



HAL
open science

Essais de fatigue équibiaxiaux à grand nombre de cycles sur un acier AISI 304L : utilisation de la corrélation d'images pour mesurer les amplitudes de déformation et détecter les réseaux de fissure

Jérémie Rupil, Martin Poncelet, Bumedijen Raka, Ludovic Vincent, Rodrigue Desmorat, J.C. Le Roux, Stéphan Courtin

► To cite this version:

Jérémie Rupil, Martin Poncelet, Bumedijen Raka, Ludovic Vincent, Rodrigue Desmorat, et al.. Essais de fatigue équibiaxiaux à grand nombre de cycles sur un acier AISI 304L : utilisation de la corrélation d'images pour mesurer les amplitudes de déformation et détecter les réseaux de fissure. CFM 2011 - 20ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2011, Besançon, France. hal-03421362

HAL Id: hal-03421362

<https://hal.science/hal-03421362>

Submitted on 9 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Essais de fatigue équi-biaxiaux à grand nombre de cycles sur un acier inoxydable austénitique AISI 304L: Utilisation de la corrélation d'images pour mesurer les amplitudes de déformation et détecter les réseaux de fissure

J. Rupil^{a,b}, M. Poncelet^{a,b}, B. Raka^a, L. Vincent^b, R. Desmorat^a, J.C. Le-Roux^c, S. Courtin^d
et F. Hild^a

a. LMT Cachan, 61 av. du Président Wilson, 94235 Cachan

b CEA Saclay, DEN, SRMA, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex

c EDF R&D / MMC, Avenue des renardières – Ecuelles, 77818 Moret Sur Loing

d AREVA NP, Tour AREVA, 92084 Paris La Défense

Résumé :

Un montage expérimental a été mis en place pour étudier la tenue à la fatigue à grand nombre de cycles en équi-traction/compression d'éprouvettes cruciformes en acier 304L. Deux caméras sont cadrées sur le centre de la zone utile de chaque face de l'éprouvette. Le déclenchement est réalisé suivant une méthode stroboscopique ce qui permet d'obtenir par technique de corrélation d'images numériques des champs de déplacements tout au long de l'essai. Ces champs sont utilisés pour obtenir l'évolution de l'amplitude des déformations ainsi que l'apparition progressive d'un réseau de microfissures.

Abstract :

A new experimental set-up has been applied to study the equitension/compression high cycle fatigue of maltese cross specimens in AISI type 304L stainless steel. Two digital cameras are focused on the center of the gauge zones of each face of the specimen. A stroboscopic trigger of the cameras is used in order to obtain displacement fields all along the tests using a Digital Image Correlation technique. These fields are derived to obtain the evolution of the strain fields and are also used to detect the progressive development of crack networks.

Mots clefs : Fatigue, biaxial, grand nombre de cycles, acier 304, Corrélation d'Images Numériques, stroboscopie.

1 Introduction

Des réseaux de fissures de fatigue ont pu être observés, sous certaines conditions, dans des tuyauteries de centrales nucléaires, notamment au niveau de zones de mélange entre fluides chaud et froid. L'apparition de ces réseaux est provoquée par des fluctuations thermiques induisant un chargement mécanique biaxial à grand nombre de cycles, d'amplitude variable et avec potentiellement la présence d'une contrainte moyenne.

L'étude en laboratoire de la résistance du matériau à de telles sollicitations complexes reste délicate dans la mesure où plusieurs effets potentiellement aggravants pour la durée de vie du matériau peuvent agir simultanément. Dans cet article, les auteurs se concentrent sur l'effet de la seule multiaxialité du chargement sur la résistance du matériau en fatigue à grand nombre de cycles.

Bon nombre de résultats de fatigue multiaxiale existent dans la littérature. Pour autant, aucun d'entre eux (à la connaissance des auteurs) ne considère le cas de sollicitations équi-biaxiales, sans contrainte moyenne (pour ne pas cumuler les effets), à grand nombre de cycles et sur un acier inoxydable austénitique semblable à celui utilisé dans les tuyauteries des centrales, d'où l'intérêt d'une nouvelle campagne expérimentale.

