

ETUDE DE LA FATIGUE A FROID D'UN ACIER iTRIP 304L

Younes Demmouche^a, Guillaume Helbert^b, Luc Saint-Sulpice^b, Nicolas Laurain^c, Oussama Yousfi^c, Shabnam Arbab Chirani^b, Sylvain Calloch^a

a. ENSTA-Bretagne, Institut de Recherche Dupuy de Lôme, FRE3744 IRDL, Brest, France

b. ENIB, Institut de Recherche Dupuy de Lôme, FRE3744 IRDL, Brest, France

c. GTT (GAZTRANSPORT & TECHNIGAZ) SA, Saint-Rémy-Lès-Chevreuse, France

Résumé :

Les aciers iTRIP sont réputés pour la transformation martensitique induite par une déformation plastique. Cette transformation de phase est accentuée sous l'effet de la température. La fatigue de ce type de matériaux, présentant souvent une microstructure très hétérogène à cause de la mise en forme, constitue un enjeu majeur pour l'industrie de transport et de stockage de gaz naturel liquéfié (GNL) réalisés à des températures cryogéniques proches de -170°C . Cette étude a pour objectif l'étude de la fatigue d'un acier inoxydable de type 304L à basses températures en considérant des états matériaux standard et non standards. En effet, l'influence de la transformation se manifeste via une pré-déformation plastique et/ ou par la présence d'une fraction volumique initiale de martensite. Pour ce faire, l'utilisation de la méthode rapide de caractérisation par auto-échauffement [DOUDARD et al. 2005] a été utilisée à différentes températures. Il a été question de mettre en place un protocole expérimental permettant de réaliser ce type d'essais dans un environnement thermiquement contrôlé (de la température ambiante jusqu'à -30°C).

Les résultats expérimentaux ont montré un effet net de la température sur la tenue en fatigue du matériau et sur sa limite d'endurance. Afin de comprendre les mécanismes régissant ce phénomène, des essais de fatigue ont été réalisés sur différents états initiaux non standards de matière, en particulier des états pré-écrouis à différents niveaux de déformation plastique et des états initiaux à différentes fractions volumiques de martensite réalisés à différentes températures mais avec le même niveau de pré-déformation plastique. L'objectif est d'identifier la part de contribution de la martensite sur la tenue en fatigue du matériau.

Les résultats essais montrent une forte influence de la transformation de phase sur les propriétés en fatigue de ce type de matériaux et une bonne prédiction de leur limite d'endurance à différentes températures. Des résultats très encourageants, pour une première, sur ce type d'essais avec la méthode d'auto-échauffement à basses températures.

Mots clefs : fatigue, auto-échauffement, aciers inoxydables, transformation martensitique.

Abstract:

Transformation-induced-plasticity (TRIP) stainless steels exhibit complex mechanical behaviour, because of martensitic transformation during plastic deformation. They are largely used in liquefied natural gas (LNG) industry as a primary insulation membrane for the LNG carrier cargo containment systems due to their mechanical properties such as ductility and resistance to corrosion. Since the TRIP behaviour is accentuated in a low temperature environment, the effect of martensitic transformation must be taken into account to determine fatigue properties of this type of materials.

This work aims to study the fatigue of a 304L stainless steel at different temperatures considering annealed and pre-strain material states to highlight the influence of the phase transformation on fatigue resistance of this material. For that, self-heating measurement method is proposed in order to estimate the evolution of the fatigue limit with respect to the pre-strain level and the environment temperature.

This required setting up a new experimental method to perform such experiments in a thermal controlled environment, from ambient to -30°C.

The experimental results show that the fatigue limit of the material increases when the temperature decreases and it also increases when the pre-strain level increases. This result means that the fatigue strength is improved by introducing an initial volume fraction of martensite in the material. These results show a good agreement with classical fatigue tests once at ambient temperature. Additional tests at different temperatures have to be considered on one side to validate the self-heating obtained results and on another side understand the contribution of each part of plastic strain and temperature on the fatigue properties of the material.

