

# Caractérisation du comportement anisotrope en fatigue d'un acier 25MnCrSiVB6 laminé

E. PESSARD<sup>a</sup>, N. GUILLEMOT<sup>b</sup>, F. MOREL<sup>a</sup>, L. FLACELIERE<sup>c</sup>

a. LAMPA, Arts et Métier ParisTech Angers, 2, Bd du Ronceray, BP 93525, 49035 Angers Cedex 01

b. LMT-Cachan et LURPA, 61 Avenue du Président Wilson 94235 Cachan Cedex

c. CREAS – ASCOMETAL, BP 70045, 57301 Hagondange Cedex

## Résumé:

*Dans cette étude, différentes méthodes expérimentales sont employées pour déterminer le comportement anisotrope monotone et en fatigue d'un acier 25MnCrSiVB6 laminé: le METASCO MC. Ce matériau de microstructure bainitique a la particularité de posséder des inclusions allongées dans le sens du laminage. Des résultats d'essais de traction monotone et de résilience sont présentés. Concernant la caractérisation du comportement en fatigue, des résultats issus d'essais d'auto-échauffement et de fatigue classiques sont comparés et discutés.*

## Abstract:

*In this study, various experimental methods are employed to determine the anisotropic monotonic and fatigue behavior of a 25MnCrSiVB6 forged steel (METASCO MC). This material has a bainitic microstructure and elongated non-metallic inclusions in the rolling direction. Results from monotonic tensile tests and Charpy impact tests are presented. Concerning the characterization of the fatigue behavior, results from a typical staircase experimental approach and self-heating fatigue tests are compared and discussed.*

**Mots clefs:** fatigue à grand nombre de cycles, anisotropie, acier forgé, inclusions

## 1 Introduction

Classiquement, les propriétés en fatigue à grand nombre de cycles d'un matériau sont définies via la réalisation d'une série d'essais cycliques sur des éprouvettes de fatigue. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle est très coûteuse en temps et en argent, il faut par exemple un minimum de quinze éprouvettes pour estimer de manière fiable une limite d'endurance et l'écart type associé d'un matériau en suivant la méthode Staircase.

Des critères empiriques basés sur les caractéristiques mécaniques en traction monotone ont été développés pour estimer de manière plus rapide les propriétés en fatigue. Par ailleurs depuis quelques années, des nouvelles méthodes basées sur les résultats issus d'essais d'auto-échauffement ont vu le jour et permettent de déterminer rapidement via l'utilisation d'une seule éprouvette les propriétés en fatigue (limite d'endurance [1] et écart type associé [2]).

Dans cette étude nous proposons de comparer l'utilisation de ces différentes approches pour déterminer l'anisotropie de la limite d'endurance d'un acier laminé possédant des inclusions allongées dans le sens de laminage. Une attention particulière est portée sur l'étude de l'influence des inclusions sur certaines caractéristiques mécaniques : limite d'élasticité, résistance mécanique, ténacité, limite d'endurance en traction-compression.

## 2 Résultats expérimentaux

Les matériaux laminés ou forgés sont reconnus pour leur bonne tenue mécanique notamment en fatigue. Cette caractéristique est liée à l'amélioration de la compacité et à l'obtention d'une microstructure plus fine par l'opération de mise en forme. Le fibrage est le terme communément employé pour définir une orientation

selon laquelle la microstructure ou les défauts présents dans le matériau ont été déformés par l'opération de mise en forme, en l'occurrence ici le forgeage.

Ce fibrage est responsable du caractère anisotrope de la tenue en fatigue. Cette variation peut être de l'ordre de 35% pour un 42CD4 et de l'ordre de 15% pour un acier inox [3-6].

Element	C	Mn	Si	Cr	S	Mo	V	Ti
% masse	0.255	1.30	0.9	0.8	0.075	0.075	0.185	0.025

Tableau I. Composition de l'acier METASCO MC (%de masse)

Le matériau étudié est un acier bainitique : le METASCO MC. Ce matériau laminé avec un rapport de corroyage de l'ordre de 15 contient des inclusions de sulfure de manganèse allongées dans le sens de laminage (figure 1 c)). Sa composition est présentée dans le tableau I et sa microstructure sur la figure 1-a). Ce matériau est reconnu pour son usinabilité et sa tenue en fatigue, il est donc employé pour des applications automobiles (vilebrequin, triangle de suspension...).

