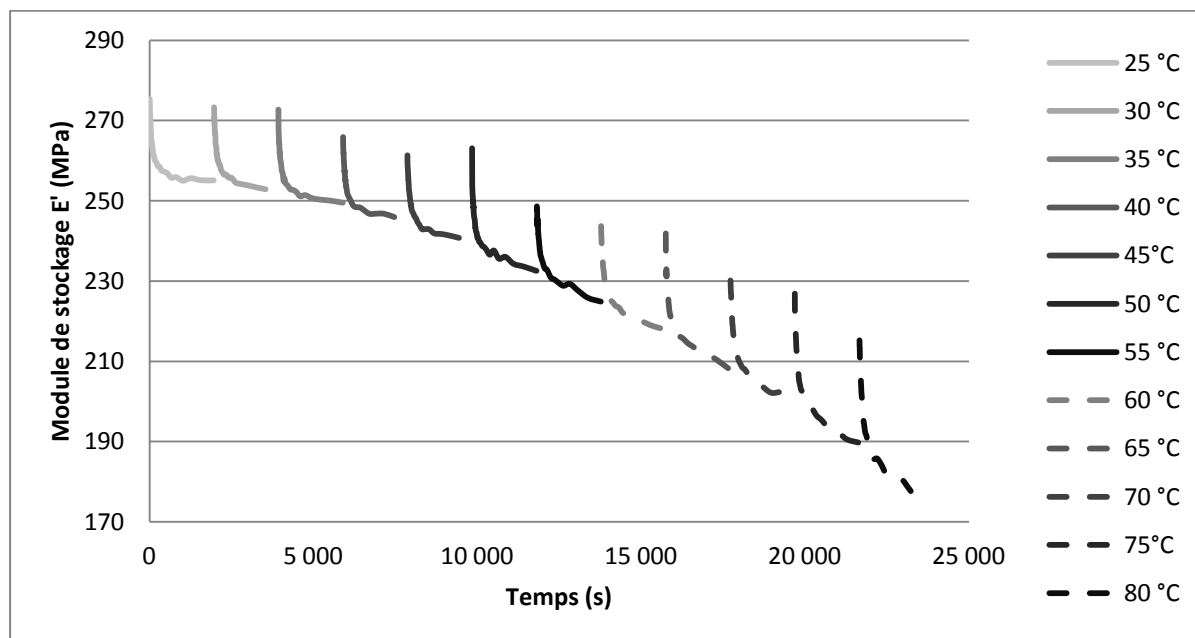


IV. Figure 1. Evolution du module de stockage au cours de l'essai

Le module d'élasticité mesuré par la machine de DMA est inférieur à celui du matériau. Cette différence est attendue vu que l'essai est non-normalisé pour la détermination de module d'élasticité; la taille de l'éprouvette et les conditions de chargements sont loin de celles de la norme. La courbe devient:

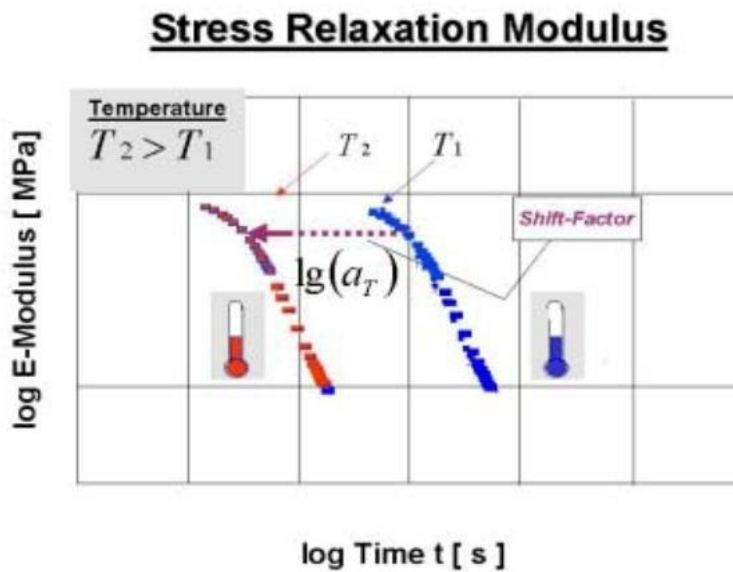


IV. Figure 2. Evolution du module de stockage corrigée

La manière la plus simple de caractériser les propriétés élastiques d'un élastomère est de mesurer son module d'élasticité en fonction de la température. Le module d'un élastomère à un niveau de déformation donné est cependant une fonction du temps ainsi qu'une fonction de la température. Une manière pratique et appropriée de décrire complètement cette double fonctionnalité consiste à utiliser la superposition temps-température (Time-temperature superposition TTS) pour générer des courbes maîtresses et des facteurs de décalage. Le principe de superposition temps-température stipule que le comportement viscoélastique à une température peut être lié à celui à une autre température par un changement d'échelle de temps (Ferry, J.D., 1980). Mathématiquement, cette idée peut être exprimée comme suit:

