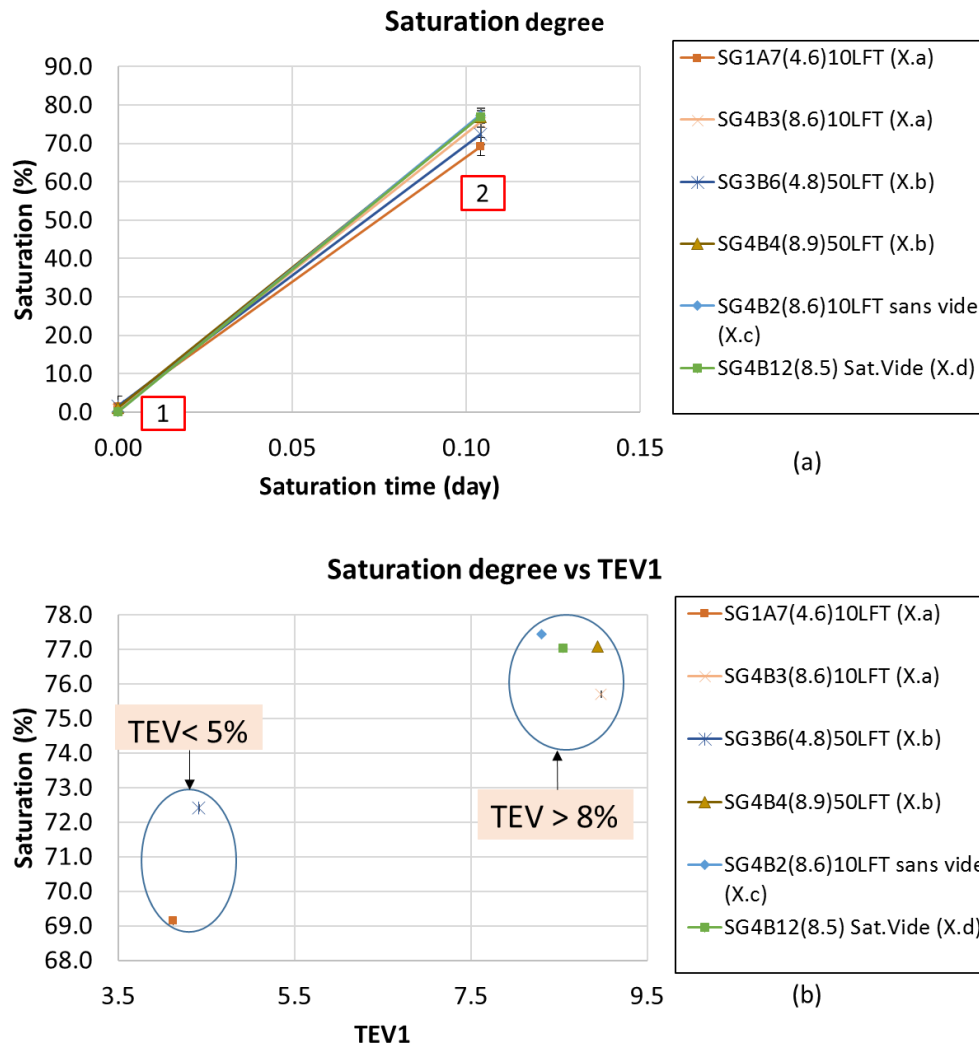


Figure 6-6. Degré de saturation en fonction du temps de saturation (a) et en fonction de la teneur en vide TEV1 (b) ((1) avant la saturation, (2) après de la saturation)

6.1.4 Etude de la phase des cycles GD

Lors du conditionnement (application des cycles GD) :

- La déformation volumique augmente d'environ 1% (10000microdef)
 - La teneur en vide augmente donc également d'environ 1%
 - 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
- Les résultats obtenus sont présentés dans les Figure 6-7 et Figure 6-8.

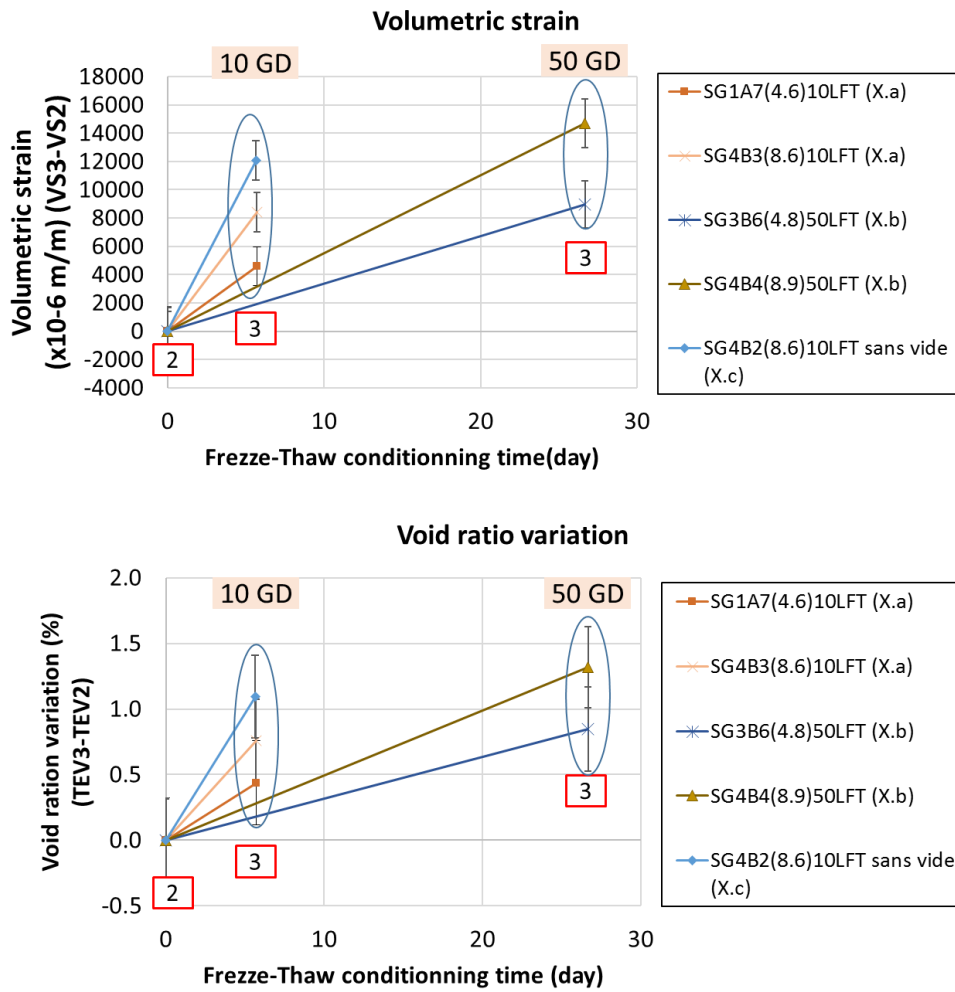


Figure 6-7. Variation de déformation volumique (a) et Variation de teneur en vide (b) en fonction du temps en phase de cycles GD ((2) après la saturation, (3) après des cycles GD)

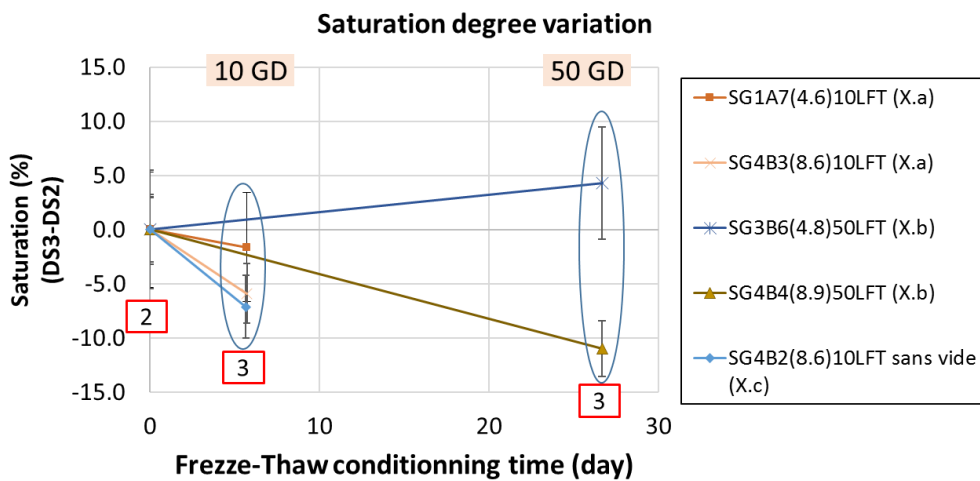


Figure 6-8. Degré de saturation en fonction de temps de saturation ((2) après la saturation, (3) après des cycles GD)

6.1.5 Etude de la phase de séchage

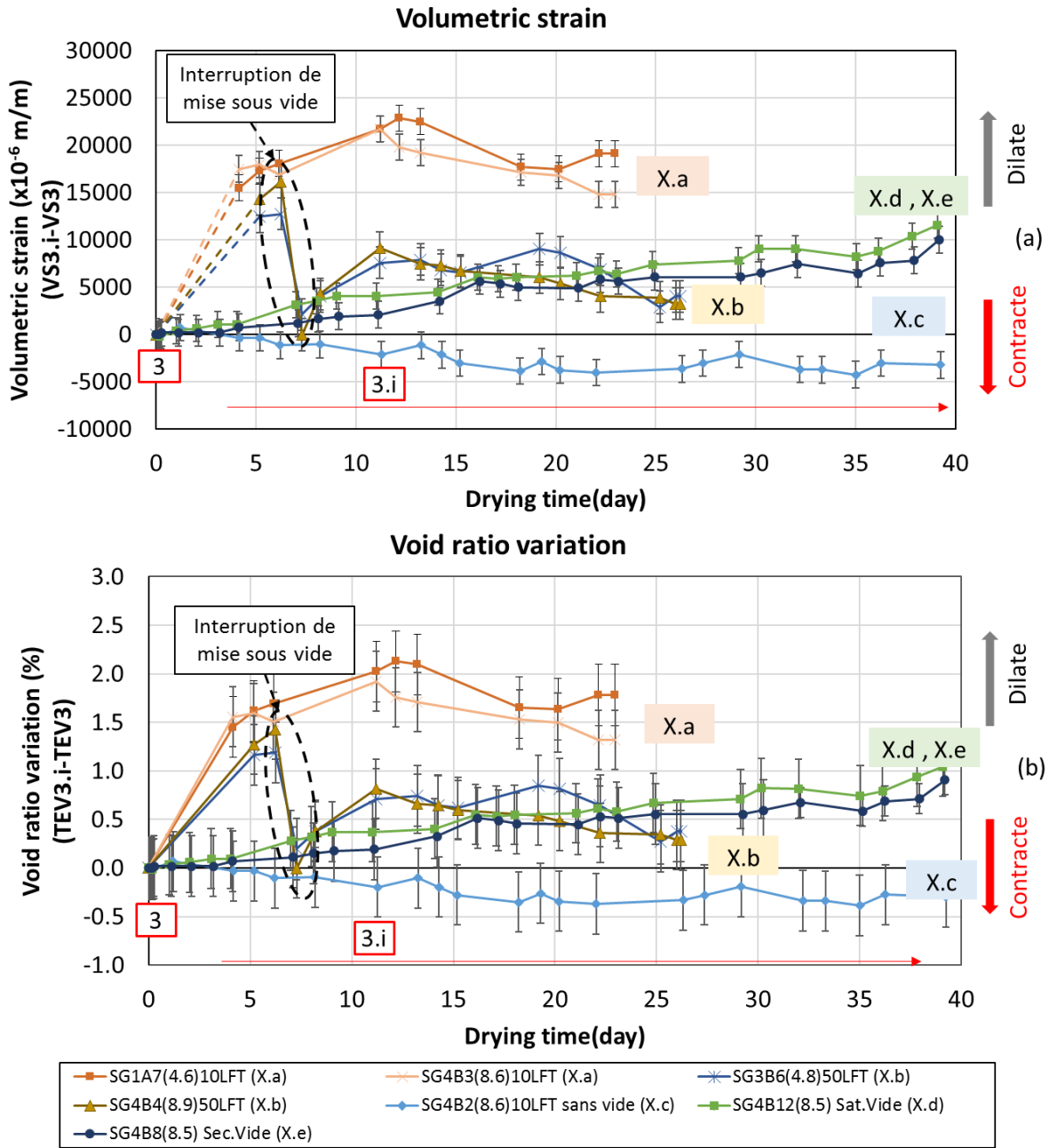


Figure 6-9. Variation de déformation volumique (a) et Variation de teneur en vide (b) en fonction du temps en phase de séchage ((3) après des cycles GD, (3i) pendant le séchage)

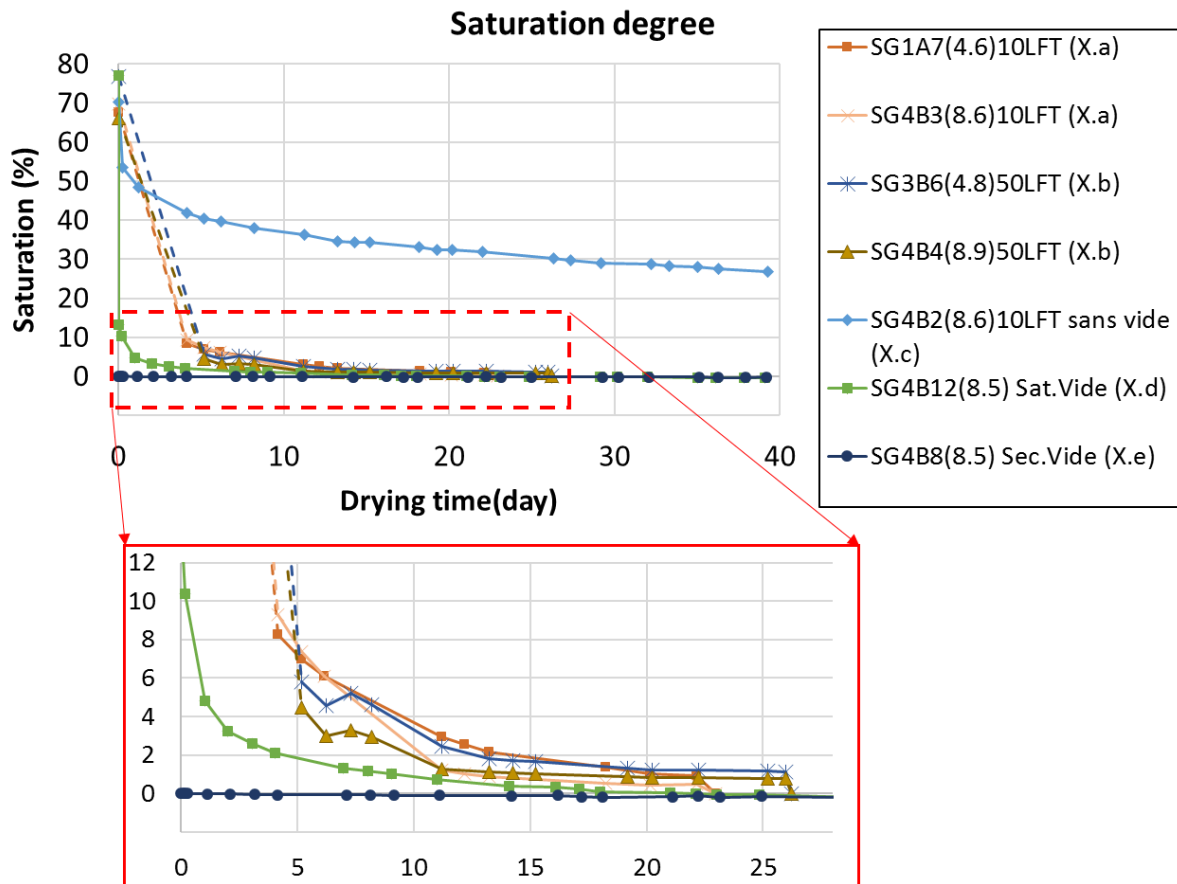


Figure 6-10. Degré de saturation en fonction du temps en phase de séchage sous vide

Les résultats obtenus dans la phase de séchage, présentés figures 6.9 et 6.10, permettent de formuler les constatations suivantes:

- Si le séchage avec gel de silice est effectué sans vide (après 10 cycles de GD), l'éprouvette contracte toujours.
- Si le séchage a lieu sous vide :
 - Il y a toujours dilatation si l'éprouvette n'a pas subi de cycle GD, 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 de GD. La dilatation initiale (durant environ 10 jours) est beaucoup plus rapide que pour les éprouvettes sans cycle de GD. 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) de ε_v positive (dilatation) pour toutes les éprouvettes (initialement sèches ou saturées avec ou sans cycle GD) qui sont maintenues dans le dessiccateur sous vide. Une représentation schématique des résultats est donnée (Cf. Figure 6-11).