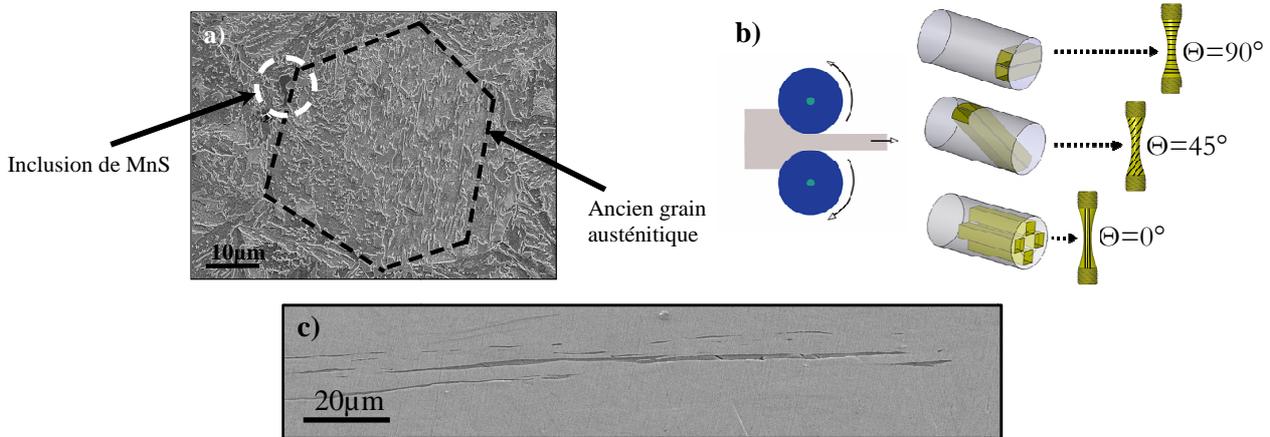


FIG. 1 – a)Microstructure du METASCO MC, b) Orientation des différents prélèvements 0°,45°,90°, c)Inclusions de MnS allongées dans la direction de laminage

Des observations au microscope optique ainsi que des figures de pôles ont permis de montrer que sa microstructure est isotrope. Si le METASCO MC possède un comportement en fatigue anisotrope, il ne peut être que la conséquence de la présence de certaines hétérogénéités comme les inclusions allongées.

## 2.1 Essais de traction monotone

Des essais de traction monotone ont été réalisés dans chacune des directions de prélèvement. Les résultats sont présentés sur la figure 2 ainsi que dans le tableau II. La résistance mécanique varie peu suivant le sens de prélèvement. Elle est maximale pour une orientation de fibrage à 0° et égale pour des orientations à 45 et 90°. L'allongement A% quant à lui, possède une anisotropie plus marquée et décroît continument entre 0° et 90°.

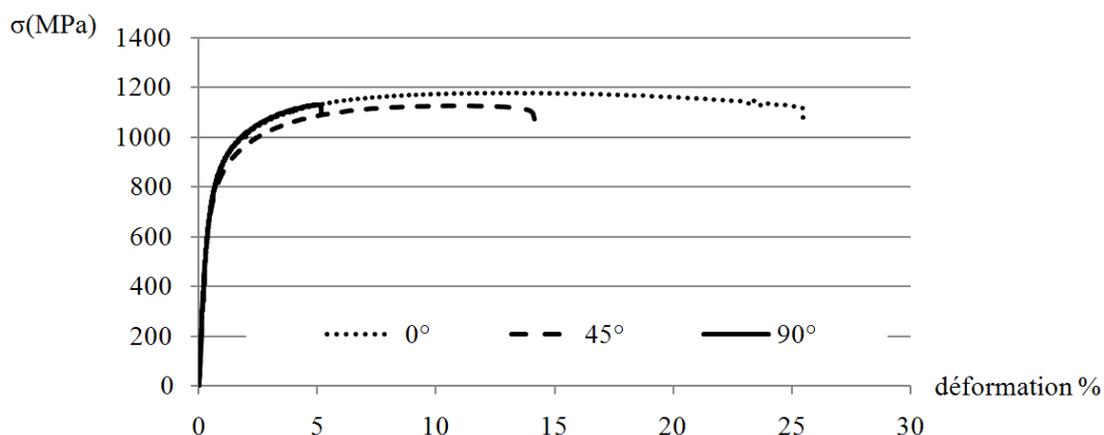


FIG. 2 –Courbes d'essais de traction monotone pour chacun des sens de prélèvement