$$E(T_1, t) = E(T_2, \frac{t}{a_T}) \cdot \frac{\rho(T_1)T_1}{\rho(T_2)T_2} \quad \text{IV.1}$$

où l'effet du changement de température est le même que l'application d'un déplacement horizontal de, $\log a_T$, sur un graphique log-log du module E en fonction du temps t.



IV. Figure 3. Principe de superposition temps-température

Une observation significative, établie par les travaux de (Williams, Landel et Ferry, 1955) WLF, est que pour la transition de l'état caoutchouteux à l'état vitreux pour de nombreux polymères amorphes, la dépendance du facteur de décalage à la température suit la même relation générale. Il s'est avéré que:

$$\log a_T = \frac{C_1(T - T_g)}{C_2 + T - T_g} \quad \text{IV.2}$$

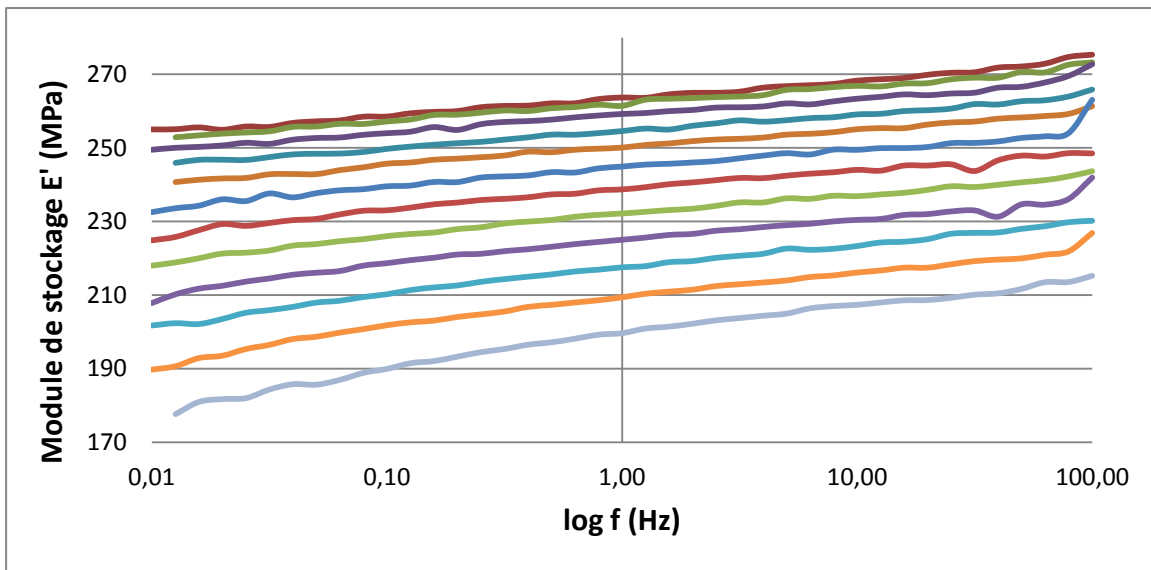
où c_1 et c_2 sont des constantes et T_g est la température de transition vitreuse.

Cette relation est valable autour de la température de transition vitreuse qui varie d'un élastomère à l'autre. Cette

équation est également valable pour des températures plus élevées - mais jamais valable pour des températures plus basses. Connaissant a_T , on peut calculer le temps de relaxation à n'importe quelle température à partir de l'équation:

$$\tau(T) = a_T \tau(T_g) \quad \text{IV.3}$$

où $\tau(T_g)$ est le temps de relaxation à la température de transition vitreuse T_g .



