

Utilisation de la méthode d'auto-échauffement à haute-température pour la détermination rapide des propriétés en fatigue à grand nombre de cycles de deux alliages métalliques pour turboréacteurs aéronautiques

V. ROUÉ^{a,b}, C. DOUDARD^a, S. CALLOCH^a

A. MATTIELLO^b, Q. PUJOL D'ANDREBO^b

a. Institut de Recherche Dupuy de Lôme, UMR CNRS 6027, Brest.

b. Safran Aircraft Engines, Villaroche.

Résumé :

La méthode d'auto-échauffement permet de réduire le temps et le coût de caractérisation des propriétés en fatigue des matériaux. Elle se base sur le suivi de température de l'éprouvette au cours de sollicitations cycliques. Cette méthode a été largement étudiée et validée à température ambiante sur de nombreux matériaux. L'objectif de l'étude est d'adapter cette méthode aux hautes températures, afin de déterminer les propriétés en fatigue de deux alliages métalliques pour turboréacteurs aéronautique. Un alliage de titane, le TA6V, est d'abord étudié pour la section froide du turboréacteur. Des courbes d'auto-échauffement ont été réalisées pour différentes conditions de température et de rapport de charge. Un modèle probabiliste à deux échelles est utilisé pour interpréter les courbes de fatigue et ainsi déterminer les limites d'endurance du matériau pour ces différentes conditions d'essais. Une comparaison avec des essais disponibles dans la base de données de Safran a également été réalisée et de très bonnes tendances sont observées. Dans la partie chaude du turboréacteur, un superalliage monocristallin est étudié, l'AM1. La réalisation des courbes d'auto-échauffement à des températures voisines de 1000°C a été rendue possible en développant et optimisant le protocole d'essais.

Abstract :

The self-heating method allows the rapid determination of fatigue properties. The method is based on the monitoring of the specimen temperature under cyclic loading. The time-saving advantage of this method has been demonstrated on several materials, at room temperature. The goal of this study is to adapt the self-heating procedure at high temperature, in order to determine the fatigue properties of aeronautical alloys. A titanium alloy (Ti-6Al-4V) is first studied for the cold section of the turbojet. Self-heating curves have been determined for different conditions of load ratio and temperature. A two-scale probabilistic model is used to interpret the self-heating results. The comparison with classical fatigue tests from Safran database is also performed and good trends are observed. In the hot section of the turbojet, a single crystal superalloy (AM1) is studied. The self-heating procedure is optimised in order to obtain self-heating curves close to 1000°C.

Mots clefs : Fatigue, HCF, auto-échauffement, TA6V, AM1

1 Introduction

Afin de dimensionner en fatigue les pièces de turboréacteurs, il est important de correctement caractériser les propriétés en fatigue des matériaux à différentes températures. En effet, un gradient thermique s'installe dans le moteur en cours de fonctionnement et les pièces sont sollicitées à différentes températures. De plus, les pièces en mouvement subissent une force centrifuge, ce qui entraîne la présence de fortes contraintes moyennes. Les propriétés en fatigue doivent donc être déterminées pour différentes conditions de température et de rapport de charge.

Le dimensionnement en fatigue des pièces de moteurs d'avion se fait généralement à partir de diagrammes de Haigh-Goodman, représentant les limites d'endurances conventionnelles à 10^7 cycles (en contraintes alternées) en fonction des contraintes moyennes à différentes températures. Classiquement, les points du diagramme sont obtenus à partir d'essais de fatigue suivant un protocole Staircase [1]. De très nombreux essais de fatigue sont donc nécessaires pour chaque condition de rapport de charge et de température, ce qui s'avère long et coûteux (notamment pour des essais à haute température). L'objectif de l'étude est d'adapter la méthode d'auto-échauffement pour des essais à haute température. Cette méthode permet la détermination rapide des propriétés en fatigue à partir de l'étude des phénomènes dissipatifs [2-3]. Deux matériaux sont étudiés. Dans la partie froide du turboréacteur, un alliage de titane (TA6V) est caractérisé pour différentes températures et à plusieurs rapports de charge pour des applications de disques de compresseur. Dans la partie chaude, un superalliage monocristallin à base nickel (AM1) est étudié jusqu'à 1050°C pour des applications d'aubes de turbines.