This study has yielded very interesting results on fatigue properties of TRIP stainless steels and has allowed for the first time the use of the self-heating method measurement successfully at low temperatures.

Key words: fatigue, self-heating, stainless steels, martensitic transformation

1 Introduction

L'étude de la fatigue des aciers iTRIP utilisés dans l'industrie de transport de GNL est un enjeu majeur pour les constructeurs de méthaniers. Cela est d'autant plus important que la microstructure de ces matériaux est sensible aux conditions sévères en service. En effet la transformation de phase martensitique joue un rôle évident dans la tenue en fatigue de ces matériaux. Cela s'explique par la modification de ces propriétés mécanique induites par l'évolution de sa microstructure sous des chargements thermique et mécanique. Le matériau de l'étude est un acier inoxydable 304L sous forme de plaques laminées de 1.2mm d'épaisseur. L'étude du comportement mécanique de ce matériau en traction monotone a montré la présence de la transformation de phase avec une cinétique qui dépend du niveau de la déformation plastique et de la température.

Le but de cette étude est d'une part de comprendre l'effet de cette transformation et d'autre part de déterminer le rôle d'une pré-déformation plastique et de la température sur la tenue en fatigue de ce type de matériau. Face au nombre important de paramètres à caractériser, le choix a été porté sur l'utilisation de la méthode d'auto-échauffement pour estimer la limite d'endurance du matériau à différents états, recuit, pré-déformé et à différentes températures (de l'ambiante jusqu'à -30°C).

2 Méthodes expérimentales

2.1 Auto-échauffement

La méthode classique de détermination des propriétés en fatigue des matériaux est très coûteuse en temps et en matière. Pour remédier à cela, des méthodes de caractérisation rapide sont largement employées aujourd'hui afin de permettre une identification rapide des propriétés en fatigue des matériaux.

Le principe de cette méthode consiste à appliquer à une éprouvette de fatigue des blocs de chargement cyclique successifs d'amplitude de contrainte croissante et mesurer la variation de la température moyenne du matériau (voir Figure 1, a). Pour chaque bloc de chargement appliqué, on relève la température stabilisée de l'éprouvette (voir Figure 1, b) et on peut ainsi tracer sur une courbe l'auto-échauffement du matériau en fonction de l'amplitude du chargement (voir Figure 1, c). En plus de l'estimation empirique de la limite d'endurance, cette méthode permet, via un modèle énergétique à deux échelles, de prédire la tenue en fatigue et prendre en compte le caractère dispersif des résultats à différentes probabilités de rupture.

Le modèle probabiliste est basé sur la description du phénomène de ruine par l'activation de sites de microplasticité qui constitue l'origine de la dissipation thermique dans le volume de matière considéré [DOUDARD et al. 2005]. Cette approche a été étendue pour l'étude de différent type de matériaux métalliques (MUNIER et al. 2014, FLORIN et al. 2013, EZANNO et al. 2013, PONCELET et al. 2007), élastomères (MASQUELIER et al. 2014, MARCO et al. 2017) et pour tenir compte de l'effet d'une pré-déformation plastique (MUNIER et al. 2010, EZANNO et al. 2013).

