

Influence de la température et d'une immersion dans du liquide de refroidissement sur le comportement mécanique d'un PPS: Etude analytique et expérimentale

Quentin C.P. Bourgoigne^{a,b}, Vanessa Bouchart^a, Pierre Chevrier^a, Emmanuel Dattoli^b

^aLaboratoire d'Etude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux (LEM3),
Université de Lorraine, CNRS, Université de Lorraine, Arts et Métiers ParisTech, LEM3,
57000 Metz, France

^bPierburg Pump Technology, 1 rue Denis Papin, ZA Kickelsberg, 57970 Basse-Ham,
France

Résumé :

Ce travail décrit premièrement une procédure expérimentale d'appréhension des phénomènes physiques liés à l'évolution des caractéristiques mécaniques d'un PPS pur lorsque celui-ci est soumis à des variations de température et/ou est immergé dans du liquide de refroidissement. Un modèle analytique a ensuite été créé pour quantifier l'influence de ces phénomènes. Enfin, les capacités prédictives du modèle proposé ont été confrontées à un modèle séquentiel basé sur l'intelligence artificielle afin de valider la grande précision du modèle analytique, de déterminer sa marge de progression et la précision maximale atteignable pour tout modèle se basant sur ces données expérimentales.

Abstract :

This work firstly presents an experimental campaign to understand the physical phenomena inducing an evolution of the mechanical characteristics of a PPS when this material is subjected to temperature variations and/or is immersed into cooling liquid. An analytical model was then built in order to quantify the influence of those phenomena. Finally, the predictive capabilities of the proposed model were confronted to an artificial intelligence based sequential model in order to confirm the good analytical model accuracy, its room of improvement and the maximal accuracy physically reachable based on this set of experimental data.

Mots clefs : Thermoplastique, Thermomécanique, modélisation analytique, vieillissement, modélisation séquentielle

1 Introduction (16 gras)

Les enjeux climatiques représentent un des grands défis industriels de notre époque. Pour l'industrie automobile notamment, ces enjeux se traduisent par des contraintes de plus en plus importantes sur les émissions de gaz à effet de serre. La réduction de ces émissions passe, entre autres, par une diminution de la consommation via un allègement des automobiles. Ce contexte a donc démocratisé l'utilisation de composites plastiques renforcés dans la création de certaines pièces. Cette utilisation tend à s'accélérer au point d'utiliser ces matériaux pour des pièces sous-capot, soumises à de fortes variations de température et au vieillissement dû au liquide de refroidissement (mélange d'eau et de glycol). La connaissance du comportement mécanique de ces matériaux dans ces configurations est de ce fait essentielle afin de permettre un dimensionnement fiable de ces pièces.

C'est dans ce contexte que se place ce travail qui vise à la mise en place d'une méthodologie de caractérisation de ces matériaux selon les différentes conditions de sollicitation de la pièce, en identifiant les phénomènes physiques en présence, telle que la viscosité, via des essais de traction monotones et cycliques. L'identification de ces phénomènes physique est indispensable pour la construction d'un modèle analytique prédictif du comportement mécanique en fonction de la température et du taux de glycol présent dans le liquide de refroidissement. L'établissement d'un tel modèle permet ainsi de réduire le nombre d'essais nécessaires à la caractérisation des matériaux.

2 Matériau et méthode expérimentale

Le matériau utilisé dans cette étude est un PolyPhénylène Sulfide (PPS) pur. Ce thermoplastique est obtenu par injection, sous forme de plaques, dans lesquelles les éprouvettes ont été découpées via découpe jet d'eau. Afin de prendre en compte le spectre des conditions d'utilisation de la pièce, des essais de traction monotones et cycliques ont été réalisés dans différents environnements :

- Cinq conditions à température ambiante $T=23^{\circ}\text{C}$ pour un PPS entièrement immergé dans du liquide de refroidissement dont la composition varie : 100% eau, 25% de glycol, 50% de glycol, 75% de glycol et 100% de glycol.
- Six conditions à différentes températures $T=23^{\circ}\text{C}$, 50°C , 70°C , 110°C , 130°C et 150°C pour un PPS non vieilli.