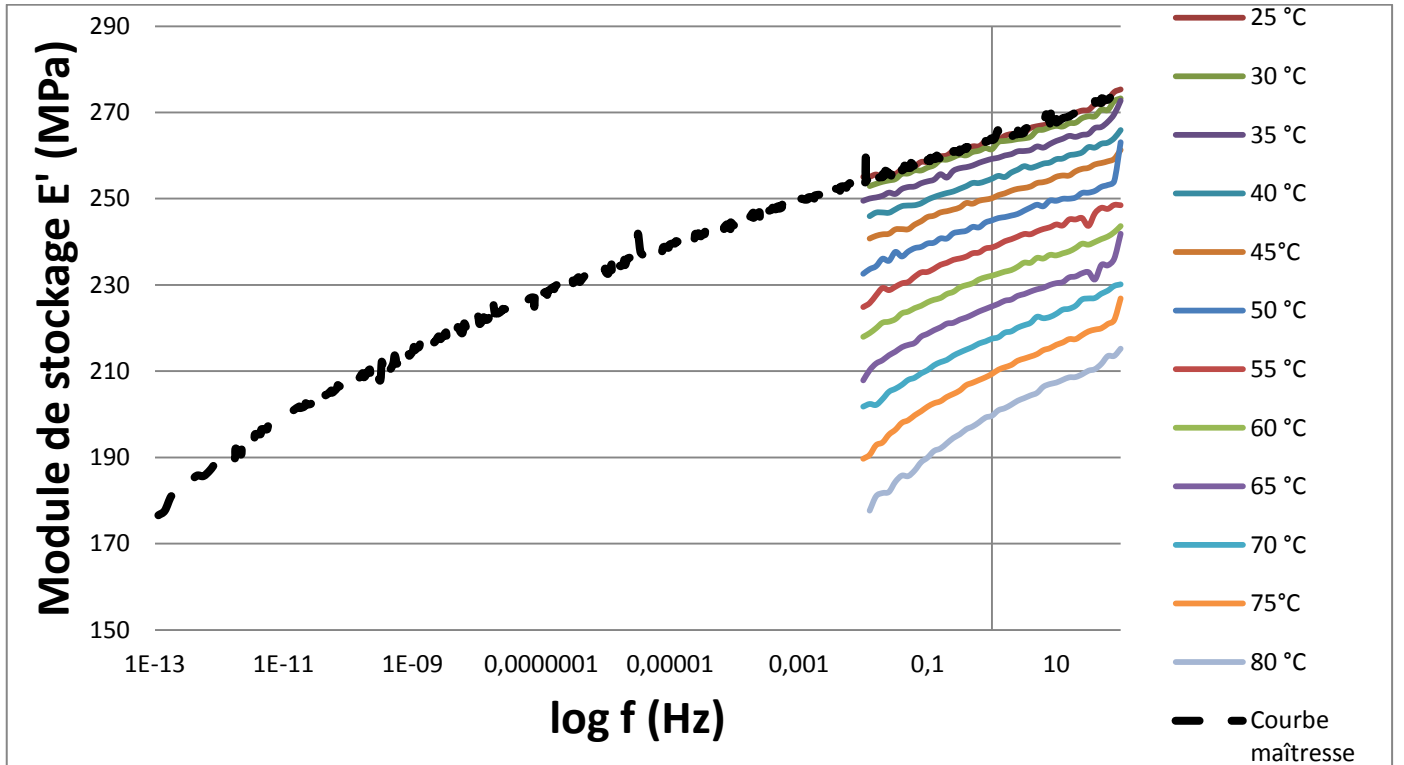
IV. Figure 4. Module de stockage en fonction de la fréquence après la séparation temps-Température

La température de référence choisie pour générer la courbe maîtresse est $T_r = 25^\circ\text{C}$. La séparation temps-température est réalisée à l'aide du logiciel STAR^e en faisant des translations horizontales en fréquence. Les paramètres de l'équation de WLF correspondants sont:

$$\log a_T = \frac{17.44(T - 298)}{51.6 + T - 298} \quad \text{IV.4}$$

avec $T_r = 25^\circ\text{C} = 298^\circ\text{K}$, $C_1 = 17.44$; $C_2 = 51.6^\circ\text{K}$

La courbe maîtresse trouvée est illustrée dans la figure suivante:



