

Détermination d'une nouvelle loi de comportement élasto-viscoplastique pour une fonte à graphite sphéroïdal

Application au dimensionnement à la fatigue oligocyclique d'un collecteur d'échappement de moteur Diesel automobile

Fabien Szymtka^{1 2 3}, Luc Rémy², Habibou Maïtournam³, Alain Köster², Myriam Bourgeois¹, Thi Mac Lan Nguyen Tajan¹

¹ PSA Peugeot Citroën - Direction de la Recherche et de l'Innovation Automobile,
Route de Gisy - 78 943 Vélizy-Villacoublay Cedex

² Centre des Matériaux P.M. Fourt (CNRS UMR 7633),
École Nationale Supérieure des Mines de Paris, BP87 - 91003 Evry Cedex

³ Laboratoire de Mécanique des Solides (CNRS UMR 7649),
École Polytechnique - 91 128 Palaiseau Cedex

fabien.szmytka@mpsa.com, luc.remy@mat.ensmp.fr, habibou@lms.polytechnique.fr, alain.koster@mat.ensmp.fr, myriam.bourgeois@mpsa.com, maclan.nguyen@mpsa.com

Résumé :

Le travail présenté ici porte sur le développement d'une nouvelle loi de comportement mécanique élasto-viscoplastique. Cette dernière est développée dans le but de dimensionner à la fatigue thermomécanique des structures de l'industrie automobile travaillant à hautes températures en décrivant au mieux la viscosité sur une large gamme de sollicitation. Ce nouveau modèle a été implémenté dans le code Abaqus en se basant sur l'algorithme du retour radial. Des simulations thermomécaniques ont été ensuite réalisées sur des collecteurs d'échappement et ont permis de prédire la tenue dimensionnelle ainsi que les zones à risque du point de vue fissuration.

Abstract :

A new elasto-viscoplastic behaviour law and its numerical integration scheme have been developed. Our aim is to design hot automotive components with a good description of all the viscous effects for a wide load range. This new model has been integrated in the Abaqus code thanks to a return-mapping algorithm. Thermo-mechanical simulations performed on exhaust manifolds had led to good estimation of the component lifetime.

Mots-clefs :

Essais mécaniques de caractérisation, loi de comportement élasto-viscoplastique anisotherme, fonte à graphite sphéroïdal

1 Introduction

La réduction de la taille des cylindrées des moteurs Diesel qui vise à réduire les consommations de carburant ainsi que les diverses stratégies de dépollution soumettent des pièces comme la culasse ou le collecteur d'échappement à des cycles thermiques de plus en plus sévères pouvant entraîner des dérives dimensionnelles par accumulation de déformation anélastique. Le dimensionnement de ces structures métalliques, travaillant à hautes températures, fait de plus en plus souvent appel à des lois de comportement élasto-viscoplastique. Ces lois macroscopiques, parmi lesquelles on peut citer celles issues des travaux de Lemaitre et Chaboche (Lemaitre et Chaboche (1996)), doivent décrire avec précision l'évolution des déformations et des contraintes qui sont à la base des critères de dimensionnement. Néanmoins, ces

modèles ne parviennent souvent pas à décrire efficacement le comportement visqueux sur une large gamme de sollicitation mécanique et de température (de l'ambiante à 700°C).

Ainsi, la modélisation du comportement de la fonte GS des collecteurs d'échappement a été jusqu'alors abordée en séparant les déformations visqueuses des déformations plastiques et en s'attachant à bien décrire les zones de chargement maximale en température et en contrainte où apparaissent les fissures de fatigue (Charkaluk (1999)). Cependant, une telle loi ne permet pas de connaître avec précision la répartition des déformations inélastiques en tout point du collecteur et les dérives dimensionnelles qu'elles occasionnent sur la structure globale. La mise au point de modèles de comportement prenant mieux en compte l'ensemble des phénomènes visqueux agissant sur les matériaux et permettant, après implémentation numérique, d'aboutir à des calculs de structure prédictifs et d'une durée compatible avec les exigences de bureaux d'étude industriels est donc une étape essentielle du dimensionnement de ces pièces.

