

Étude Thermomécanique d'une nouvelle géométrie d'éprouvette de fatigue en environnement sévère

Catherine MABRU, Christine ESPINOSA & Rémy CHIERAGATTI

ENSICA /DGM

1, place Émile Blouin 31056 Toulouse Cedex 05

Résumé

De nombreuses pièces mécaniques sont soumises à des variations de chargement dans des environnements agressifs. Pour évaluer la tenue des matériaux les constituant, a été développée une nouvelle géométrie d'éprouvette. Il s'agit d'une éprouvette tubulaire, dont le fût constitue la zone utile, munie d'un noyau fabriqué dans le même matériau qui fait office de demi ligne. Dans cet article, sera présenté le bon comportement mécanique de cette éprouvette en fatigue et en flambage. Pour vérifier ce dernier point, un modèle tridimensionnel complet a été réalisé. Les résultats étant concluants, l'étude du comportement en cyclage thermique a débuté. Un modèle a été développé au moyen d'un code par éléments finis qui montre des gradients inférieurs à 40K pour des amplitudes de cyclage de l'ordre de 850 K. Ce modèle une fois validé expérimentalement permettra d'optimiser le système d'essai pour minimiser les gradients tout en augmentant la fréquence des cycles thermiques.

Abstract

In many cyclic application and fatigue investigations, the solid or tubular specimens are employed. A new tubular specimen is proposed in this study. A central rod can pass through the tubular sample and plays the role of a one-side fixture. In this paper, the validity check of this specimen concerning the fatigue and buckling behaviour is first presented. To examine buckling behaviour, a complete 3D-model is performed. Then thermal cycling behaviour is analysed through numerical calculations. It has been proved that calculated temperature gradient on the gauge part of the specimen is less than 40K for a cycle amplitude of 850K. This model has to be validated by experimental tests and then will be used to optimise the specimen and fixture design in order to decrease temperature gradient without increasing thermal cycling frequency.

Mots-clés :

éprouvette, fatigue thermomécanique, environnement

1 Introduction

De nombreuses pièces mécaniques sont soumises à des variations de chargement dans des environnements agressifs notamment liquides ou gazeux. Pour évaluer la tenue des matériaux les constituant, une nouvelle géométrie d'éprouvette est proposée. Le but de cette géométrie est de permettre de solliciter la partie utile de l'éprouvette dans des environnements agressifs en facilitant l'installation de dispositifs environnementaux (fours, bains ou autoclaves...) et en limitant les effets de flexion parasite. Après description de son principe et des résultats de sa validation en fatigue et en flambage, sera présentée

une étude thermique destinée à évaluer l'utilisation de cette éprouvette pour des essais de fatigue thermomécanique : la période la plus courte du cycle thermique générant un gradient de température maximum fixé a priori dans la partie utile sera calculé à partir d'un modèle numérique.

2 Principe

La solution choisie, décrite par une coupe en figure 1, est basée sur une éprouvette tubulaire dont le fût constitue la zone utile et d'un noyau réalisé dans le même matériau. Ce noyau fait office de demi ligne. Une telle disposition libère un demi espace. En outre, le moment d'inertie en flexion de l'éprouvette tubulaire est beaucoup plus grand que celui du noyau. Cette propriété permet de filtrer les moments de flexion parasites provenant du montage d'essai. Plusieurs gammes d'usinage peuvent être envisagées pour réaliser cette éprouvette. La plus contraignante pour le dimensionnement est celle qui prévoit de récupérer le noyau au centre de l'éprouvette est alors la plus indiquée. Cette gamme part d'un barreau de 20 mm de diamètre et de 100 de longueur. La première étape consiste en un usinage par électroérosion par carottage, suivi d'une série d'usinage visant à récupérer l'ébauche du noyau. C'est ce carottage qui est à l'origine des cotes maxi du diamètre du noyau et du diamètre intérieur de l'éprouvette tubulaire : l'entrefer ne pouvait être inférieur à 1mm au final. Les contraintes de fabrication définissant des cotes maxi et mini pour les différentes pièces la constituant, le problème consiste à vérifier qu'il est possible de définir des cotes conduisant à faire de la partie centrale du tube, la zone de l'éprouvette la plus sollicitée. L'objectif étant de réaliser une éprouvette de fatigue, c'est bien entendu la tenue en fatigue de ces pièces qui a été vérifiée en premier. L'existence d'un noyau et d'un tube susceptibles d'être sollicités en compression impose aussi une vérification en flambage de l'ensemble.