## 2.2 Essais de résilience

Des essais de résilience ont été menés afin de tracer la courbe de transition fragile/ductile en fonction de l'orientation du fibrage. Les résultats d'essais de résilience permettent de mieux comprendre le comportement en fatigue d'un matériau. Temmel et al. [5] les utilisent par exemple afin de décorréliser les effets de la matrice et des inclusions. Des essais Charpy ont été réalisés sur des éprouvettes entaillées en suivant la norme NF EN 10045-1. La courbe suivante a été réalisée à partir de 3 éprouvettes par condition expérimentale (figure. 3).

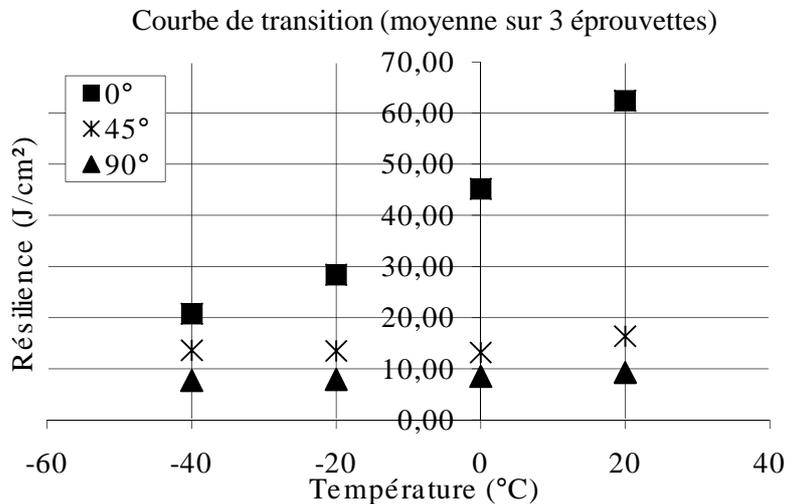


FIG. 3 – Courbes de transition Fragile/Ductile pour différentes orientation 0°, 45° et 90°

## 2.3 Estimation de la limite d'endurance

### 2.3.1 Estimation de la limite d'endurance par méthode Staircase

Afin de caractériser l'anisotropie en fatigue de l'acier METASCOMC 15 éprouvettes par sens de prélèvement ont également été testées en traction-compression  $R=-1$  en suivant la méthode Staircase avec un seuil fixé à  $N=2.10^6$  cycles. Les limites d'endurance obtenues, présentées dans le tableau II, montrent une diminution continue pour les orientations comprises entre 0° et 90°. Par ailleurs cette diminution de la limite d'endurance s'accompagne d'une chute de la dispersion relative associée. Notons que ces résultats suivent les mêmes tendances que ceux obtenus par Temmel et al. sur un 50CD4 [5].

Orientation (degrés)	$R_m (MPa)$	$Re_{0,2\%} (MPa)$	A%	$\overline{s_{-1}} (MPa)$	$\overline{s_{-1}} (MPa)$	$Cov = \frac{\overline{s_{-1}}}{s_{-1}}$
0°	1180	755	25	476	±20	0,042
45°	1127	710	14	453	±8	0,018
90°	1130	750	5	415	±11	0,026

Tableau II. Résultats des essais de traction monotone et de fatigue en traction-compression  $R=-1$