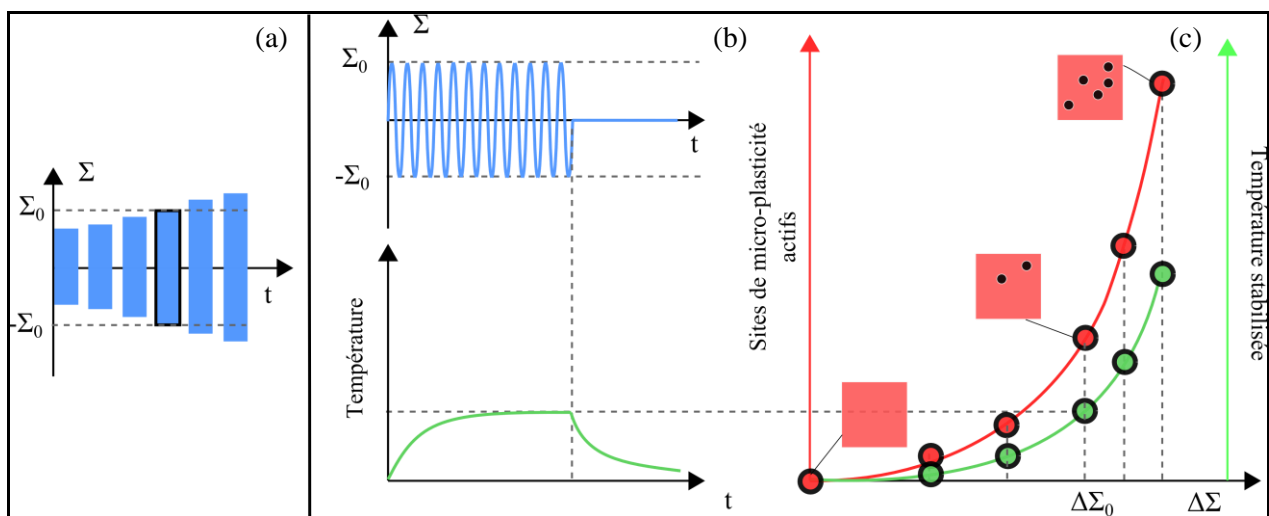


Figure 1- Construction d'une courbe d'auto-échauffement

2.2 Dispositif expérimental

Les essais d'auto-échauffement ont été réalisés sur une machine servo-hydraulique de capacité 100kN. La température de l'environnement d'essai est contrôlée à l'aide d'une enceinte thermo-hygrométrique type SERVATIN montée entre la traverse haute et le bâti fixe de la machine. L'éprouvette est montée à l'aide des mors mécaniques (Figure 4) et fixée sur la machine via deux rallonges. Pour éviter d'altérer la mesure de la cellule d'effort à basses températures, un système de chauffage a été mis en place afin de la garder à une température proche de la température ambiante, comme illustré sur la Figure 5. Les essais ont été réalisés une fois le régime permanent atteint et la température de l'enceinte stabilisée à l'effort imposé avec un rapport de charge $R=-1$.

La géométrie d'éprouvette retenue est représentée sur la Figure 2. Les éprouvettes ont été prélevées dans le sens de laminage des plaques.

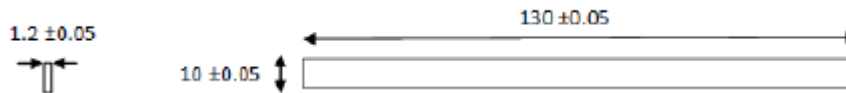


Figure 2 : géométrie d'éprouvette

La géométrie des éprouvettes de travail les rend sujettes au phénomène de flambement lors d'une sollicitation en compression. Afin de palier à ce problème, un dispositif constitué de deux raidisseurs en aluminium a été mis en place et englobe la zone utile de l'éprouvette. Des plaques en téflon sont intercalées entre les raidisseurs et l'éprouvette pour limiter les frottements (voir Figure 3).