Les tests ont été réalisés sur une machine INSTRONTM 5585H contrôlée via une cellule de charge de 10kN, pour une vitesse de déformation fixée à $1 \cdot 10^{-3} \text{s}^{-1}$.

Les échantillons vieillis ont été immergés dans du liquide de refroidissement dans une autoclave maintenue à 90°C et ont été testés une fois arrivés à saturation. Le gain en masse maximal des échantillons varie selon la composition du liquide, comme le montre la figure 1.

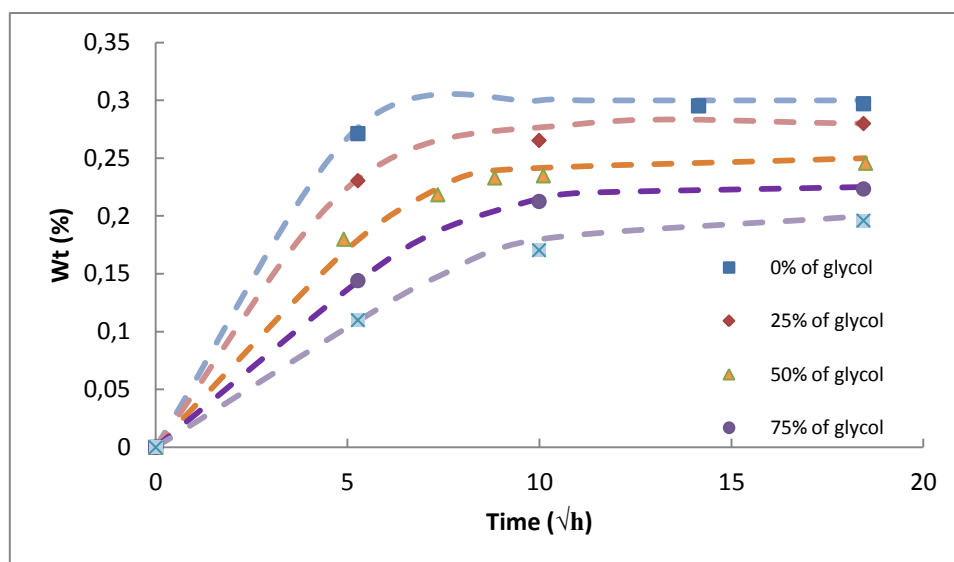


Figure 1: absorption de liquide par un PPS pur

3 Résultats

Les tests de traction effectués sur les échantillons vieillis ont montré que le PPS se rigidifiait après absorption de liquide. Comme le montrent les figures 2 et 3, cette rigidification augmente lorsque que le taux d'eau contenu dans le liquide de refroidissement augmente, c'est-à-dire lorsque le matériau absorbe d'avantage de liquide.