→ 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 6-10).

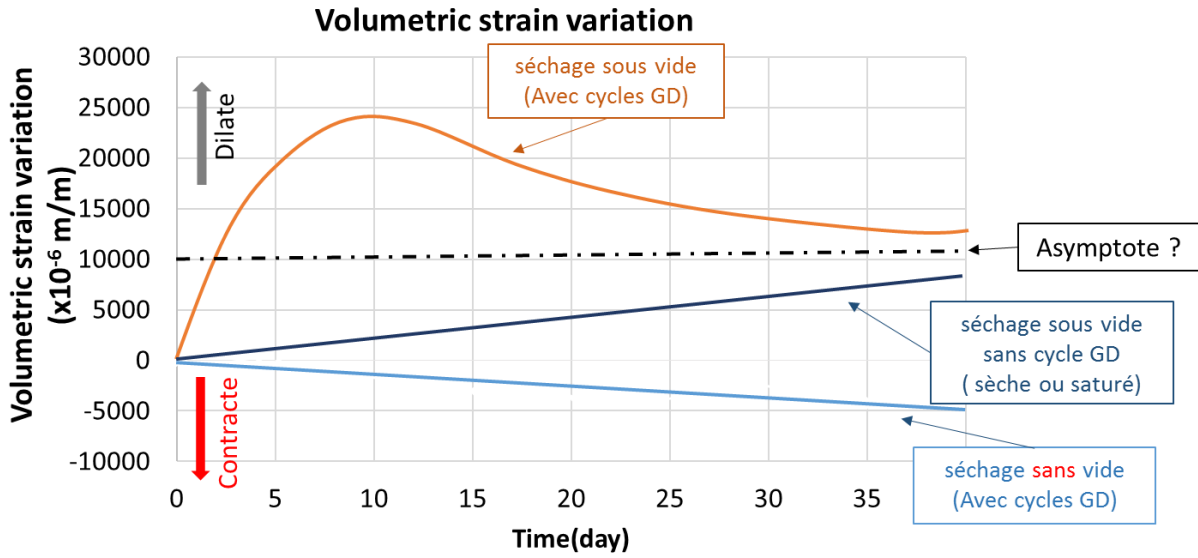


Figure 6-11. Résumé schématique de l'évolution des éprouvettes en phase de séchage

6.2 Essais E*

Le Tableau 6-5 présente les éprouvettes utilisées avec les conditionnements appliqués pour chaque éprouvette.

Tableau 6-5. Eprouvettes utilisées pour l'essai E*

Eprouvettes	TEV corrigé	Matériau	Saturation (DS %)	Cycles GD	Séchage sous vide	Etat pendant d'essai	Essai
SG2A1(7.7)	----	Non- vieilli	Non	0	Non	Sec	E*
SG4B10(8.2)	----	Non- vieilli	Non	0	Non	Sec	E*
SG6B4(7.1)	----	Non- vieilli	Non	0	Non	Sec	E*
SG5C3(7.4) ^(*)	----	Non- vieilli	Non	0	Non	Sec	E*
SG5C3(7.4) ^(*)	----	Non- vieilli	Oui (72.7%)	0	Non	Saturé (40%)	E*
SG2A4(8)	10	Non- vieilli	Oui (72.0%)	10	Oui	Sec	E*
SG6B10(6.8)	8.8	Non- vieilli	Oui (74.2%)	10	Oui	Sec	E*
SG6B9(7.4)	9.4	Non- vieilli	Oui (73.9%)	50	Oui	Sec	E*
SG6B12(7.4)	9.4	Non- vieilli	Oui (72.9%)	50	Oui	Sec	E*
SG1aB7(4.5)	----	Vieilli	Non	0	Non	Sec	E*
SG3aB1(6)	----	Vieilli	Non	0	Non	Sec	E*
SG1aB9(5.4)	----	Vieilli	Oui (59.8%)	0	Non	Sec	E*
SG3aB10(5.5)	----	Vieilli	Oui (66.3%)	0	Non	Sec	E*
(*) Eprouvette SG5C3(7.4) d'abord testée à l'état sec puis testée à l'état saturé (----) non-corrigé							

Lors de l'analyse des résultats, pour prendre en compte des résultats de la campagne X, une correction de 2% de teneur en vide est appliquée sur les 4 éprouvettes ayant subies des cycles GD (10 et de 50 cycles) (cf. Tableau 6-5)

Les résultats obtenus ont été modélisés à l'aide du modèle Viscoélastique linéaire (VEL) 2SP1D développé à l'ENTPE (Cf. section 5.2.3.2). Les constantes de calibration sont données dans le Tableau 6-5. Ces constantes sont analysées pour modéliser et quantifier les effets des conditionnements appliqués sur les éprouvettes sur les propriétés VEL (E*).

Tableau 6-6. Constantes du modèle 2S2P1D ($T_{référence}=15^{\circ}C$)

Eprouvette	E_{00} (MPa)	E_0 (MPa)	k	h	δ	τ (s)	β	ν_{00}	ν_0	τ_v (s)	C1	C2
SG2A1(7.7)D0FT	14	34250	0.2	0.65	2.23	0.046	50	0.46	0.17	0.126	25	166
SG4B10(8.2)D0FT	25	34000				0.052		0.4	0.23	0.015		
SG6B4(7.1)D0FT	25	34500				0.043		0.35	0.22	0.123		
SG2A4(8)10LFT	22	33000				0.037		0.47	0.25	0.248		
SG6B10(6.8)10LFT	16	33500				0.027		0.49	0.24	0.110		
SG6B9(7.4)50LFT	30	33000				0.036		0.37	0.19	0.180		
SG6B12(7.4)50LFT	24	36600				0.036		0.45	0.3	0.01		
SG5C3(7.4)D0FT	30	35567				0.048		0.41	0.18	0.119		
SG5C3(7.4)S0FTsat	39	34000				0.043		0.44	0.20	0.073		
SG1aB7(4.5)D0FT	18	40700	0.16	0.5	2.3	0.266	500	0.44	0.19	1.064	39	235
SG3aB1(6)D0FT	15	36500				0.171		0.42	0.20	1.138		
SG1aB9S(5.4)S0FTsat	30	36500				0.172		0.49	0.22	1.147		
SG3aB10S(5.5)S0FTsat	35	36500				0.194		0.39	0.20	1.297		

Tout d'abord, Les résultats présentés dans le Tableau 6 5 montrent que les constantes k, h, δ , β , C1 et C2 sont identiques pour le même type de matériau testé, vieilli, d'une part, et non-vieilli, d'autre part, quel que soient le conditionnement et les conditions d'essai. Cette observation confirme un résultat déjà présenté qui associe la valeur de ces constantes uniquement à la nature du bitume. Les caractéristiques du squelette granulaire agissent uniquement sur les autres constantes E_{00} , E_0 , ν_{00} , ν_0 et τ .

6.2.1 Epreuves testées à l'état sec (matériaux non-vieillis)

Huit éprouvettes non-vieillies ont été testées à l'état sec, dont 4 éprouvettes non-conditionnées, 2 éprouvettes conditionnées avec 10 grands cycles GD et deux autres conditionnées avec 50 grands cycles GD.

Pour chaque éprouvette, les résultats tracés dans le plan Cole-Cole et dans l'espace de Black (Figure 6-12 pour E^*), se situent sur une courbe continue et unique. Le principe d'équivalence temps-température (PETT) est donc vérifié. Il est appliqué afin de construire les courbes maîtresses de la norme et l'angle de phase du module complexe ainsi que celles du coefficient de Poisson complexe.(Figure 6-16).

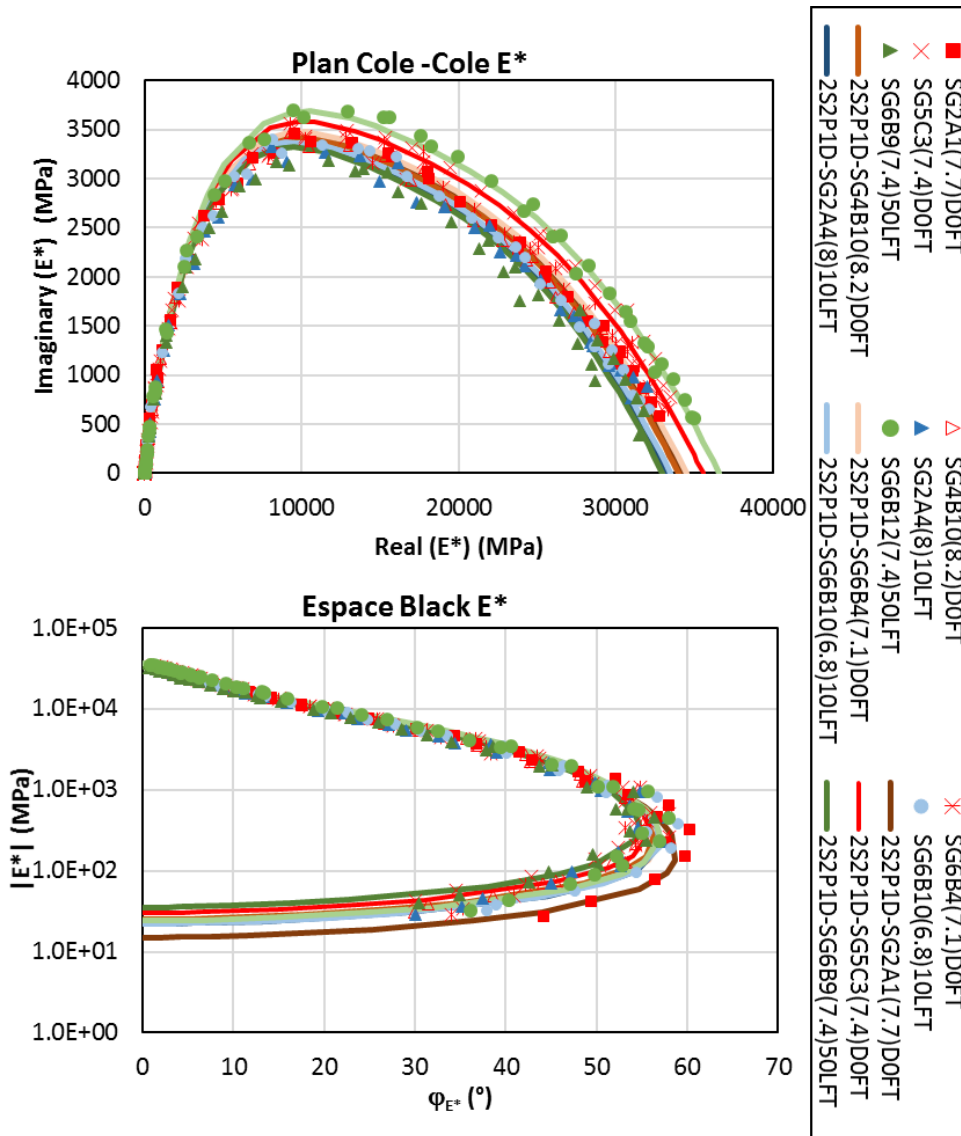


Figure 6-12. Module complexe E* dans le plan Cole-Cole et dans l'espace de Black avec la simulation du modèle 2S2P1D pour les éprouvettes non-vieillies testées à l'état sec

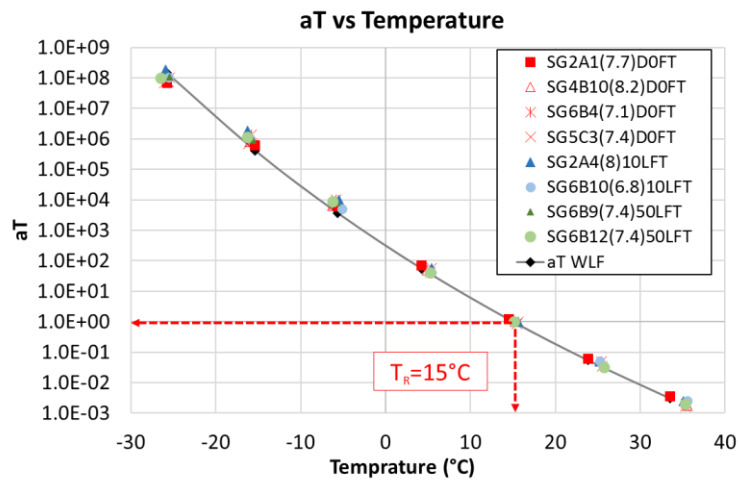


Figure 6-13. Coefficients de translation aT selon la température (à une température de référence $T_r = 15^\circ\text{C}$) pour les éprouvettes non-vieillies testées à l'état sec. Les mêmes coefficients sont obtenus pour E* et ν^*

Les coefficients de translation a_T obtenus pour construire les courbes maîtresses (Figure 6-13) qui sont identiques pour E^* et ν^* sont également quasiment identiques pour toutes les éprouvettes. La variation de a_T en fonction de la température permet de déterminer les coefficients C1 et C2 de la loi WLF.

Les modélisations à l'aide du modèle 2S2P1D sont aussi tracées sur les figures présentées (Figure 6-16 à Figure 6-19). On constate que le modèle décrit correctement les résultats obtenus sur toute la gamme des fréquences et températures.

La Figure 6-14 présente la variation de constantes (E_0 , E_{00} , ν_0 , ν_{00} et τ) en fonction du nombre de cycles de GD appliqués. Ces constantes n'évoluent pas significativement même pour les éprouvettes ayant subies 50 cycles de GD.

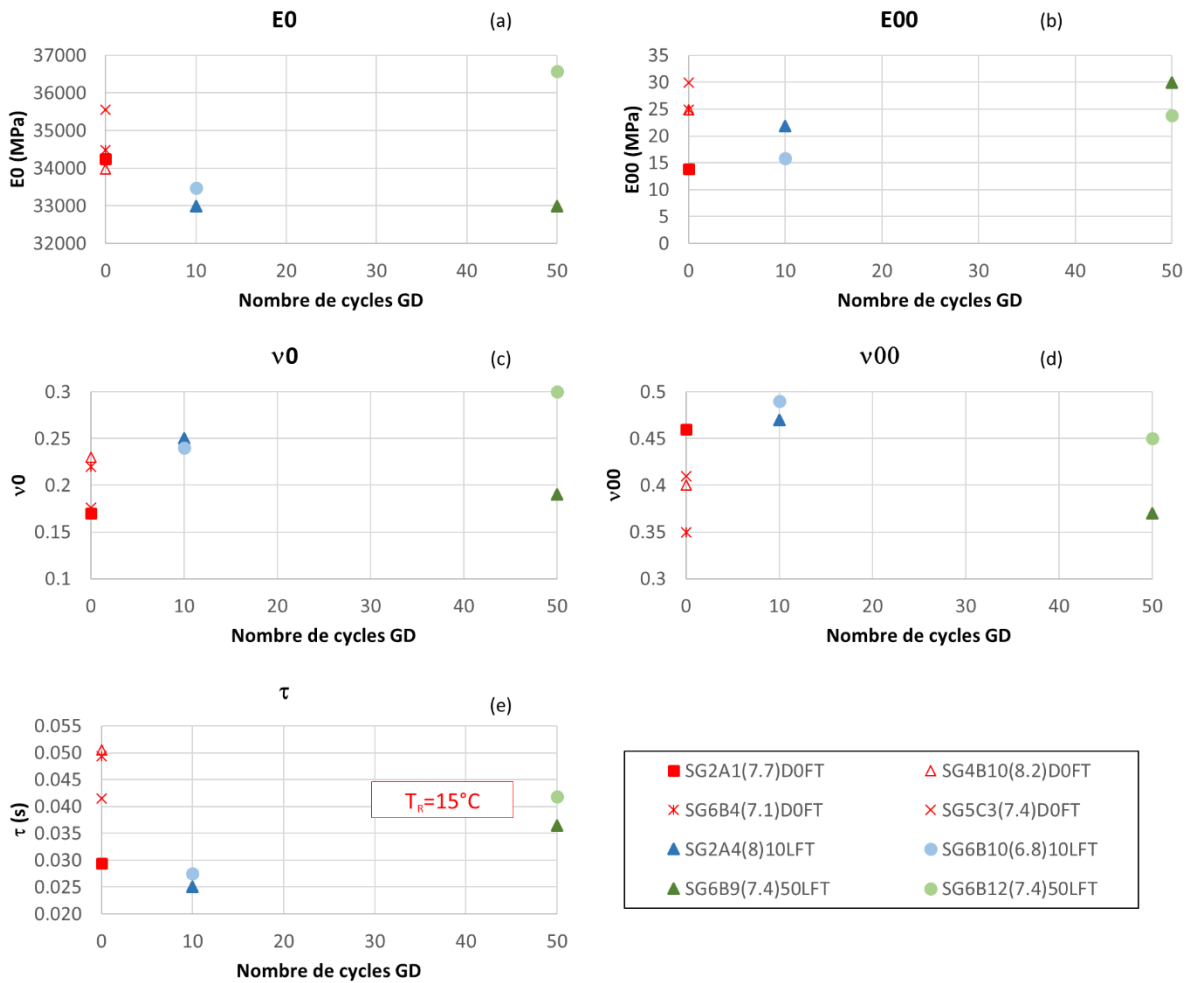


Figure 6-14. Constantes E_0 , E_{00} , ν_0 , ν_{00} et τ du modèle 2S2P1D en fonction de nombre de cycles GD

La Figure 6-15 présente les variations des constantes E_0 , E_{00} , ν_0 , ν_{00} et τ en fonction de la teneur en vide des éprouvettes. En accord avec les résultats de la campagne X, la teneur en vide TEV0 des éprouvettes ayant subies des cycles GD et ensuite séchées sous vide doit être corrigée de 2% par rapport à la mesure faite avant conditionnement. Cette correction est indiquée dans la Figure 6-15.