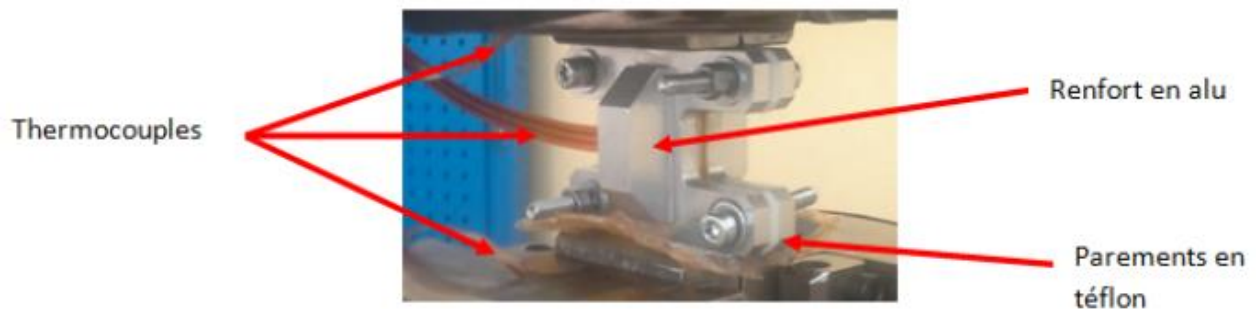


Figure 3 : dispositif anti-flambement

L'approche adoptée dans le cadre de cette étude est une approche 0D : on suppose une température moyenne du volume de l'éprouvette constituant sa zone utile. Ainsi, l'élévation moyenne de la température de l'éprouvette est calculée en prenant en compte son environnement représenté par les températures respectives des mors haut et bas :

$$\theta^{0D} = T_{ep} - \frac{T_{MB} + T_{MH}}{2}$$

Avec T_{ep} la température de l'éprouvette, T_{MB} la température du mors bas et T_{MH} la température du mors haut



Figure 4- Dispositif expérimental



Figure 5- Contrôle de la température de la cellule d'effort

Les essais ont été réalisés à une fréquence de 5Hz à des températures de 25°C, de 5°C, de -20°C et de -30°C. Pour mettre en évidence l'effet d'une pré-déformation, des éprouvettes ont été prélevées dans des plaques pré-déformées à 0%, à 10%, à 18%, à 30%, à 40% et à 50%.

3 Résultats et discussions

3.1 Effet de la pré-déformation sur la tenue en fatigue

La figure 4 représente les courbes d'auto-échauffement à température ambiante obtenues à partir d'éprouvettes ayant subi une pré-déformation initiale de 0%, 10%, 18%, 30%, 40% ou de 50%. On observe une tendance nette qui voit la limite d'endurance augmenter avec le niveau de pré-déformation initial jusqu'à observer une saturation à partir de la valeur de 30%. Ces résultats vont dans le sens d'une augmentation de la limite d'élasticité obtenue après pré-déformation, ainsi que dans le sens d'une formation croissante de martensite avec le niveau de pré-déformation [1]. Ce dernier point est illustré par la figure 5, qui représente la cinétique de transformation mesurée in-situ lors des essais de traction réalisés sous les mêmes conditions que les phases de pré-déformations mentionnées dans ce paragraphe (température ambiante de 25°C, vitesse de déformation imposée de $6 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$). Cette figure montre une tendance à la saturation de la fraction volumique de martensite à partir d'une pré-déformation de 40 % et une valeur proche de la saturation dès 30%. Ainsi, une corrélation entre la microstructure du matériau sollicité et sa signature thermique est mise en évidence.