### 2.3.2 Estimation de la limite d'endurance par essais d'auto-échauffement

Pour réaliser ces essais il est nécessaire d'appliquer une séquence de blocs de chargement cyclique d'amplitude croissante et de mesurer pour chacun de ces blocs la température stabilisée sur la surface de l'éprouvette. Il est alors possible de tracer la courbe d'auto-échauffement qui représente l'évolution de la variation de la température stabilisée en fonction de l'amplitude de la contrainte appliquée. La précision de la mesure de température dépend à la fois de la précision du thermocouple et de la centrale d'acquisition employée. La centrale d'acquisition (Eurotherm Chessel – 5100V) utilisée assure une précision de mesure de 0,02°C avec des thermocouples de Type T. Afin de vérifier la répétabilité de l'essai, 2 lots de 3 éprouvettes par sens de prélèvement ont été testés dans les mêmes conditions par le LAMPA. Les courbes obtenues pour chacune des directions et pour chacun des lots (1<sup>er</sup> et 2<sup>nd</sup> lots) se sont montrées quasiment identiques. Afin également de fiabiliser le protocole expérimentale suivi, un troisième lot d'éprouvette a été testé au sein du

CREAS en suivant la même séquence de chargement mais en utilisant un matériel différent. Précisons que les deux laboratoires sont dotés de machines servohydrauliques différentes équipées de mors et de système d'acquisition de température également distincts. Les courbes d'autoéchauffement de 1<sup>er</sup> lot testé au LAMPA et du 3<sup>ème</sup> lot testé au sein du CREAS sont tracées sur la figure 4. Afin d'alléger le graphique, les courbes d'autoéchauffement du second lot testé au LAMPA n'ont pas été représentées sur la figure 4.

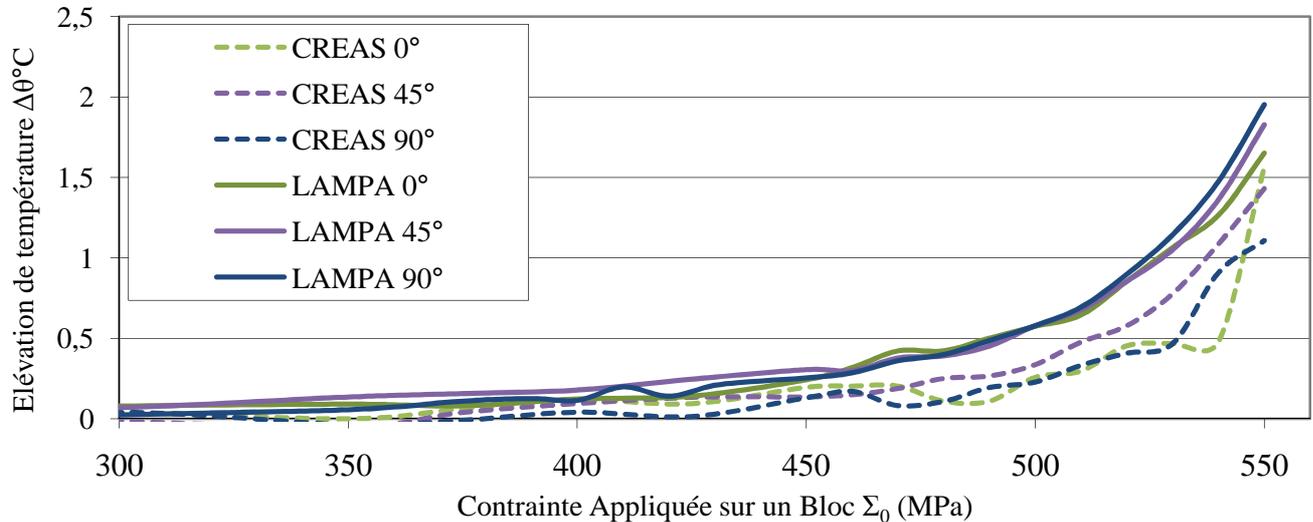


FIG. 4 – Courbes d'essai d'auto-échauffement pour différentes orientations de fibrage,  $R=-1, f=10$  Hz

Les courbes obtenues par les essais du CREAS sont toutes situées légèrement en dessous de celles obtenues au LAMPA (figure 4). Par contre, elles présentent exactement la même allure.