IV. Figure 5. Courbe maîtresse avec température de référence égale à 25 °C

Le comportement des matériaux peut être décrit comme des combinaisons d'éléments Maxwell et Voigt connectés entre eux (Modèles rhéologiques bibliographie). Un modèle simple est le modèle Maxwell généralisé qui est juste un ensemble d'éléments Maxwell connectés en parallèle (Figure I.41). Dans le modèle de Maxwell généralisé, la contribution au module de relaxation de chaque élément de Maxwell est donnée par l'équation :

$$G_i(t) = G_i e^{-t/\tau_i} \quad \text{IV.5}$$

Où G_i est la raideur du ressort et τ_i est le temps de relaxation de l'élément, défini par:

$$\tau_i = \eta_i / G_i \quad \text{IV.6}$$

Où η_i est l'amortissement de l'amortisseur. Le module de relaxation du modèle complet est la somme des modules de relaxation de tous les éléments de Maxwell connectés en parallèle, comme suit:

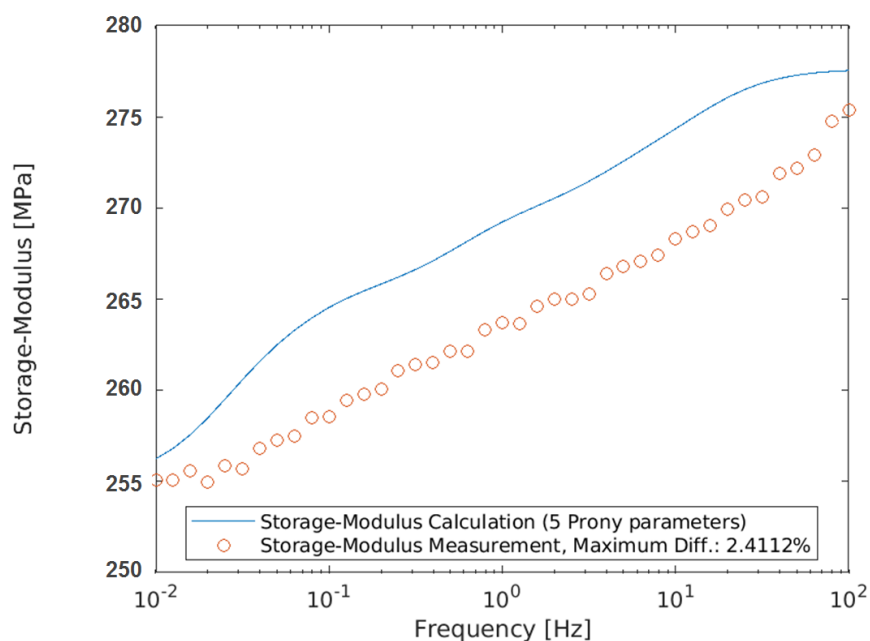
$$G(t) = \sum_i G_i e^{-t/\tau_i} \quad \text{IV.7}$$

Lorsque t tend vers l'infini dans le cas de matériaux qui ont un comportement solide, $G(t)$ s'approche d'une valeur finie G_e . Pour les matériaux de type li-liquid, $G(t)$ s'approche de zéro (Ferry, 1980), c'est pourquoi dans le cas des adhésifs structuraux, qui deviennent des matériaux de type solide après le processus de durcissement, l'équation 3 devient :

$$G(t) = G_e + \sum_i G_i e^{-t/\tau_i} \quad \text{IV.8}$$

L'équation 4 est également connue sous le nom de série Prony (Tschoegl, 1989) du matériau, et est utile pour décrire les propriétés viscoélastiques dans CAE Software (ABAQUS, 1998). La définition de la série Prony peut être différente sur chaque progiciel CAE commercial. Dans le cas d'Abaqus® lorsque le modèle est viscoélastique et défini dans le domaine temporel, le logiciel affiche un tableau où les paramètres demandés sont: g_i , k_i et r_i . Les termes g_i sont les coefficients de Prony normalisés pour le comportement de cisaillement, les termes k_i sont les coefficients de Prony normalisés pour le comportement volumétrique et les valeurs r_i sont les temps de relaxation de la série de Prony. Abaqus® suppose que la dépendance en fréquence de g_i et k_i est indépendante.