Les résultats présentés Figure 6-15 montrent que E_0 semble évoluer en fonction de la teneur en vide selon une loi linéaire tandis que les variations des autres constantes E_{00} , ν_0 , ν_{00} et τ semblent indépendantes de la teneur en vide de l'éprouvette testée.

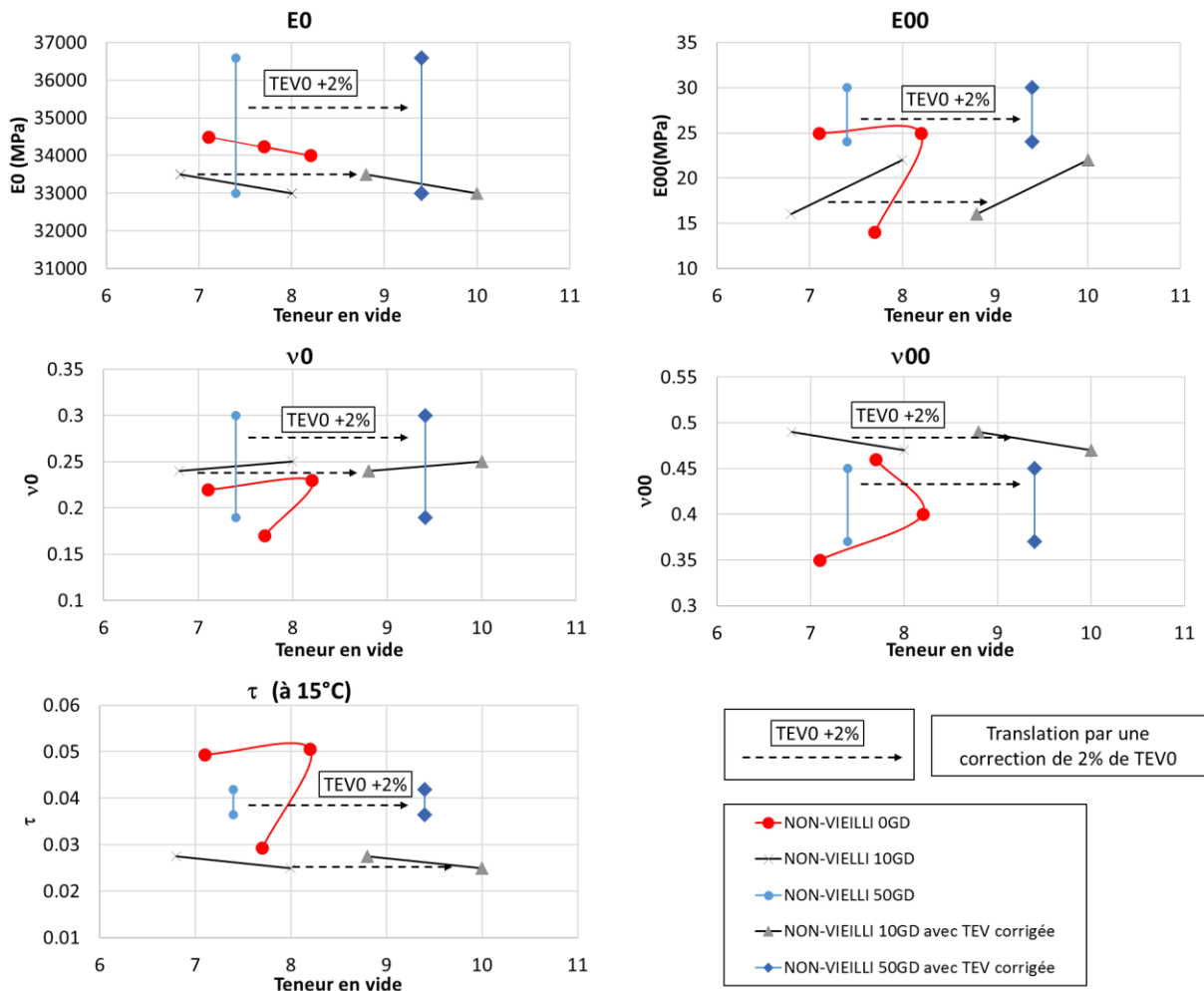


Figure 6-15. Les constantes 2S2P1D en fonction de teneur en vide

Les figures Figure 6-17 et Figure 6-18 présentent les valeurs du module complexe normalisé (E^*_{nor}) et du coefficient complexe normalisés (v^*_{nor}) dans les axes de Cole-Cole et de Black. On constate que les points expérimentaux des différents essais sont superposés et décrivent une courbe unique. Cette observation indique que les constantes k , h , δ , β du modèle 2S2P1D doivent être identiques pour les différents matériaux. Dans ces axes la courbe 2S2P1D ne dépend, en effet, que de ces 4 constantes. La courbe simulée à l'aide du modèle 2S2P1D est donc unique. Elle est également tracée sur les Figure 6-17 et Figure 6-18.

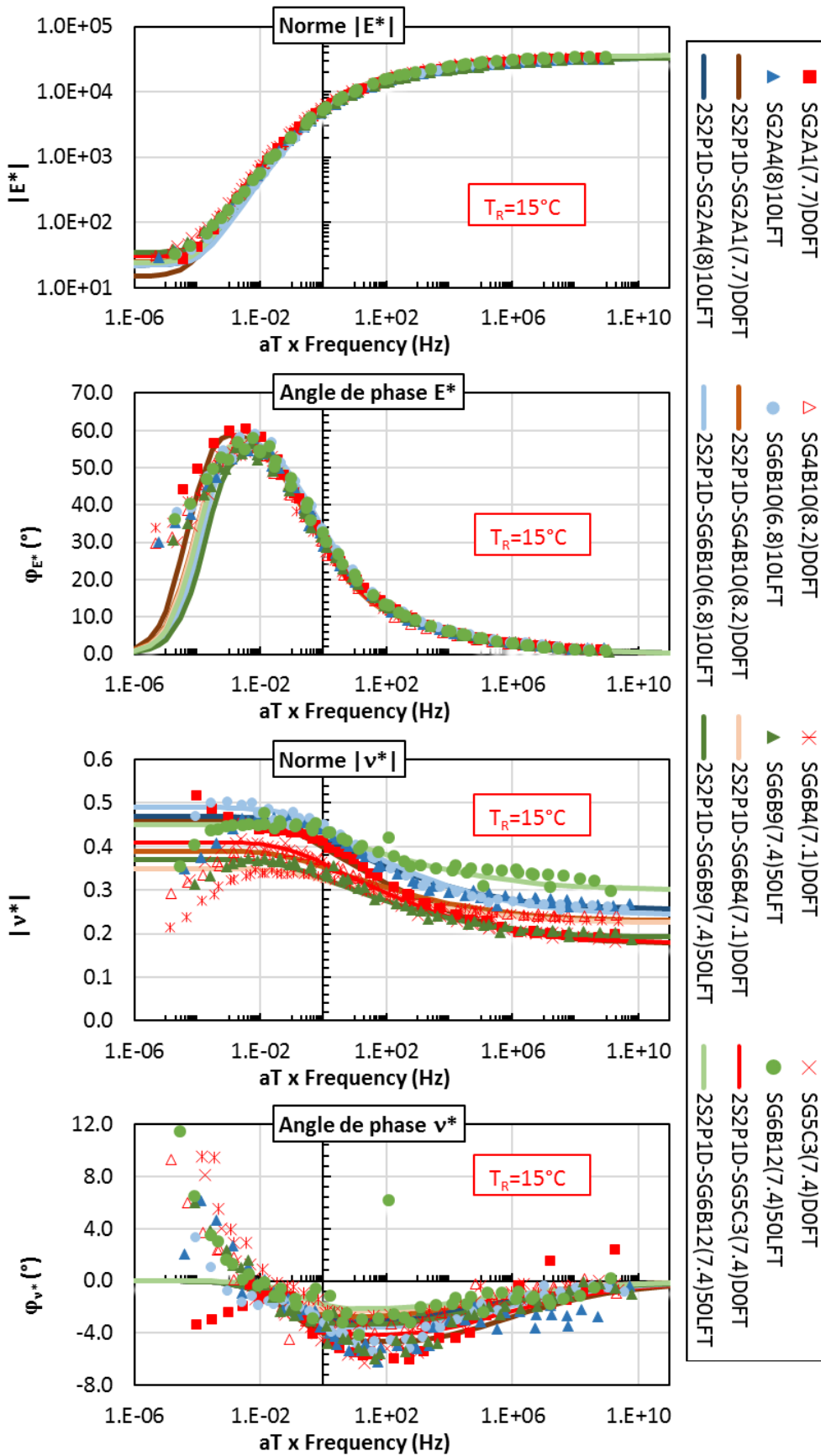


Figure 6-16. Courbes maîtresses de la norme et de l'angle de phase du module E^* et du coefficient v^* des éprouvettes non-vieillies testées à l'état sec et courbes simulées avec le modèle 2S2P1D

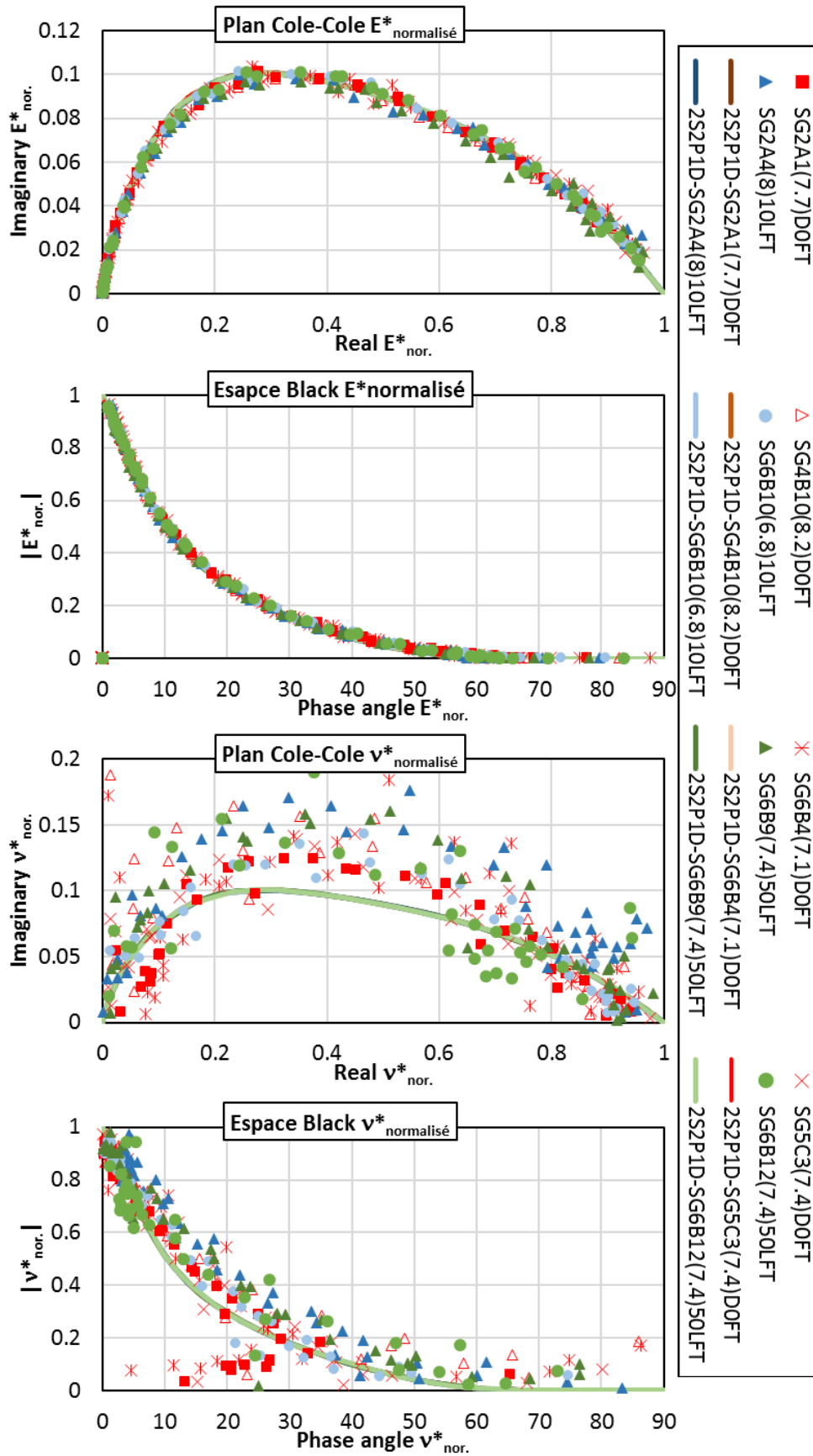


Figure 6-17. Valeurs de E^* et v^* normalisés pour des éprouvettes non-vieilles testées à l'état sec dans le plan Cole-Cole et dans l'espace de Black et courbe simulée avec le modèle 2S2P1D

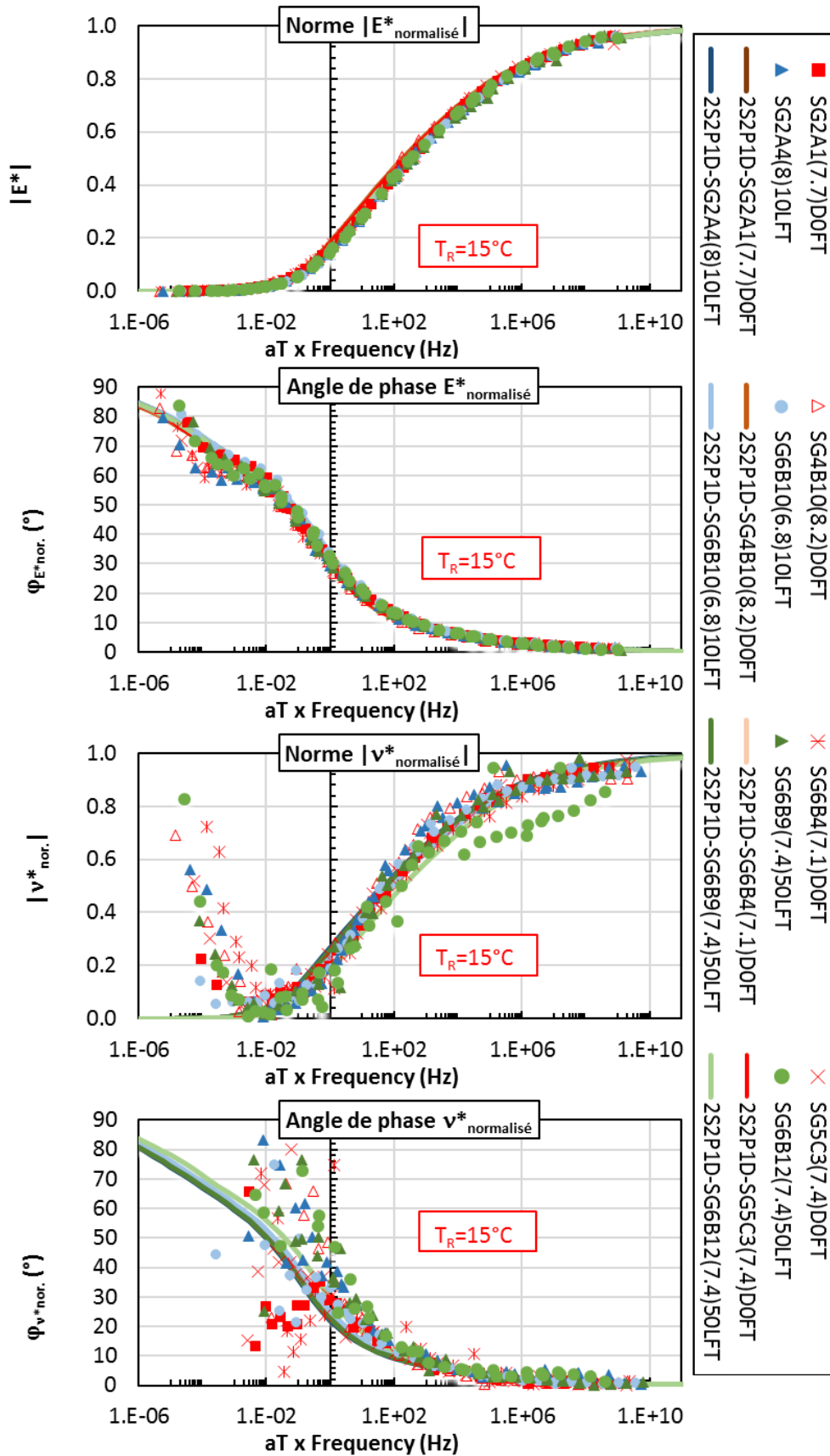


Figure 6-18. Courbes maître de E^* et v^* normalisés des éprouvettes non-vieilles testées à l'état sec et courbes simulées à l'aide du modèle 2S2P1D

6.2.2 Eprouvettes testées à l'état sec (matériaux vieillis)

4 échantillons vieillis ont été testés à l'état sec, dont 2 échantillons non-conditionnés et 2 échantillons saturés puis séchés sous vide. Aucune n'a subi de cycles de GD.

