

Influence des effets de surcharges et souscharges sur la propagation d'une fissure de fatigue

A Miloudi¹, M Bnguediab¹, M Zemri¹, M Ma'ari¹

¹ University of Sidi Bel Abbas, BP 89 Cité Ben M'hidi, Sidi Bel Abbas, 22000, ALGERIE, Laboratoire des Matériaux et Systèmes Réactifs (LMSR).

Abstract— Ce travail apporte une contribution à l'étude du phénomène de retard à la propagation d'une fissure de fatigue suite à l'application d'un cycle de surcharge, souscharge consécutif à un cycle de surcharge, souscharge suivie par une surcharge lors de la propagation d'une fissure en fatigue.

En outre, ce retard est dû essentiellement aux contraintes résiduelles de compression ainsi qu'à la fermeture de fissure. La partie expérimentale se concentre sur l'analyse des effets d'interaction entre les zones plastifiées intervenant en fond de fissure. Pour y parvenir, cette étude a été menée sur l'acier XC38. De plus, différents chargements ont été effectués dans le but d'isoler l'effet de telle ou telle zone plastifiée sur les différents paramètres de retard : Δa , N_d , $(da/dN)_{min}$, et a_{min} . La fermeture a été suivie par mesure de la déformation du ligament résiduel. Ces mesures ont montré que ce phénomène ne constitue pas la cause majeure du retard.

Keywords-fatigue; fissure; surcharge; souscharge; retard à la propagation; zone plastifiée.

I. INTRODUCTION

Les services de maintenances (aéronautique, hydraulique, transports,...) doivent souvent faire face à l'apparition de fissures dans les éléments métalliques de structures soumises à des chargements cycliques. Dans la plupart des cas, pour les structures subissant des chargements cycliques, l'amplitude des cycles est variable.

En fatigue, l'histoire de chargement est donc le facteur le plus important pour le calcul du nombre de cycles à la rupture N_r d'un élément fissuré. L'interaction des niveaux de chargement influe fortement sur les vitesses de propagation de fissure. La compréhension des effets d'histoire de chargement sous spectre nécessite de considérer des chargements simplifiés par rapport aux spectres réels.

L'effet du cycle de souscharge après celui de surcharge a fait l'objet de moins de travaux [1, 2, 3,4]. Il est cependant incontestable qu'un cycle de souscharge modifie notablement les caractéristiques du retard. Notre travail s'inscrit dans la

continuité de ces travaux. Plusieurs auteurs [5, 6, 7, 8] ont montré que le ralentissement ne dépend pas exclusivement des modifications de la microstructure par la surcharge ni de la géométrie de la zone plastifiée subséquente, mais plutôt des contraintes résiduelles associées aux déformations plastiques. Actuellement, on pense que les contraintes résiduelles et la fermeture de fissure, tous deux liées à la croissance de la zone plastique due à la surcharge, sont souvent la cause du retard. Pour cela des mesures d'ouverture de fissure, ont été réalisées qui ont pour but de mettre en évidence l'effet bénéfique des contraintes résiduelles.

Ce travail présente une étude sur l'influence d'un cycle de surcharge, un cycle de surcharge suivie à un cycle de souscharge et un cycle de souscharge consécutif à un cycle de surcharge lors de la propagation en fatigue d'une fissure le cas d'acier XC38.

II. ETUDE EXPERIMENTALE

A. Matériau étudié

Le matériau étudié est un acier semi-doux utilisé dans la fabrication de moulage, arbres de transmission, et petites pièces d'outillages de type XC38 la composition chimique et les propriétés mécaniques est données par les tableaux (1, 2).

Elément	C	Mn	Si	P	S
%	0.38	0.65	0.25	0.01	0.02

Tableau 1: Composition chimique de l'acier XC 38

E GPa	Re0.2 % Mpa	Rm MPa	A %	Hv	ν
212	315	580	20	210	0.3

Tableau 2: Propriétés mécaniques de l'acier XC38

Tous les essais ont été conduits sur des éprouvettes CT75 d'épaisseur $B = 4$ mm et de largeur $W = 75$ mm

B. Dispositif expérimental

Les essais de fissuration ont été réalisés sous air et à la température ambiante sur une machine servo-hydraulique de type INSTRON 8516. La capacité de cette machine est de ± 50 KN en statique et de ± 100 KN en dynamique.

