

Suivi du chargement et de l'endommagement d'un acier inoxydable sous sollicitations de fatigue thermique à grand nombre de cycles

Y. WANG^{a,b}, A. CHARBAL^{a,b1}, L. VINCENT^a, F. HILD^b, S. ROUX^b

a. DEN-Service de Recherches Métallurgiques Appliquées (SRMA), CEA, Université Paris-Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette, France, yanjun.wang@cea.fr, ludovic.vincent@cea.fr

b. LMT, ENS Paris-Saclay, CNRS, Université Paris-Saclay, 61 av. du Président Wilson, 94235 Cachan cedex, France, hild@lmt.ens-cachan.fr, stephane.roux@lmt.ens-cachan.fr

Résumé :

L'étude de la fatigue thermique à grand nombre de cycles pose un certain nombre de difficultés expérimentales au premier rang desquelles le maintien tout au long des cycles d'un chargement thermique d'amplitude constante, la mesure continue de ce chargement thermique et de ses effets en termes de déformation mécanique et d'endommagement dans la zone la plus fortement sollicitée. On se propose ici d'exposer les derniers résultats expérimentaux en fatigue thermique d'un acier inoxydable austénitique obtenus avec un dispositif expérimental conçu pour relever ces défis. Le développement de réseaux de fissures est suivi in-situ à l'aide d'une caméra infrarouge et l'influence de l'amplitude du chargement ou encore d'une contrainte moyenne sur le développement de ces réseaux est évaluée.

Abstract :

The study of high cycle thermal fatigue raises several experimental challenges among which keeping the thermal loading constant all along the cycles, continuously measuring this loading and its effects in terms of mechanical strain and damage in the most loaded area. Recent experimental results on austenitic stainless steels obtained on a device designed to address these specific challenges are presented. The development of thermal fatigue crack networks is followed in-situ with an infrared camera and the influence of loading amplitude and mean stress level on these developments is evaluated.

Mots clés : fatigue thermique, acier inoxydable austénitique, suivi in-situ de réseaux de fissures

1 Introduction

¹ Actuellement à LeHigh University, Packard Lab, 19 Memorial Drive West, Bethlehem, PA 18015, USA

La fatigue thermique conduisant à l'amorçage puis au développement de réseaux de fissures par dilatations cycliques empêchées est un phénomène observé dans des structures industrielles comme les réacteurs nucléaires [1-2]. L'étude en laboratoire de ce phénomène se heurte à de nombreux défis expérimentaux qui ont généralement pour conséquence de limiter le domaine de validité des analyses conduites à certains types de transitoire particuliers.

On se propose ici d'exposer les derniers résultats expérimentaux de fatigue obtenus sur un nouveau dispositif expérimental permettant à la fois d'imposer des chargements thermiques d'amplitude constante sur un grand nombre de cycles ($> 10^6$ cycles) et de mesurer les quantités d'intérêt pour une analyse à la fatigue au niveau de la zone de fissuration. Une présentation du matériau étudié sera tout d'abord proposée suivie de celle de l'installation expérimentale. L'exploitation des mesures de champs in-situ sera ensuite présentée au travers de l'estimation du chargement mais aussi via le suivi in-situ du développement de réseaux de fissures par thermographie infrarouge.

2 Matériau

Deux aciers inoxydables austénitiques ont fait l'objet des essais de fatigue thermique de cette étude. Tout d'abord un acier de type AISI 316L(N), envisagé comme matériau de structure pour les réacteurs nucléaires de 4^e génération, puis un acier de type AISI 304L, utilisé dans les réacteurs actuels. Les compositions chimiques de ces deux matériaux sont reportées dans le Tableau 1.

	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	Mo	N ₂	Co	Cu	B	Fe
316L(N)	0.025	1.70	0.19	17.38	12.12	0.019	2.39	0.069	0.04	0.16	0.0004	Bal.
304L	0.023	1.23	0.49	18.5	10.10	0.024	0.09	0.028		0.1		Bal.

Tableau 1 : Compositions chimiques des deux aciers inoxydables austénitiques étudiés

Les éprouvettes de fatigue thermique sont des barreaux parallélépipédiques de dimensions $L \times l \times P = 270 \times 40 \times 7 \text{mm}^3$ prélevés au fil dans des tôles de 30mm d'épaisseur. Seule une petite zone centrale d'une des grandes faces de ces éprouvettes est sollicitée cycliquement. Elle est préalablement polie pour atteindre l'état poli miroir.