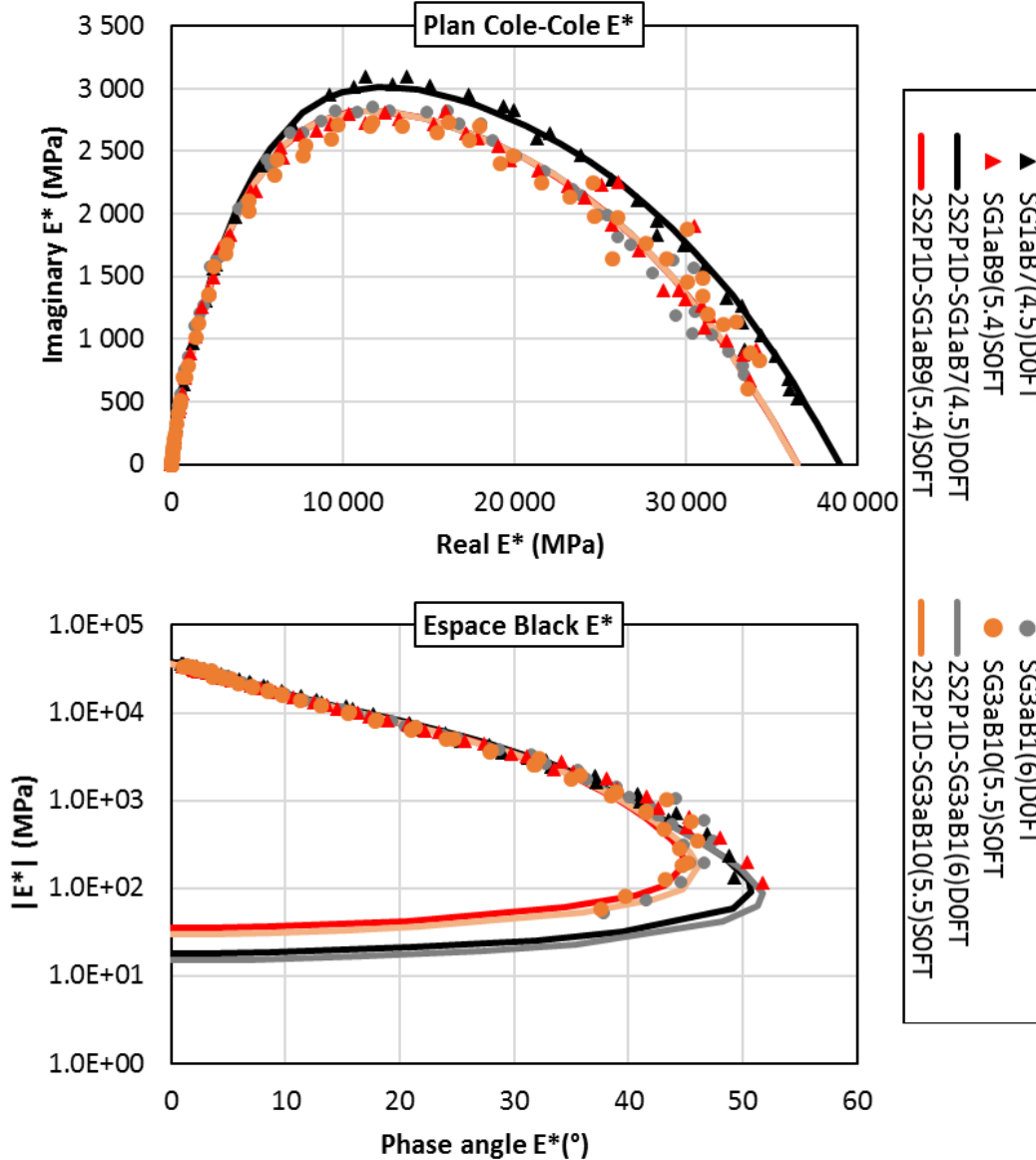


Figure 6-19. Module complexe E* dans le plan Cole-Cole et dans l'espace Black et courbes simulées avec le modèle 2S2P1D pour les échantillons vieillis testés à l'état sec

Les résultats sont présentés dans le plan Cole-Cole et dans l'espace de Black (Figure 6-19). Comme pour les échantillons avec matériaux non vieillis les points expérimentaux décrivent une courbe unique pour chacune des échantillons. Le principe d'équivalence temps-température (PETT) peut donc être appliqué afin de construire les courbes maîtresses de la norme et l'angle de phase du module complexe ainsi que celles du coefficient de Poisson complexe.(Figure 6-21).

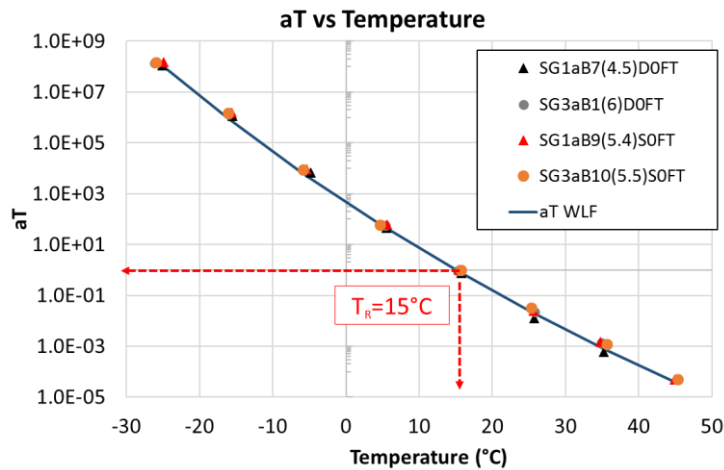


Figure 6-20. Coefficients de translation selon la température de référence $T_r = 15^\circ\text{C}$ des éprouvettes vieilles testées à l'état sec

La Figure 6-20 présente les coefficients de translation a_T expérimentaux et la simulation par l'équation WLF. Il n'y a pas de différence significative entre les a_T des éprouvettes non-conditionnées et celles ayant subies une saturation. Les constantes WLF, C_1 et C_2) sont donc uniques.

En utilisant la même procédure d'analyses que pour les éprouvette non vieilles, les courbes maîtresses de E^* normalisé et de ν^* normalisé ont été construites. (Figure 6-22 et Figure 6-23).

Les points expérimentaux forment une courbe unique dans le plan Cole-Cole et dans l'espace Black donc, comme pour les éprouvettes non vieilles, les constantes k , h , δ , β ont la même valeur pour toutes les éprouvettes en matériau vieilli.

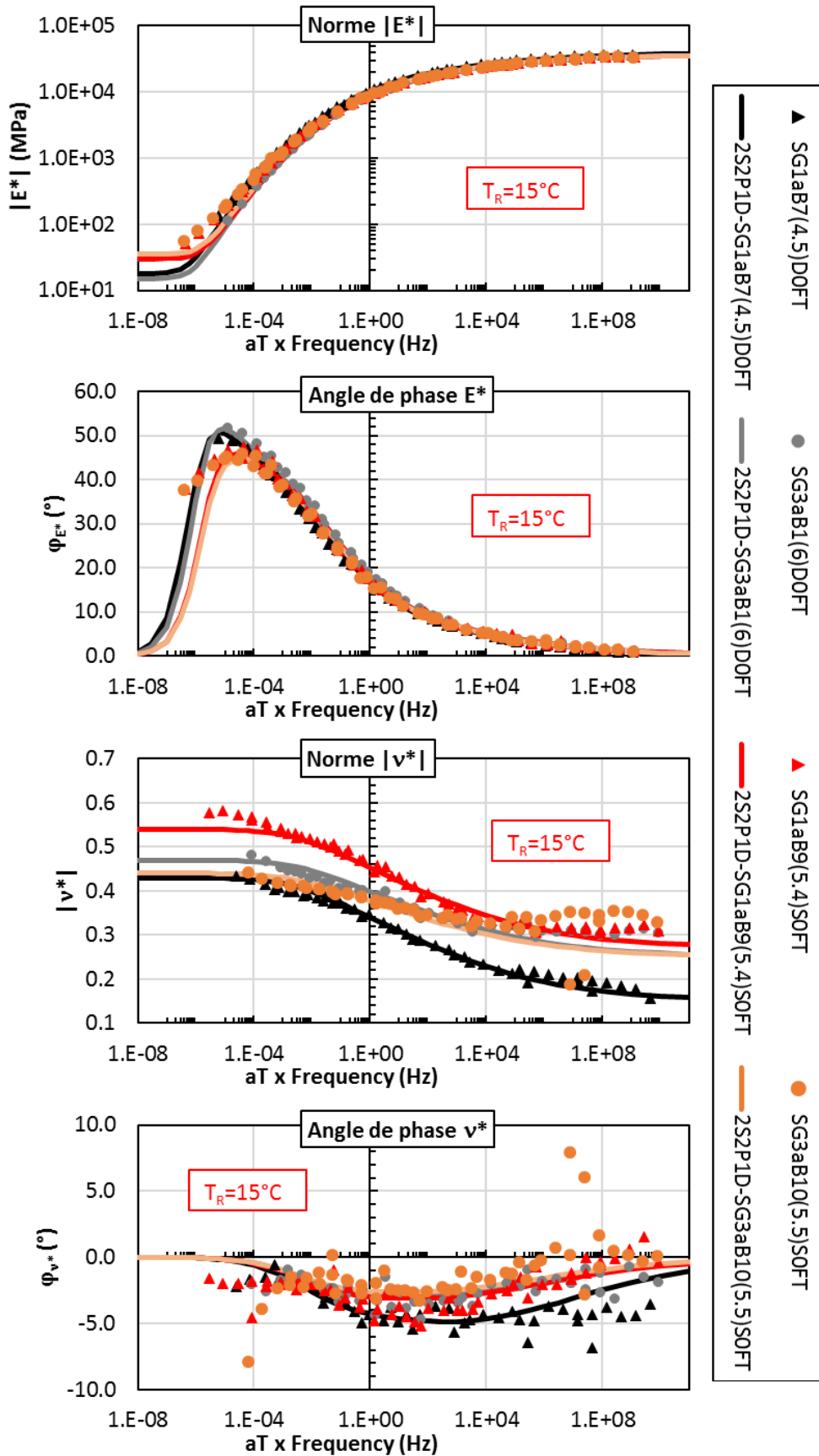


Figure 6-21. Courbes maîtresses de la norme et de l'angle de phase du module E^* et du coefficient ν^* des éprouvettes vieilles testées à l'état sec et courbes maîtresses simulées avec le modèles 2S2P1D

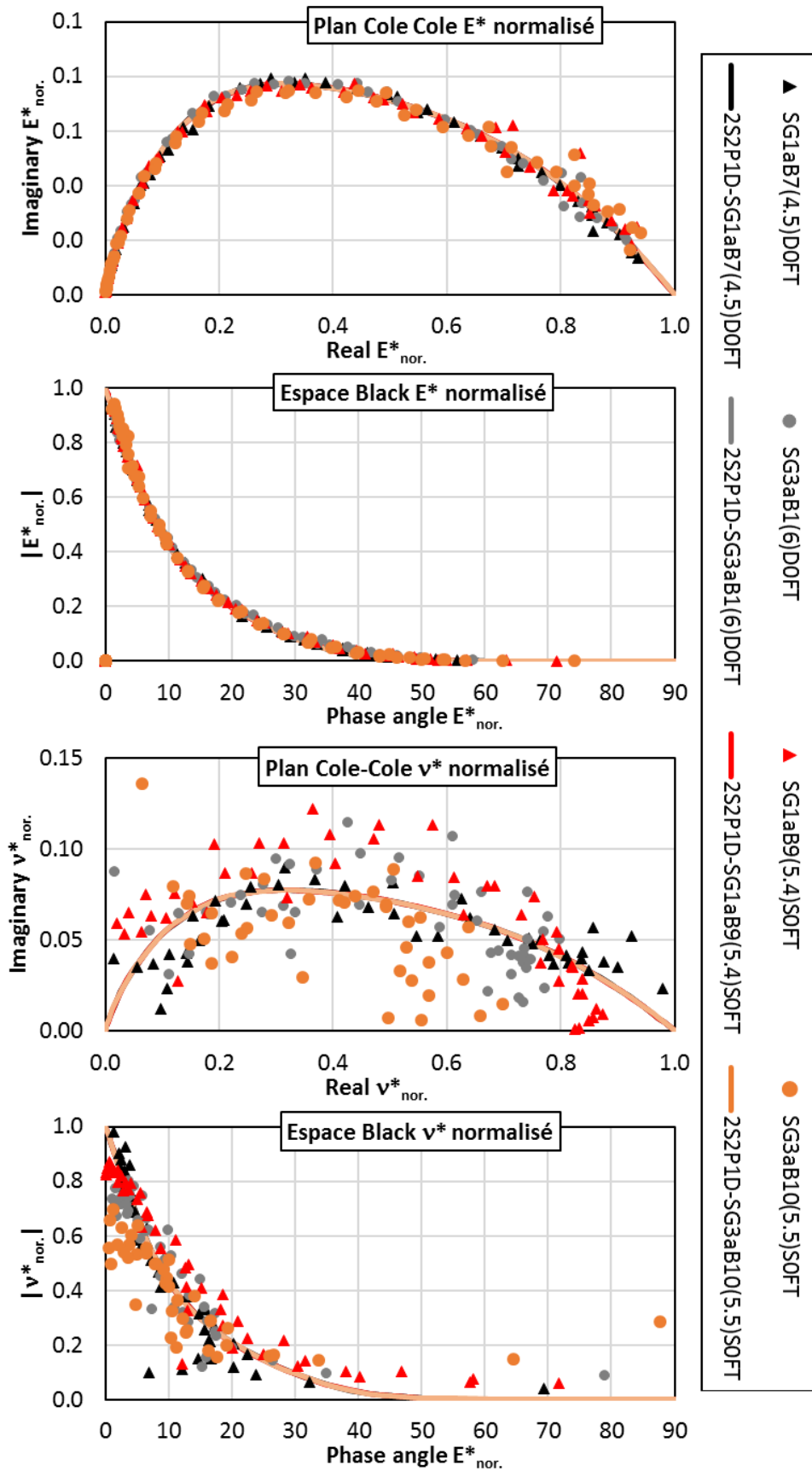


Figure 6-22. Valeurs de E^* et v^* normalisés pour des éprouvettes vieillies testées à l'état sec dans le plan Cole-Cole et dans l'espace de Black et courbe simulée avec le modèle 2S2P1D