C. Chargement appliqué sur les éprouvettes CT

Pour quantifier une surcharge ou une souscharge, appliquée au cours d'un essai de propagation de fissure quatre types de chargements ont été appliqués. Tous les essais dont les résultats ont été exploités dans la présente étude sont représentés dans le tableau 3.

Matériau	Nature de l'essai	Rapport de charge R	Taux de surcharge	Taux de souscharge
XC38	Simple surcharge	0.1	1.7	1
XC38	Surcharge Suivie par une souscharge	0,1	1.70	-1.11
XC38	Souscharge Suivie par une surcharge	0,1	1.70	-1.70
XC38	Souscharge	0,1	1.70	-1.70

Tableau 3 : Les différents types de chargements

III. ANALYSE DES RÉSULTATS

A. Evolution de la longueur de fissure en fonction du nombre de cycles N

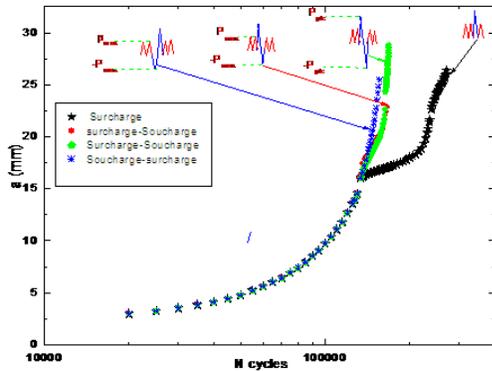


Figure 1 : Evolution de la longueur de fissure a en fonction du nombre de cycles N

La figure 1 illustre les différents cas possible de chargement en fatigue, sous forme de courbe donnant l'évolution de la longueur de fissure a en fonction du nombre de cycles N.

Dans le cas d'une simple surcharge nous constatons l'existence de trois domaines qui sont défini comme suit :

- la fissure avance avec l'augmentation du nombre de cycle ;
- dès l'application de la surcharge, la fissure ralentie pendant un nombre de cycle N_d appelée nombre de cycle de retard ;

- à l'extinction de l'effet de surcharge, la fissure reprend son avancé normale.

Par ailleurs dans le cas d'une surcharge suivie par une souscharge où $P_{\text{sous}} = P_{\text{max}}$ pour un taux de surcharge $\tau = 1,7$, nous constatons qu'une surcharge suivie par une souscharge diminue l'effet de retard.

Pour mieux cerner l'influence d'une souscharge nous avons décidé de faire appliquer des essais en variant le pic de souscharge en fonction de la charge où $P_{\text{sous}} = P_{\text{pic}}$, nous constatons qu'une forte souscharge appliquée après la surcharge diminue d'une manière importante le nombre de cycle de retard N_d .

Par contre dans le cas d'une forte souscharge en compression appliquée avant une surcharge (où $P_{\text{sous}} = P_{\text{pic}}$) atténué le retard de propagation d'une fissure.

A. Evolution de la vitesse de fissuration da/dN en fonction du facteur d'intensité de contrainte ΔK

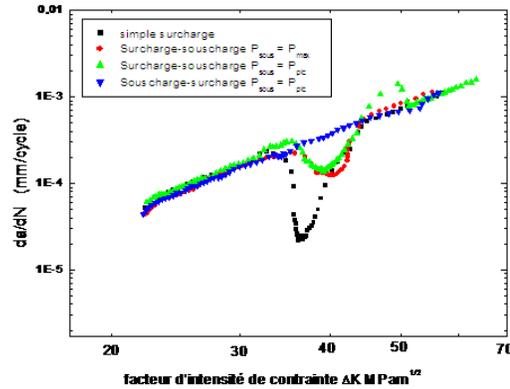


Figure 2 : Evolution de da/dN en fonction de facteur d'intensité de contrainte ΔK

Dans cette figure, nous nous proposons d'étudier les phases de propagation de fissure, la figure 2 illustre l'évolution de la vitesse de propagation da/dN en fonction du facteur d'intensité de contrainte ΔK , nous remarquons qu'après l'application d'une surcharge, un arrêt de la propagation de la fissure pendant un certain nombre de cycles qui correspond au nombre de cycles de retard N_d .