3 Dispositif de fatigue thermique

Le dispositif expérimental FLASH (Fatigue thermique par chocs LASer et jets d'Helium) a été conçu pour reproduire en laboratoire l'amorçage de fissures par fatigue thermique observé industriellement tout en garantissant à la fois :

- la plus grande stabilité possible du chargement sur de grands nombres de cycles, typiquement au-delà du million de cycles ;
- une mesure fiable du chargement thermique ainsi que du comportement cyclique et de l'endommagement qu'il induit dans la zone d'amorçage de fissures pendant toute la durée d'un essai.

Pour répondre à ce cahier des charges drastique, un laser de puissance (Fig. 1(c)-(1)) capable de réguler précisément l'énergie émise à chaque impulsion a été retenu pour imposer le chargement thermique. Le profil spatial du faisceau d'énergie est de type « *top-hat* » avec un diamètre de l'ordre de 5 mm, la durée des impulsions est fixée à 50 ms et la fréquence des tirs à 1 Hz.

Pour éviter toute modification de l'état de surface du matériau au cours des cycles (et donc des conditions d'échange de chaleur avec le laser), principalement par un phénomène d'oxydation, les

essais sont réalisés dans une chambre hermétique dans laquelle un vide secondaire est tout d'abord imposé avant de la remplir d'hélium pur.

La température moyenne des éprouvettes (400°C pour l'acier 316L(N) et 150°C pour le 304L) est imposée par un dispositif de chauffage par passage de courant électrique (effet Joule) dont la puissance est régulée par un asservissement Eurotherm en fonction de la température mesurée par un thermocouple inséré puis collé dans un trou depuis la face opposée à la zone de tir et jusqu'à la mi-épaisseur de l'éprouvette. Une contrainte moyenne statique de traction selon le sens long (L) de l'éprouvette peut également être imposée au moyen d'un montage de flexion 4 points relié à un vérin électromécanique et une cellule de force.

En ce qui concerne les mesures du chargement thermique cyclique ou de ses effets, celles-ci sont effectuées sans contact, au travers de hublots disposés sur le couvercle de l'enceinte, en orientant les appareils de mesure en direction de la zone impactée par le laser. Cette méthodologie permet à la fois de garantir l'absence d'effet du moyen de mesure sur le chargement thermique lui-même (comme cela peut être le cas avec des thermocouples) ainsi qu'un temps de réponse de la mesure minimal.

L'amplitude du chargement thermique est ainsi contrôlée au centre de la tache thermique induite par le laser grâce à des pyromètres infrarouges (Fig. 1(c)(3)) dont la fréquence d'acquisition est de 1 kHz. Cette mesure ponctuelle de température est complétée par des mesures de champs thermiques avec une caméra IR (Fig. 1(c)-(2)). Une mesure des champs de déplacement 3D de la surface d'éprouvette est enfin réalisée par une approche multivue hybride (partie 4) dans laquelle les images de la caméra IR sont associées à celles de deux caméras visibles (Fig. 1(c)-(4,5)) inclinées par rapport à la normale à la surface de l'échantillon. Pour obtenir la luminosité indispensable à l'acquisition d'images dans le spectre visible, une source de lumière blanche (Fig. 1(c)-(6)) a également été mise en place.

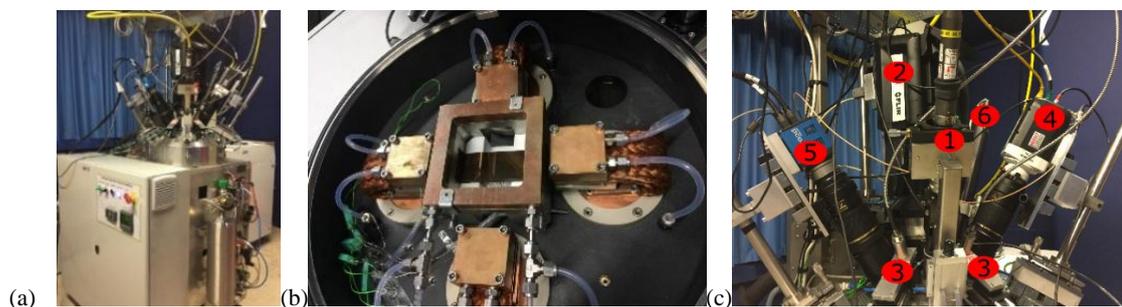


Fig. 1 (a) Vue d'ensemble de l'installation FLASH. (b) Echantillon plat positionné à l'intérieur de la chambre. (c) Configuration expérimentale avec les principaux composants (voir texte principal pour une description détaillée des composants numérotés dans la figure)