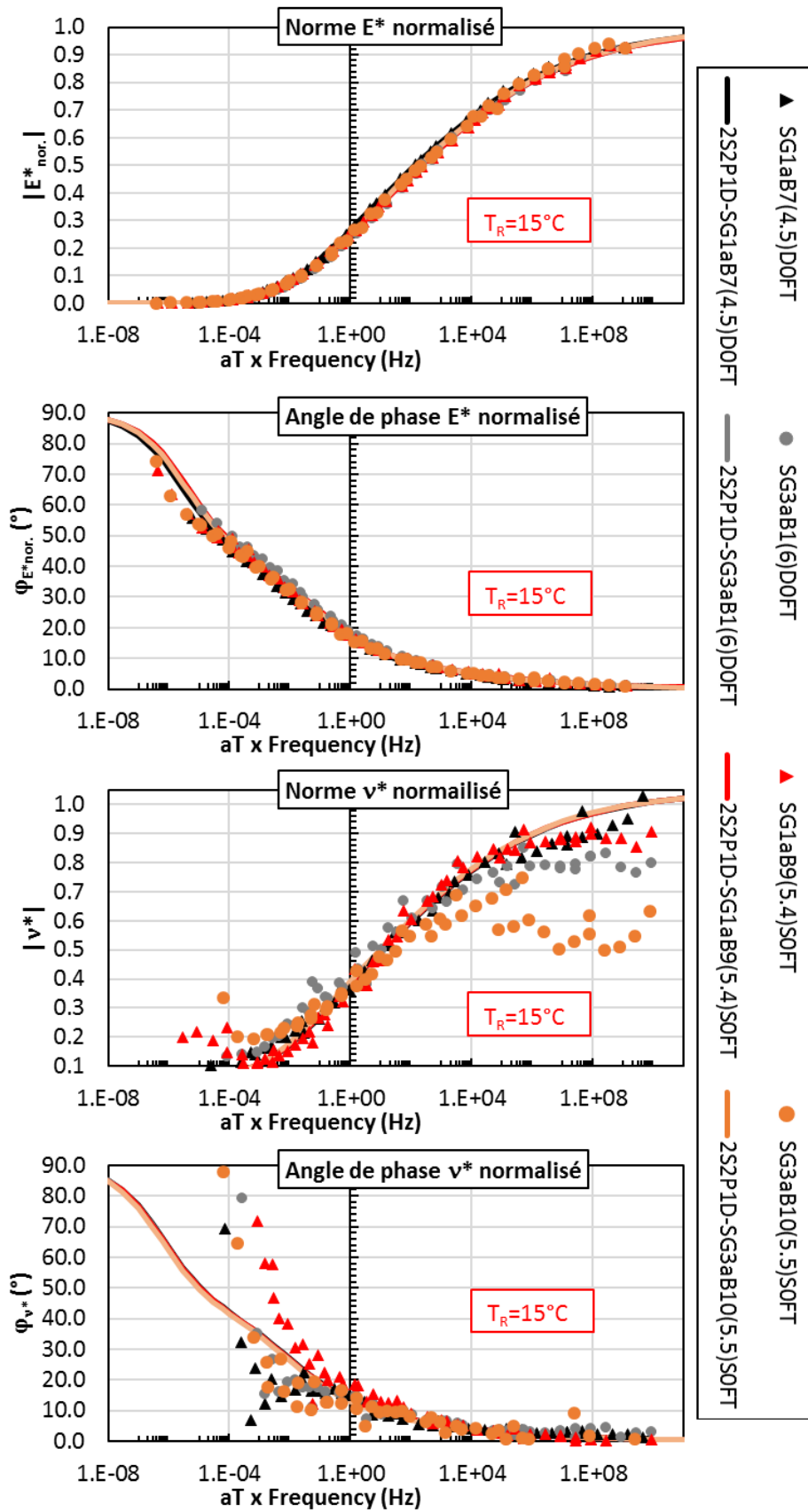


Figure 6-23. Courbes maîtresses E^* et v^* normalisés des éprouvettes vieilles testées à l'état sec et courbes simulées à l'aide du modèle 2S2P1D

6.2.3 Effet du vieillissement sur les éprouvettes testées à sec

Dans cette partie, on compare les résultats des essais E^* du matériau non-vieilli avec le matériau vieilli en utilisant les constantes du modèle 2S2P1D obtenues pour chaque éprouvette.

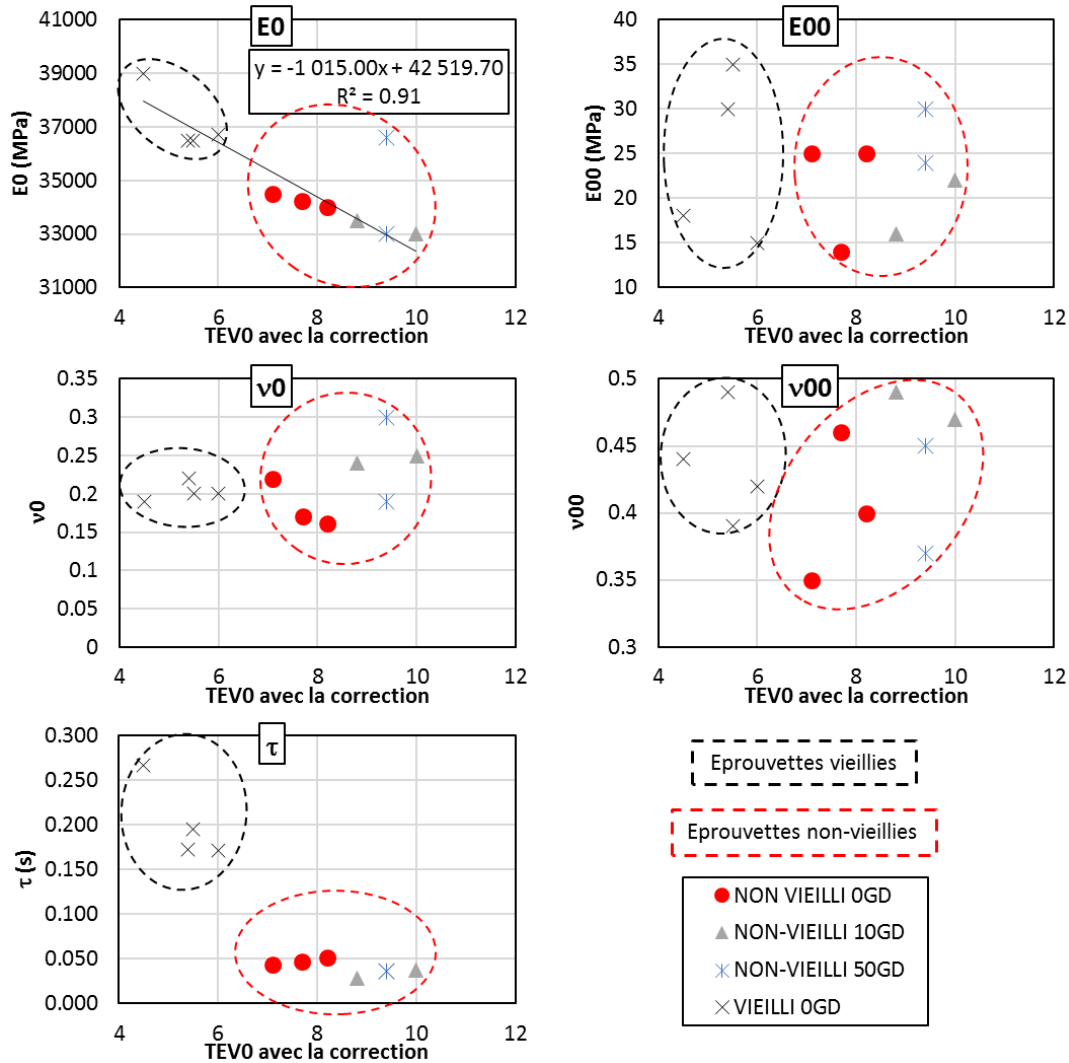


Figure 6-24. E_0 , E_{00} , v_0 , v_{00} , τ en fonction de teneur en vide avec correction de 2% pour les 4 éprouvettes saturées ayant subi les cycles de GD (Cf. résultat de campagne X)

Les résultats présentés Figure 6-24 montrent que les constantes (E_0 et τ) semblent dépendre de la teneur en vide. En particulier, une évolution linéaire de E_0 en fonction de la teneur en vide permet de décrire les résultats indépendamment du vieillissement du matériau. Cette variation est significative : lorsque la teneur en vide augmente de 1%, E_0 diminue environ de 1000 MPa. Les constantes E_{00} , v_0 et v_{00} ne semblent pas influencées par la TEV.

Comme montré précédemment, les autres constantes k , h , β , δ sont des constantes qui ne dépendent que de la nature du bitume.

Les valeurs du module normalisé et du coefficient de Poisson normalisé sont tracées dans les axes Cole-Cole et Black (Figure 6-25). L'effet du vieillissement est clairement observé grâce à cette représentation.

Les courbes du module normalisé nous permettent mieux observer l'effet de vieillissement. Le résultat montre que le vieillissement diminue toujours l'angle de phase du module normalisé.

Les résultats en fonction de la fréquence équivalente (courbes maîtresses) sont présentés Figure 6-26. Ils montrent que le vieillissement diminue toujours l'angle de phase du module normalisé et augmente son module dans le domaine des moyennes et basses fréquences équivalentes.

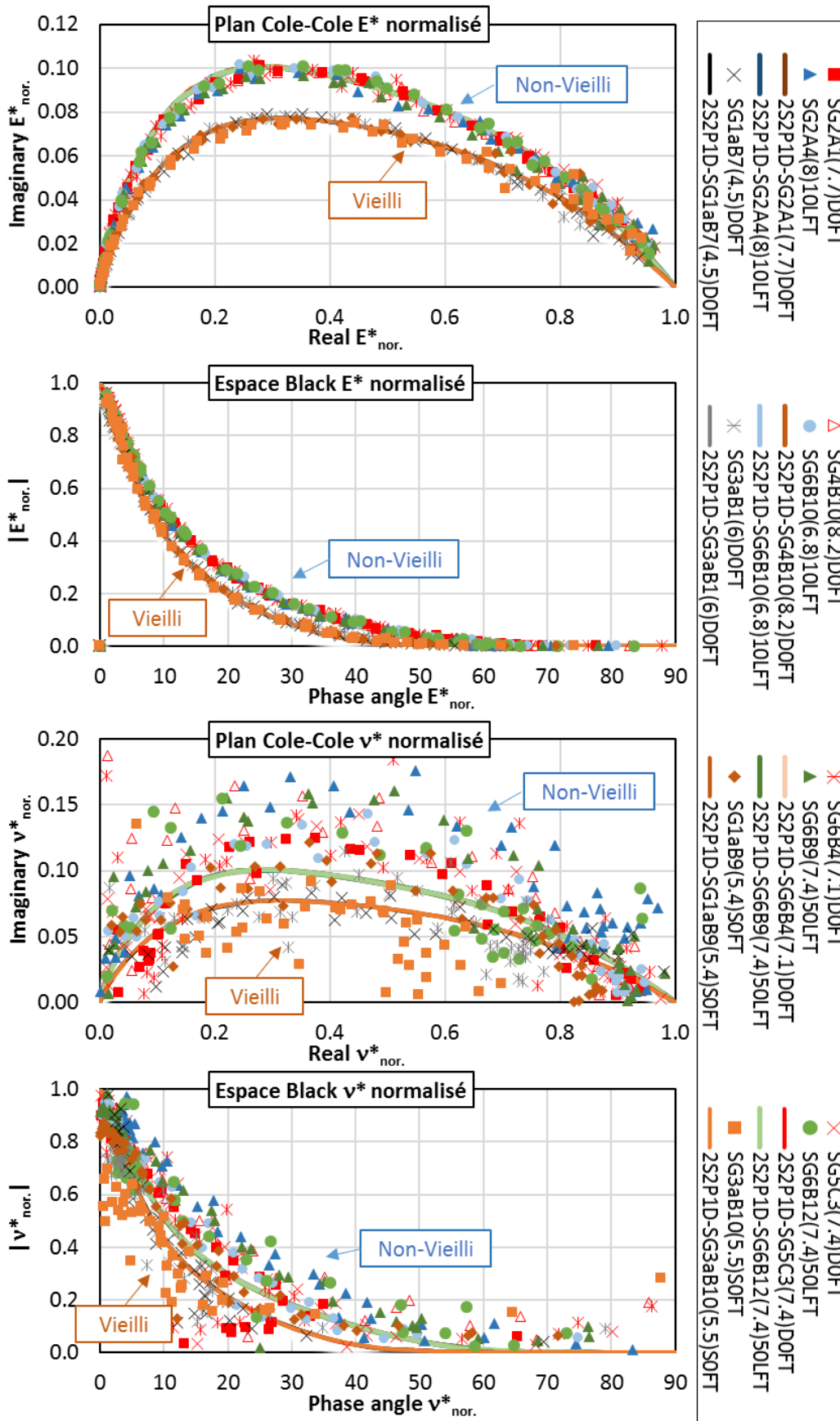


Figure 6-25. Résultats dans le plan Cole-Cole et dans l'espace de Black de E^* normalisé et v^* normalisé pour les éprouvettes non-vieilles et vieilles (testées à l'état sec)

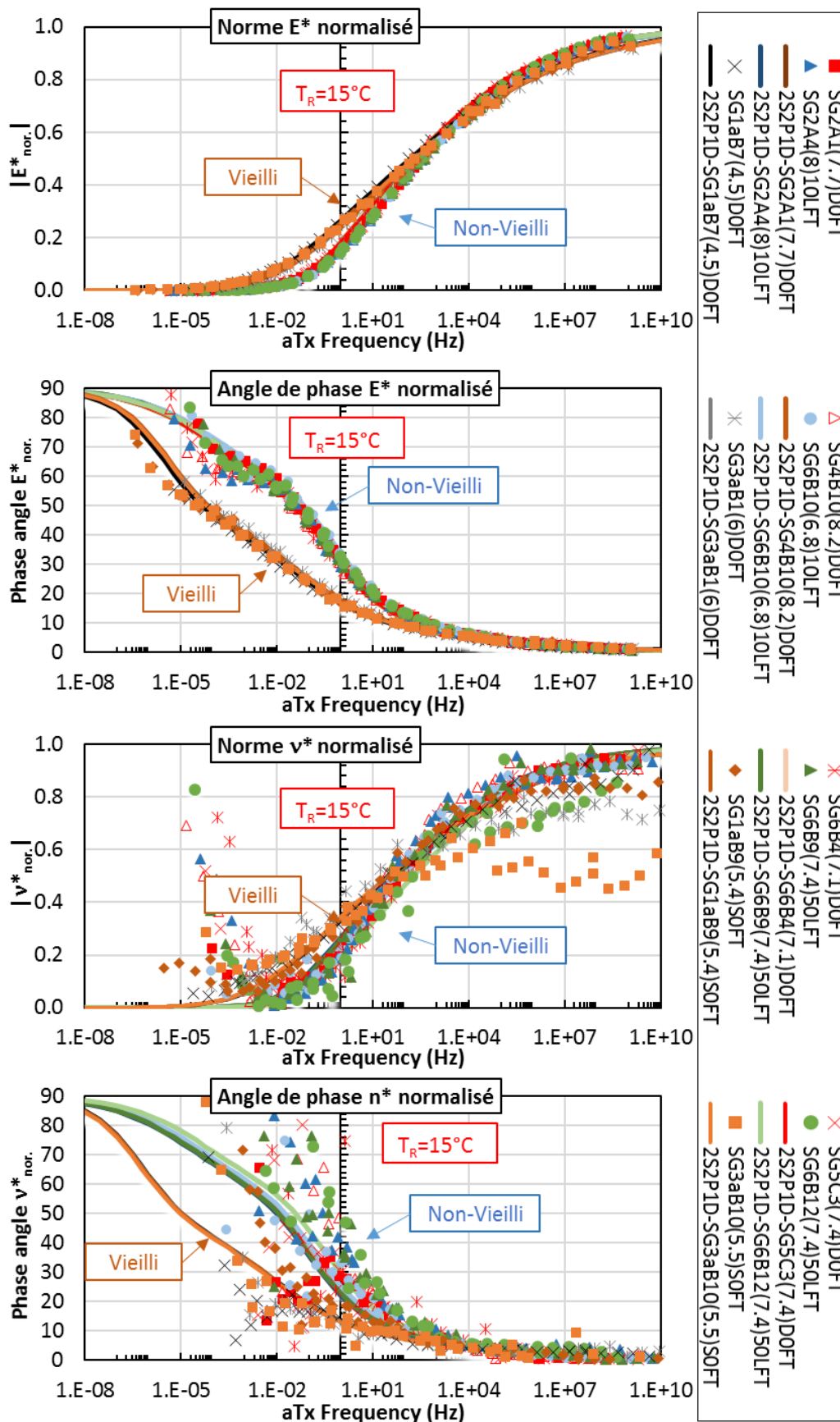


Figure 6-26. Courbes maîtresses de E^* et v^* normalisés des éprouvettes non-vieillies et vieilles (testées à l'état sec) et courbes simulées à l'aide du modèle 2S2P1D

6.2.4 Epreuve 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 observable 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 de 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 lors 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 varié lors de l'essai.

