

Effet du vieillissement sur les propriétés de fluage de l'acier inoxydable austénitique 310S lors d'essais de fluage isothermes et non isothermes.

C. PARRENS^{1,2}, J. LACAZE¹, B. MALARD¹, J.-L. DUPAIN²,
D. POQUILLON¹

1. Université de Toulouse, CIRIMAT, 4 Allée Emile Monso, CS 44362, 31030 Toulouse, France
2. Safran Landing Systems, Safran group, 9 Rue Guynemer, 64400 Bidos, France

...

Résumé :

Les aciers inoxydables austénitiques sont utilisés dans de nombreuses applications. L'alliage 310S contient des teneurs en chrome et en nickel particulièrement élevées qui lui confèrent une excellente résistance pour les utilisations à hautes températures. Néanmoins, pour des applications combinant cyclage thermique et chargement mécanique, la prédiction de la durée de vie de pièces est délicate. En effet, si de nombreuses données sont disponibles dans la littérature concernant le vieillissement et le fluage isotherme des aciers austénitiques, celles dédiées aux sollicitations couplées sont très rares. Elles s'avèrent insuffisantes pour rendre compte des phénomènes macroscopiques observés industriellement. Une étude a donc été menée pour comprendre les mécanismes mis en jeu. Le vieillissement d'un acier 310S a été exploré pour plusieurs cycles thermiques à 870°C. Des essais mécaniques ont été réalisés sur une large plage de contraintes. Les résultats confirment l'influence forte de la modification de la microstructure sur les propriétés élastiques et sur celles en fluage. Une augmentation conjointe du module d'Young, de la limite à rupture et des vitesses de fluage a été observée. La prédiction de la durée de vie de composants subissant des cyclages thermomécaniques doit donc tenir compte de l'évolution de la microstructure. Ces travaux aboutissent donc à une double modélisation qui permet, d'une part, de décrire la cinétique de transformation de phase et, d'autre part, de prédire les vitesses de fluage de l'acier 310S en isotherme comme en cyclage thermomécanique, dans des conditions représentatives de conditions de services des pièces industrielles.

Abstract:

Austenitic stainless steels are widely used in industrial applications. 310S stainless steel has high chromium and nickel contents, providing a competitive mechanical behavior for high temperature utilizations. Nevertheless, lifetime prediction is difficult under coupled mechanical and thermal solicitations. Many data are available on aging and isothermal creep of austenitic stainless steels, but few consider the coupled effect of multiple solicitations. These data are then insufficient to explain industrial macroscopic observations. The aim of this study was thus to explore the involved

mechanisms. 310S stainless steel aging was investigated under various thermal cycling solicitations at 870°C. Mechanical tests were carried out under a large range of stresses. The results highlight a significant influence of microstructural evolution on elastic and creep properties of this alloy. Simultaneous increase of Young modulus, rupture stress and creep rates was evidenced. Hence lifetime prediction of components under thermomechanical cycling must take into account microstructure modification during service. Finally, two models were proposed in order to assess microstructural changes and creep behavior which apply to isothermal and thermomechanical cycling conditions related to in service conditions of industrial components.

Mots clefs : Cyclage thermique ; vieillissement ; fluage ; modélisation

1 Introduction

Le traitement thermique est une opération fréquente et importante lors de la fabrication de pièces de structures en acier. C'est notamment le cas pour les pièces constituant les trains d'atterrissage conçus et réalisés par Safran Landing Systems. Ce procédé, qui nécessite l'emploi d'une atmosphère à la chimie contrôlée, confère aux composants traités les microstructures et donc les caractéristiques mécaniques optimales pour l'application ciblée. Pour réaliser ces traitements, des équipements spécifiques sont nécessaires, tels que des fours, des systèmes de refroidissements, et des outillages adaptés permettant de suspendre, caler et déplacer les pièces dans une installation automatisée. Augmenter la durée de vie de ces équipements nécessite une meilleure compréhension de leur comportement en service. Ainsi, si le comportement à haute température des aciers inoxydables austénitiques a fait l'objet de nombreuses études [1-7], les effets conjoints du cyclage thermique et du chargement mécanique à des températures induisant des transformations de phase n'ont que rarement été étudiés. Nous détaillons ici une partie des résultats obtenus dans la cadre de la thèse de Coralie Parrens [8], résultats qui permettent de comprendre les fortes vitesses de fluage observées sur les structures utilisées par Safran Landing Systems pour ses outillages de traitement thermique et d'en proposer une modélisation.