En termes de vitesse de propagation, ce phénomène se traduit par l'apparition immédiate d'un "crochet" mettant en évidence une décélération. Ce qui correspond à un retard immédiat.

La vitesse de propagation après surcharge peut être décrite par deux stades :

- 1- stade 1 : où la vitesse chute rapidement pour atteindre une valeur minimale noté $(da/dN)_{\text{min}}$. Cette zone fortement perturbée par la surcharge correspond à une longueur de fissure a_{min} ;
- 2- stade 2 : la fissure progresse dans la zone plastifiée jusqu' retrouver sa valeur initiale $(da/dN)_{\text{base}}$.

Figure 5 : Evolution de l'hystérésis du cycle "charge-déformation"

Il faut rappeler ici que l'intensité de la vitesse minimale atteinte une faible valeur dans le cas d'une surcharge, pour un rapport de surcharge $\tau = 1,7$ la vitesse minimale est de $2.16 \text{ e-5 mm/cycle}$, tandis qu'elle est de 1.2 e-4 mm/cycle dans le cas d'une surcharge suivie par une souscharge où $P_{\text{sous}} = P_{\text{pic}}$ cette vitesse augmente quand le taux de souscharge augmente et elle est de $1.36 \text{ e-4 mm/cycle}$.

Dans le cas d'une forte souscharge en compression appliquée après une surcharge (où $P_{\text{sous}} = P_{\text{pic}}$) deux phénomènes importants se sont produits :

- 1- Après application d'une surcharge suivie par une souscharge, la vitesse diminue légèrement ;
- 2- Elle atteint une vitesse supérieure à sa vitesse initiale, pour retrouver, sa vitesse initiale après un certain nombre de cycles.

Ceci peut être expliqué par les contraintes résiduelles de traction induites par la forte souscharge appliquée.

Tandis que d'une forte souscharge en compression appliquée avant une surcharge (où $P_{\text{sous}} = P_{\text{pic}}$) élimine le retard de propagation d'une fissure.

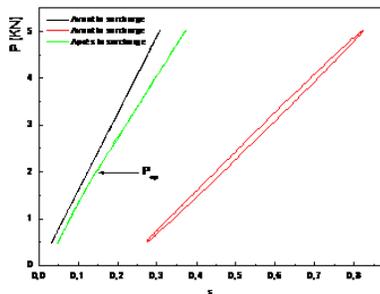
Le tableau 4 regroupe les différents résultats pour les différents chargements, afin de montrer la différence de comportement entre ces chargements.

Types de chargements	Nd (cycles)	ad (mm)	(da/dN)min (mm/cycles)
Simple Surcharge	94000	7,49	$2,16 \text{ e-5}$
Surcharge-Souscharge ($P_{\text{sous}}=P_{\text{max}}$)	25000	6,34	$1,2 \text{ e-4}$
Surcharge-Souscharge ($P_{\text{sous}}=P_{\text{pic}}$)	22000	6,09	$1,36 \text{ e-4}$
Souscharge-surcharge ($P_{\text{sous}}=P_{\text{max}}$)	0	0	X

Tableau 4 : Ensemble des résultats pour les différents chargements

B. Abbreviations Analyse en termes de fermeture

Pour mesurer la charge à l'ouverture P_{0p} , nous avons utilisé un capteur à lames. Le principe est de mesurer la déformation du ligament de l'éprouvette. En effet, cette déformation est liée à sa rigidité. Cette rigidité faiblit quand la fissure progresse. De plus, lorsque le phénomène de fermeture de fissure se produit, la courbe charge-déformation $P-\delta$ montre un changement de pente figure 5.



C. Evolution des tensions d'ouvertures

Dans cette étude, l'évolution de la répartition des tensions d'ouverture de fissure a été prise en compte dans le calcul du facteur d'intensité de contraintes pour chaque cas de chargement. Nous observons qu'après l'application d'une surcharge les contraintes d'ouverture croissent rapidement et atteignent une valeur supérieure à la contrainte maximale du chargement de base puis s'affaiblissent lentement (Fig 06 a).