La méthode d'auto-échauffement sous chargement cyclique repose sur l'observation de l'évolution de la température de l'éprouvette au cours d'une succession de blocs avec des amplitudes de chargement croissantes. Pour chaque bloc, la température stabilisée est relevée et est associée à l'amplitude de chargement afin de construire une courbe d'auto-échauffement. À partir d'un certain niveau de chargement, la température stabilisée augmente de façon significative. Cette augmentation est due à l'activation de mécanismes dissipatifs. Lorsque ces mécanismes sont aussi ceux à l'origine de l'endommagement en fatigue, une interprétation de la courbe d'auto-échauffement permet alors de déterminer la limite d'endurance en fatigue à partir d'une seule éprouvette et en quelques heures. De plus, une modélisation probabiliste à deux échelles permet dans certains cas de déterminer la dispersion des essais de fatigue à partir de l'analyse de cette courbe. Ce modèle a été développé et validé sur une large gamme d'aciers à température ambiante [3].

Dans le cadre de l'étude sur les alliages métalliques pour turboréacteur, il s'agit tout d'abord d'un challenge expérimental : il faut en effet pouvoir mesurer une faible élévation de température de l'éprouvette, l'auto-échauffement de l'éprouvette, dans un environnement à haute température. Il s'agit également d'un challenge de modélisation : il faut en effet comprendre les mécanismes dissipatifs afin de faire le lien entre les mesures d'auto-échauffement et les propriétés en fatigue.

2 Section froide : alliage de titane TA6V

Dans cette partie, quelques résultats d'une campagne d'essais sur des éprouvettes de TA6V sont présentés. Les premiers essais d'auto-échauffement avec un four ont été réalisés afin de fixer les premiers paramètres du protocole d'essais.

Le dispositif expérimental est d'abord exposé. Ensuite, le modèle probabiliste à deux échelles utilisé pour interpréter les courbes d'auto-échauffement est rapidement présenté. Enfin, l'influence de la température et du rapport de charge sur les courbes d'auto-échauffement est montrée et une comparaison avec des essais de fatigue est réalisé pour confronter les résultats obtenus par auto-échauffement.

2.1 Protocole d'essai à haute température

Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques de TA6V sur une machine servo hydraulique (**Fig. 1**). Le choix du dispositif de chauffage, un four à résistance, a été réalisé afin d'obtenir une température de l'environnement la plus stable possible. Les conditions aux limites sont soignées en confinant au maximum le four afin d'éviter les perturbations éventuelles.

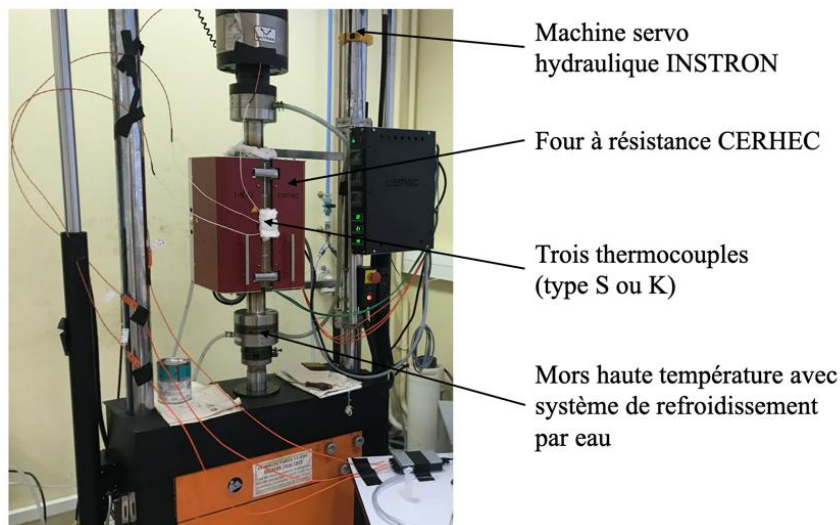


Fig. 1. Dispositif expérimental.