2 Matériau et méthodes expérimentales

Le matériau faisant l'objet de cette étude est un acier inoxydable austénitique 310S. Il a été affiné par AOD (Argon Oxygen Decarburization) après fusion des éléments dans un four à arc électrique afin d'atteindre la faible teneur en carbone visée. Dans l'acier 310S, celle-ci doit en effet être inférieure à 0,06%. S'en suit une phase de réduction du métal en fusion. Une fois la coulée achevée, les tôles sont laminées à chaud jusqu'à atteindre l'épaisseur souhaitée, de 20 mm dans notre cas. La composition du lot utilisé (P20-B) est donnée dans le tableau ci-dessous.

	C	Cr	Ni	Mn	Si	N	P	S	Co	Fe
P20-B	0,041	24,755	19,134	1,379	0,477	0,024	0,023	0,001	0,169	Bal.

Tableau 1 : Composition (% massique)

Afin d'étudier le vieillissement de l'acier 310S à 870°C, différents traitements thermiques sont conduits pour étudier l'effet de l'atmosphère, du cyclage thermique et des contraintes sur les cinétiques de vieillissement. Les vieillissements anisothermes sont constitués de cycles successifs de

2h à 870°C, achevés par une trempe à l'eau. D'autres échantillons subissent des traitements thermiques en conditions industrielles, dans l'atelier de traitement thermique de Safran Landing Systems. La comparaison des microstructures obtenues pour ces différents vieillissements (figures 1 et 2) permet d'étudier l'effet du cyclage thermique et de l'atmosphère sur le vieillissement de l'alliage et d'obtenir des éprouvettes d'essais mécaniques dans différents états de vieillissement. Une étude microstructurale précise a permis de mettre en évidence une accélération de la cinétique de formation de la phase σ du fait du cyclage thermique, en lien avec une modification de la germination de cette phase [9].

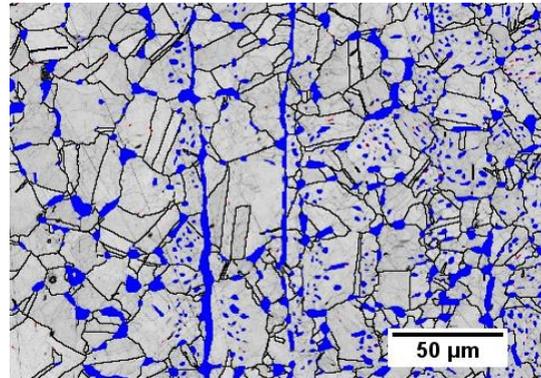
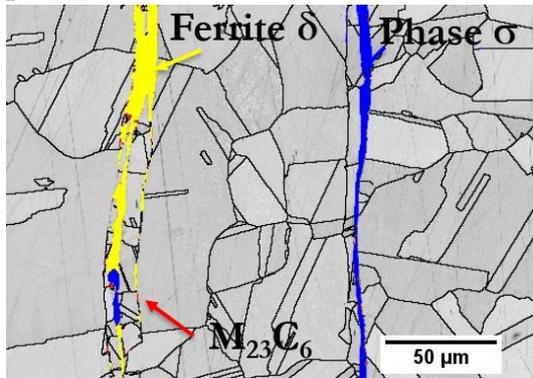


Figure 1 : Microstructure initiale, sens de laminage = vertical, travers court = horizontal

Figure 2 : Microstructure après 257 cycles de 2h10 à 870°C, sens de laminage = vertical, travers court = horizontal

Des mesures du module d'Young ont été réalisées par résonance acoustique (RFDA) pour différents états du matériau par la société Aurock sur des échantillons 80x20x2 mm. Une rampe en température est imposée à 1°C/s, de 20°C à 900°C. Les mesures de module d'Young sont effectuées au cours du chauffage et du refroidissement. Des essais de fluage ont été réalisés, au laboratoire, sous air et sous Ar-5%H₂ à 870°C sur des éprouvettes ayant subi différents vieillissements, et en particulier sur des éprouvettes à la microstructure stabilisée après 257 cycles de 2h10 à 870°C. De plus des mesures de vitesses de fluage ont été réalisées *in situ*, dans le four de traitement thermique, sur des éprouvettes embarquées. Pour cela, un montage spécifique a été entièrement conçu et réalisé, permettant de tester les effets de l'atmosphère spécifique du four de traitement thermique.