La discrétisation de ce modèle en éléments de série de Prony est réalisé par outil développé sur Matlab appelée "dma2prony" développé par (Netzband et al., 2018) en 5 paramètres dans la plage des fréquence entre 0.01 Hz et 100 Hz. Les changements de volume dans le matériau ne seront pas pris en compte, par conséquent la colonne pour les valeurs k_i sera laissée vide. L



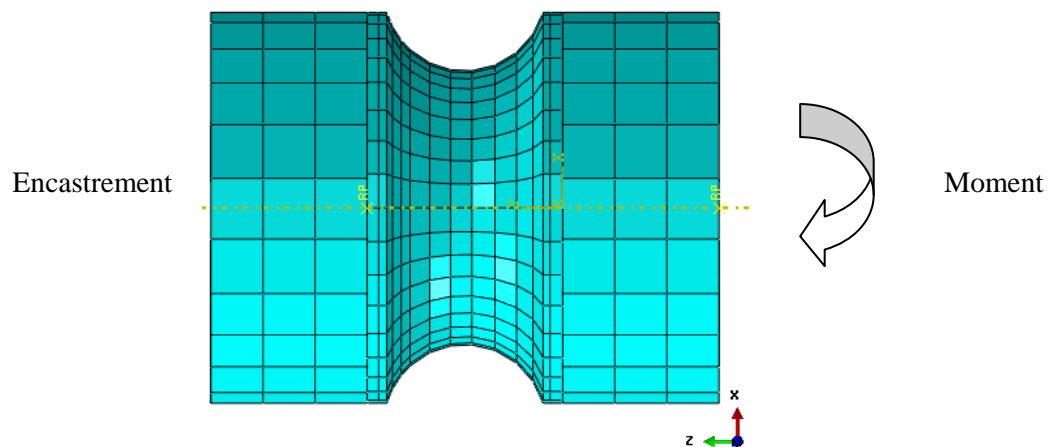
IV. Figure 6. Approximation du module de relaxation avec 5 paramètres

Les éléments de série de Prony sont présentés dans le tableau suivant:

Tableau 1. Eléments de série de Prony

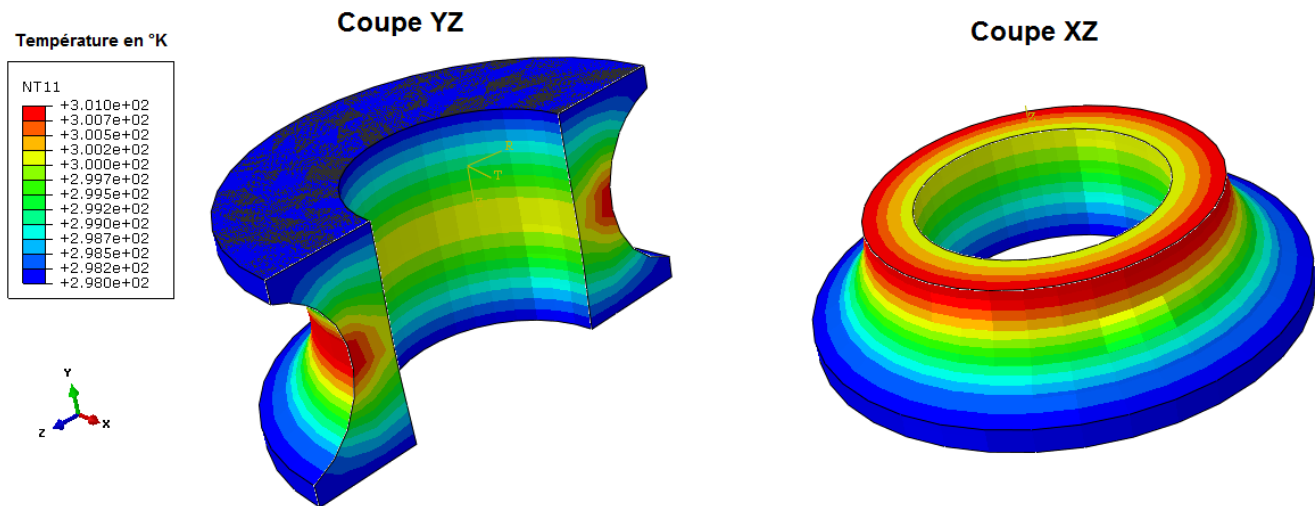
E_i (MPa)	τ_i (s)
250	
0,0090	2,107
0,0298	6,519
0,0147	0,0108
0,0123	0,0393
0,01558	0,274

Les paramètres de série de Prony sont insérés par la suite dans un modèle à éléments finis en 3D développé sur Abaqus. L'éprouvette en mousse PVC est collée de part et d'autre à des éléments rigides (mors). L'âme est maillée en 1080 éléments de type C3D8T (élément à 8 nœuds couplée thermiquement, déplacement tri-linéaire et température) qui permettent un couplage thermo-mécanique. Les conditions aux limites sont illustrées sur la figure suivante.