De même que pour le protocole expérimental à température ambiante, trois thermocouples sont utilisés pour déterminer la température d'élévation de température de l'éprouvette. Un seul thermocouple est disposé sur l'éprouvette (approche 0D). Les deux autres thermocouples sont fixés à proximité de l'éprouvette pour capter les variations thermiques dans l'environnement immédiat, tout en n'étant pas impactés par l'auto-échauffement de l'éprouvette. Ainsi, la température θ peut être déterminé par

$$\theta(t) = T_{ep}(t) - \frac{T_{MB}(t) + T_{MH}(t)}{2}, \quad \text{eq 2-1}$$

avec T_{ep} la température issue du thermocouple de l'éprouvette, T_{MB} et T_{MH} les températures des thermocouples fixés respectivement sur le mors bas et le mors haut. Ainsi, les variations de l'environnement thermique sont compensées et la température d'auto-échauffement est isolée.

La régulation du four ne se fait évidemment pas directement sur la température de l'éprouvette afin que l'auto-échauffement de l'éprouvette ne perturbe pas la régulation et la stabilité de l'environnement thermique. Le protocole classique d'auto-échauffement est alors réalisé. Des blocs de chargement de 6000 cycles sont réalisés à une fréquence de sollicitation de 30 Hz. Au cours de ses blocs, un suivi de température est réalisé et un auto-échauffement de l'éprouvette est observé (**Fig. 2.**). L'éprouvette possède un volume suffisamment petit par rapport au four et au mors pour ne pas perturber l'environnement thermique ; il s'agit d'une faible augmentation de température (du moins sur les premiers paliers d'auto-échauffement) sur une courte période (200s de sollicitation), alors que l'inertie du four étant bien plus importante.

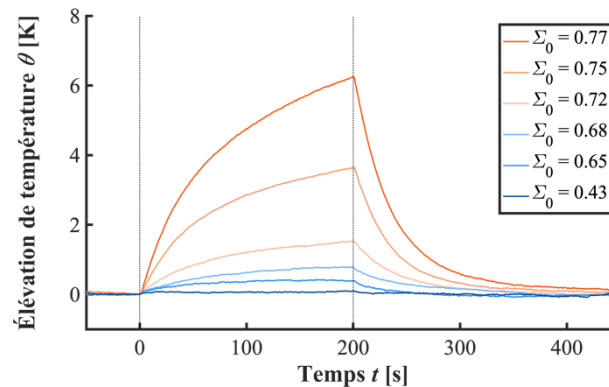
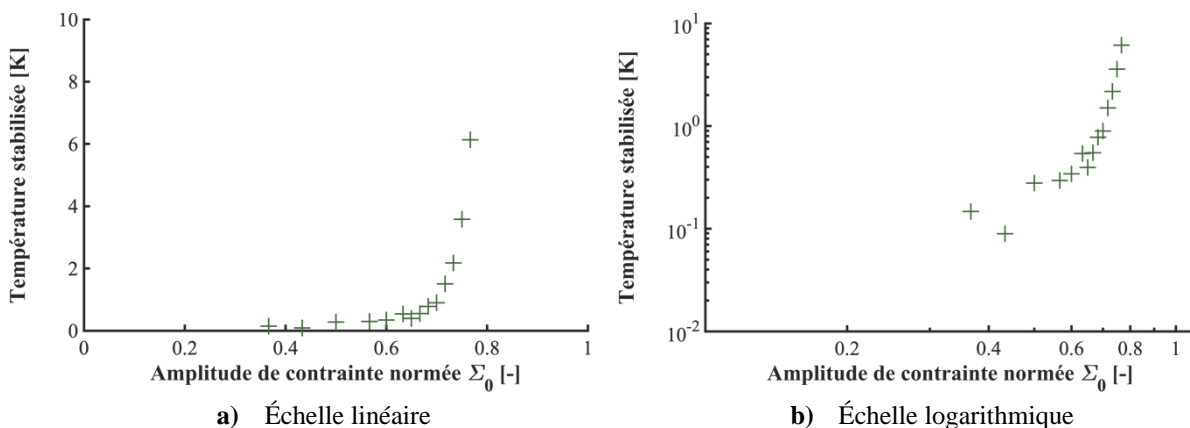


Fig. 2. Élévation de température de l'éprouvette en TA6V lors des paliers d'auto-échauffement ($T = 250^\circ\text{C}$, $R = -1$).