3 Résultats

La réalisation d'essais de fluage sur différents états de vieillissement métallurgique a mis en évidence une modification significative des vitesses de fluage secondaires. Pour les vieillissements isothermes, comme illustré sur la figure 3, la vitesse de déformation diminue dans un premier temps puis, augmente pour des durées de vieillissement plus importantes. Pour des contraintes inférieures à 20 MPa, la vitesse de fluage secondaire obtenue sur l'état métallurgique vieilli est supérieure d'environ un ordre de grandeur à celle obtenue sur le matériau brut.

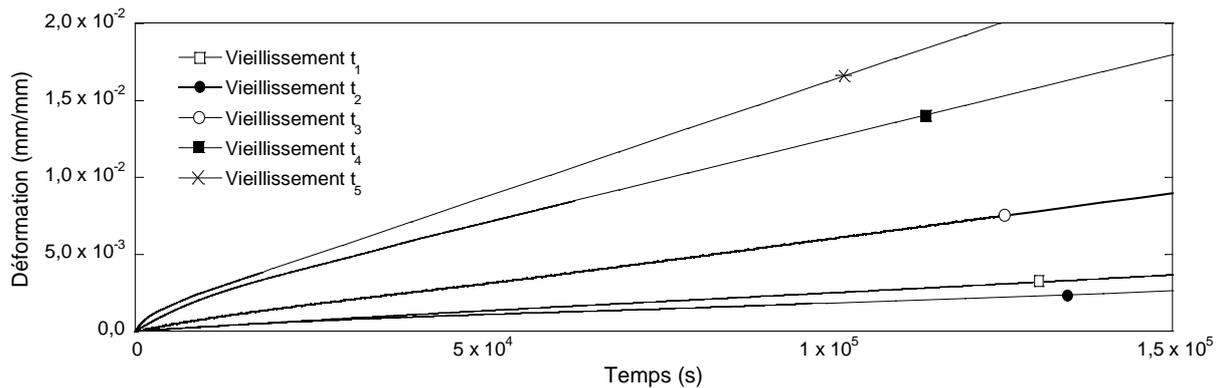


Figure 3 : Courbes de fluage obtenues sur des éprouvettes de P20-B après des vieillissements de durées variable ($t_1 < t_2 < t_3 < t_4 < t_5$), pour une contrainte de 10 MPa à 870°C

Pour les vieillissements anisothermes, le vieillissement métallurgique accéléré mène à une perte de résistance au fluage plus rapide que celle observée lors des vieillissements isothermes (Figure 4). Par ailleurs, cette augmentation des vitesses de fluage secondaire est d'autant plus marquée que les contraintes sont faibles. Par exemple, la figure 4c montre, pour une contrainte de 8 MPa, un facteur 33 d'augmentation de la vitesse de fluage secondaire sur l'éprouvette vieillie 257 cycles par rapport à celle dans l'état de réception.

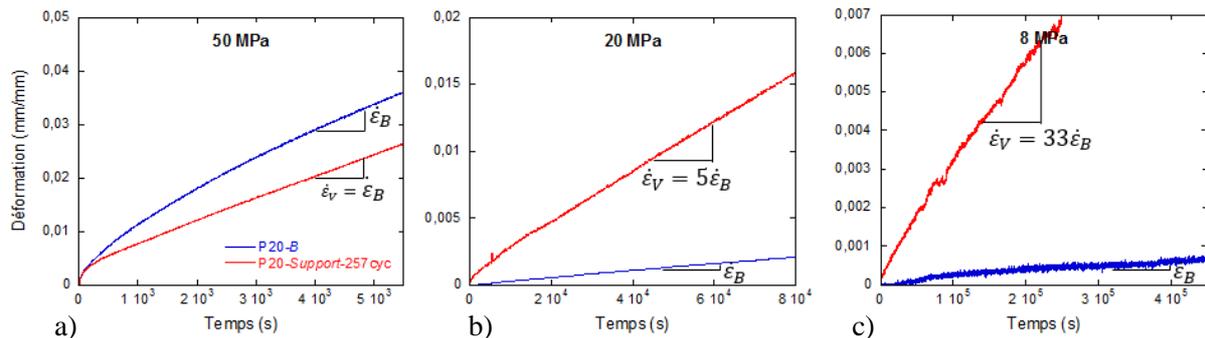


Figure 4 : Essais de fluage à 870°C, en bleu éprouvette à l'état de réception, en rouge éprouvette après vieillissement de 257 cycles de 2h10 à 870°C.