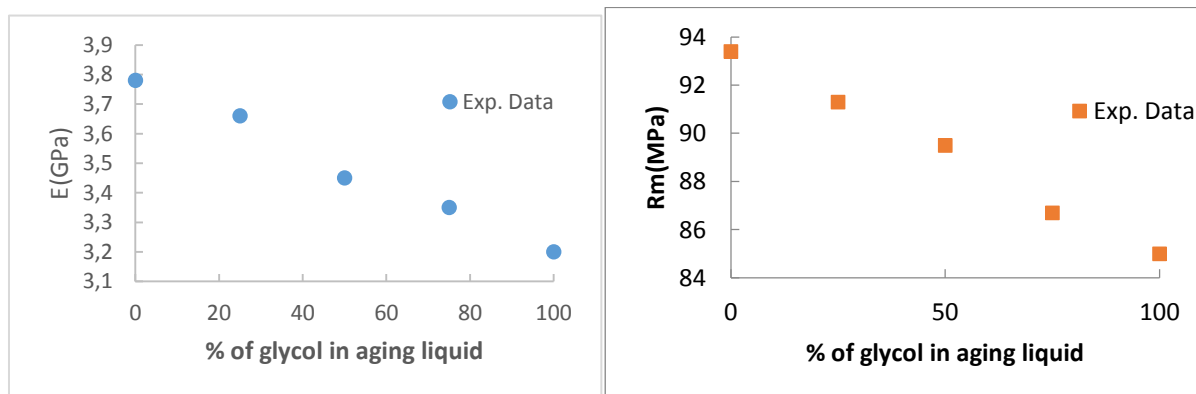


Figure 2: évolution des propriétés mécaniques en fonction du taux de glycol

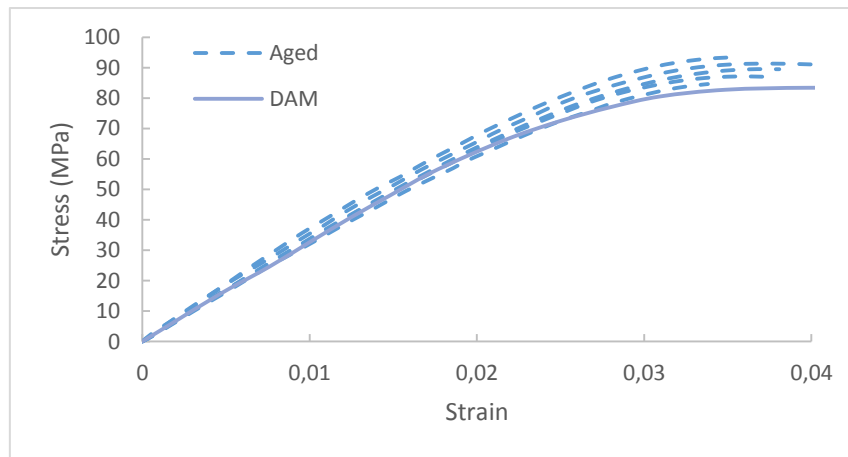


Figure 3: Comparaison du comportement à l'état neuf et vieilli selon les différentes configurations

Les essais menés à différentes températures ont permis de mettre en évidence deux types de comportement du PPS. Le premier, avant la température de transition vitreuse du matériau ($T_g = 90^\circ\text{C}$), est un comportement de type élasto-plastique. Le second comportement, au-dessus de la température de transition vitreuse, semble être entièrement inélastique (figure 4).

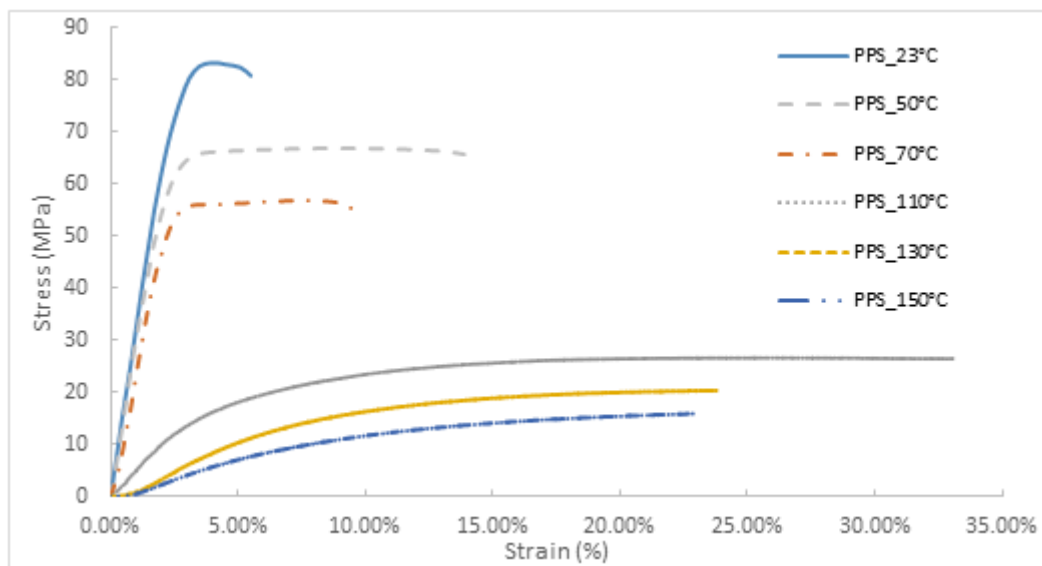


Figure 4: impact de la température sur les courbes de traction d'un PPS

Les essais cycliques ont permis de montrer l'influence de la viscosité au fur et à mesure que la température augmente. Ces essais ont également permis de confirmer le comportement purement inélastique au-delà de la température de transition vitreuse, de par la valeur négligeable du module d'Young relevé à ces températures, quelle que soit le nombre de cycles subit, comme montré en figure 5.