À la fin des blocs de chargement, la température stabilisée est relevée et est associée à l'amplitude de chargement du bloc. Pour certains paliers, notamment les derniers, la température ne semble pas se stabiliser. Cependant, la température à l'issue du palier est tout de même relevée et assimilée à une température stabilisée. La courbe d'auto-échauffement est alors tracée (**Fig. 3.**). Pour des raisons de confidentialité, les contraintes sont normées par une valeur arbitraire. À partir d'une certaine amplitude de contrainte, la température stabilisée augmente de manière significative, alors que la sollicitation se situe toujours dans le domaine élastique macroscopique. La représentation en échelle logarithmique permet de mettre en évidence deux régimes d'auto-échauffement. Afin d'interpréter les courbes, le modèle probabiliste à deux échelles, développé pour les aciers à température ambiante, sera utilisé.



a) Échelle linéaire

b) Échelle logarithmique

Fig. 3. Courbe d'auto-échauffement du TA6V ($T = 250^\circ\text{C}$, $R = -1$).

2.2 Modélisation probabiliste à deux échelles

Le Volume Élémentaire Représentatif (VER) du modèle est constitué d'une matrice élasto-plastique dans laquelle des inclusions élasto-plastique s'activent avec l'augmentation de l'amplitude du chargement (Fig. 4).

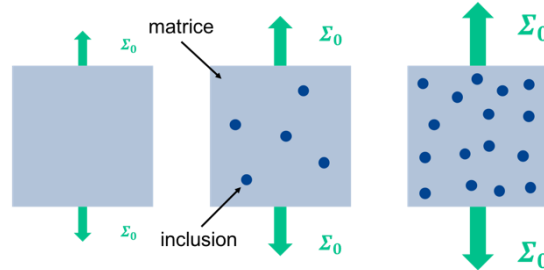


Fig. 4. VER du modèle probabiliste à deux échelles : activation de sites (inclusions) élasto-plastiques dans une matrice élasto-plastique avec l'amplitude de contrainte.

Chaque site (inclusion) est défini par un écrouissage cinématique linéaire qui s'active à partir d'un certain niveau d'amplitude σ_y^μ . Le VER est constitué d'une population d'inclusion suivant un Processus Ponctuel de Poisson (P.P.P.). L'intensité du processus de poisson est définie par une loi puissance

$$\lambda = \frac{1}{V_0} \left(\frac{\Sigma_0}{S_0} \right)^m \quad \text{eq 2-2}$$

Avec l'hypothèse du maillon le plus faible, la probabilité de rupture du volume V est alors celle de trouver au moins un site actif, soit avec le P.P.P. et l'intensité en loi puissance

$$P_F = 1 - \exp\left(-\frac{V}{V_0} \left(\frac{\Sigma_0}{S_0} \right)^m\right), \quad \text{eq 2-3}$$

ce qui correspond alors au modèle de Weibull [4].

À partir du scénario d'activation des sites, il est alors possible de calculer la dissipation d'une éprouvette en fonction de l'amplitude de chargement [2-3]. La résolution de l'équation de la chaleur permet alors de faire le lien entre l'élévation de température de l'éprouvette sous chargement cyclique en fonction de l'amplitude de chargement appliqué. Cette température se décompose en deux contributions, celle d'un régime primaire (correspondant à la dissipation de la matrice élasto-plastique) et celle du régime secondaire (correspondant à la dissipation de la population de sites élasto-plastique, à l'origine de l'endommagement en fatigue). Cette température stabilisée s'écrit alors

$$\bar{\theta} = \alpha \left(\frac{\Sigma_0}{\Sigma_{max}} \right)^2 + \beta \left(\frac{\Sigma_0}{\Sigma_{max}} \right)^{m+2}, \quad \text{eq 2-4}$$

où Σ_0 est l'amplitude de contrainte du bloc de chargement. Le régime primaire est caractérisé par une intensité α et le régime secondaire par une intensité β . L'évolution en $(\Sigma_0)^2$ est classiquement observé sur les aciers [3]. L'analyse du second régime permet alors d'évaluer les propriétés en fatigue du matériau.