Les essais de fluage embarqués réalisés directement dans les fours industriels de traitement thermique confortent les résultats obtenus au laboratoire : l'accélération du fluage n'est pas due, à l'ordre 1, à l'atmosphère spécifique du four de traitement thermique (interaction hydrogène plasticité) mais aux évolutions notables de la microstructure de l'acier austénitique utilisé. La précipitation conjointe de carbures $M_{23}C_6$ et de la phase σ dans un premier temps, suivie de la dissolution des carbures déstabilisés lors de la croissance de la phase σ , entraînent des modifications majeures du comportement en fluage de cet acier. D'autre part, le cyclage thermique apparaît comme un paramètre d'ordre 1 sur ces évolutions métallurgiques et mécaniques.

4 Modélisation

La modélisation proposée prend donc en compte la cinétique différente d'évolution de la microstructure en condition isotherme et en cyclage thermique. Il a été considéré que, dans la gamme de contraintes d'intérêt, le fluage à 870°C peut se modéliser avec une loi de Norton à seuil :

$$\dot{\epsilon} = A(\sigma - \sigma_s)^N$$

Les paramètres A, N et σ_s identifiés dépendent de l'avancement du vieillissement, matérialisé par l'augmentation du taux de phase sigma. La figure 5 illustre la modélisation proposée de l'accélération du fluage observée.

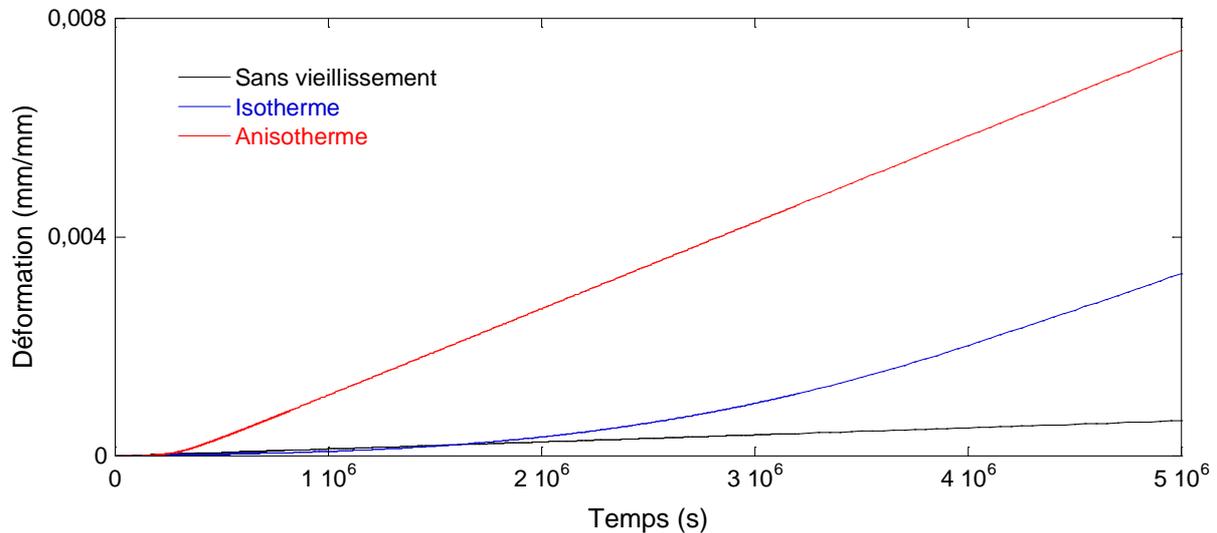


Figure 5 : Modélisation de la déformation de fluage à 870°C sous 10 MPa sans vieillissement, avec vieillissement isotherme et avec vieillissement cyclique (cycles de 2h 20-870°C).

Ce modèle a été intégré dans le code éléments finis Cast3M [10] afin de calculer la déformation en fluage d'un bras d'outil en flexion (Figure 6).

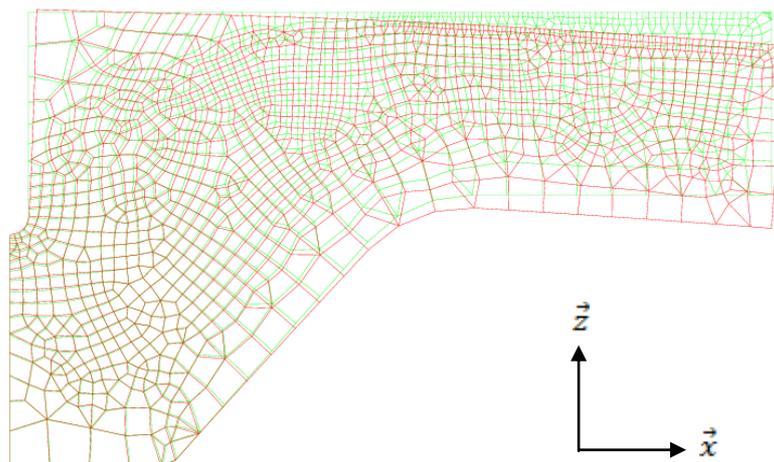


Figure 6: Bras d'outil, fluage en cyclage thermomécanique à 870°C, en vert le maillage non déformé, en rouge, la déformée après 800 000 s