Un dispositif expérimental de fatigue équi-biaxiale a donc été développé [1] en s'appuyant sur une machine

multivérins permettant de contrôler l'effort appliqué sur chacun des bras d'une éprouvette en croix. Les résultats présentés ici concernent tous des essais de fatigue en équibitraction/compression à force imposée, avec un rapport de charge $R_F = F_{min} / F_{max} = -1$, c'est-à-dire sans force moyenne.

2 Matériau

Le matériau testé est un acier inoxydable austénitique de type AISI 304L. Deux coulées ont été testées, leurs caractéristiques principales étant reportées dans le Tableau 1 (conformes aux exigences du code de dimensionnement des centrales nucléaires RCC-M). On constate ainsi que la taille de grain est sensiblement différente entre ces deux coulées. De plus, la composition chimique complète des coulées permet d'indiquer que la coulée THY (Thyssen) est moins stable que la coulée CLI (Creusot Loire Industrie), autrement dit qu'une transformation martensitique induite par la déformation plastique est plus facile dans la nuance THY que CLI.

Une des particularités de ces matériaux est qu'ils peuvent supporter pendant des millions de cycles un chargement d'amplitude suffisamment élevée pour induire une déformation plastique. En outre, le comportement cyclique de ce matériau ne se stabilise pas au cours des cycles [2]. A faible amplitude de chargement, on observe ainsi une phase d'écrouissage cyclique (≈ 30 cycles) suivie d'un adoucissement cyclique ($\approx 40\,000$ cycles) et enfin un durcissement secondaire (plus marqué pour la nuance THY que CLI). Pour une bonne analyse des essais, il est donc absolument nécessaire de mesurer au cours des cycles la déformation locale au centre des éprouvettes où s'amorcent les fissures de fatigue et où l'état de contrainte est équibiaxial.

Désignation	Ferrite %pds	Cr %pds	Ni %pds	Mn %pds	Si %pds	Mo %pds	$\varnothing_{\text{grain}}$ (μm)	Rp _{0.2%} (MPa)	Rm (MPa)
304L THY	3,2	18,50	10,10	1,13	0,49	0,09	~ 40	190	577
304L CLI	3,0	18,00	10,00	1,86	0,37	0,04	~ 120	220	557

Tableau 1 : Principales caractéristiques mécaniques et métallurgiques des deux coulées testées [3].

3 Protocole expérimental

Les essais sont réalisés sur des éprouvettes en croix de malte dont la conception a été optimisée pour produire un amorçage dans la zone centrale amincie où l'état de contrainte est équibiaxial lorsque l'effort imposé sur les 4 bras de l'éprouvette est identique. Les 4 vérins horizontaux de la machine d'essais triaxiale ASTREE du LMT Cachan [4] sont ainsi utilisés pour solliciter l'éprouvette en force imposée, à une fréquence maximale de 10 Hz, cette valeur de fréquence pouvant être réduite pour les chargements d'amplitude élevée de manière à limiter l'échauffement de l'éprouvette.

Un mode d'asservissement particulier permet d'imposer à la fois la moyenne des efforts et la différence des efforts enregistrés sur les deux vérins d'un même axe. En imposant que les différences d'efforts sur les deux axes restent nulles, on vérifie que le centre de l'éprouvette reste immobile quelle que soit l'amplitude d'effort imposé dans les deux directions. On évite aussi de faire travailler les bras de l'éprouvette en cisaillement avec ce mode d'asservissement.

La relaxation de contraintes résiduelles lors de l'usinage des éprouvettes a conduit à des défauts de planéité et des défauts d'épaisseur au centre des éprouvettes. Les dimensions principales des éprouvettes, et notamment son épaisseur dans la zone centrale amincie, sont donc contrôlées avec une machine de mesure tridimensionnelle avant chaque essai. L'état de surface des éprouvettes est par ailleurs un poli miroir dans la zone centrale pour ne pas favoriser l'amorçage sur des stries d'usinage. Enfin, le défaut de planéité peut produire une mise en flexion des éprouvettes en cours d'essai, voire une légère dissymétrie de l'écoulement plastique entre les deux faces, le temps que la faible contrainte moyenne (estimée inférieure à 40 MPa [1]) induite lors du maintien en position de l'éprouvette sur les mors de la machine se relaxe cycliquement. Une mesure de déformation sur les deux faces de l'éprouvette est donc indispensable.