Pour estimer les limites d'endurance prédites à partir de ces courbes, il est nécessaire d'identifier le point d'inflexion, nous proposons pour cela d'utiliser l'algorithme développé par Cura et al. [1]. Pour estimer l'écart type nous baserons sur le modèle probabiliste proposé par Doudard et al. [2] qui approxime la courbe d'autoéchauffement à l'aide d'une fonction de type :

$$\Delta\theta = k\Sigma_0^{m+2} \quad (1)$$

Où  $\Delta\theta$  est l'élévation de température sur un bloc,  $\Sigma_0$  la contrainte appliquée sur un bloc,  $k$  une constante permettant de prendre en compte les effets d'échelle et de conductivité du matériau et  $m$  est le module de Weibull du modèle probabiliste. Plus  $m$  est élevé et plus la dispersion de la limite d'endurance est faible.

Pour estimer l'exposant  $m$  à partir d'une courbe d'essai d'auto-échauffement à l'aide du modèle de Doudard, il est nécessaire d'approximer la courbe d'auto-échauffement en imposant une fonction de la forme (1). L'approximation pour ce dépouillement a été réalisée en utilisant la méthode des moindres carrés. Le lien entre le module  $m$  d'une loi de Weibull et les moyennes et écarts type d'une loi normale peut être écrit à l'aide des équations suivantes :

$$COV = \frac{\overline{s_{-1}}}{s_{-1}} = \frac{\sqrt{\Gamma(1+2/m) - \Gamma^2(1+2/m)}}{\Gamma(1+1/m)} \quad (2)$$

Avec: 
$$\Gamma(t) = \int_0^{\infty} x^{t-1} e^{-x} dx \quad (3)$$

Orientation (degrés)	RESULTATS LAMPA (2 essais par orientation)		RESULTATS CREAS (1 essai par orientation)		RESULTATS STAIRCASE (15 essais par orientation)	
	$\overline{s_{-1}}$ (MPa)	Exposant $m$	$\overline{s_{-1}}$ (MPa)	Exposant $m$	$\overline{s_{-1}}$ (MPa)	Exposant $m$
0°	491	10	502	11	476	30
45°	493	11	503	14	453	>50
90°	501	11	490	14	415	45

Tableau III. Comparaison des résultats obtenus par méthode d'auto-échauffement et par Staircase

D'après le tableau III les valeurs prédites par les essais d'auto-échauffement réalisés au CREAS et au LAMPA sont très proches ce qui permet de valider le protocole expérimental suivi dans les deux laboratoires.

Le tableau III permet également de comparer l'estimation des caractéristiques en fatigue obtenues à partir des essais d'auto-échauffement et à partir de la méthode Staircase. Pour un prélèvement orienté à 0° la limite d'endurance est correctement estimée avec une erreur de l'ordre de 5%. Pour l'ensemble des essais l'exposant de Weibull estimé est plus faible comparé aux résultats du Staircase. Les essais d'auto-échauffement tels qu'ils ont été conduits ne semblent pas en mesure de refléter le comportement anisotrope en fatigue du METASCO MC. En effet, les limites d'endurances et modules de Weibull associés ne varient pas en fonction de l'orientation du fibrage et ceci quelles que soient les conditions expérimentales.

### 3 Analyse

Afin de mieux comprendre les mécanismes d'endommagement en fatigue de l'acier METASCO MC, nous proposons d'analyser les faciès de ruptures issus des essais de résilience et de fatigue (figure 5)