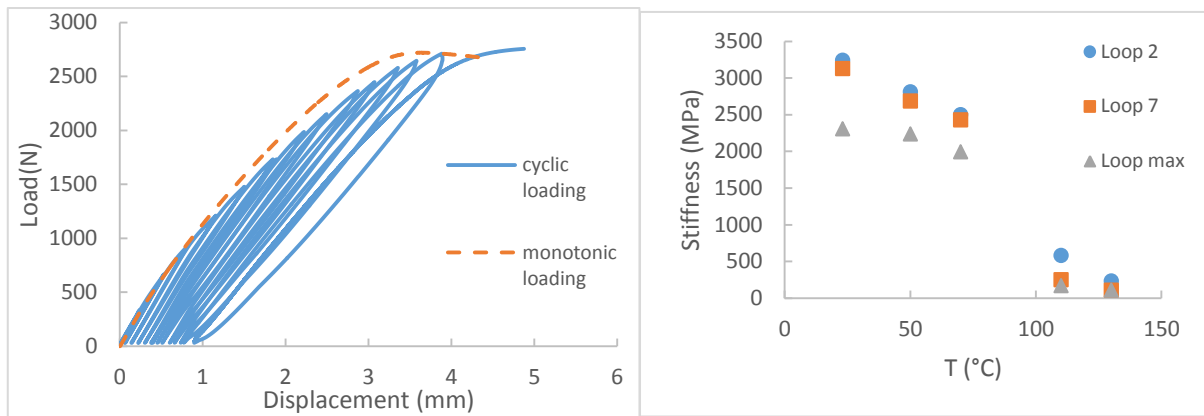


Figure 5: évolution du module d'Young en fonction de la température et du nombre de cycles

4 Modélisation

L'identification des différents types de comportement et l'influence de la viscosité seront des informations importantes pour l'élaboration d'un modèle phénoménologique prédictif du comportement mécanique du matériau. La base expérimentale étant des courbes de traction, un schéma rhéologique uniaxial a été développé (figure 6), avec une expression d'énergie libre de Helmholtz considérant une évolution exponentielle des paramètres en fonction de la température (eq.1)