2.3 Influence de la température et du rapport de charge

Le changement de régime d'auto-échauffement est assimilé à l'activation des sites de microplasticité et donc à la limite d'endurance du matériau. Afin de faciliter l'interprétation, le régime primaire

d'auto-échauffement est mis en évidence. Six essais ont été réalisés et sont présentés (**Fig. 5.**) pour montrer l'influence de la température et du rapport de charge sur les courbes d'auto-échauffement. Lorsque la température de l'environnement augmente, le second régime d'auto-échauffement s'active pour des amplitudes de contrainte plus faibles. De même lorsque le rapport de charge augmente (et donc avec la présence d'une contrainte moyenne). Ces résultats sont en accord avec les résultats classiques de diminution des propriétés en fatigue avec l'augmentation de la température et/ou du rapport de charge.

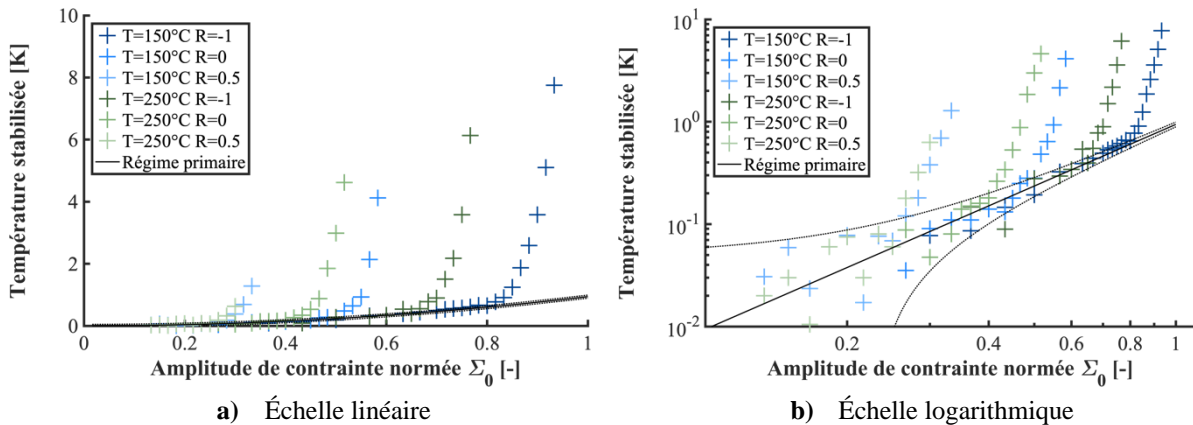


Fig. 5. Courbes d'auto-échauffement du TA6V dans différentes conditions.

Les essais d'auto-échauffement sur TA6V sont donc capables de retranscrire l'influence de la température et du rapport de charge sur les propriétés en fatigue. Afin de compléter l'analyse, les amplitudes de contrainte de transition entre les deux régimes d'auto-échauffement sont comparées à la base de données d'essais de fatigue de Safran Aircraft Engines.

2.4 Comparaison avec des essais de fatigue

La base de données est constituée de différents lots de matière, il est donc compliqué d'analyser simplement les résultats. Quelques lots sont isolés afin de réduire l'impact des différents lots dans l'analyse et la comparaison avec les résultats d'auto-échauffement est présentée (**Fig. 6.**). Les amplitudes de contrainte associées à la transition entre les deux régimes d'auto-échauffement sont représentées par des asymptotes horizontales (car elles ne sont pas associées à un nombre de cycles) afin de les comparer aux essais de fatigue.