4 Mesures de champs cinématiques et thermiques

Des mesures de champs à la fois cinématique et thermique de la surface des éprouvettes impactée par le laser de puissance sont réalisées à l'aide des trois caméras et d'une méthode de corrélation d'images dite multivue hybride (car impliquant des imageurs travaillant dans différentes plages du spectre de lumière). Cette approche est basée sur la description dans un espace paramétrique de la surface des échantillons au moyen de NURBS et sur une phase préalable d'étalonnage du banc de mesure à partir d'une mire 3D dont les contrastes sont détectés de manière univoque par les trois caméras. Des corrections de niveaux de gris sont effectuées sur les images IR acquises au cours des tirs, de manière à, d'une part, conserver un histogramme de niveaux de gris similaire quelle que soit la température de l'éprouvette, et d'autre part, identifier par cette correction le champ de variation de température induit par le laser. Le lecteur intéressé par cette méthodologie pourra trouver une présentation détaillée dans [3].

Sur la Fig. 2 est représenté un exemple de champs thermique (a) et cinématique (b-d) dans la zone d'impact, mesurés entre un trio d'images acquises par les trois caméras avant le déclenchement d'un tir laser et le même trio acquis au maximum d'un tir laser. On peut constater sur cet exemple que le faisceau laser induit un chargement biaxial dans le plan de l'éprouvette (directions X et Z) ainsi qu'un déplacement hors plan (direction Y) de quelques micromètres.

Ces mesures permettent à la fois d'alimenter en entrée des simulations numériques aux éléments finis (pour identifier le terme source de chaleur responsable de l'élévation de température mesurée en Fig. 2(a)) mais également de valider la réponse mécanique prédite par des modèles de comportement en les comparant aux déformations ou déplacements expérimentaux induits par les chocs thermiques [3]. Une fois ces simulations validées, elles sont ensuite exploitées pour extraire une variation de déformation mécanique équivalente dans la zone d'impact laser qu'il convient de relier, au travers d'une courbe de fatigue, au nombre de cycles nécessaires pour amorcer des fissures (voir partie 6).

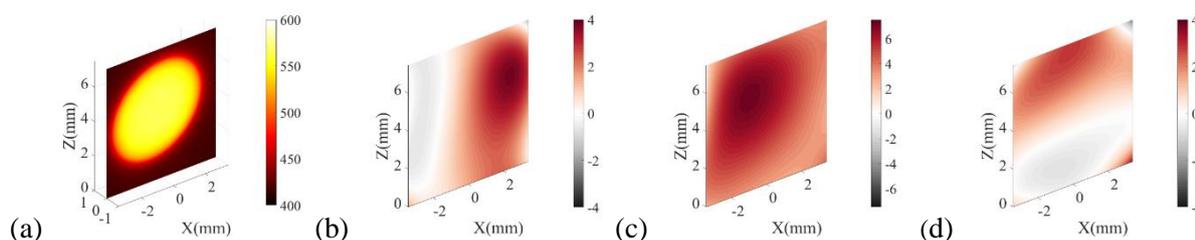


Fig. 2 : Exemple de champs de température ($^{\circ}\text{C}$) et de déplacement (μm) mesurés par corrélation d'images hybride et multivue dans le cas de l'acier 316L(N)

5 Détection et suivi de réseaux de fissures.

Les mesures de champs présentées succinctement précédemment permettent également de détecter l'amorçage de fissures puis de suivre in-situ le développement de réseaux, en considérant par exemple qu'une élévation locale du résidu de corrélation peut témoigner d'une refermeture de fissure qui modifie les niveaux de gris entre l'image de référence et l'image déformée [4].