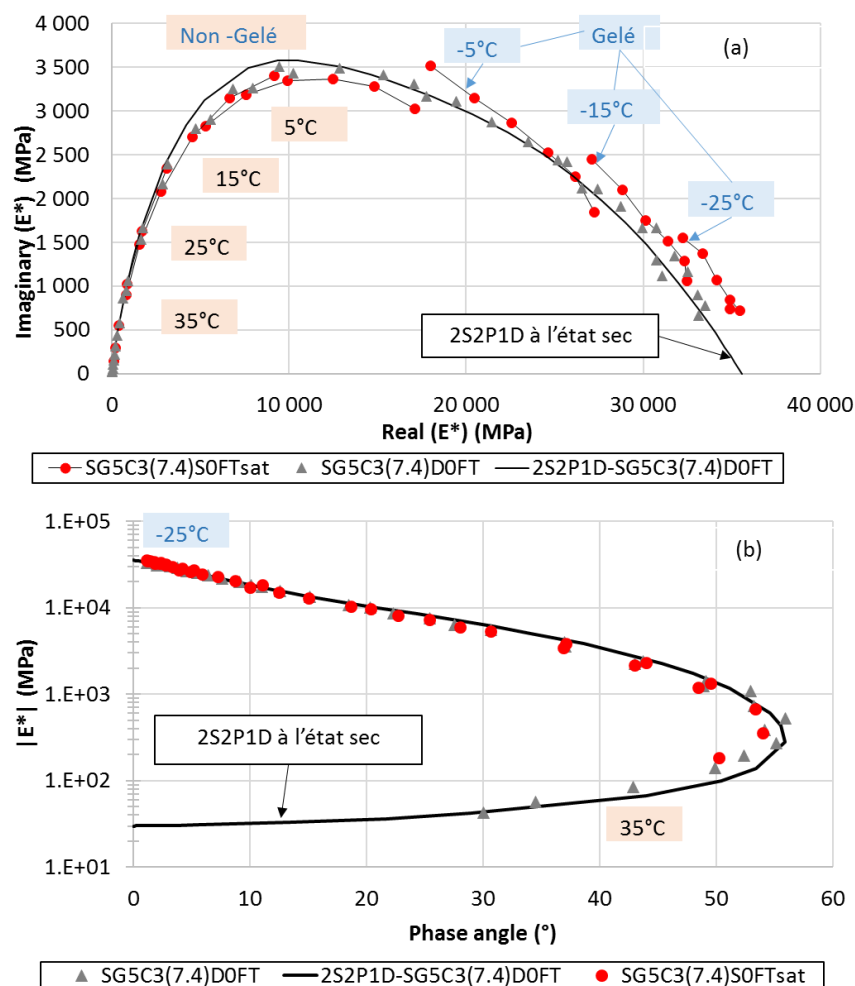


Figure 6-27. Module complexe dans le plan Cole-Cole et l'espace de Black – essais sur éprouvette SG5C3(7.4)

La Figure 6-27 présente les résultats expérimentaux de deux essais dans le plan Cole-Cole, et dans l'espace de Black. Aux températures négatives (-5°C, -15°C, -25°C), la norme du

Projet National DVDC – Durée de Vie Des Chaussées 52 / 67

module complexe de l'éprouvette saturée est supérieure à celle de l'éprouvette sèche (environ 5%, Figure 6-28.a), les angles de phase restent assez identiques pour les 2 essais. Aux températures positives (5°C, 15°C, 25°C et 35°C), les angles de phase ne varient pas significativement (Figure 6-28.b). Les valeurs du module complexe sont plus faibles (de l'ordre de 4% Figure 6-28)

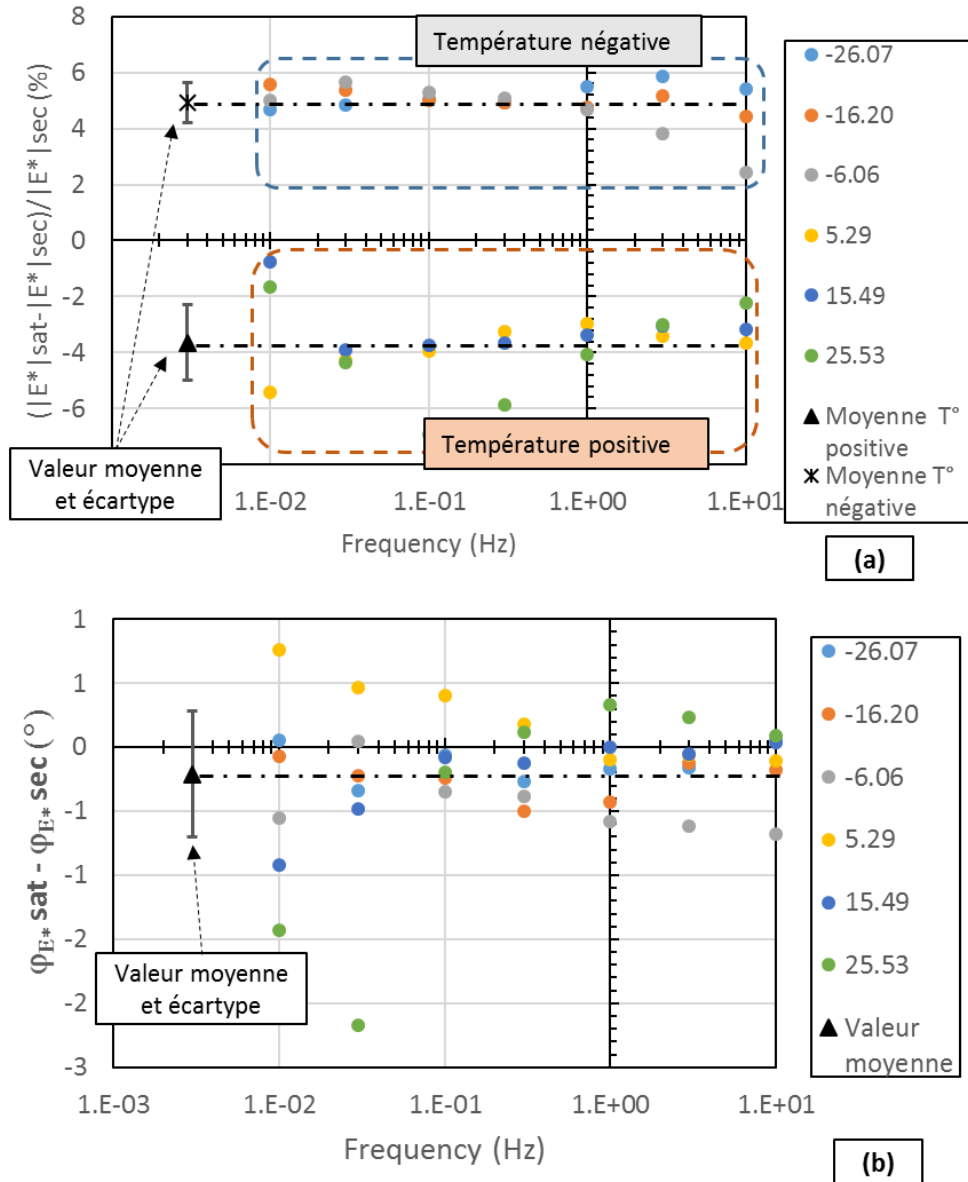


Figure 6-28. Différence relative entre la norme de E^* (a) et Différence d'angle de phase de E^* entre les essais réalisés sec et saturé (éprouvette SG5C3(7.4))

En outre, le principe d'équivalence temps température n'est pas respecté pour l'éprouvette saturée aux températures négatives (car les points expérimentaux ne décrivent pas une courbe unique). On peut cependant construire des courbes maîtresses de la norme et de l'angle de phase de E^* en distinguant des aT pour la norme et des aT pour l'angle de phase (figure 6-29 à 6-31). 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 6-29 présente les valeurs des aT et la loi WLF calibrée avec les résultats à l'état sec.

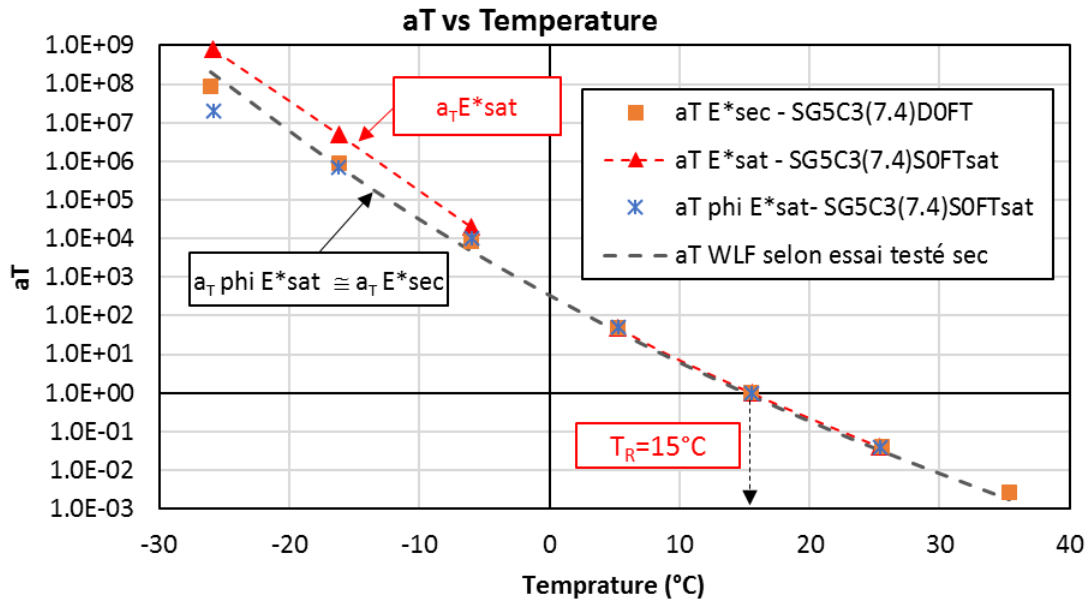


Figure 6-29. Comparaison des coefficients de translation a_T vs Température

Aux températures négatives, les a_T de l'éprouvette testée saturée sont de l'ordre de 10 fois plus grand que ceux de l'éprouvette testée à sec. Les mêmes valeurs de a_T sont obtenues pour les température positives. La différence est due à la formation de glace dans les vides aux températures négative. Cette glace se comporte comme du granulat complémentaire qui rigidifie le matériau mais ne modifie pas le liant.

Les Figure 6-30 et Figure 6-31 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 $a_T \phi E^*$ pour l'essai sur l'éprouvette saturée.

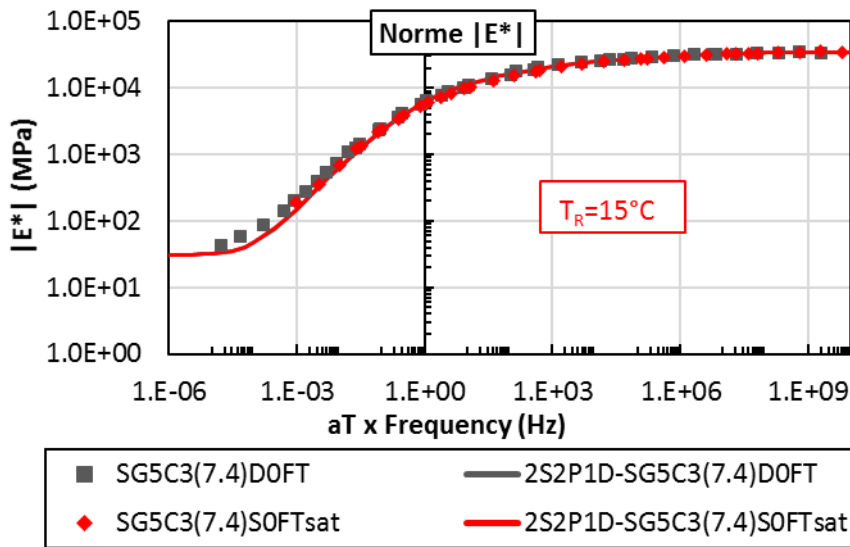


Figure 6-30. Courbes maîtresses de la norme du module complexe avec les coefficients de translation $a_T(E^*)$ de la figure 6-29

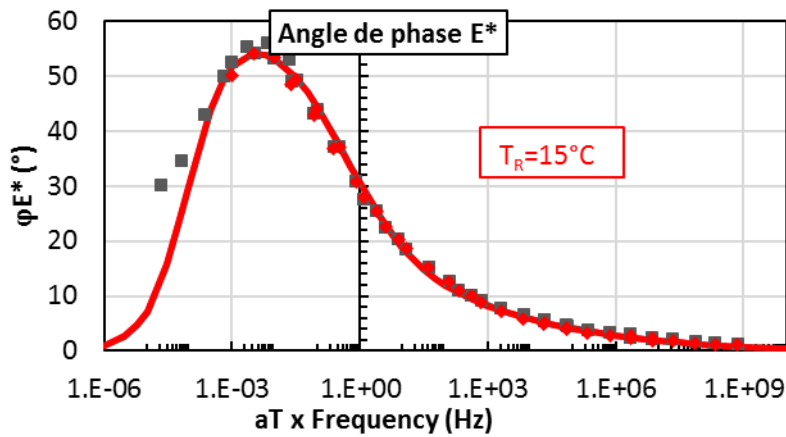


Figure 6-31. Courbes maîtresses de l'angle de phase du module complexe en utilisant les coefficients de translation $a_T(\phi_{E^*})$ pour l'éprouvette testée saturée ($T_R=15^\circ\text{C}$)

Les courbes maîtresses du coefficient de Poisson complexe sont présentées Figure 6-32. 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^* (Figure 6-29) 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.

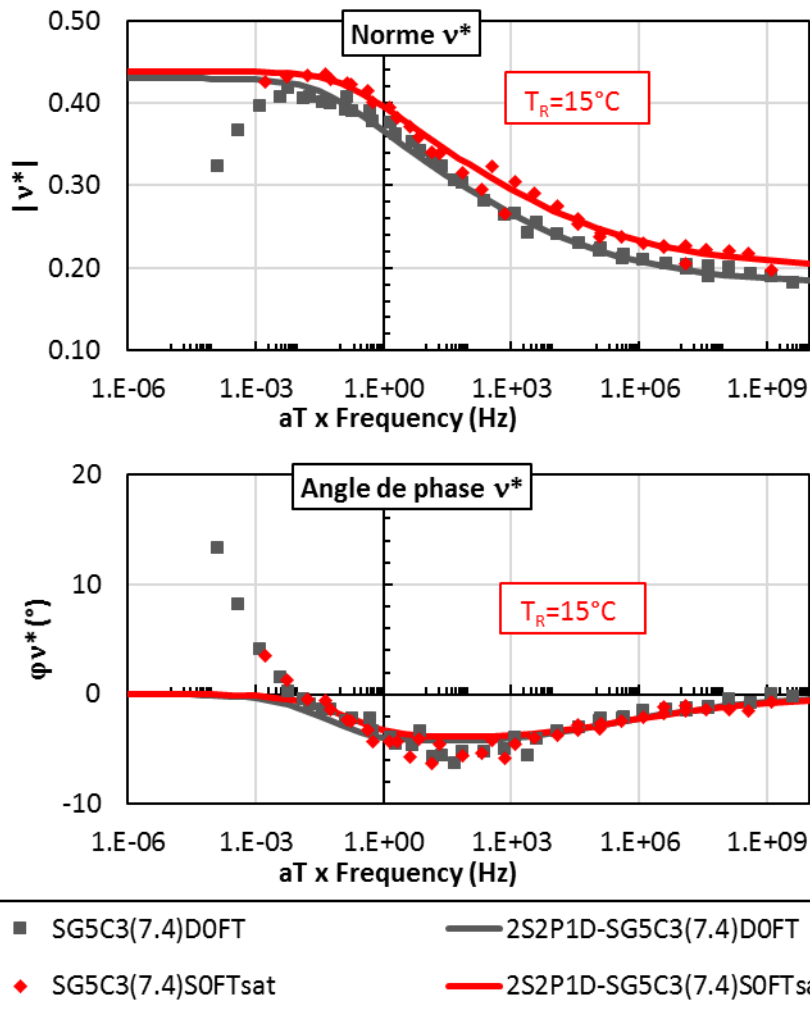


Figure 6-32. Courbes maîtresses de la norme de l'angle de phase du coefficient Poisson complexe en utilisant les mêmes coefficients de translation a_T que pour E^* ($T_R=15^\circ\text{C}$)

6.3 Essais TSRST

Dans cette partie, les résultats de 13 d'essais TSRST sont présentés. Ces 13 éprouvettes non-vieilles ont été différemment conditionnées (Cf. Tableau 6-7) afin d'étudier les effets de l'eau et du gel/dégel.