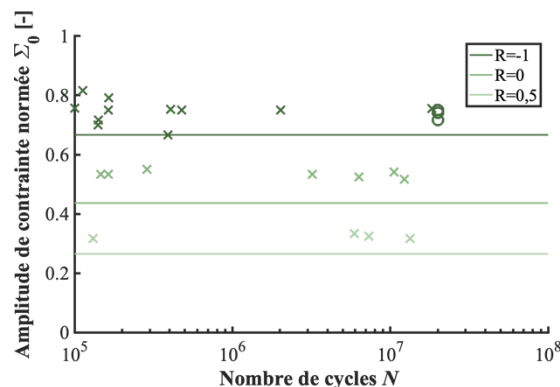


Fig. 6. Comparaison avec des essais de fatigue ($T = 250^\circ\text{C}$).

Il est compliqué de conclure quantitativement sur les valeurs de limites d'endurance étant donné qu'il s'agit de lots de matière différents. Cependant, une très bonne tendance est observée, notamment sur l'influence du rapport de charge sur la limite de fatigue. Les résultats sont très prometteurs, d'autant plus que chaque essai d'auto-échauffement pour chaque condition a duré moins de 2h (une journée entière avec la mise en place et la stabilisation de la température avant l'essai). Ce qui constitue un gain de temps considérable en comparaison avec une campagne d'essais de fatigue classique.

3 Section chaude : alliage de nickel AM1

Dans cette partie, des essais d'auto-échauffement à très haute température sont présentés sur un superalliage monocristallin, l'AM1. Le même dispositif expérimental est utilisé (**Fig. 1.**), mais la mesure par thermocouple est adaptée. L'influence de la température sur la courbe d'auto-échauffement est également exposée.

3.1 Protocole d'essai

La même géométrie d'éprouvette est utilisée que pour l'étude sur le TA6V. Des précautions similaires sont appliquées et de la même manière que précédemment, une succession de blocs de chargement de 6000 cycles à 30 Hz est appliquée sur l'éprouvette. Le suivi de température avec les trois thermocouples permet d'isoler la température d'auto-échauffement de l'éprouvette (**Fig. 7.**).

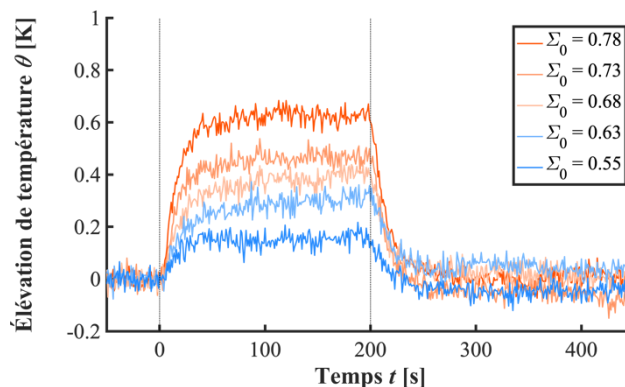


Fig. 7. Élévation de température de l'éprouvette en AM1 lors des paliers d'auto-échauffement ($T = 950^{\circ}\text{C}$, $R = 0$).

La température stabilisée à l'issue des paliers d'auto-échauffement est alors associée à l'amplitude de chargement du bloc afin de construire une courbe d'auto-échauffement (**Fig. 8.**). Contrairement aux courbes d'auto-échauffement sur TA6V, un seul régime d'auto-échauffement semble être présent pour l'AM1 (échelle logarithmique).

Les éprouvettes d'AM1 s'auto-échauffent peu sous sollicitation cyclique, mais le protocole d'essais mis en place a permis de le détecter et de réaliser des essais d'auto-échauffement à 950°C , avec de bonnes résolutions thermiques.