L'utilisation de jauges de déformation n'est pas recommandée compte tenu des grandes amplitudes de déformation générées avec le matériau de l'étude pour de la fatigue polycyclique et compte tenu de la déformation plastique progressive qui peut également survenir y compris lors d'essais à $R_F = -1$. Pour

contourner cette difficulté, deux caméras numériques équipées d'un objectif télécentrique sont focalisées sur le centre de la zone utile de chaque face de l'éprouvette. Les caméras numériques sont déclenchées simultanément en utilisant une méthode stroboscopique. Un mouchetis très fin est projeté sur chaque face de l'éprouvette pour pouvoir utiliser une méthode de Corrélation d'Images Numériques (CIN) [5]. Enfin, les résultats de CIN stroboscopiques sont exploités pour mesurer l'amplitude maximale de la déformation au cours d'un cycle, ainsi que sa position dans la zone utile. Les déformations dans la zone utile sont caractérisées par des fluctuations spatiales à grande échelle correspondant à la variation d'épaisseur de la zone utile. On identifie donc un polynôme de degré 2 sur la zone utile par la méthode des moindres carrés, à chaque instant du cycle, afin de diminuer l'incertitude de mesure. Vu que seules les fluctuations spatiales à grandes échelles sont recherchées à cette étape, la taille des zones d'intérêt utilisées à l'étape précédente de CIN est donc choisie grossière ($32 \times 32 \text{ pix}^2$) pour permettre un traitement du grand nombre de données plus rapide. La carte d'amplitude de déformation est alors calculée à partir de l'ensemble de ces champs de déformations filtrés, avec une incertitude de mesure sur l'amplitude inférieure à 5×10^{-5} (l'ordre de grandeur de l'amplitude de déformation maximale mesurée est de 10^{-3}). Les amplitudes de déformations obtenues sont en bon accord (Figure 1) avec les simulations numériques correspondantes (cf. partie résultats). Selon le nombre de cycles à rupture attendu pour chaque essai, l'acquisition stroboscopique est réalisée tous les 10^3 cycles ou tous les 10^4 cycles.

Afin de détecter l'amorçage de fissures dans la zone utile, des images sont également prises pendant un court maintien de l'effort maximal et avant chaque mesure stroboscopique, de manière à ouvrir les microfissures. Compte tenu du matériel de prise de vue utilisé et du mouchetis réalisé sur les faces des éprouvettes, la technique de CIN permet de détecter des fissures de longueur minimale égale à $300\mu\text{m}$. Pour détecter l'amorçage de fissures encore plus courtes, de l'ordre de $100\mu\text{m}$, des répliques de surface sont effectuées tous les 10^4 cycles à l'aide d'un polymère développé pour les empreintes dentaires [6]. Lors de l'amorçage d'une fissure, un pic de résidu de corrélation apparaît (cf. Figure 2). Il est possible de vérifier que ce pic de résidu correspond à la détection d'une fissure par observation des répliques de surface au nombre de cycles correspondant (cf. Figure 4). Il est ensuite possible de suivre la propagation des premières fissures amorcées par CIN (cf. Figure 3) ainsi que de suivre l'amorçage d'autres microfissures (cf. Figure 3 et Figure 5). Cette technique permet ainsi d'obtenir plusieurs informations liées à l'endommagement du matériau en fatigue équi-biaxiale comme le nombre de cycles à l'amorçage, la densité de fissures amorcées au cours des cycles ou encore la vitesse de propagation des différentes fissures amorcées.

Enfin, un appareil photo numérique réflex (DSLR) est utilisé pour prendre une vue d'ensemble d'une face des éprouvettes comprenant la zone utile et le début des bras de celles-ci de manière à s'assurer qu'aucune fissure ne s'amorce en dehors de la zone utile. L'appareil photo et la caméra située du même côté de l'éprouvette partagent le même axe optique grâce à l'emploi d'un prisme séparateur.