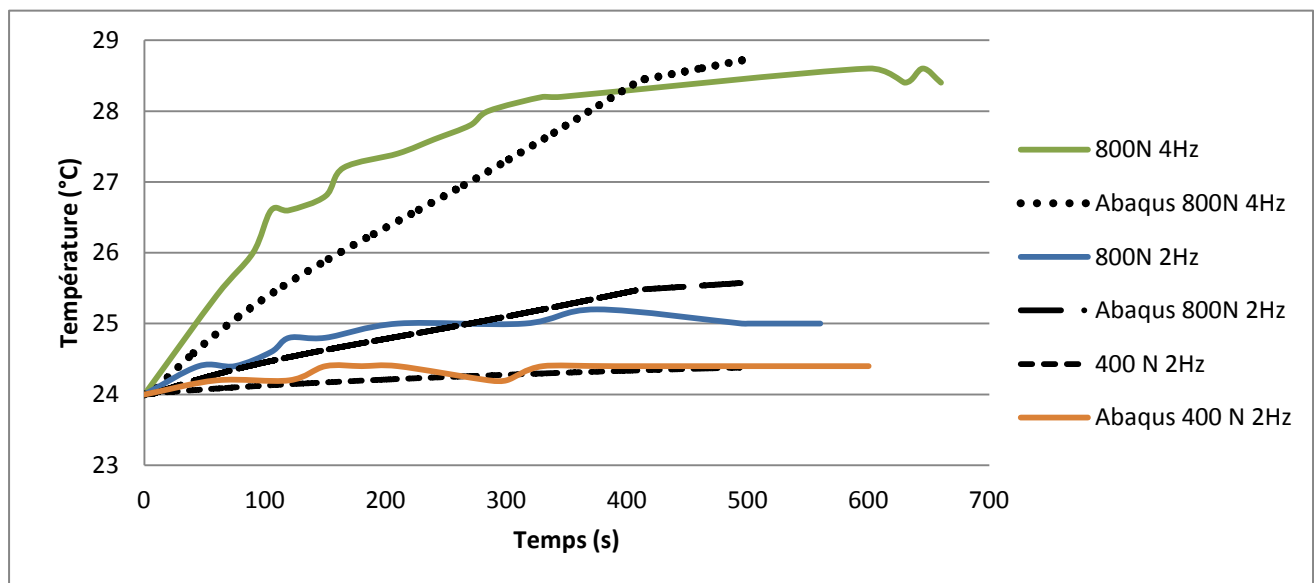
IV. Figure 7. Modélisation en 3D de l'essai de torsion en fatigue

L'essai est réalisé en faisant varier la fréquence et la valeur de moment de torsion exercée afin de comparer les valeurs numériques avec les valeurs de la température mesurées expérimentalement sur la surface de l'éprouvette. Pour les différents cas de simulations, nous avons remarqué que les valeurs de température les plus élevées sont concentrées sur la section la plus faible ou on trouve les valeurs de contraintes de cisaillement les plus importants. La figure



IV. Figure 8. Distribution du champs de température dans l'éprouvette après 1000 cycles à une force linéaire $F=800\text{N}$ et fréquence 4Hz

Les résultats numériques sont comparés avec les résultats mesurés expérimentalement. La figure suivante illustre l'évolution de la température sur la surface de l'éprouvette dans la section la plus faible pour 3 cas de chargement; 800N à 4Hz, 800N à 2Hz et 400N à 2Hz.



IV. Figure 9. Evolution de la température à la surface; corrélation numérique-expérimental

Les résultats numérique du modèle thermo-viscoélastique développé sur Abaqus montrent un bon accord avec les résultats expérimentaux. Les différences entre les deux résultats peuvent être dûs aux plusieurs facteurs dont la technique de mesure de température utilisé expérimentalement, le maillage faible du modèle numérique choisi à cause du taille lourd de modélisation et aux incertitudes liés à la détermination des paramètres thermo-viscoélastiques.

Ferry, J.D., 1980, Viscoelastic Properties of Polymers, 3rd ed. New York: Wiley.

Tschoegl, N.W. (1989). The phenomenological theory of linear viscoelastic behavior. 1st edition: Springer-Verlag

Williams, Landel, Ferry, 1955. J. Am. Chem. Soc., 77: 3701.

Netzband, Dennis & Dietrich, Søren & Gieß, Michael. (2018). DMA2PRONY_OPT Manual. 10.13140/RG.2.2.31820.26248.