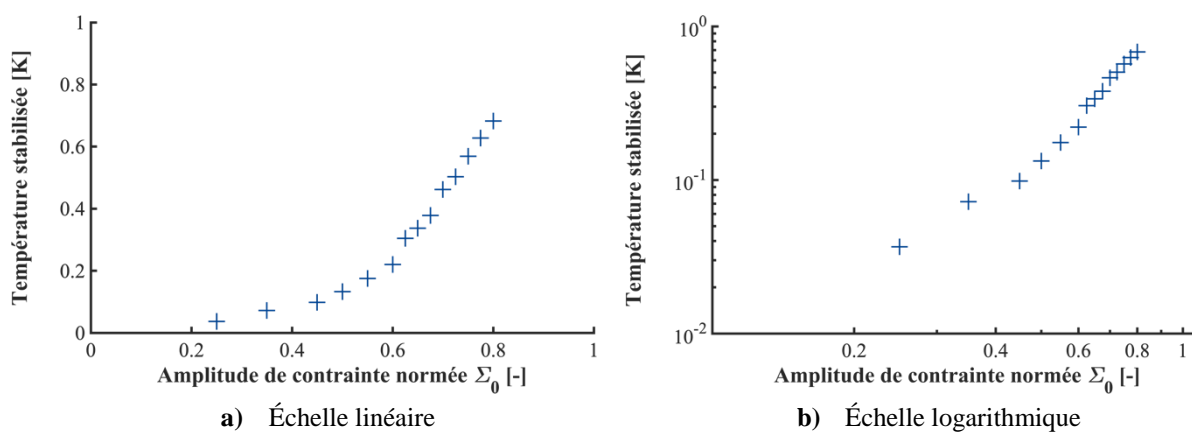


Fig. 8. Courbe d'auto-échauffement de l'AM1 ($T = 950^{\circ}\text{C}$, $R = 0$).

3.2 Influence de la température

Deux essais ont été réalisés pour la condition $R = 0$, un essai à 950°C et un autre à 1050°C . Le protocole mis en place permet de détecter l'auto-échauffement de l'éprouvette à ces températures, et ainsi des courbes d'auto-échauffement peuvent être tracées (Fig. 9).

Un décalage de la courbe d'auto-échauffement est observé avec l'augmentation de la température, traduisant l'activation plus précoce (en fonction de l'amplitude de contrainte) de mécanismes dissipatifs. Ce qui pourrait signifier une diminution des propriétés en fatigue si ces mécanismes dissipatifs peuvent être reliés à des mécanismes d'endommagement par fatigue.

De nombreuses études doivent encore être menées pour comprendre l'origine de cet auto-échauffement dans ce matériau, et notamment l'origine de l'unique régime d'auto-échauffement. De plus, il serait intéressant, si les mécanismes dissipatifs sont bien issus de mécanismes d'endommagement en fatigue, de relier ces observations à des résultats d'essais de fatigue. Pour cela, une modélisation est bien sûr nécessaire afin d'interpréter les résultats d'auto-échauffement.

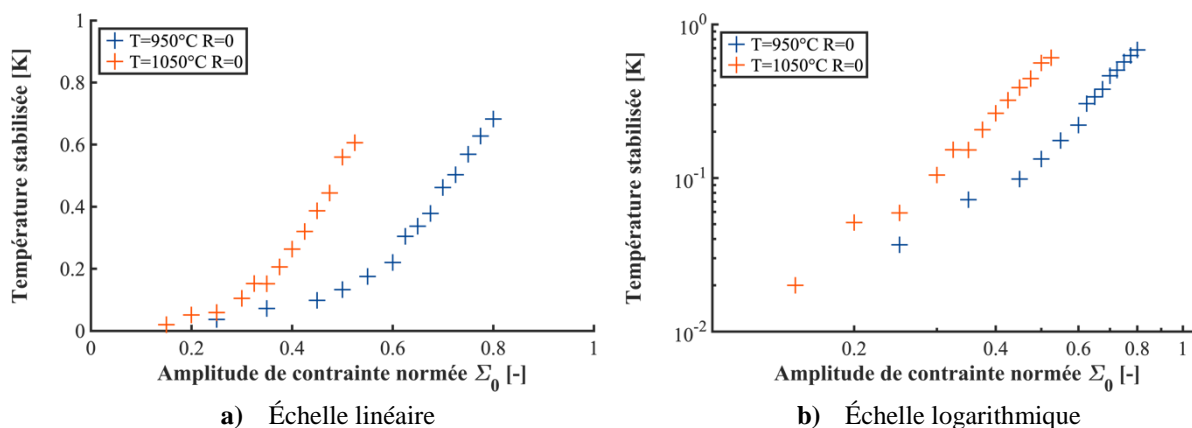


Fig. 9. Influence de la température sur la courbe d'auto-échauffement de l'AM1 ($R = 0$).