3 Les résultats de la validation en fatigue et en flambage.

Cette validation est présentée de façon plus détaillée dans un article paru à l'occasion de la conférence CAMP2002 (Chieragatti *et al* (2002)). Les principaux résultats sont présentés ici.

3.1 Validation en fatigue

Un calcul élastique basé sur la détermination de facteurs de concentration de contraintes montre que les contraintes les plus importantes se localisent dans la zone utile de l'éprouvette. Pour étayer cette analyse sommaire, des essais d'érouissage cyclique à l'air ambiant ont été effectués sur deux éprouvettes en acier traité X38CrMoV5. La première est l'éprouvette proposée et l'autre est une éprouvette cylindrique classique dont le fût est un rond de 7,5 mm de diamètre et 10 mm de longueur : ces cotes permettent d'obtenir des charges sensiblement égales pour la même contrainte dans les deux éprouvettes. Les essais ont été effectués à charge imposée alternée symétrique du domaine élastique au domaine plastique en augmentant l'amplitude de la charge par paliers. À chaque palier, la déformation totale est mesurée continuellement. La déformation retenue pour une charge donnée est celle mesurée lorsque le régime d'érouissage stabilisé est atteint. La figure 2 montre l'évolution de l'amplitude de contrainte en fonction de cette déformation totale pour les deux types d'éprouvettes. Dans la zone élastique et pour des déformations plastiques faibles, il y a coïncidence des comportements. Pour les déformations les plus importantes, une légère divergence apparaît liée à une légère mise en tonneau propre à la plupart des éprouvettes tubulaires. En outre, aucun flambage visible n'a été constaté sur le noyau de l'éprouvette tubulaire. Ce comportement satisfaisant pour la validation du principe de cette éprouvette a été confirmé par l'étude numérique de ses conditions de flambage présentée ci-après.

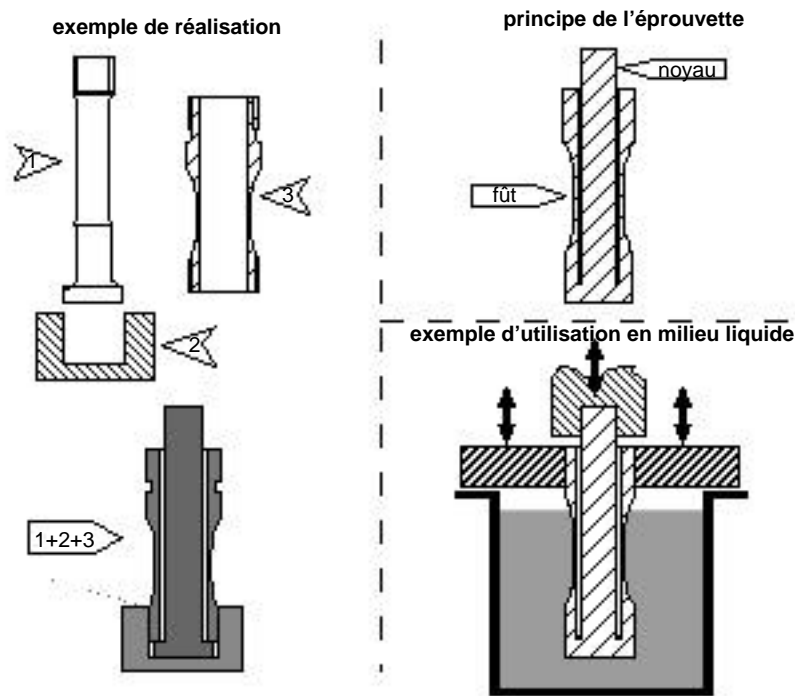


FIG .1- Principe de conception et d'utilisation de l'éprouvette proposée

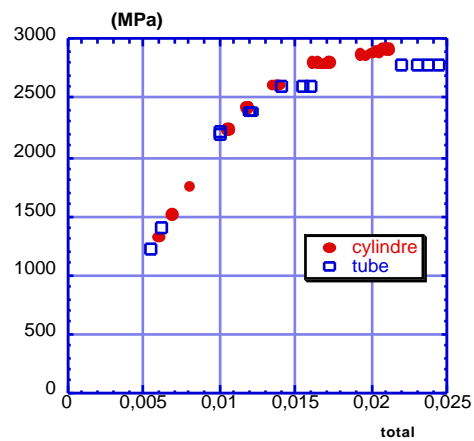


FIG.2 - Courbes d'écrouissage cyclique de l'acier considéré obtenue sur les deux types d'éprouvettes