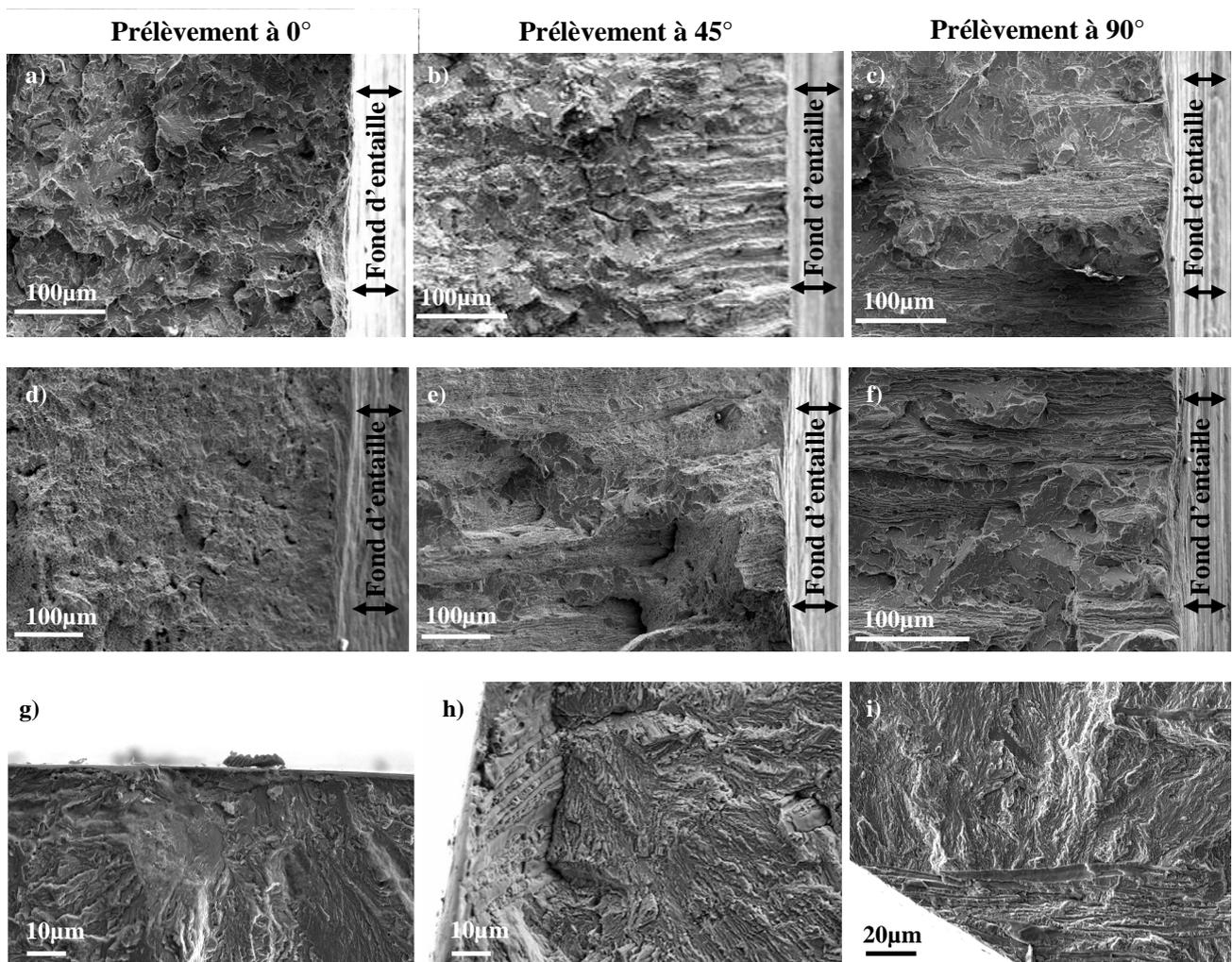


FIG. 5 –Faciès de rupture pour différents conditions d'essais et orientation de prélèvement  
a,b,c) Essais Charpy à -40°C, d,e,f) Essais Charpy à 20°C, g,h,i) Essais de fatigue

Les faciès de rupture issus d'essais Charpy réalisés à -40°C sont tous de type fragile. L'amorçage pour un fibrage orienté à 45° et 90° apparaît au niveau de bandes d'inclusions (figure 5 b), c)) alors qu'à 0° il semble naître à partir de la matrice bainitique (figure 5 a)). A 20°C, le constat est différent : pour le fibrage orienté à 0° le faciès est de type ductile et présente des cupules (figure 5 d)) alors que pour un fibrage orienté à 45° et 90° le faciès est toujours de type fragile avec un amorçage localisé sur des bandes d'inclusions (figure 5 e), f)). Cette différence de mécanismes permet d'expliquer le fait que l'anisotropie de résilience à 20°C soit plus marquée qu'à -40°C.

Les faciès de rupture issus des éprouvettes rompues en fatigue mettent également en évidence un changement de mécanisme en fonction de l'orientation du fibrage. Pour un fibrage orienté à 0°, l'amorçage a lieu au sein de la structure bainitique (figure 5 g)). Pour un fibrage orienté à 45° et 90° l'amorçage est localisé au niveau de bandes d'inclusion (figure 5 e), f)). Les inclusions sont donc responsables du comportement anisotrope en fatigue de l'acier METASCO MC. Notons que ce changement de mécanismes permet d'expliquer la chute de dispersion associée à la limite d'endurance en fonction de l'angle de fibrage.