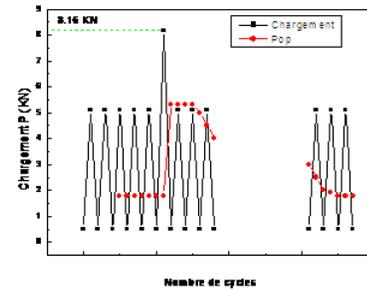


Figure 06.a : Evolution des tensions d'ouverture après surcharge

Une souscharge, avant surcharge, causerait une diminution rapide de la contrainte d'ouverture suivi d'une augmentation à un niveau inférieur au cas précédent suivi d'une diminution lente comme précédemment. (Figure 06 b) une chute brusquement.

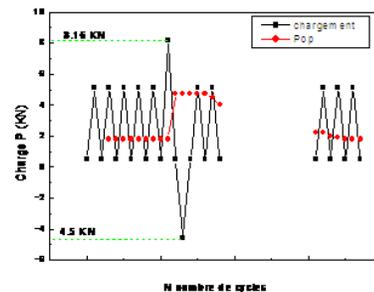


Figure 06.b : Evolution des tensions d'ouverture après surcharge-souscharge ($P_{\text{sur}}=P_{\text{max}}$)

Dans la figure 06.c nous constatons qu'après l'application d'une souscharge la diminution des tensions d'ouverture est d'autant plus élevée que le taux de souscharge est important.

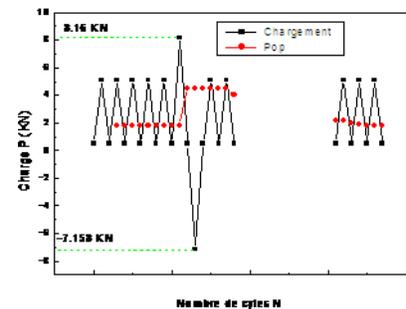


Figure 06.c : Evolution des tensions d'ouverture après surcharge-souscharge (Psur =Ppic)

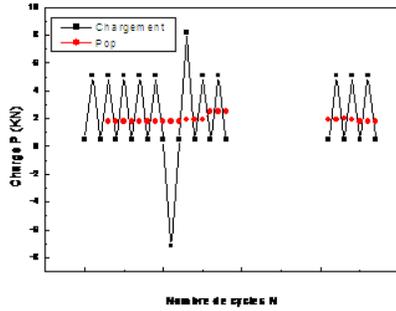


Figure 06.d : Evolution des tensions d'ouverture après souscharge-surcharge (Psur =Ppic)

La figure 07 illustre la courbe donnant la variation du facteur d'intensité d'ouverture K_{ouv} en fonction de la longueur de fissure a , ces résultats montrent qu'il y'a plusieurs stades distincts :

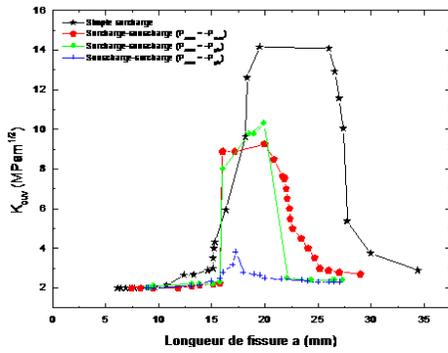


Figure 07 : Evolution du facteur d'intensité d'ouverture en fonction de la longueur de fissure a

1- Effet d'une simple surcharge

- Le stade 1 où le chargement est à amplitude constant représente un ΔK_{eff} croissant résultant d'une charge à l'ouverture P_{op} constante ;
- Le deuxième correspond à l'application d'un premier cycle de surcharge, où la fissure croît dans une zone plastifiée plus grande à celle associée à la charge la plus élevée (surcharge). La contrainte nécessaire à l'ouverture augmente et provoque une diminution de ΔK_{eff} . La réduction du facteur d'intensité de contrainte efficace explique mieux le ralentissement après l'application de la surcharge qui donne un retard immédiat ;
- le troisième stade, la charge à l'ouverture diminue graduellement avec la croissance qui suit jusqu'à ce qu'une nouvelle valeur d'équilibre soit atteinte.