Tableau 6-7. Eprouvettes testées pour l'essai TSRST

Eprouvettes	Saturation (DS%)	Cycles GD	Re-Saturation après cycles GD (DS%)	Séchage sous vide	Etat pendant d'essai	Essai
SG5C12(6)	Non	0	Non	Non	Sec	TSRST
SG5C13(7.3)	Non	0	Non	Non	Sec	TSRST
SG7D7(6.3)	Non	0	Non	Non	Sec	TSRST
SG1A9(6.7)	Oui (63.0%)	0	Non	Non	Saturé	TSRST
SG1A13(6.9)	Oui (75.3%)	0	Non	Non	Saturé	TSRST
SG7D6(6.9)	Oui (77.7%)	0	Non	Non	Saturé	TSRST
SG5C9(7)	Oui (78.3%)	0	Non	Non	Saturé	TSRST
SG1A10(5.9)	Oui (70.0%)	10	Non	Oui	Sec	TSRST
SG5C11(6.4)	Oui (66.2%)	10	Non	Oui	Sec	TSRST
SG7D1(6.4)	Oui (77.9%)	10	Non	Oui	Sec	TSRST
SG1A12(5.6)	Oui (73.1%)	10	Oui (82.0%)	Non	Saturé	TSRST
SG2A12(5.6)	Oui (74.7%)	10	Oui (76.2%)	Non	Saturé	TSRST
SG5C10(5.7)	Oui (73.6%)	10	Oui (84.4%)	Non	Saturé	TSRST

6.3.1 Effet de la saturation lors de l'essai

6.3.1.1 Epruvettes sans cycle de gel/dégel

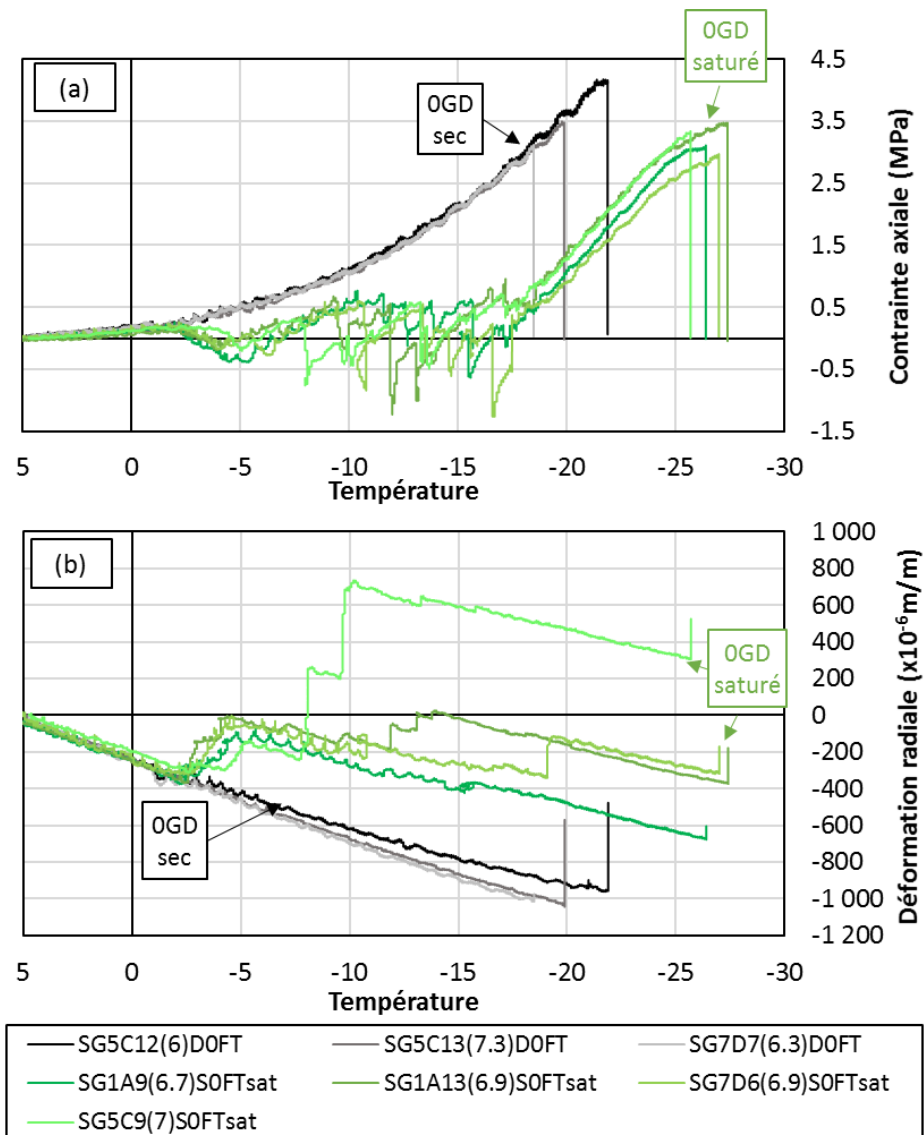


Figure 6-33. Contrainde vs Température (a); Déformation radiale vs Température (b) pendant l'essai TSRST sur les éprouvettes ayant subies 0 cycle de GD

La Figure 6-33 montre les résultats des éprouvettes non-conditionnées et des éprouvettes saturées lors de l'essai sans cycles GD. L'évolution de la courbe contrainte-température des éprouvettes saturées sans cycles GD se compose de 4 périodes :

- Première période ($T > -2^{\circ}\text{C}$): l'éprouvette saturée se comporte comme l'éprouvette sèche jusqu'à une température sur la surface de l'ordre de -2°C . Aucune glace n'est sans doute apparue au sein de l'éprouvette.
- Deuxième période ($-2^{\circ}\text{C} \geq T > -5^{\circ}\text{C}$) : La contrainte axiale diminue (traction), et la déformation radiale augmente (extension) par rapport aux essais sur l'éprouvette sèche. L'eau dans les vides se transforme en glace ce qui induit une dilatation globale de l'éprouvette compensée dans la direction axiale par une diminution de la contrainte (moins de traction).

- Troisième période ($-5^{\circ}\text{C} \geq T > -17^{\circ}\text{C}$) : Une fluctuation autour de 0 de la contrainte axiale, apparait. Une explication du phénomène pourrait être donnée par la formation de glace dans les micro (voire nano) pores existant dans l'éprouvette.
- Quatrième période ($-17^{\circ}\text{C} \geq T$) : les courbes contrainte-température et déformation radiale-température reprennent des évolutions parallèles pour les deux types d'éprouvette. A ces températures toute l'eau est à l'état de glace.

6.3.1.2 *Eprouvettes avec cycles de gel/dégel (10 cycles GD)*

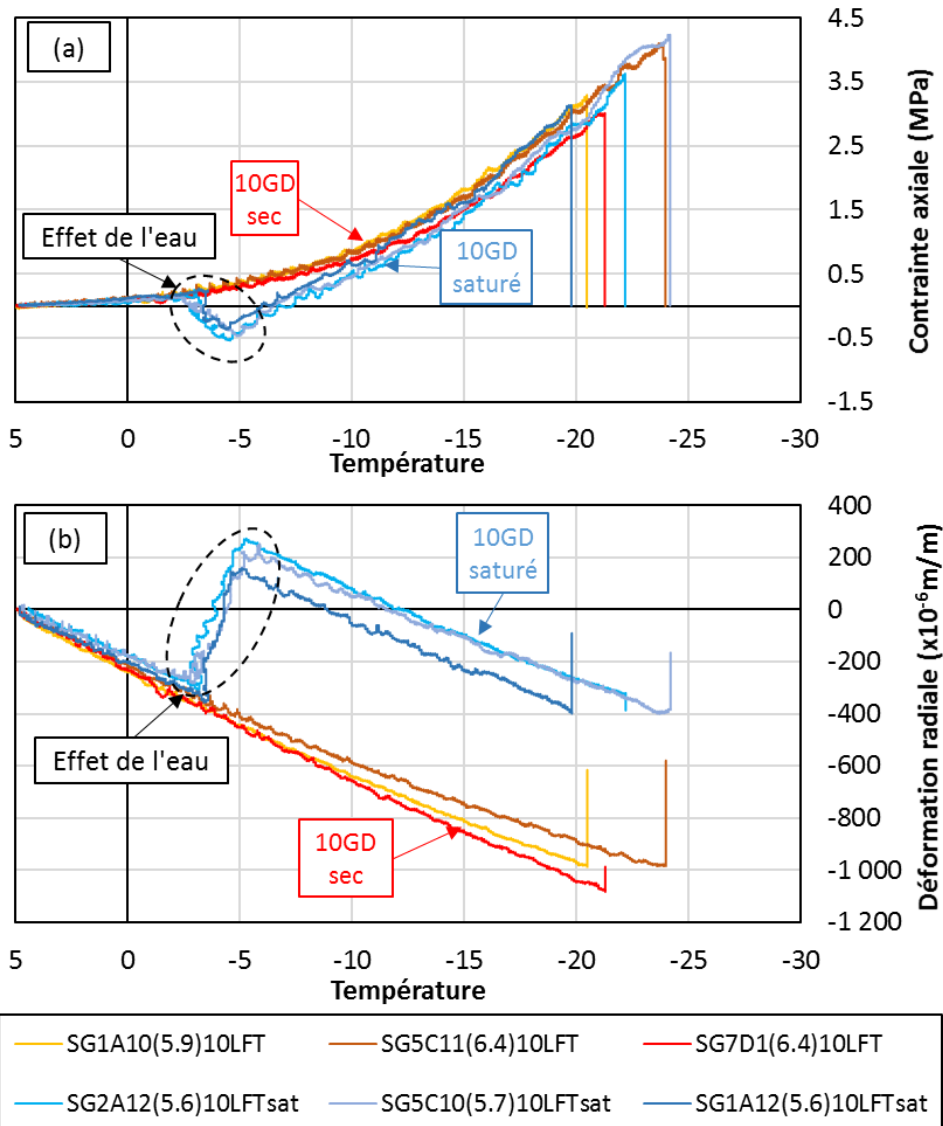


Figure 6-34. Contrainte vs Température (a); Déformation radiale vs Température (b) pendant l'essai TSRST sur les éprouvettes ayant subi 10 cycles de GD

Pour les éprouvettes ayant subi des cycles de GD et testées à l'état saturé, l'évolution de la courbe contrainte-température ne se compose plus que de 3 périodes. La période 3 observée pour les éprouvettes testées saturé ayant subi aucun cycle de GD a disparu. Une explication de cette disparition pourrait être la disparition d'une grande partie des micro (ou nano) pores car leurs dimensions augmentent lors des cycles de GD:

- Première période ($T > -2^{\circ}\text{C}$) et Deuxième période ($-2^{\circ}\text{C} \geq T > -5^{\circ}\text{C}$) identiques à celles observées pour les éprouvettes sans GD. Lors de la deuxième période la déformation radiale augmente avec une pente d'environ $180\mu\text{def}/^{\circ}\text{C}$.

- Troisième période ($-5^{\circ}\text{C} \geq T$) : A partir de -5°C , la courbe contrainte-température reprend une évolution négative et rejoint vers -12°C celle des éprouvettes sèches avec cycles GD. Les courbes d'évolution de la déformation radiale sont approximativement parallèles.

6.3.2 Effet des cycles de gel/dégel

6.3.2.1 Eprouvettes testées à l'état sec

La Figure 6-35 présente les résultats de l'essai TSRST pour les éprouvettes non-conditionnées et les éprouvettes conditionnées avec 10 GD testées à l'état sec. Il y a des différences très faibles entre les différents résultats expérimentaux.

Sur la courbe contrainte-température, on constate que à même température, la contrainte des éprouvettes non-conditionnées est légèrement plus grande que celle des éprouvettes conditionnées. Cependant la contrainte à la rupture ne change pas entre les deux types d'éprouvette.

Sur la courbe de déformation radiale-température, aucune variation significative n'est visible. Il semble que les cycles GD n'affectent pas l'évolution de la déformation radiale pendant l'essai TSRST.

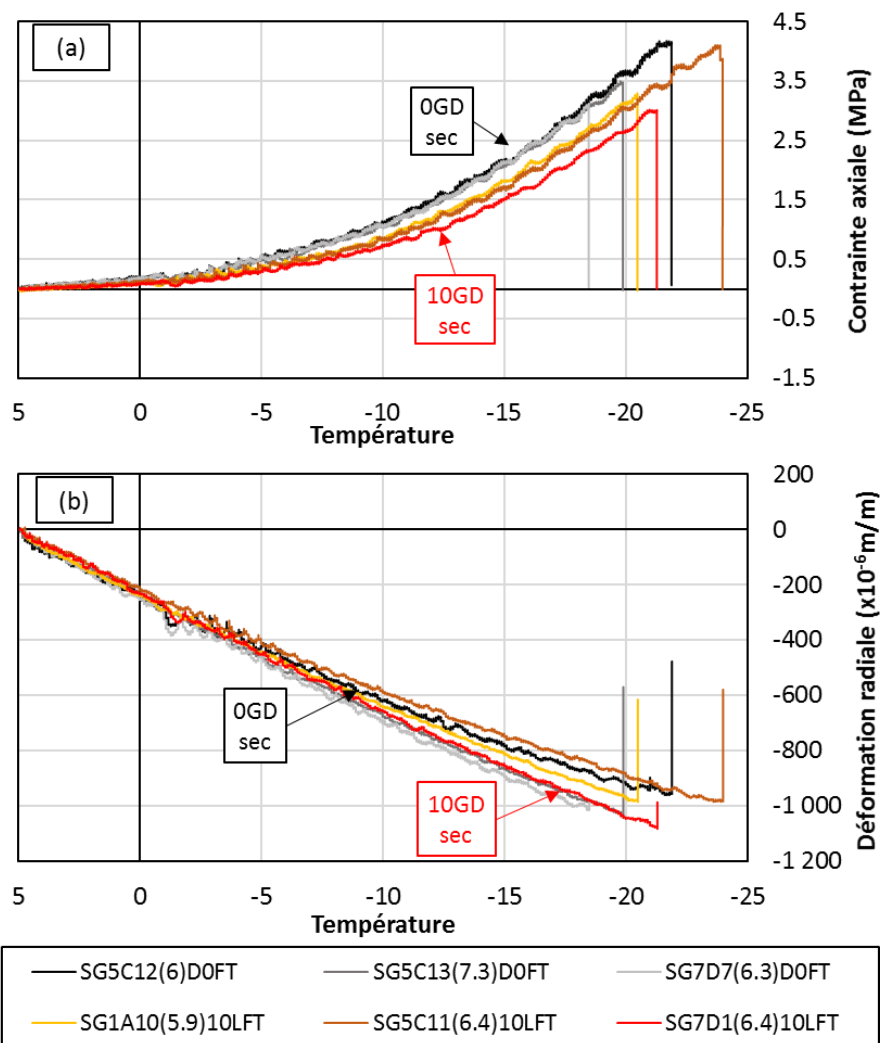


Figure 6-35. Contrainte vs Température (a); Déformation radiale vs Température (b) pendant l'essai TSRST sur les éprouvettes testées à l'état sec

6.3.2.2 Epruvettes testées à l'état saturé

La Figure 6-36 compare les résultats des épruvettes testées à l'état saturé. L'influence de l'eau sur le comportement à basse température du matériau dépend clairement de l'histoire du conditionnement appliquée. Des explications sur les différences sont données aux paragraphes précédents.

La température à la rupture des épruvettes n'ayant subi aucun cycle de GD est très inférieure à celle des épruvettes ayant subi 10 cycles de GD, tandis que la contrainte à la rupture est quasiment identique. La déformation radiale des épruvettes ayant subi 0GD est plus fluctuante que celle des épruvettes avec 10GD.