Nous nous intéressons ici au développement d'une telle loi de comportement depuis la phase expérimentale jusqu'à l'écriture des équations du modèle et leur implémentation dans un code de calcul éléments finis dans le but de réaliser des calculs de dimensionnement d'organes automobile comme le collecteur d'échappement. Dans un premier temps, nous détaillerons donc la constitution d'une base expérimentale robuste permettant de mieux comprendre le comportement visqueux de la fonte. Cela nous permet alors d'explicitier les équations du modèle de comportement mis au point et de tester leur capacité à reproduire les données expérimentales avant de valider notre démarche par des calculs éléments finis.

2 Stratégie Expérimentale

La constitution d'une base expérimentale robuste est nécessaire pour caractériser le matériau, mettre au point une loi de comportement et en identifier les paramètres. Afin de nous permettre d'appréhender au mieux le comportement visqueux de la fonte GS considérée¹, nous avons essentiellement effectué des essais d'érouissage cyclique.

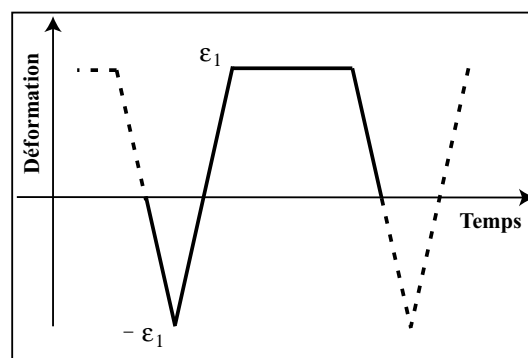


FIG. 1 – Principe d'un essai d'érouissage cyclique

Ces essais, réalisés dans des conditions isothermes, consistent (voir figure 1), pour un niveau de déformation ε_1 positif donné, en une compression jusqu'à $-\varepsilon_1$ suivie d'une traction jusqu'à ε_1 et d'une phase de relaxation avant un retour à déformation nulle. Cette pénultième étape se révèle très riche d'enseignement car elle permet de solliciter le matériau sur une très large

¹contenant principalement du silicium et du molybdène et dénommée par la suite SiMo

gamme de vitesse de déformation inélastique (de $10^{-3}s^{-1}$ à $10^{-9}s^{-1}$) et alors d'observer toute la variété du comportement visqueux de la fonte. Ainsi, nous avons pu constater, lors de phases de relaxation à différentes températures, une évolution quasi linéaire de la contrainte en fonction de la vitesse de déformation inélastique dans un diagramme semi-logarithmique.

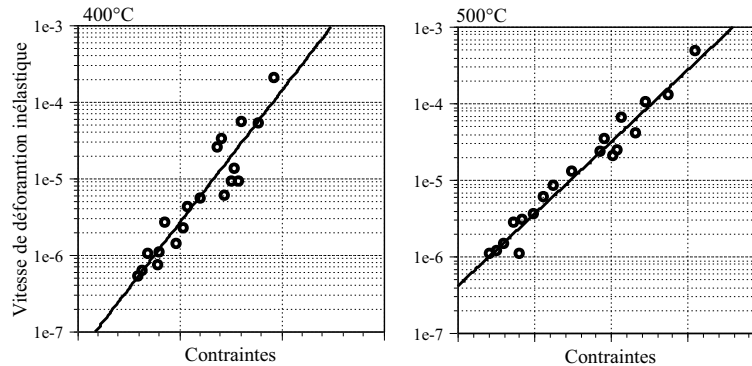


FIG. 2 – Évolution de la contraintes en fonction de la vitesse de déformation inélastique - Phase de relaxation des essais d'érouissage cyclique

Par ailleurs, ces essais sont pilotés en déformation à fréquence constante. Ainsi, pour une température donnée, chacune des phases a une durée fixe quel que soit ε_1 . On sollicite alors l'éprouvette d'abord pour des valeurs de ε_1 faibles de l'ordre de 0,1% et une fois la boucle contraintes déformations stabilisée, on augmente cette valeur. Un essai complet, se composant d'environ 8 à 10 paliers, est ainsi très riche d'informations et, répété pour différentes températures puis complété par des essais de tractions simples, permet de mieux appréhender le comportement de la fonte sur une large gamme de sollicitations thermomécaniques. Nous pouvons alors envisager sa modélisation, qui pourra être ensuite validée notamment par des essais anisothermes uniaxiaux (Rémy (2003)).