La figure 7 montre la comparaison entre l'expérience et la modélisation proposée. Ainsi, une flèche de 26,18 mm a été mesurée, en moyenne sur les 4 bras d'un outillage, après 86 cycles en service. La flèche calculée est de 27,2 mm alors que, pour la même durée de maintien en condition isotherme, la

flèche calculée est de seulement 1,73 mm. Ceci confirme la nécessité de prendre en compte non seulement le vieillissement, mais également le cyclage thermique et ses conséquences sur la cinétique de vieillissement.

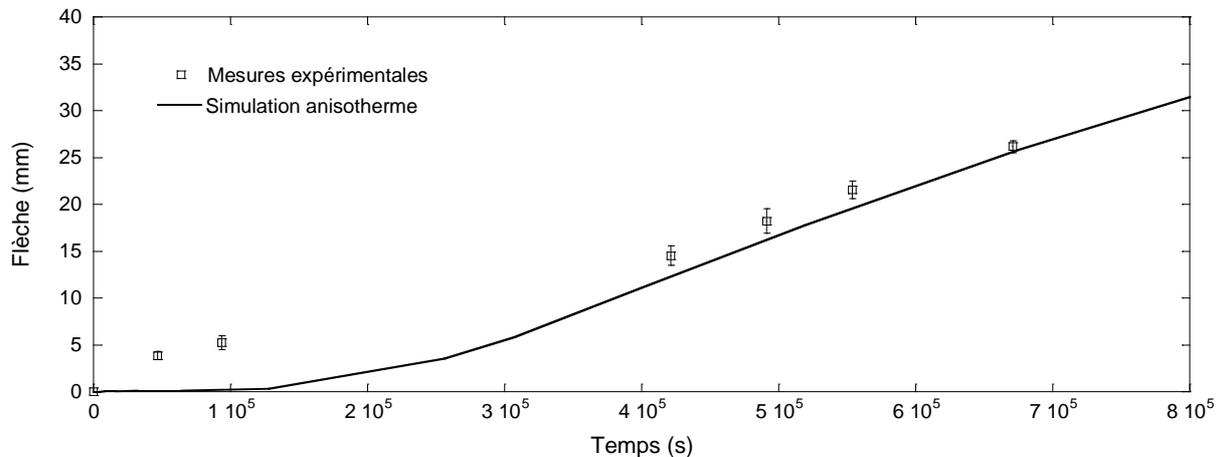


Figure 7: Comparaison entre les déformations des bras mesurées et prédites par la simulation en conditions anisothermes (Cycles de 2h10)

Références

- [1] D.M.E. VILLANUEVA et al., Materials Science and Technology 22(9), pp. 1098-1104 (2006).
- [2] A. V. KINGTON, F.W. NOBLE, Materials Science and Technology 11(3), pp. 268-275 (1995)
- [3] J. BROZDA, J. MADEJ, Engineering Failure Analysis 15, pp. 368-377, (2008).
- [4] A.Y. AL-KAWAIE, A. KERMAD, Saudi Aramco Journal of Technology, (2011).
- [5] A.V. KINGTON, F.W. NOBLE, Materials Science and Engineering A 138, pp. 259-266, (1991).
- [6] E. O. HALL, S.H. ALGIE, Metallurgical Reviews, 11(1), pp. 61-88 (1966).
- [7] Nickel Development Institute, A.I.S.I., High-Temperature Characteristics of Stainless Steels, in A Designers' handbook series. 2011.
- [8] C. PARRENS Cyclage thermomécanique d'un acier inoxydable austénitique à haute température : influence sur le vieillissement et le comportement mécanique. Caractérisations expérimentales et modélisations. Thèse INP Toulouse (2017)
- [9] C. PARRENS, J. LACAZE, B. MALARD, J.-L. DUPAIN, D. POQUILLON, Isothermal and Cyclic Aging of 310S Austenitic Stainless Steel, Metallurgical and Materials Transactions A, 48(6), 2834-2843. (2017)
- [10] <http://www-cast3m.cea.fr/>