3.2 Calcul au flambage

Le logiciel de calcul LS-DYNA (2001) a été utilisé pour réaliser la simulation en flambage de l'éprouvette. Un modèle tridimensionnel complet est réalisé. Le modèle comprend l'éprouvette, et le

noyau qui charge l'éprouvette. Les mors sont considérés indéformables et ne sont pas représentés.

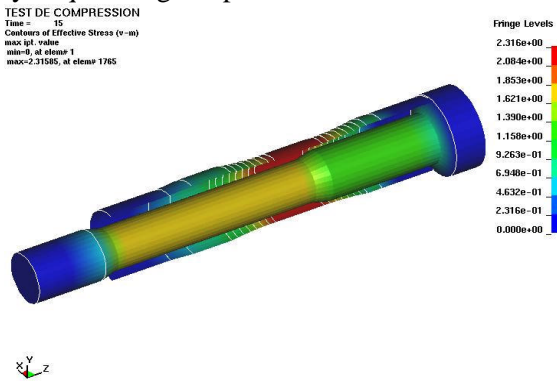


FIG. 3 - Contraintes calculées dans le tube et le noyau de l'éprouvette

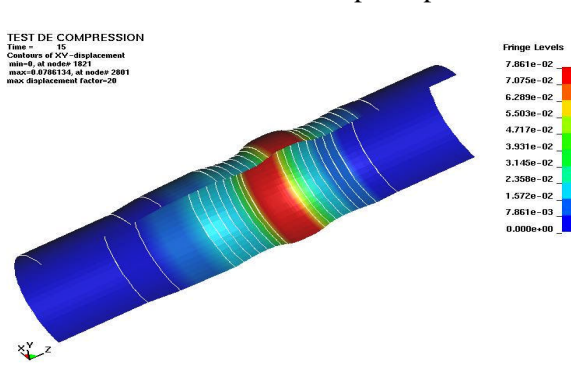


FIG. 4 - Déplacements radiaux (x20) dans le tube en compression

L'éprouvette est modélisée à l'aide d'éléments coques. Dans la partie centrale de l'éprouvette la plus sollicitée, les mailles ont été affinées. Le tube constituant l'éprouvette est de forme générale cylindrique avec des épaisseurs variables dans sa partie centrale. La partie basse cylindrique est vissée sur un mors rigide fixe. Elle est considérée indéformable et fixe. La partie haute cylindrique est vissée sur un mors rigide libre de se déplacer dans la direction axiale. Cette partie est également considérée indéformable. Tous ses déplacements sont bloqués sauf la translation axiale. Elle est supposée solidaire de la tête du noyau. Le noyau est constitué d'une tige cylindrique et d'une tête également cylindrique mais d'un diamètre supérieur. La tête est maintenue en contact sur la partie haute de l'éprouvette par le mors sur lequel elle est vissée. La tête est considérée indéformable. La partie inférieure de la tige est vissée sur un mors mobile et est considérée indéformable. Cette partie (solidaire du mors mobile) se déplace à une vitesse constante imposée dans la direction (z) longitudinale du tube. La vitesse réelle de déplacement du mors a été multipliée par un facteur 1000 afin d'accélérer le calcul. Ceci n'a pas d'effet sur le comportement des matériaux dont on a négligé la viscoplasticité. Le maillage complet comprend 2688 éléments coques quadrangulaires pour l'éprouvette et 4960 éléments volumiques pour la tige du noyau. L'éprouvette et son noyau sont constitués du même acier. Le matériau est modélisé par une loi de comportement élasto-plastique avec écrouissage isotrope et linéaire (loi n°3 de LS-DYNA), avec les caractéristiques suivantes :

Masse volumique	= 7.85.10 ⁻⁶ kg/mm ³	Coefficient de poisson	= 0,3
Module d'Young	E = 220 GPa	Limite élastique	Re = 900 MPa

On montre sur la figure 3, la répartition des contraintes de Von Mises (contraintes rationnelles effectives) dans l'éprouvette et dans la tige du noyau. Les extrémités de la tige comme celles de l'éprouvette étant indéformables, les contraintes dans ces zones sont nulles.