3 Vers un nouveau modèle de comportement

Nous nous plaçons ici dans le cadre de la viscoplasticité unifiée. Le matériau, homogène et isotrope, obéissant au critère de von Mises, nous avons tout d'abord recours à un érouissage cinématique non linéaire selon le modèle d'Armstrong-Frederik (Armstrong et Frederick (1966)) :

$$\underline{\underline{X}} = \frac{2C}{3} \underline{\underline{\alpha}} \quad (1)$$

$$\dot{\underline{\underline{\alpha}}} = \dot{\underline{\underline{\varepsilon}}}_{vp} - \frac{3\dot{\gamma}D}{2C} \underline{\underline{X}} \quad (2)$$

avec C et D , 2 paramètres à identifier, $\underline{\underline{X}}$ la variable d'érouissage et $\underline{\underline{\alpha}}$, sa variable associée. La base expérimentale met de plus en évidence un adoucissement cyclique de la fonte considérée. Nous complétons donc la description de la plasticité par un érouissage isotrope non linéaire selon le modèle de Chaboche (Lemaitre et Chaboche (1996)) :

$$\dot{R} = b(Q - R)\dot{\gamma}, \text{ avec } R(t = 0) = R_0 \quad (3)$$

avec b , Q et R_0 , 3 paramètres supplémentaires à identifier et γ , le multiplicateur viscoplastique.

Comme nous l'avons vu (figure 2), l'évolution de la contrainte lors des phases de relaxation ainsi que la présence d'une forte viscosité pour les températures supérieures à 400°C, ne nous permettent pas le recours à un potentiel visqueux de type Norton, couramment utilisé (Rémy (2003)).