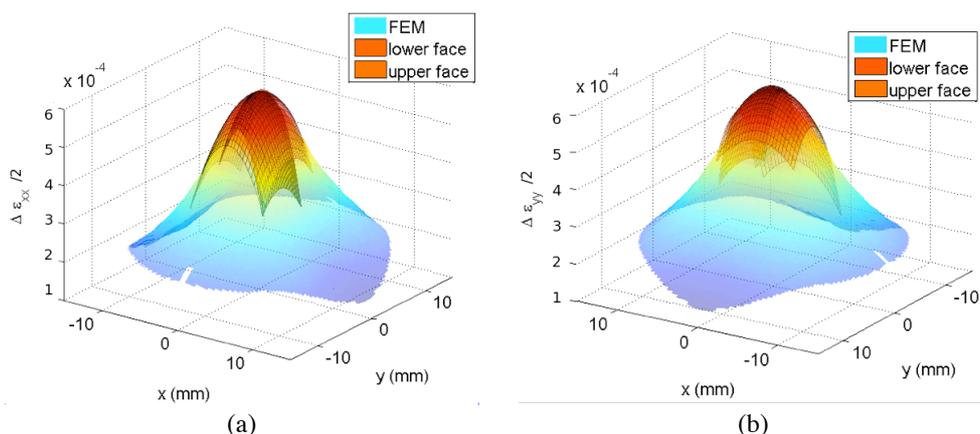


Figure 1 : Comparaison des cartes d'amplitudes de déformation ϵ_{xx} (a) et ϵ_{yy} (b) calculées par méthode des éléments finis (FEM) et mesurées par CIN sur les faces inférieures (lower face) et supérieures (upper face).

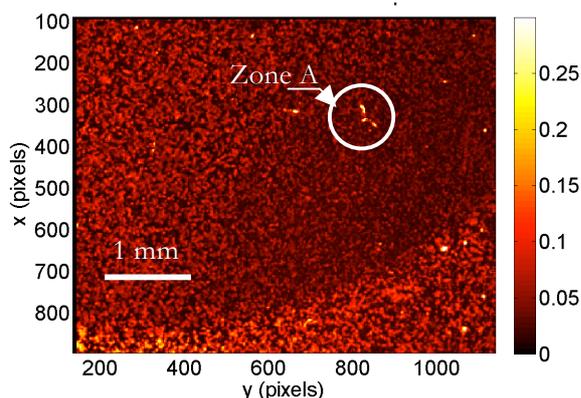


Figure 2 : Champ de résidu de corrélation après 60 000 cycles (niveau de gris résiduel / dynamique), taille des éléments de corrélation $4 \times 4 \text{ px}^2$ (1 pixel = $6\mu\text{m}$).

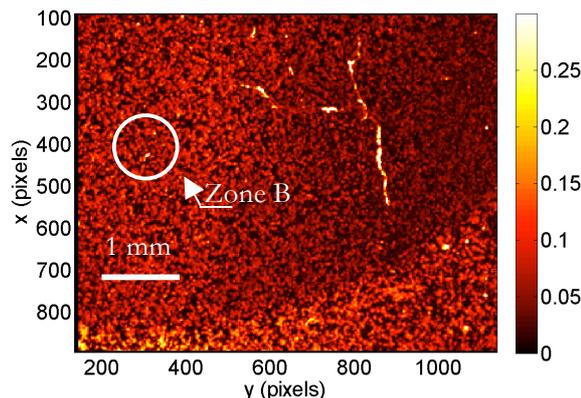


Figure 3 : Champ de résidu de corrélation après 90 000 cycles (niveau de gris résiduel / dynamique), taille des éléments de corrélation $4 \times 4 \text{ px}^2$ (1 pixel = $6\mu\text{m}$).