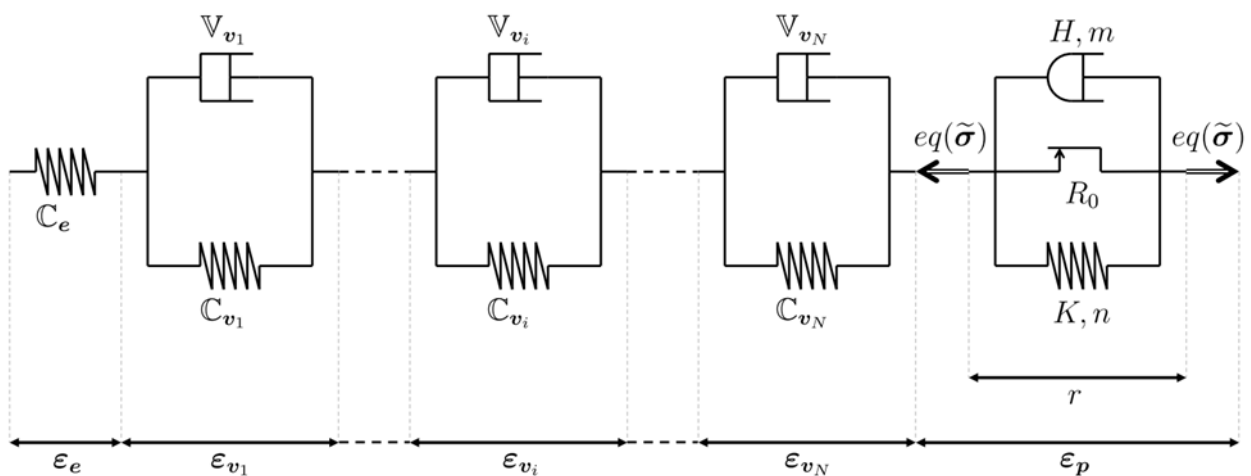


Figure 6: schéma rhéologique uniaxial du modèle proposé

$$\rho\psi = \left[\frac{1}{2}C_e(\varepsilon - \varepsilon_{vi} - \alpha\theta)^2 + \frac{1}{2}C_{vi}\varepsilon_{vi}^2 \right] e^{\delta_e(1-\frac{T_{eq}}{T_0})} - \frac{\rho C}{2T_0}\theta^2 - C_{vi}\varepsilon_{vi}\alpha\theta + \left[\frac{1}{2}kp^2 + R_\infty(p + \frac{1}{m}e^{-mp}) \right] e^{\delta_p(1-\frac{T_{eq}}{T_0})} \quad (1)$$

Des études ont montré l'influence du vieillissement sur la température de transition vitreuse [1]. Une équivalence température/humidité a été créée afin d'implémenter les effets du vieillissement dans le modèle (eq.2)

$$T_{eq} = T - (\chi H(\%) + \xi G(\%)) \quad (2)$$

Où $G(\%)$ est la proportion de glycol, $H(\%)$ est la proportion d'eau et ξ et χ sont des coefficients.

Ce modèle montre une bonne précision (figure 7) et permet ainsi avec 2 courbes de traction en dessous de la température de transition vitreuse, 2 autres courbes au-delà et enfin 2 autres pour prendre en compte le vieillissement dans un mélange de 2 liquides de prédire le comportement mécanique pour toute autre nuance.

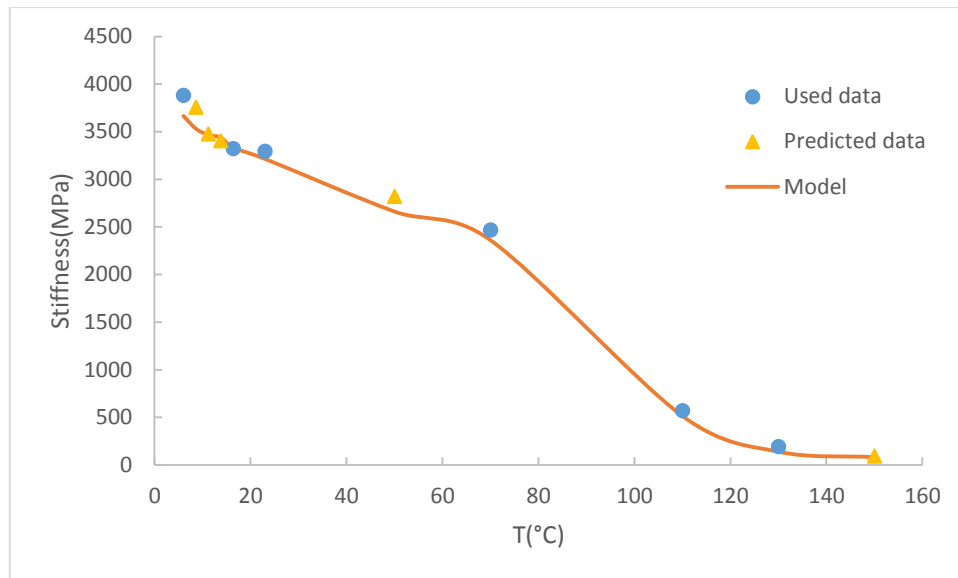


Figure 7: corrélations et prédictions du modèle

Il est intéressant de confronter la précision de ce modèle avec la précision de modèles phénoménologiques existants. Cependant, même si ce nouveau modèle peut s'avérer plus précis, ces comparaisons restent relatives et ainsi, le modèle le plus précis aujourd'hui ne le sera plus forcément demain.