Plus simplement, les images brutes acquises par la caméra IR permettent déjà de détecter efficacement cette fissuration sans avoir recours à un calcul de corrélation d'images. En effet, une fissure peut être considérée du point de vue du rayonnement IR comme une cavité linéique dont l'émissivité est nettement plus élevée que celle de la surface polie qui l'entoure. Par conséquent, la mesure du flux IR en l'absence de tirs laser (*i.e.* pour une scène homogène en température) permet de détecter très rapidement les fissures. Un exemple de ces détections est présenté sur la Fig. 3, où l'on peut voir la propagation des fissures principales, qui tendent à s'orienter selon les directions orthogonale et parallèle à celle de la contrainte moyenne appliquée au cours de cet essai. Une comparaison de la taille des plus grandes fissures mesurées au cours des essais effectués sur les deux coulées d'acier est proposée sur la Fig. 4. En tenant compte de la dispersion importante qui apparaît naturellement sur ce type de mesures, on constate néanmoins sur cette figure l'absence d'effet marqué du type de matériau ou encore des conditions d'essais, et notamment de la valeur de contrainte moyenne appliquée ou de la température initiale avant lancement des tirs laser (150°C pour les essais sur acier 304L contre 400°C pour les essais sur la nuance 316L(N)). En ce qui concerne la propagation en profondeur des fissures, compte tenu du fort gradient de température induit dans cette direction par une impulsion laser de seulement 50 ms, la taille des fissures reste bien en deçà du millimètre (Fig. 5). Une caractérisation plus systématique du suivi de ces réseaux de fissures (nombre de cycles à l'amorçage, propagation de fissure principale, morphologie en fonction de la contrainte moyenne et de l'amplitude du chargement thermique) est proposée dans [4].

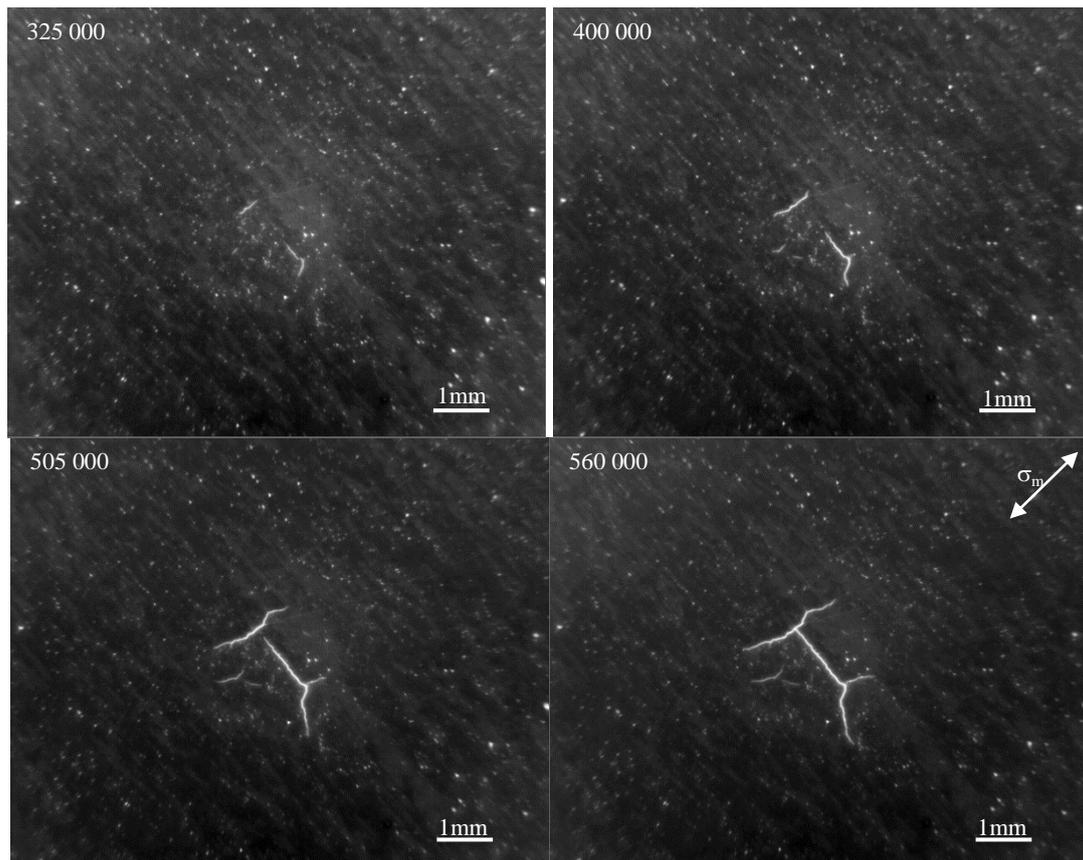


Fig. 3 : Exemple d'évolution de réseaux de fissures détecté par caméra IR pour l'acier 304L. Contrainte moyenne de 65MPa imposée selon la direction indiquée dans l'image en bas à droite.