À la fin du calcul, les contraintes dans la zone centrale du tube sont environ 1,27 fois plus grandes que celles dans le noyau. Le déplacement radial maximal reste très faible à la fin du calcul. Il est de l'ordre de 0.08 mm dans la partie centrale la plus mince de l'éprouvette. On observe l'amorçage d'une déformation en tonneau. Le flambage reste donc très limité dans la partie utile de l'éprouvette et est largement plus faible dans le noyau.

3.3 Modélisation d'un cycle thermique.

Afin d'évaluer cette nouvelle éprouvette en fatigue thermomécanique, une modélisation du comportement

thermique a été entreprise. Elle a été réalisée à l'aide du solveur éléments finis THERNL (SAMCEF (2000)), commercialisé par SAMTECH qui permet de traiter des problèmes thermiques instationnaires non linéaires en tenant compte des échanges convectifs et/ou radiatifs, de flux de chaleur ou de températures imposées.

module d'élasticité (MPa)	module de poisson	densité	coef. dilatation (1/K)	coef. conduction (W/mm.K)	capacité calorifique (J/T.K)
2,10e+5	0,3	7,8	1,20e-5	6,40e-2	4,60e-5

La géométrie complète définie pour cette étude est représentée en figure (5). La géométrie et le maillage de l'éprouvette et de son noyau sont identiques à ceux du problème mécanique. Le système d'amarrage, la cellule et la ligne de chargement ont été pris en compte afin de reproduire au mieux l'inertie thermique de l'ensemble.

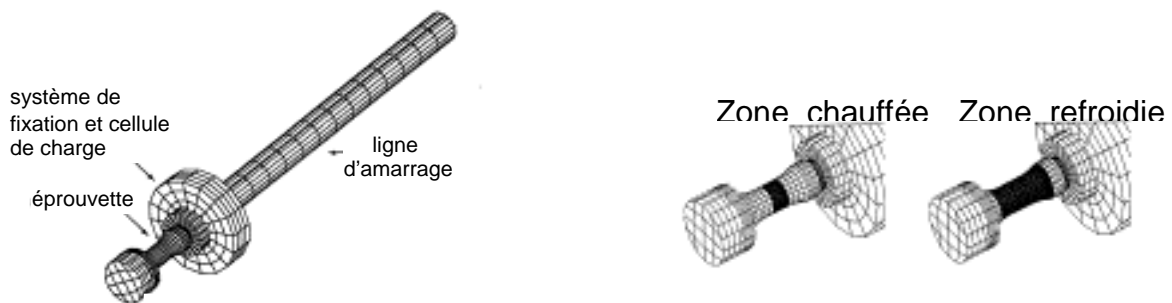


FIG.5 - Modèle géométrique et zone de chargement thermique..

Pour toutes les pièces composant ce système, le matériau choisi dans le modèle est un acier de construction dont les caractéristiques thermiques sont supposées constantes quelle que soit la température. On a également supposé qu'il n'y avait aucune résistance thermique de contact entre les différentes pièces. Les différentes conditions aux limites appliquées sont les suivantes :

- dans les différents cas étudiés, le rayonnement de l'ensemble avec l'environnement, ainsi que le rayonnement entre la surface intérieure de l'éprouvette et la surface extérieure du noyau ont été considérés. L'émissivité de l'acier a été estimée à 0,8 (= 0,8) et supposée également constante.
- quelle que soit la configuration de calcul, on a tenu compte de la convection libre sur l'ensemble de la surface extérieure de la structure ($R = 5\text{W/m}^2.\text{K}$)
- Pour les calculs représentant les phases de refroidissement, un échange convectif forcé a été imposé sur la surface représentée (figure 5). Pour un refroidissement réalisé par air comprimé, le coefficient d'échange convectif a été estimé à $h = 280\text{ W/m}^2.\text{K}$. On a supposé en outre pour une première approximation, que cette convection forcée était uniforme sur toute la surface de refroidissement.
- La modélisation des phases de chauffage par ce système à induction a été réalisée en imposant un flux de chaleur constant et uniforme dans tout le volume représenté (figure 5).
- La valeur de ce flux de chaleur a été estimée à 4 W/m^3 .