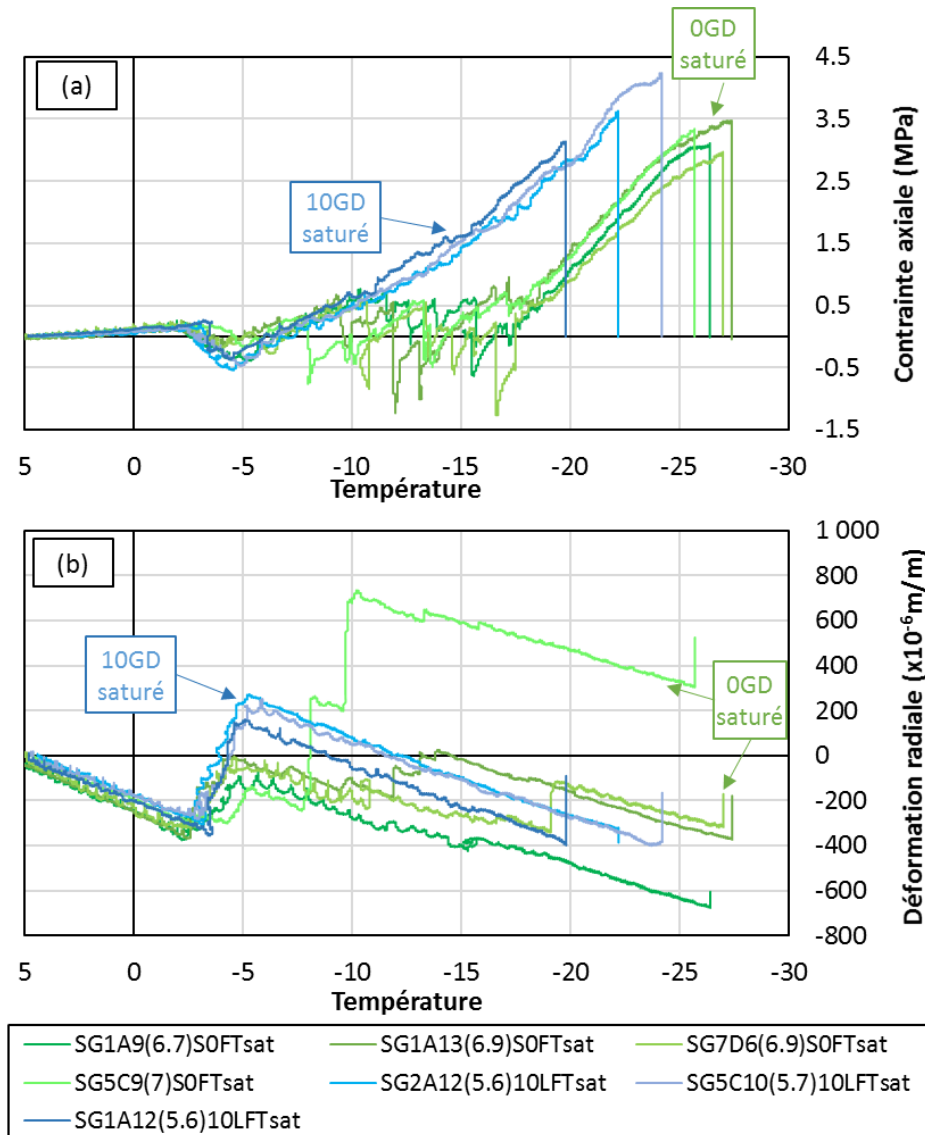


Figure 6-36. Contrainte vs Température (a); Déformation radiale vs Température (b) pendant l'essai TSRST sur les épruvettes testées à l'état saturé

6.3.3 Ensemble des résultats de TSRST

la Figure 6-37 présente tous les résultats des essais TSRST.

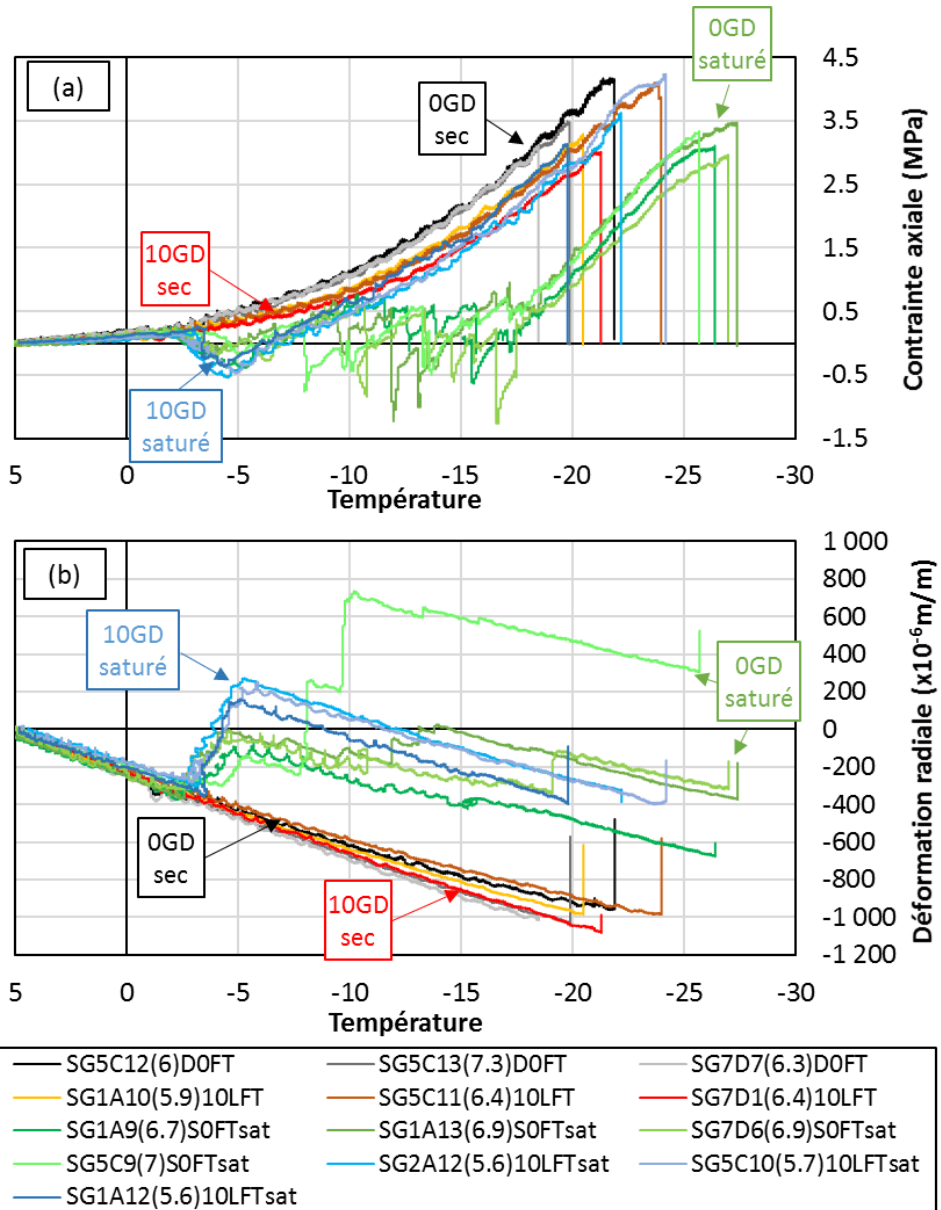


Figure 6-37. Contraite vs Température (a); Déformation radiale vs Température (b) pendant l'essai TSRST

Tableau 6-8. Résultats des essais TSRST

Eprouvettes	Caractéristiques à la rupture		
	Température T_{rup} (°C)	Contrainte σ_{rup} (MPa)	Déformation radiale $\varepsilon_{r.rup}$ ($\times 10^{-6}$ m/m)
SG5C12(6)D0FT	-21.9	4.1	-915
SG5C13(7.3)D0FT	-19.8	3.5	-1046
SG7D7(6.3)D0FT	-18.4	3.0	-1029
Moyenne	-20.0	3.52	-996.67
Ecart type	1.24	0.39	54.44
SG1A9(6.7)S0FTsat	-26.4	3.1	-727
SG1A13(6.9)S0FTsat	-27.4	3.5	-385
SG7D6(6.9)S0FTsat	-26.6	2.8	-366
SG5C9(7)S0FTsat	-25.7	3.3	283
Moyenne	-26.52	3.21	-299
Ecart type	0.48	0.23	291
SG1A10(5.9)10LFT	-20.5	3.2	-963
SG5C11(6.4)10LFT	-23.9	4.0	-1086
SG7D1(6.4)10LFT	-21.3	3.0	-1072
Moyenne	-21.90	3.40	-1040.33
Ecart type	1.33	0.40	51.56
SG1A12(5.6)10LFTsat	-22.2	3.6	-395
SG2A12(5.6)10LFTsat	-24.2	4.2	-395
SG5C10(5.7)10LFTsat	-19.8	3.1	-414
Moyenne	-22.06	3.67	-401
Ecart type	1.51	0.38	8.5

La température, la contrainte et la déformation à la rupture des essais TSRST sont données dans Le Tableau 6-8. La valeur moyenne et l'écart type sont aussi indiqués. Les résultats repris dans la Figure 6-38 montrent que :

- La déformation radiale à la rupture est toujours inférieure (de l'ordre de 6×10^{-4} m/m) pour les éprouvettes saturées (moins contractante).
- Aucune différence significative n'existe pour la contrainte de rupture.
- La température de rupture est identique pour les éprouvettes (saturée ou non) ayant subi 10 cycles de GD.
- La température de rupture est significativement différente entre les éprouvettes sèches et saturées n'ayant subi aucun cycle de GD. Celle des éprouvettes testées saturées est environ 6°C plus faible.

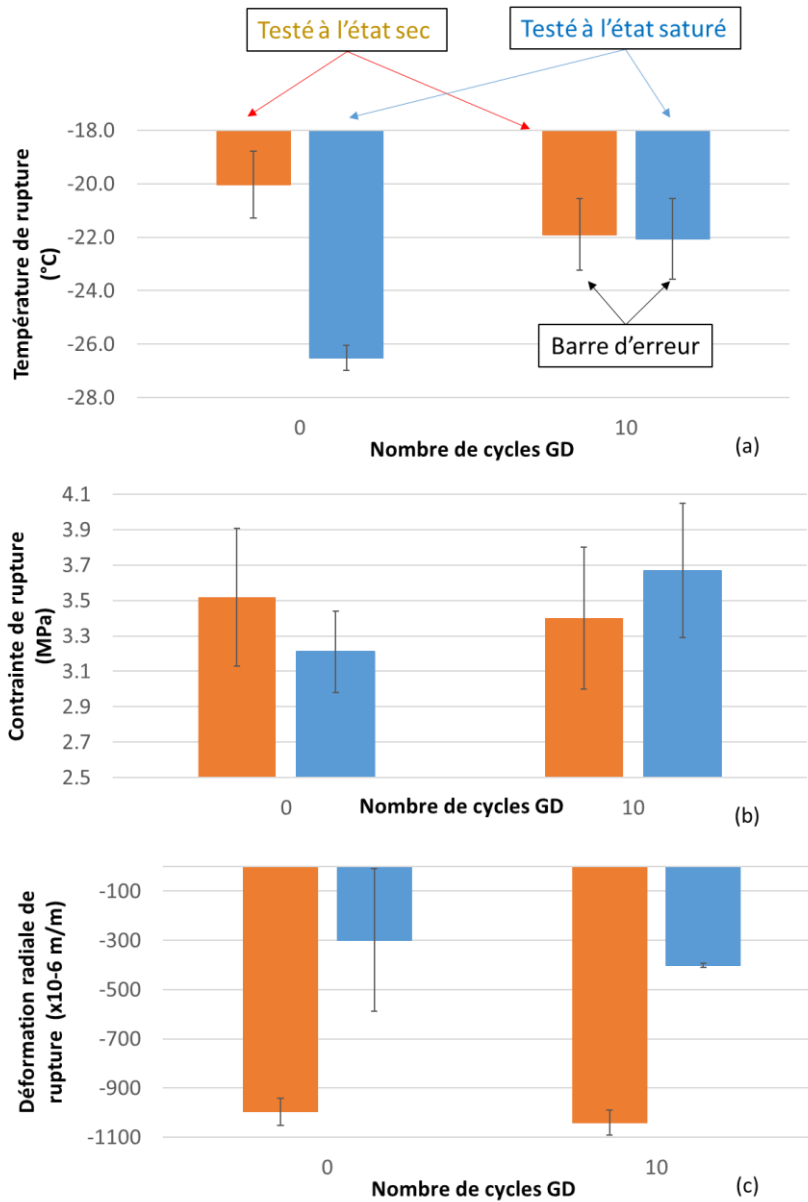


Figure 6-38. Températures de rupture (a), Contrainte de rupture (b), Déformation radiale de rupture (c) selon le nombre de cycle FT et l'état de saturation pendant l'essai

7 Conclusions

Les premiers résultats obtenus lors des deux campagnes expérimentales programmées dans le cadre de la thèse de D.T. Tran ont été présentés (campagne principale et campagne complémentaire).

Les évolutions de la teneur en vides (TEV), de la saturation et du volume des éprouvettes lors du conditionnement ont été étudiées 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.
- L'éprouvette n'est que partiellement saturée même en utilisant une procédure de saturation sous vide, le degré de saturation atteint environ 70% et augmente avec la teneur en vides.
- Lors de l'application des cycles GD, l'éprouvette saturée se dilate d'environ 1% en 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 avec cycles de GD. Cependant le bilan global est une augmentation comprise entre 1% et 2% de teneur en vide.

Les premiers résultats obtenus de la campagne principale montrent que le conditionnement appliqué a un effet négligeable sur les propriétés viscoélastiques linéaires des matériaux testés à sec. Si l'éprouvette est testée à l'état saturé (en fait partiellement saturé), le comportement VEL du matériau est modifié de la manière suivante :

- à température négative, la norme du module complexe de l'éprouvette saturée est supérieure à celle de l'éprouvette sèche (environ 5%)
- à température positive, la valeur des normes E^* est plus faible (environ 4%).
- Les angles de phase restent assez identiques pour une éprouvette saturée ou non.

La modélisation VEL des résultats expérimentaux a été réalisée à l'aide du modèle 2S2P1D développé par l'équipe de l'ENTPE. L'analyse des constantes de calibration pour chaque type de matériau et de conditionnement ont 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 , $C1$ et $C2$ 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, quel que soient le conditionnement et les conditions d'essai.
- Les constantes $E00$, $E0$, $\nu00$ et $\nu0$ dépendent des caractéristiques du squelette granulaire. En particulier, $E0$ évolue en fonction linéaire de la teneur en vide (TEV). Lors que TEV augmente de 1%, $E0$ diminue de 1000MPa environ, tandis que $E00$, $\nu00$ et $\nu0$ ne semblent pas influencées par la TEV.

Les résultats des essais TSRST montrent que :

- les valeurs à la rupture, température, contrainte et déformation radiale, des éprouvettes testées à sec restent assez identiques malgré le conditionnement appliqué.
- La contrainte à la rupture reste identique pour des éprouvettes testées saturées ou sèches.
- La déformation radiale à la rupture est toujours supérieure (de l'ordre de $6 \times 10^{-4} \text{m/m}$) pour les éprouvettes saturées (moins contractante).
- La température de rupture est identique pour les éprouvettes (saturée ou non) ayant subi 10 cycles de GD.

- Entre les éprouvettes sèches et saturées n'ayant subi aucun cycle de GD, la température de rupture diminue significativement (environ 6°C).

La campagne principale se poursuit, en particulier avec la réalisation d'essais de fatigue dont les résultats seront présentés dans un futur rapport.

Bibliographie

- 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.
- 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.
- 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 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'éprouvettes au compacteur de plaque. *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*.
- 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., 2003. General “2S2P1D” Model and Relation Between the Linear Viscoelastic Behaviours of Bituminous Binders and Mixes. *Road Materials and Pavement Design - RMPD*, 4(2), pp. 185-224.
- 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.
- Tran, D., Di Benedetto, H. & Sauzéat, C., 2018. Étude bibliographique sur l'endommagement des enrobés bitumineux à l'eau et au gel. *Rapport N° LC/17/DVDC/09*.
- William, M., Landel, R. & Ferry, J., 1955. *The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquid*. s.l.:Journal of American Chemistry Society.