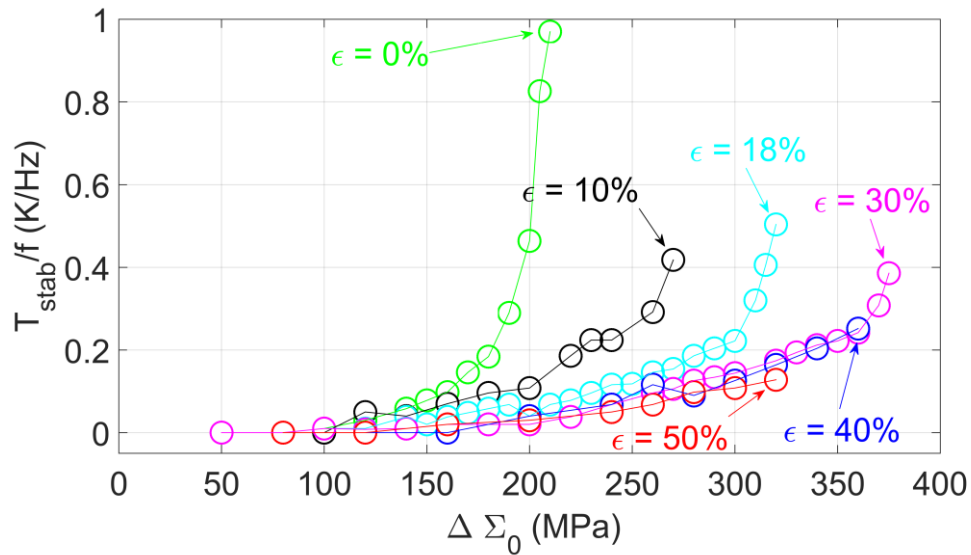


Figure 6- Effet de pré-déformation sur l'auto-échauffement

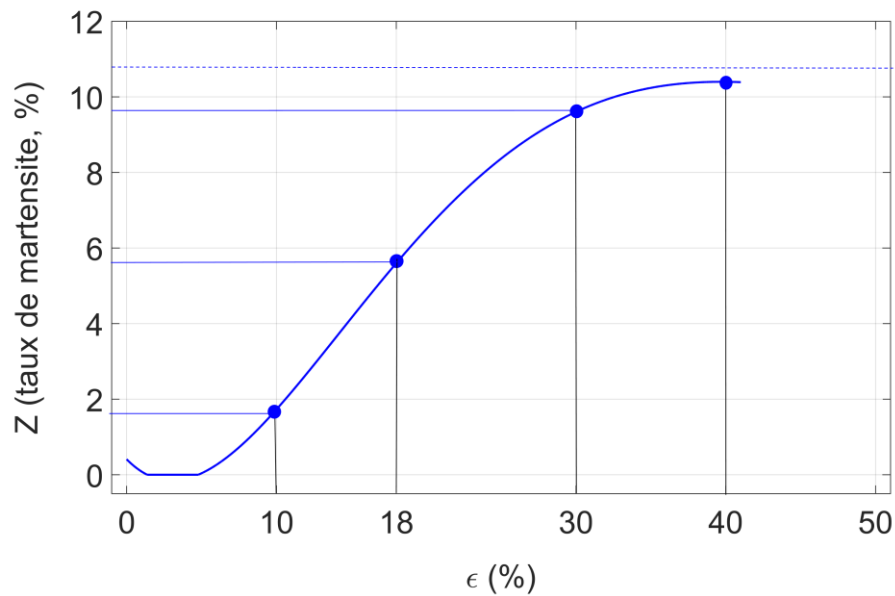


Figure 7- Transformation de phase lors de la pré-déformation

La Figure 7 montre l'évolution de la fraction volumique de la martensite lors d'un essai de traction à température ambiante. On note évidemment les fractions volumiques résiduelles dans les éprouvettes pré-déformées.

3.1 Effet de la température sur la tenue en fatigue

La figure 5 représente les courbes d'auto-échauffement à différentes températures ambiantes, obtenues à partir d'éprouvettes dont l'état est standard. On observe une augmentation de la limite d'endurance avec la diminution de température. Cette augmentation ne peut pas être mise sur le compte d'une augmentation de la limite d'élasticité, indépendante de la température, ni sur le compte de l'état initial du matériau. En revanche, des mesures magnétiques représentées en figure 7 ont permis de doser la phase du matériau à l'issue des essais d'auto-échauffement. Une mesure sur 10 points sur la zone utile des éprouvettes pour chaque température a permis de mettre en évidence une formation de martensite induite par plasticité cyclique [2]. Celle-ci est d'autant plus favorable que la température est basse [3]. Par ailleurs, une localisation du phénomène est à noter, comme le montrent les barres de dispersion affichées.