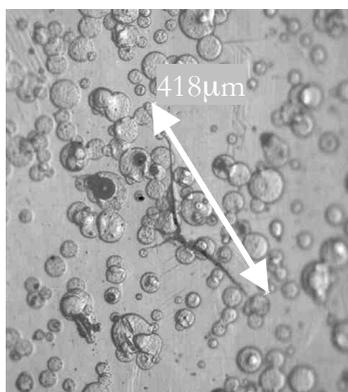


Figure 4 : Observation au microscope optique de la zone A (cf. Figure 2) sur une réplique réalisée à 60 000 cycles

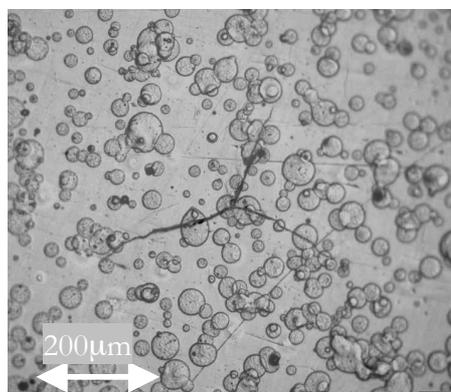


Figure 5 : Observation au microscope optique de la zone B (cf. Figure 3) sur une réplique réalisée à 90 000 cycles

4 Résultats

Cinq essais de fatigue équibiaxiale sont réalisés. Les conditions de chargement sont reportées dans le Tableau 2. Les essais pour lesquels les éprouvettes ne présentent aucun amorçage après 10^6 cycles sont interrompus.

Matériau (n° essai)	Effort imposé (kN)	Fréquence (Hz)	Maximum de l'amplitude de déformation dans le plan	Nombre de cycles à l'amorçage
CLI (I)	$\pm 19,00$	10	$\pm 0.11\%$	10^6
CLI (K)	$\pm 23,00$	5	$\pm 0.18\%$	4×10^4
THY (L)	$\pm 23,00$	10	$\pm 0.13\%$	10^6
CLI (M)	$\pm 22,00$	10	$\pm 0.15\%$	10^6
CLI (O)	$\pm 24,75$	3	$\pm 0.30\%$	3×10^3

Tableau 2 : Conditions de chargement et principaux résultats d'essai.

A partir de l'amplitude maximale de déformation mesurée par CIN dans le plan des éprouvettes, il est intéressant de calculer une amplitude de déformation équivalente qui puisse se comparer ensuite à des résultats de fatigue uniaxiaux plus conventionnels. Nous faisons le choix pour cette déformation équivalente de retenir la plus grande valeur de déformation principale. Toutefois, il est à noter que pour ce type d'essais (solicitation + matériau), les conclusions obtenues en comparant nos résultats avec ceux de fatigue uniaxiale seraient très proches en prenant une déformation équivalente de von Mises.

En présence de plasticité cyclique importante, ce qui est le cas dans nos essais, la composante du tenseur des déformations la plus élevée est la composante hors plan, laquelle n'est pas accessible par les mesures de déformation. Des simulations par éléments finis sont donc réalisées pour obtenir cette composante

manquante. Ces simulations utilisent une loi de comportement élasto-viscoplastique avec deux variables tensorielles d'écrouissage cinématique et une variable d'écrouissage isotrope. Les lois d'évolutions non-linéaires de ces écrouissages sont de type Armstrong-Frederick [7] pour les écrouissages cinématiques et Chaboche et coll. [8] pour l'écrouissage isotrope. L'identification des paramètres de cette loi a été faite dans une autre étude [9] et on vérifie ici simplement que cette loi est à même de représenter les boucles Effort global (sur les bras) / Déformation locale (au centre des éprouvettes). L'accord entre les résultats expérimentaux et numériques étant jugé satisfaisant, on constate que le passage de l'amplitude de déformation dans le plan des éprouvettes à l'amplitude de déformation hors plan est obtenu en multipliant la première amplitude par un facteur 1,5. De manière assez surprenante d'ailleurs, ce facteur s'est révélé être très peu sensible à la variation d'effort imposée lors des différents essais. Par conséquent, l'amplitude maximale de déformation mesurée dans le plan des éprouvettes au cours des différents essais, reportée dans le Tableau 2 est donc multipliée par un facteur 1,5 avant d'être comparée aux résultats de fatigue uniaxiaux obtenus sur cette nuance de matériau dans la Figure 6.