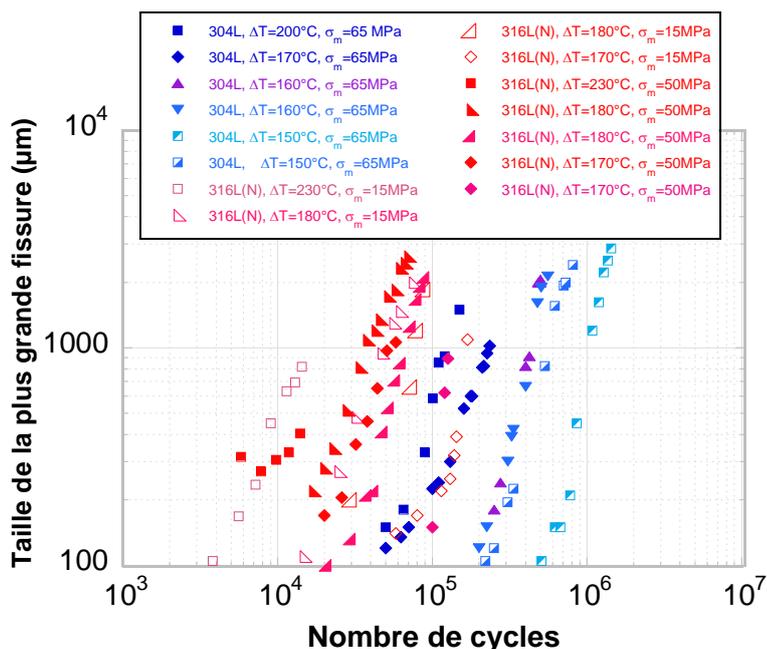


Fig. 4 : Evolution de la taille des fissures les plus grandes détectées en cours d'essais de fatigue thermique. Acier 304L (bleu) sollicité à partir de $T_{min} = 150^{\circ}\text{C}$, et acier 316L(N) (rouge) sollicité à partir de $T_{min} = 400^{\circ}\text{C}$.

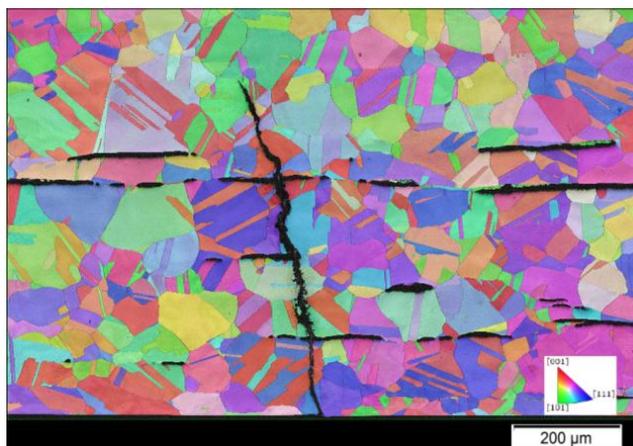


Fig. 5: Exemple de propagation de fissure selon la profondeur des éprouvettes révélée sur une cartographie EBSD (couleur = orientation cristalline selon la direction de laminage) pour l'acier 316L(N). Présence de ferrite résiduelle et de macles (sans effet apparent sur la propagation de fissures).

6 Courbes de fatigue

Connaissant les nombres de cycles à l'amorçage d'une fissure de $200\ \mu\text{m}$ d'une part (soit quelques tailles de grain, cf. partie 5) et la variation de déformation mécanique responsable de cet amorçage d'autre part (partie 4), des courbes de fatigue sont construites pour les deux matériaux (Fig. 6). Les résultats de fatigue thermique sont comparés à des données de fatigue isotherme uniaxiale. On note tout d'abord que les résultats de fatigue thermique se situent dans le nuage de points d'essais uniaxiaux effectués sur ces matériaux. Par ailleurs, la variabilité liée au matériau et à la température

d'essais reste limitée. Enfin, l'effet de l'ajout d'une contrainte moyenne de traction (de 65 MPa au plus) ne semble pas réduire significativement la durée de vie en fatigue thermique, contrairement à ce qui a pu être rapporté sur certains résultats d'essais de fatigue uniaxiaux.