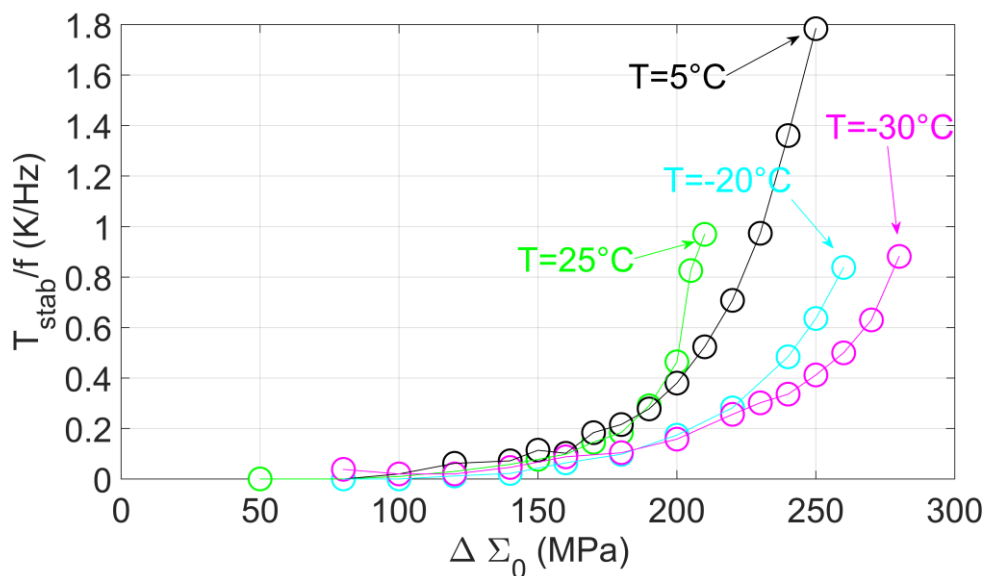


Figure 8- Effet de la température ambiante sur l'auto-échauffement

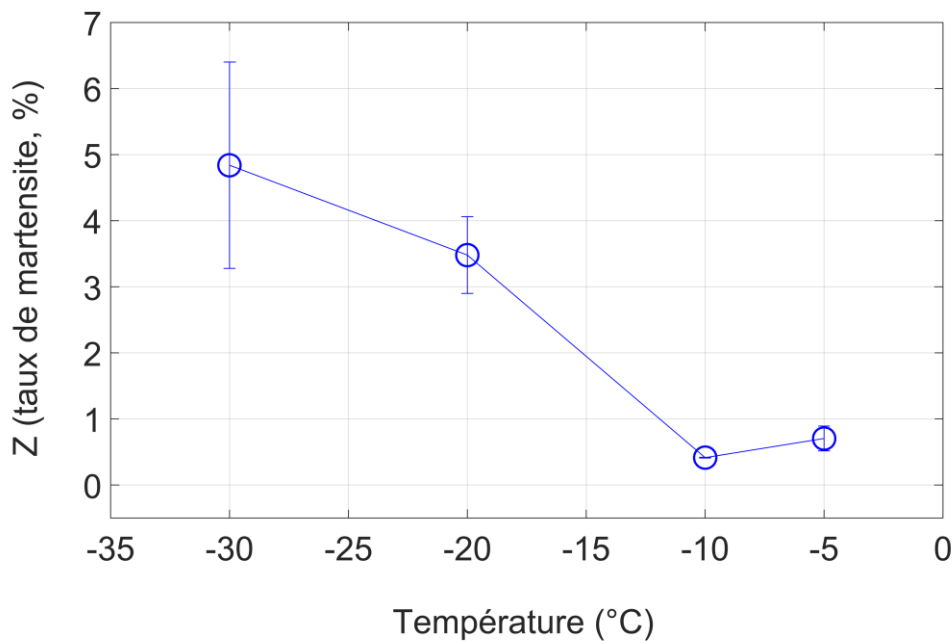


Figure 9- Transformation de phase après sollicitation cyclique

4 Conclusions

Le travail présenté a permis de mettre en évidence le rôle de la microstructure des aciers inoxydables 304L sur leur tenue en fatigue. En effet, deux paramètres qui pilotent la formation de la phase martensitique ont été retenus pour illustrer ce point.