De ce fait, le nouveau modèle proposé a été confronté à un modèle séquentiel, basé sur l'intelligence artificielle. La courbe ainsi formée ne repose sur aucun sens physique. En effet, le modèle va s'entraîner sur les données expérimentales et va venir retrouver la courbe expérimentale en ayant pour seule contrainte la minimisation de l'erreur relative. Il est donc raisonnable de penser que la précision atteinte par l'IA sera toujours supérieure à celle atteignable par un modèle phénoménologique analytique. L'objectif est donc ici de déterminer la marge de progression de notre modèle tout en estimant une limite de progression pour tout modèle phénoménologique utilisant les mêmes données expérimentales.

Pour se faire, le modèle séquentiel s'est entraîné sur 5000 couples contrainte/déformation sur 10 000 itérations, permettant la stabilisation de l'erreur. Quelques résultats sont présentés en figure 8.

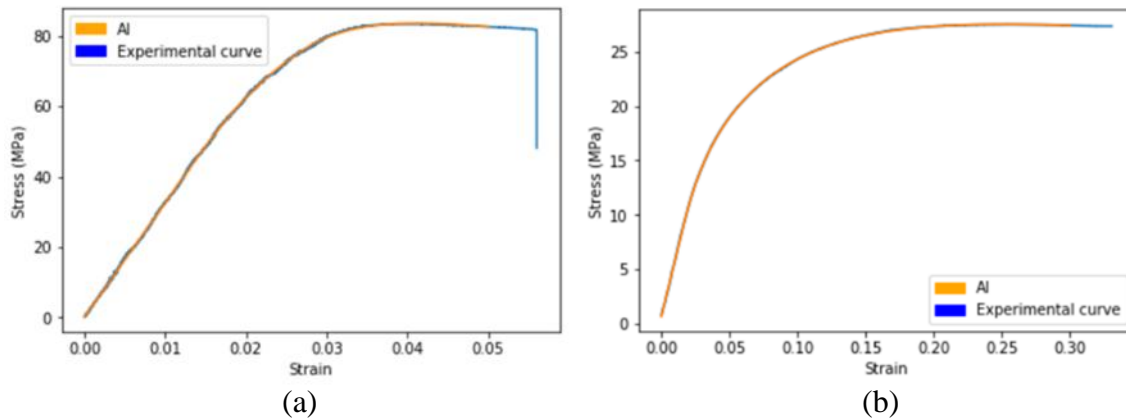


Figure 8: estimation des courbes à : (a) 23°C et (b) 110°C

Comme montré dans le tableau 1, les différentes comparaisons ont mis en valeur la précision du nouveau modèle et sa capacité à préserver cette précision lors des prédictions.

T	Proposed model	Ramberg-Osgood	Sequential model
23°C	2,41%	4,03%	0,93%
50°C	3,93%	4,81%	1,13%
70°C	3,85%	8,61%	2,28%
110°C	0,98%	9,15%	0,18%
130°C	2,76%	5,65%	1,75%
150°C	3,41%	9,39%	2,20%
aged 0%g	2,40%	5,37%	1,30%
aged 25%g	3,41%	4,83%	1,27%
aged 50%g	2,07%	3,26%	0,70%
aged 75%g	2,17%	6,47%	1,69%
aged 100%g	1,78%	4,00%	0,93%
	completely known		
	partially known		
	completely predicted		

Tableau 1 : erreur des différents modèles étudiés

5 Conclusion

Ce travail a montré l'influence de la viscosité sur le comportement mécanique au fur et à mesure que la température augmente. Il a également été montré que le matériau était sensible au vieillissement et que cette sensibilité dépend de la densité du liquide immergant.

Ces informations ont servi à la création d'un modèle phénoménologique prédictif du comportement mécanique en fonction de l'environnement dans lequel le matériau est sollicité.

La précision du modèle créé a été ensuite confrontée à la précision d'un modèle séquentiel, permettant de confirmer la fiabilité du nouveau modèle ainsi que de quantifier sa marge de progression.

Références

- [1] Antoine Launay, Yann Marco, Habibou Maitournam, Ida Raoult. Modelling the influence of temperature and relative humidity on the time-dependent mechanical behaviour of a short glass fibre reinforced polyamide. *Mechanics of Materials*, Elsevier, 2013, 56, pp 1 - 10