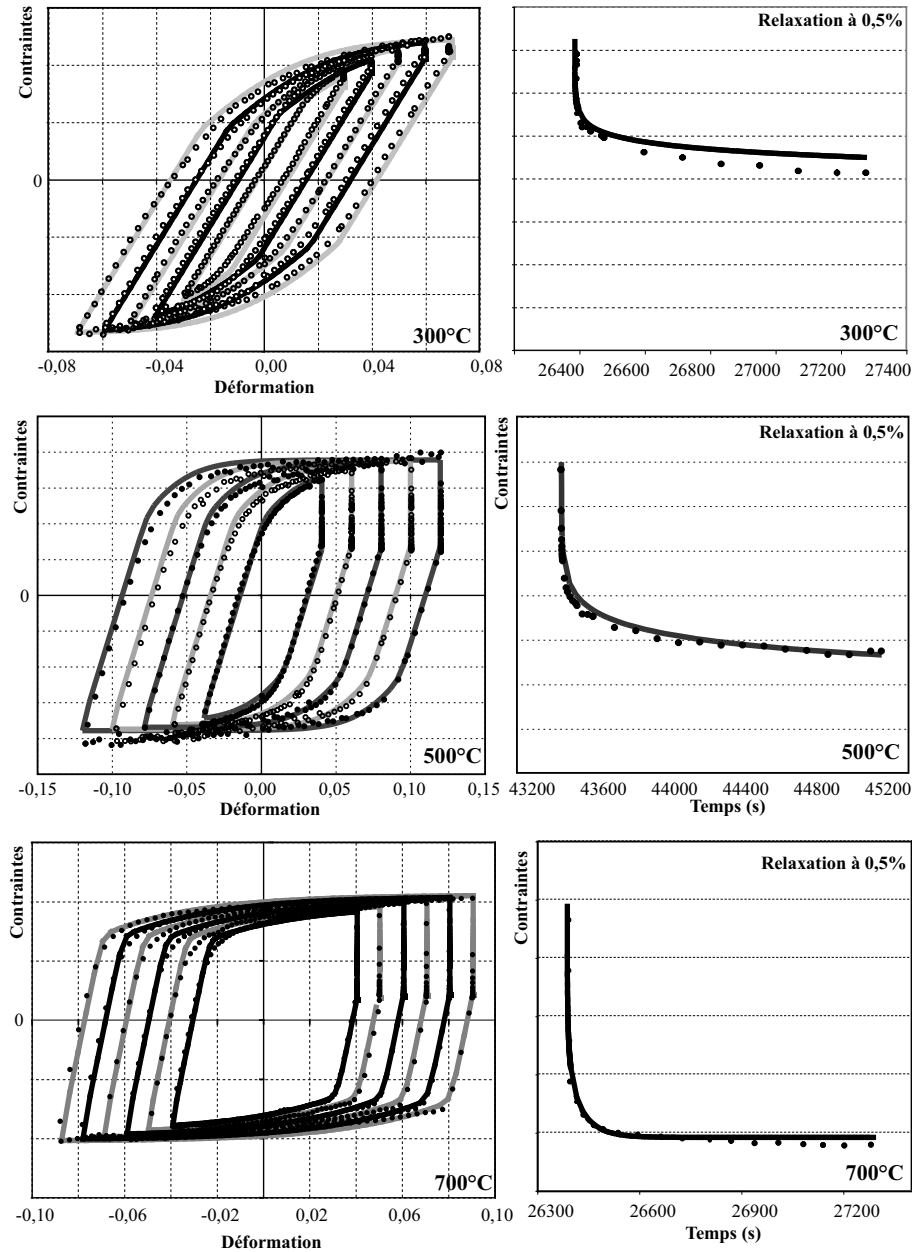


FIG. 3 – Essai d'érouissage cyclique à 300 °C, 500°C et à 700°C - les traits pleins représentent la simulation

En nous basant sur les mécanismes de déformation à l'échelle microscopique (Poirier (1976)), nous avons mis au point un nouveau potentiel viscoplastique :

$$\dot{\gamma} = \dot{\epsilon}_0 \left(1 + \left(\frac{J_2(\underline{\sigma} - \underline{X}) - R}{H} \right)^2 \right) \left(\sinh \left(\frac{J_2(\underline{\sigma} - \underline{X}) - R}{K} \right) \right) \quad (4)$$

avec $\dot{\epsilon}_0$, H et K , 3 nouveaux paramètres à identifier. Ce potentiel s'écrit donc comme la

combinaison d'un terme en sinus hyperbolique valant pour les plus hautes températures et qui a montré son efficacité pour décrire le fluage à température élevée (Chateau et Rémy (2001), Dyson et McLean (1998)) et d'un terme multiplicatif polynomial en $\underline{\sigma}$, lié à la viscoplasticité à basse température. L'écriture d'un potentiel de dissipation ϕ , positif, convexe et nul en l'origine selon $f = J_2(\underline{\sigma} - \underline{X})$ et qui s'écrit sous la forme :

$$\phi^* = \dot{\epsilon}_0 \cdot K \left[\left(1 + 2 \cdot \frac{K^2}{H^2} + \frac{f^2}{H^2} \right) \cdot \cosh \left\langle \frac{f}{K} \right\rangle - \left(1 + 2 \cdot \frac{K^2}{H^2} \right) - 2 \cdot \frac{K}{H^2} \cdot \langle f \rangle \cdot \sinh \left\langle \frac{f}{K} \right\rangle \right] \quad (5)$$

permet à la loi de comportement de rentrer dans le cadre thermodynamique des matériaux standards généralisés (Halphen et Nguyen (1975)).

À l'aide d'un algorithme de type Levenberg Marquardt, nous identifions et optimisons les 7 paramètres matériaux pour chacune des températures où nous disposons d'essais, en cherchant la meilleure corrélation possible entre le modèle et l'expérience. Les résultats obtenus présentent une bonne concordance que ce soit pour les hystérèses de contrainte déformation ou pour l'évolution temporelle de la contrainte lors des relaxations et ce quelque soit la température comme le représente la figure 3.

4 Applications : calcul d'un collecteur d'échappement

Une fois les paramètres de la loi identifiés, il convient, afin de l'utiliser pour réaliser des calculs éléments finis, d'écrire son schéma d'intégration numérique. Nous utilisons alors un schéma implicite utilisant la technique du retour radial (Nguyen (1977), Simo et Taylor (1985)) afin de développer une sous-routine matériau Umat pour *Abaqus*.