2- Effet d'une surcharge suivie par une souscharge

Dans le cas d'une surcharge suivie par une souscharge, la fermeture de fissure se manifeste juste après l'application d'une surcharge suivie par souscharge. Celle-ci à lieu à une distance

moyenne de 4mm cette distance peut être comparable à la valeur moyenne de la longueur de fissure associée à la distance minimale de la propagation après surcharge-souscharge. L'augmentation de l'amplitude d'une souscharge entraîne une diminution du facteur d'intensité d'ouverture.

3- Effet d'une souscharge suivie par une surcharge

Dans le cas d'une forte souscharge en compression appliquée avant une surcharge (où $P_{sous} = P_{pic}$) le facteur d'intensité d'ouverture est faible ceci peut être expliquer par les contraintes résiduelles de traction suite à l'application d'une forte souscharge en compression.

Lors des derniers cas étudiés on peut tirer les conclusions suivantes :

- Le stade La fermeture de fissure est importante dans le cas d'une simple surcharge.
- La fermeture est moins élevée dans le cas d'une surcharge suivie par souscharge que celle d'une surcharge.
- La fermeture de fissure diminue avec le taux de souscharge (cas d'une surcharge suivie par souscharge).
- Le phénomène de fermeture est moins marqué dans le cas d'une forte souscharge en compression suivie d'une surcharge.

La figure 08 montre les évolutions du rapport de fermeture U en fonction de la longueur de fissure a . la valeur de ce rapport U permet de déduire l'amplitude efficace du facteur d'intensité de contrainte ΔK_{eff} et donc de prédire la vitesse de fissuration en utilisant une relation de type Elber.

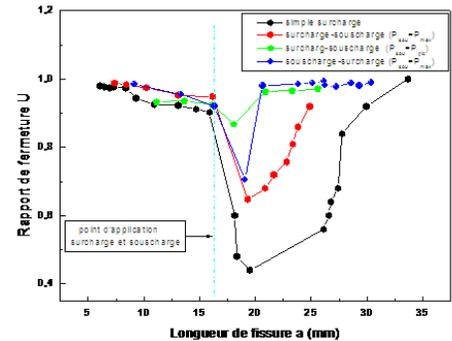


Figure 08 : Evolution du rapport de fermeture en fonction de la longueur de fissure a

Le rapport d'ouverture U peut être exprimé par la relation suivante :

$$U = \frac{\Delta K_{eff}}{\Delta K} \quad (1)$$

L'amplitude du facteur d'intensité de contrainte efficace et ensuite donnée par l'expression suivante :

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{ouv} = U \cdot \Delta K \quad (2)$$

Les figures 9, 10 et 11 illustrent la comparaison entre une courbe de vitesse de fissuration obtenue expérimentalement et une courbe traduisant le modèle d'Elber.

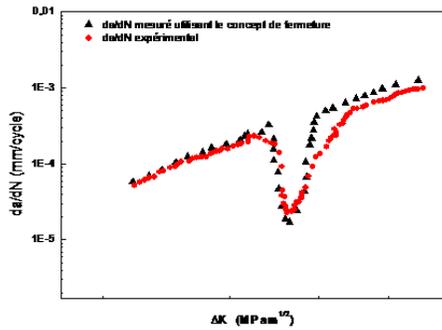


Figure 9 : Evolution de la vitesse de fissuration en fonction du facteur d'intensité de contrainte cas d'une simple surcharge.

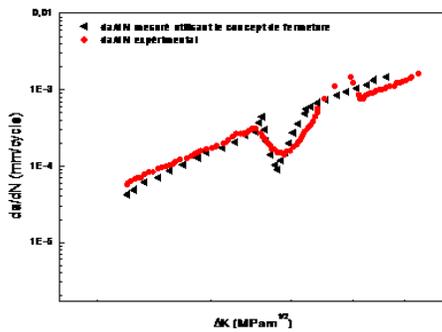


Figure 10 : Evolution de la vitesse de fissuration en fonction du facteur d'intensité de contrainte cas d'une surcharge-souscharge

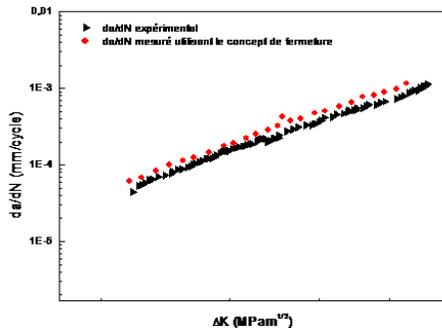


Figure 11: Evolution de la vitesse de fissuration en fonction du facteur d'intensité de contrainte cas d'une souscharge-surchage.