Les essais d'auto-échauffement ont permis de prédire la limite d'endurance pour un fibrage orienté à 0°, c'est-à-dire lorsque l'amorçage est piloté par la microplasticité au sein de la matrice. En revanche avec la démarche adoptée, cette méthode ne semble pas être en mesure de rendre en compte de l'effet des inclusions inhérentes au matériau. Rappelons que ces méthodes sont basées sur l'hypothèse selon laquelle l'élévation de température est due à une énergie dissipée créée par une activité microplastique. Dans le cas où les inclusions sont à l'origine de la rupture en fatigue, cette activité microplastique est sans doute différente (en termes de localisation et d'intensité) et doit donc être traitée différemment. Notons néanmoins que pour un fibrage à 90°, l'activité microplastique au sein de la structure bainitique ne disparaît pas complètement. Plus précisément, il apparaît une compétition entre les mécanismes d'amorçage au sein des amas d'inclusions et de la structure bainitique.

Ces différents essais permettent également de mettre en évidence les paramètres mécaniques sensibles à la présence d'inclusions. Concernant les essais monotones, la limite d'élasticité ( $Re_{0,2\%}$ ) et la résistance mécanique ( $Rm$ ) sont peu affectées par l'orientation des inclusions alors que l'allongement est très affecté (tableau II). La ténacité est le paramètre le plus sensible à la présence d'inclusion, en accord avec les travaux de Wilson [7]. Les inclusions, en fonction de leur orientation, facilitent différemment la propagation des fissures et font chuter la ténacité, la ductilité et la limite d'endurance.

## 4 Conclusion

Les différents essais mettent en évidence le rôle des inclusions allongées dans le sens de laminage sur l'anisotropie en fatigue. Les limites d'endurance obtenues montrent une diminution continue pour les orientations comprises entre 0° et 90°. Les essais d'auto-échauffement n'ont pas permis de caractériser l'anisotropie en fatigue du METASCO MC.

Tous ces essais ont été réalisés sur des éprouvettes polies, la prise en compte des effets de surface fait l'objet de travaux en cours en collaboration avec le LURPA et le LMT de l'ENS Cachan.

## 5 Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet Optiforge soutenu par l'Agence National de la Recherche. Ces résultats sont le fruit d'un partenariat fort entre industriels (Ascoforge, Ascometal, Cetim, PSA, Setforge, Transvalor) et universitaires (INSA Lyon-MATEIS, ENSMP-CEMEF, Arts et Métiers PARISTECH Angers-LPMI).

## Références

- [1] Cura F., Curti G., Sesana R., A new method for thermographic determination of fatigue limit in steels, *International Journal of Fatigue*, 27, 453-459, 2005.
- [2] Doudard C., Calloch S., Influence of hardening type on self-heating of metallic materials under cyclic loadings at low amplitude, *European Journal of Mechanics A/solids*, 28, 233-240, 2009.
- [3] Berard J.Y., Dang Van K. and Baudry G., influence de l'anisotropie sur le comportement en fatigue multiaxiale d'un acier de construction mécanique, IRSID, Technical Note No RI 93 062, 1993.
- [4] Mateo A., Llanes L., Akdut N., Stolarz J. and Abglada M., Anisotropy effects on the fatigue behaviour of rolled duplex stainless steels, *Int. J. of Fatigue*, 25, 481-488, 2003.
- [5] Temmel C., Karlsson B. and Ingesten N.G., Fatigue Isotropy in Cross-Rolled, Hardened Isotropic-Quality Steel, *Metallurgical and Materials Transaction A.*, 2008.
- [6] Lütjering G., Albrecht J., Sauer C. and Krull T., The influence of soft, precipitate-free zones at grain boundaries in Ti and Al alloys on their fatigue and fracture behaviour, *Mater. Sci. Eng.A*, 468-470, 2007.
- [7] Wilson A. D., Comparing the Effect of Inclusions on Ductility, Toughness, and Fatigue Properties, ASTM STP 794, American Society for Testing and materials, 130-146, 1983.