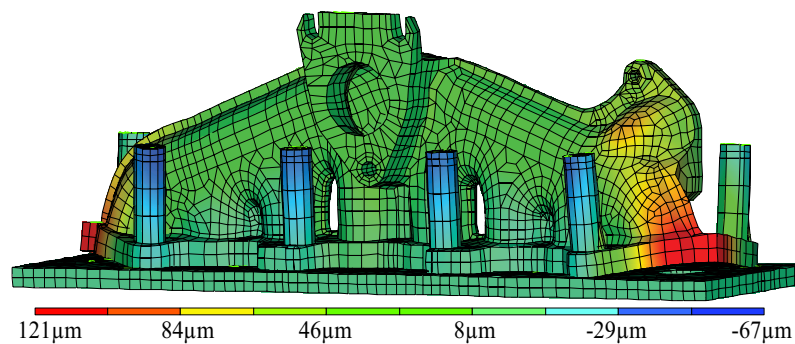


FIG. 4 – Calcul EF thermomécanique d'un collecteur d'échappement - Déformée après retour à l'ambiante

Un calcul thermomécanique (Lederer *et al.* (2000)) est réalisé sous *Abaqus* pour 10 cycles de sollicitations suivis d'un retour à température ambiante. Ce dernier consiste d'abord en un calcul thermique représentatif d'un essai collecteur sur banc moteur et recalé au plus juste sur des mesures de températures. Les résultats obtenus (essentiellement une cartographie thermique du collecteur d'échappement fonction du temps) augmentés de différentes conditions de bridage seront ensuite utilisés comme données d'entrée à un calcul mécanique.

Les simulations ainsi effectuées (voir figure 4), dans des temps de calcul comparables à ceux obtenus avec les lois classiques, donnent des résultats relativement semblables en terme

de tenue à la fissuration mais présentent une meilleure corrélation expérimentale en terme de déformée globale après retour à l'ambiante. En effet, l'amplitude des déplacements relatifs du collecteur sont plus marqués, ce qui concorde avec les observations sur banc moteur.

Nous pouvons alors dimensionner la pièce au plus juste et en anticipant les déformées après retour à froid, éviter tout problème de perte d'étanchéité du collecteur.

5 Conclusions et perspectives

Nous avons ici succinctement présenté les différentes étapes du développement d'une nouvelle loi de comportement élasto-viscoplastique depuis la création d'une base expérimentale jusqu'à la simulation par élément fini. Ce modèle macroscopique, basé sur un potentiel visqueux innovant issu de phénomènes physiques microscopiques, nous permet aujourd'hui de fournir des calculs de structures donnant des résultats plus conformes à la réalité que les lois classiquement utilisées.

Références

- ARMSTRONG, P. et FREDERICK, C. (1966). A mathematical representation of the multiaxial bauschinger effet. Rapport technique, Berkeley Nuclear Laboratories.
- CHARKALUK, E. (1999). *Dimensionnement des structures à la fatigue Thermomécanique*. Thèse de doctorat, École polytechnique.
- CHATEAU, E. et RÉMY, L. (2001). Oxidation-assisted creep damage in udimet 720li. In Associazione Italiana di METALLURGICA, M., éditeur : *EUROMAT 2001, proceedings of the 7th European Conference on Advanced Materials and Processes, Rimini, Italy*.
- DYSON, B. et MCLEAN, M. (1998). *Microstructural stability of creep resistant alloys for high temperature plant applications*, chapitre Microstructural evolution and its effects on the creep performance of high temperature alloys, pages 371–392. A. Strang, J. Cawley, G.W. Greenwood Eds, Institute of Materials, Londres.
- HALPHEN, B. et NGUYEN, Q. (1975). Sur les matériaux standards généralisés. *Journal de Mécanique*, 14(1):39–63.
- LEDERER, G., CHARKALUK, E., VERGER, L. et CONSTANTINESCU, A. (2000). Numerical lifetime assesment of engine parts submitted to thermomechanical fatigue. *SAE Technical paper series*, 2000-01-0789.
- LEMAITRE, J. et CHABOCHE, J.-L. (1996). *Mécanique des matériaux solides*. Dunod, 2ème édition.
- NGUYEN, Q. (1977). On the elastic plastic initial-value problem and its numerical integration. *International Journal for Numerical Method in Engineering*, 11(817-832).
- POIRIER, J.-P. (1976). *Plasticité à haute température des solides cristallins*. Édition Eyrolles.
- RÉMY, L. (2003). *Comprehensive Structural Integrity*, volume 5, chapitre Thermal-Mechanical Fatigue, pages 113–200. Elsevier.
- SIMO, J. et TAYLOR, R. (1985). Consistent tangent operators for rate-independent elastoplasticity. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 48:101–118.