On constate sur cette figure que les résultats de fatigue équi-biaxiaux sont très proches de ceux obtenus en fatigue uniaxiale, ce qui tend à montrer une absence d'effet de biaxialité sur la résistance à la fatigue. Pour autant, il convient de rester prudent eu égard au très faible nombre d'éprouvettes testées en fatigue biaxiale par rapport à la fatigue uniaxiale. De plus, la surface effective des éprouvettes biaxiales est plus faible que celle des éprouvettes uniaxiales et enfin l'état de surface poli des éprouvettes biaxiales tend à améliorer légèrement la résistance à la fatigue par rapport à l'état usiné fin des éprouvettes uniaxiales. Par conséquent, il est encore possible qu'un effet aggravant de la multiaxialité existe mais si tel est le cas, cet effet semble limité au vu des résultats.

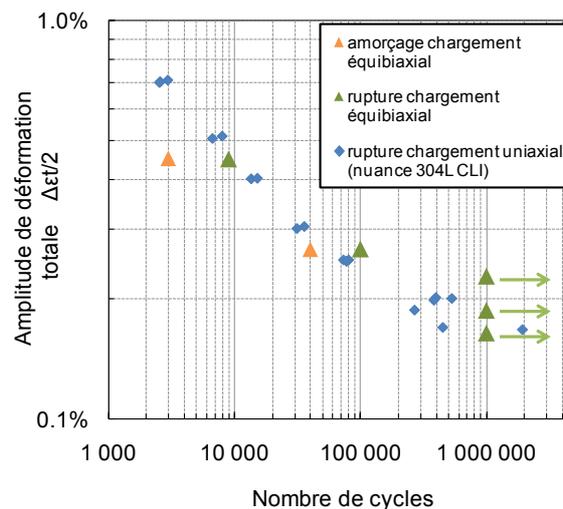


Figure 6 : Comparaison de résultats d'essais de fatigue uniaxiaux et biaxiaux, sans contrainte moyenne.

5 Conclusion

Ces premiers résultats d'essais équi-biaxiaux à $R_F = -1$ sont basés sur un protocole d'essais initialement conçu pour des rapports de charge positifs [1]. Il s'avère néanmoins parfaitement adapté à ce nouveau rapport de charge, et permet donc d'étudier l'effet de la biaxialité seule, et non celui d'une combinaison biaxialité + contrainte moyenne. Une étude de l'amorçage, basée sur des mesures par corrélation d'images numériques et doublée par des prise de répliques a été en outre réalisée sur la série d'éprouvettes testées. Même si les surfaces des éprouvettes uniaxiales et multiaxiales ne sont pas rigoureusement identiques (état de surface et aire de zone utile), ces premiers résultats équi-biaxiaux tendent à montrer que l'effet de biaxialité, s'il existe, reste faible, l'amorçage d'un réseau de fissure arrivant pour un nombre de cycles proche de son homologue en fatigue uniaxiale, pour une même amplitude de déformation principale maximale.

Références

- [1] M. Poncelet, G. Barbier, B. Raka, S. Courtin, R. Desmorat, J.C. Le Roux et L. Vincent, *Eur. J. Mech. - A/Solids*, **29**(5), 810–825, 2010.
- [2] J.-C. Le Roux, Projet t2-00-04 (domzone), Note EDF R&D HT-26/03/056/B, 2004.
- [3] M. Akamatsu, E. Chevallier, Note EDF R&D HT-42/00/020/A, 2001.
- [4] S. Calloch et D. Marquis, *Int. J. of Plast.*, **15**(5), 521–549, 1999.
- [5] G. Besnard, F. Hild, et S. Roux., *Exp. Mech.*, **46**(6), 789–804, 2006.
- [6] Y. Nadot, H.V. Quoc et D. Halm, Proc. 28^e Journées de Printemps de la SF2M, 2009.
- [7] P.J. Armstrong et C.O. Frederick, Cegb report rd/b/n731, Berkeley Nuclear Laboratories, 1966.
- [8] J.-L. Chaboche, K. Dang-Van et G. Cordier, Proc. of the 5th SMIRT Conference, paper L11/3, 13–17 1979.
- [9] F. Curtit, Note technique EDF R&D, H-T26-2007-03264-FR, mise à jour en 2011.

Remerciements

Les essais présentés dans cet article ont été réalisés sur la machine multiaxiale du LMT-Cachan dont l'électronique a été renouvelée grâce à un financement de la Région Ile de France.