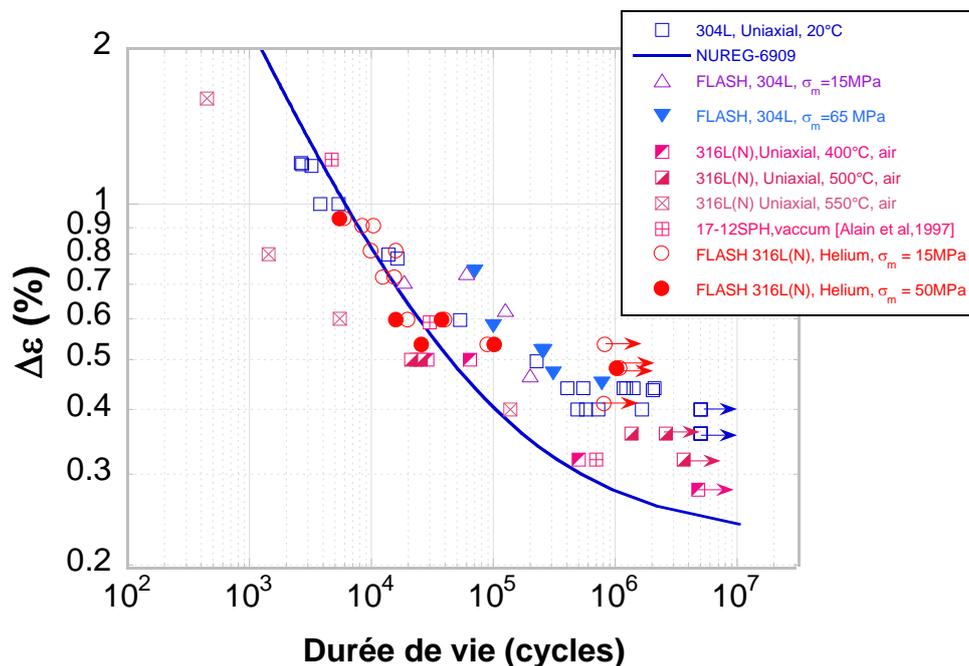


Fig. 6 : Courbes de fatigue. Comparaison des résultats de fatigue thermique avec ceux de fatigue uniaxiale isotherme, sur aciers 316L(N) et 304L [4-5]

7 Conclusion

Un dispositif de fatigue thermique permettant à la fois d'imposer un grand nombre de cycles sous chargement constant et de mesurer les champs thermiques et cinématiques dans la zone d'amorçage de fissure est présenté. Des essais sont effectués sur deux coulées d'acier inoxydable austénitique et à deux températures moyennes différentes. La thermographie infrarouge s'est révélée être un outil particulièrement efficace pour détecter l'amorçage de fissures et suivre le développement des réseaux. Le nombre de cycles à l'amorçage de fissures est finalement très proche entre les deux coulées et deux conditions de température d'une part et entre essais de fatigue thermique et fatigue uniaxiale isotherme d'autre part.

8 Remerciements

Les études menées sur l'acier 304L ont été soutenues par EdF et par le programme GEN2&3 du CEA. Celles menées sur l'acier 316L ainsi que l'investissement dans le dispositif expérimental ont été soutenues par le programme GEN4 du CEA. Les auteurs remercient C. Caes et F. Lefebvre pour les essais de fatigue menés à 550°C ainsi que V. Rabeau, S. Urvoy et E. Rouesne pour les observations microstructurales.

Références

- [1] D. G. Cacuci, Handbook of nuclear engineering, Volume I: Nuclear Engineering Fundamentals, Springer, 2010.

- [2] N. Robert, J. Economou, F. Cornuel, O. Volte, J.-M. Stephan, Investigations of mixing zones subject to thermal fatigue, International symposium on the Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs, 2006, Fontevraud, France
- [3] Y. Wang, A. Charbal, J.E. Dufour, F. Hild, S. Roux and L. Vincent, Hybrid multiview correlation for measuring and monitoring thermomechanical fatigue test, *Experimental Mechanics*, sous presse (DOI : 10.1007/s11340-019-00500-8).
- [4] Y. Wang, A. Charbal, F. Hild, S. Roux, L. Vincent, Crack initiation and propagation under thermal fatigue of austenitic stainless steel, *International Journal of Fatigue*, 124 (2019), 149-166
- [5] L. Vincent, J.C. Le Roux, S. Taheri, On the high cycle fatigue behavior of type 304L stainless steel at room temperature, *International Journal of Fatigue*, 38 (2012), 84-91