Des essais de fatigue, notamment en VHCF réalisés par des machines ultrasonores à très haute fréquence afin de limiter l'impact du fluage, semblent montrer qu'il n'y a pas d'asymptote horizontale sur les courbes de fatigue [5] (ou du moins pas aussi marquée que sur le TA6V). L'origine du régime unique d'auto-échauffement pourrait donc s'expliquer par le fait qu'il ne semble pas avoir de « seuil » à partir duquel des mécanismes dissipatifs s'activent comme pour le TA6V et une large gamme d'aciers. L'endommagement serait donc plus progressif. L'influence de la température est bien captée

par auto-échauffement. D'autres conditions de température et rapports de charge doivent encore être testées afin d'apporter plus d'information sur les mécanismes dissipatifs pour alimenter une modélisation, nécessaire à l'interprétation de ces courbes d'auto-échauffement.

4 Discussion

Les essais d'auto-échauffement permettent de réduire considérablement les temps de caractérisation en fatigue de nombreux matériaux. Cette étude a permis de mettre en place un protocole d'essais, et avec de nombreuses précautions, de réaliser des courbes d'auto-échauffement avec de très bonnes résolutions thermiques à différentes températures.

Les mêmes observations que sur aciers ont été réalisées pour l'alliage de titane (présence de deux régimes d'auto-échauffement) et ainsi l'interprétation a pu se faire à partir d'un modèle probabiliste à deux échelles [3]. Les résultats d'auto-échauffement pour le TA6V sont en accord avec les observations d'évolution des propriétés en fatigue pour différentes températures et rapport de charge. La méthode d'auto-échauffement est donc très prometteuse pour réduire le temps et le coût de caractérisation des éprouvettes de TA6V forgé, dans de nombreuses configurations de température et rapport de charge.

Pour l'alliage de la partie chaude du turboréacteur, il a fallu plus de temps pour l'obtention des courbes d'auto-échauffement à très haute température. Cependant, le protocole développé a permis de réaliser des courbes d'auto-échauffement à ces températures. L'interprétation des courbes d'auto-échauffement de l'AM1 est plus délicate, dans le sens où la configuration de la courbe avec un unique régime d'auto-échauffement ne permet pas de détecter directement un seuil d'activation. Des méthodes de dépouillement empiriques de la courbe d'auto-échauffement seraient possibles, comme cela se fait pour de nombreux matériaux (élastomères, composites...), en effectuant simplement des recalages à partir de résultats de fatigue. Cependant, il serait plus intéressant de mettre en place une modélisation. Pour cela, des études complémentaires sur l'origine des mécanismes dissipatifs dans l'AM1 sont nécessaires.

Références

- [1] W. Dixon, A. M. Mood, A method for obtaining and analyzing sensitivity data, *Journal of the American Statistical Association* 43 (241) (1948) 109–126.
- [2] C. Doudard, Détermination rapide des propriétés en fatigue à grand nombre de cycles à partir d'essais d'échauffement, Thèse de doctorat, ENS Cachan (2004).
- [3] R. Munier, Étude de la fatigue des aciers laminés à partir de l'auto-échauffement sous sollicitation cyclique : essais, observations, modélisation et influence d'une pré-déformation plastique, Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale (2012).
- [4] W. Weibull, A statistical distribution function of wide applicability, *Journal of applied mechanics* 103 (1951) 293–297.
- [5] A. Cervellon, Propriétés en fatigue à grand et très grand nombre de cycles et à haute température des superalliages base nickel monogranulaires, Thèse de doctorat, ENSMA (2018).