Le niveau de pré-déformation initial pilote l'état initial du matériau. La limite d'endurance augmente sensiblement avec ce niveau de pré-déformation et donc avec la fraction de martensite. Ainsi, il est nécessaire de tenir compte de l'état non standard du matériau pour prédire la durabilité à l'échelle d'une structure mise en forme.

La température imposée lors des essais d'auto-échauffement pilote la formation progressive de martensite au cours des cycles. La limite d'endurance augmente avec la diminution de la température et donc avec la formation de martensite.

Par ailleurs, la mise en œuvre d'une procédure expérimentale a été nécessaire pour caractériser la tenue en fatigue d'éprouvettes plates à basses températures. De nombreuses précautions prises ont été présentées.

La poursuite de l'étude aura pour objectif de découpler les effets de la déformation plastique, de la température et de la transformation de phase afin de confirmer et de quantifier l'influence de cette dernière sur la tenue en fatigue des aciers inoxydables 304L.

Références

- [1] Y. Demmouche, E. Alarcon Tarquino, L. Saint-Sulpice, N. Laurain, O. Yousfi, S. Arbab Chirani, S. Calloch, Martensitic transformation effect on the mechanical behavior of TRIP austenitic stainless steel during forming process, ICOMAT (2014)
- [2] L. Vincent, J.C. Le Roux et S. Taheri, On the high cycle fatigue behaviour of a type 304L stainless steel at room temperature, *International Journal of Fatigue* 38 (2012) 84-91
- [3] U. Krupp, C. West et H-J. Christ, Deformation-induced martensite formation during cyclic deformation of metastable austenitic steel: Influence of temperature and carbon content, *Material Science and Engineering : A* 481-482 (2008) 713-717
- [4] A.A. Lebedev, V.V. Kosarchuk. Influence of phase transformations on the mechanical properties of austenitic stainless steels. *International Journal of Plasticity*, 16:749-767, 2000.
- [5] Luc Saint-Sulpice, Mohamed Lakrit, Shabnam Arbab Chirani, Sylvain Calloch. Variation in electric resistivity in metastable alloys during thermomechanical loading: Effects of temperature, elasticity, plasticity and phase transformation. *Mechanics of Materials*, 71(0):1- 9, 2014.
- [6] Jens SCHOLZ. Experimental analysis and modelling of the mechanical behaviour of an unstable austenitic stainless steel. 2002.
- [7] R. Munier. Etude de la fatigue des aciers laminés à partir de l’auto-échauffement sous sollicitations cyclique : essais, observations, modélisation et influence d’une pré-déformation. Thèse de doctorat, SICMA, 2012.
- [8] L. Vincent. On the high cycle fatigue behavior of a type 304L stainless steel at room temperature. *International Journal of Fatigue*, 2011.
- [9] Rémi Munier, Cédric Doudard, Sylvain Calloch, Bastien Weber, Determination of high cycle fatigue properties of a wide range of steel sheet grades from self-heating measurements, *International Journal of Fatigue*, Volume 63, June 2014
- [10] Pierrick Florin, Matteo Facchinetti, Cédric Doudard, Sylvain Calloch, Fast Fatigue Properties Identification by “Self-heating” Method: Application to Automotive Welded Joints, *Procedia Engineering*, Volume 66, 2013
- [11] Anthony Ezanno, Cédric Doudard, Sylvain Calloch, Jean-Loup Heuzé, A new approach to characterizing and modeling the high cycle fatigue properties of cast materials based on self-heating measurements under cyclic loadings, *International Journal of Fatigue*, Volume 47, February 2013
- [12] Cédric Doudard, Sylvain Calloch, Influence of hardening type on self-heating of metallic materials under cyclic loadings at low amplitude, *European Journal of Mechanics - A/Solids*, Volume 28, Issue 2, March–April 2009
- [13] R. Munier, C. Doudard, S. Calloch, B. Weber, Towards a faster determination of high cycle fatigue properties taking into account the influence of a plastic pre-strain from selfheating measurements, *Procedia Engineering*, Volume 2, Issue 1, April 2010