Nous remarquons que les résultats calculés à partir de ce modèle sont en accord avec les résultats expérimentaux.

CONCLUSION

L'étude présentée dans ce mémoire a pour objectif la caractérisation de la propagation des fissures sous chargement variable. Dans ce cas tous les cycles sont soit de surcharge suivie par souscharge ou souscharge suivie par une surcharge. Cette étude a été axée principalement sur l'influence du taux de surcharge et de taux de souscharge. Quatre familles de

configurations de chargement ont été testées. Les essais ont été réalisés sur l'acier XC38.

A l'issue de cette investigation expérimentale, nous pouvons tirer les conclusions suivantes:

Simple surcharge

- Une surcharge appliquée lors d'un chargement d'amplitude constante provoque un retard sur la propagation de fissure.
- la fermeture de fissure est importante dans le cas d'une simple surcharge.

Surcharge suivie par une souscharge

- l'application d'une souscharge immédiatement après une surcharge diminue le nombre de cycle de retard.
- La longueur perturbée par le retard est moins importante dans le cas d'une surcharge suivie par une souscharge que dans le cas d'une surcharge.
- Le nombre de cycle de retard diminue avec le taux de souscharge.
- La fermeture de fissure est moins importante dans le cas d'une surcharge suivie par une souscharge que dans le cas d'une surcharge.
- La fermeture de fissure augmente avec le taux de souscharge.

Souscharge suivie par une surcharge

- une forte souscharge en compression appliquée avant une surcharge atténue le retard de propagation d'une fissure.
- Le phénomène de fermeture est moins marqué dans le cas d'une forte souscharge en compression.

En ce qui concerne le phénomène de fermeture de la fissure, nous pouvons souligner les remarques suivantes :

- La méthode de compliance semble être une technique correcte pour la détection de la charge d'ouverture de la fissure P_{ouv} .
- La fermeture de fissure a été observée dans tous les différents chargements.
- Dans notre cas (contrainte plane) la fermeture de fissure peut être évoquée pour expliquer et modéliser le retard.

Globalement, on peut remarquer une assez bonne corrélation entre les courbes du modèle et les valeurs expérimentales. Ce modèle nous a permis d'obtenir une meilleure description de la propagation après surcharge.

REFERENCES

[1] A. Bacila, "influence des effets de surcharges et souscharges sur la propagation d'une fissure de fatigue. Modélisation et estimation de la

durée de vie des éléments de construction mécanique”. Thèse soutenue le 11 juillet 2007 à USTL, Lille.

- [2] V. Zitounis, P.E. Irving – “Fatigue crack acceleration effects during tensile underloads in 7010 and 8090 aluminium alloys” ; International Journal of Fatigue; 2006.
- [3] V. Zitounis, P.E. Irving – “ Experimental and analytical investigation of fatigue characteristics of 350WT steel under constant and variable amplitude loadings” International Journal of Fatigue; 2006.
- [4] “K. Sadananda, A.K. Vasudevan, R.L. Holtz, E.U. Lee - “Analysis of overload effects and related phenomena” – International Journal of Fatigue 21, pp. S233-S246, 1999.
- [5] X. Decoopman “Influence des conditions de chargement sur le retard à la propagation d’une fissure de fatigue après l’application d’une surcharge“ Thèse soutenue le 16 Décembre 999 à USTL, Lille.
- [6]] M. Benguediab “Etude de la propagation des fissures de fatigue sous spectres de chargement réduits “Thèse de docteur ès Sciences, Université de Poitiers (1989).
- [7] A.Imad, “Mécanisme du retard induit par l’application d’une surcharge au cours de propagation d’une fissure de fatigue”. Thèse soutenue le 22 Décembre 1989 à USTL, Lille.
- [8] S.Chand, “Crack closure and propagation studies to determine the effects of single load interaction”, Journal of Engineering Materials Technology, Vol. 114, pp.229-236, Juillet 1992.