Des calculs de cas simples ont tout d'abord permis de valider le maillage et les conditions aux limites. Une étude de cycles thermiques alternant des phases de chauffage et de refroidissement a ensuite été

réalisée. Un cycle de base entre 450 K et 1300 K a été choisi. Ce cycle, sans être représentatif d'un cycle constaté sur pièce présente l'avantage d'être reproductible expérimentalement et de reproduire des conditions assez sévères pour inclure la plupart des cas de pièces industrielles.

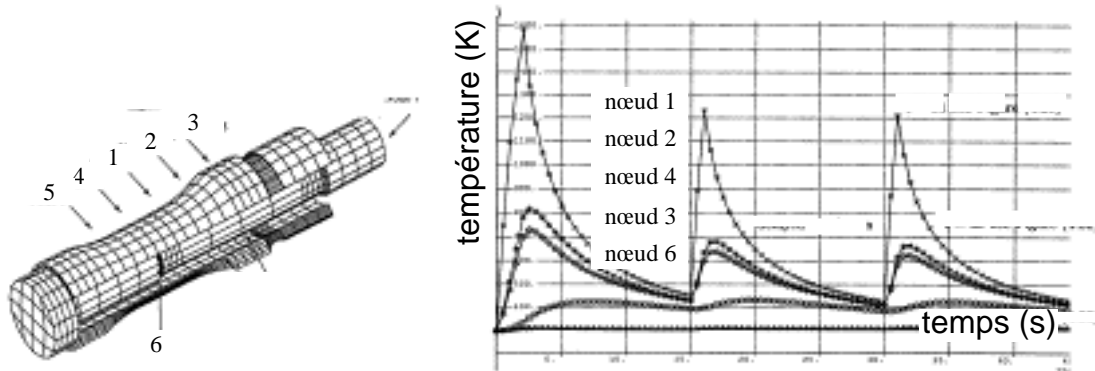


FIG.6 - Position des nœuds de référence et évolution

Avec les conditions limites présentées ci-dessus, les temps de chauffage et de refroidissement sont respectivement de 0,5s et de 13,5s avec une pause de 0,5s entre les deux périodes. Un cycle dure ainsi 15s. Le régime établi, avec des températures extrêmes de la zone utile de l'éprouvette de 450K et 1300K est atteint au bout d'une soixantaine de cycles. La figure 6 présente la température calculée au cours des trois premiers cycles de différents points correspondant aux thermocouples qui seront installés ultérieurement. Il est à noter que les nœuds 2 et 4 sont dans les congés de l'éprouvette. Par ailleurs, le gradient thermique maximal observé sur la zone utile de l'éprouvette au cours d'un cycle est de l'ordre de 40K au point le plus chaud du cycle.

4 Conclusions et perspectives

La validation de l'éprouvette en fatigue est acquise. Le modèle thermique, bien que non encore validé par l'expérience, montre que, sans modification de l'éprouvette et du système d'amarrage, des cycles d'environ 850K en 15s ne génèrent que des gradients de 40K dans la partie utile de l'éprouvette. La suite prévue de cette étude consistera en une validation du modèle thermique par l'expérience et son utilisation pour optimiser la géométrie du système éprouvette-amarrage de façon à éventuellement en diminuer le gradient.

Remerciements

Les auteurs remercient Roland Nordeide pour son travail de stage sur le modèle thermique

Références

Chieragatti R, Mabru.C, Espinosa.Ca & Rezaï-Aria.F 2002 A new specimen for fatigue investigations. CAMP 2002 (ed.G.Biallas & H.J.Maier & O.Hahn & K.Herman & F.Vollertsen),pp. 207-213. Paderborn, Germany

LS-DYNA Keyword User's Manual – March 2001 - Version 960 - Livermore Software Technology Corporation

SAMCEF Système pour l'analyse des Milieux Continus par la méthode des Éléments Finis Manuel de référence des modules BACOM, THERNL, BACOMPOST, Version 8, 2000.