

# Utilisation de la méthode des plans d'expérience dans la pondération des facteurs de retard induit par une surcharge

A Miloudi<sup>1</sup>, M Bnguediab<sup>1</sup>, M Zemri<sup>1</sup>, M Ma'ari<sup>1</sup>

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

**Abstract**— Le retard à la propagation d'une fissure produit par une surcharge unique dépend de plusieurs facteurs intrinsèques ou extrinsèques du matériau. Cette dépendance rend complexe la modélisation du phénomène de retard. Elle peut expliquer les résultats contradictoires rencontrés parfois dans la littérature. En effet, plusieurs auteurs [1,2] ont axé leurs travaux sur la compréhension des effets de certains paramètres sur le retard. Un plan d'expérience a été utilisé en vue de mettre en évidence les facteurs les plus importants. Il a ainsi été montré que les paramètres les plus influents sont dans l'ordre : rapport de charge, taux de surcharge, l'épaisseur de l'éprouvette et la limite élastique. L'étude d'interaction a permis de trouver les combinaisons de différents facteurs pour un nombre de cycle de retard important.

**Keywords**-fatigue; fissure; surcharge; retard de propagation; zone plastique; taux de surcharge; plans d'expérience.

## I. INTRODUCTION

Lors de l'application d'une surcharge, au cours d'un chargement constant, la propagation de fissure est perturbée par un phénomène appelé retard. Ce phénomène, bien que découvert par Schijve (1962), reste que partiellement compris. Il est cependant reconnu que l'application d'une surcharge entraîne une période de retard,  $N_d$ , que cette période de retard augmente avec l'amplitude de la surcharge Schijve [3] et Decoopman [4].

L'application d'un cycle de plus grande amplitude au sein d'un chargement à amplitude constante entraîne une zone de transition de propagation durant laquelle le taux d'accroissement de fissure diminue dans un premiers temps pour atteindre un minimum, puis augmente jusqu'au total

recouvrement de la vitesse initiale de propagation. De plus, de par son effet bénéfique sur la durée de vie en fatigue la surcharge peut être considérée comme un moyen de réparation lors de l'application d'une fissure sur un élément de structure métallique.

## II. ETUDE EXPÉRIMENTALE

Tous les essais ont été conduits sur des éprouvettes CT75 de largeur  $W = 75$  mm (norme ASTM 647-00 [5]). Les essais de fissuration ont été réalisés sous air et à la température ambiante sur une machine servo-hydraulique de type INSTRON 8516. Nous présentons les principaux quelques résultats obtenus lors de l'étude expérimentale qui porte sur l'analyse des effets de conditions de chargement et des caractéristiques mécaniques sur l'acier XC38.

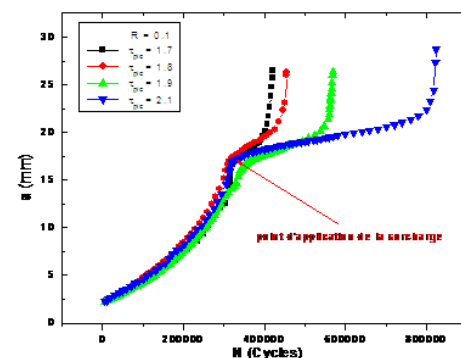


Figure 1 : Effet du taux de surcharge  $\tau$  sur la durée de vie  $N$

La figure 1 montre les différents résultats obtenus sous forme de courbes donnant l'évolution de la longueur de fissure en fonction du nombre de cycles  $N$  avant et après l'application de la surcharge.

### III. MODELISATION DU RETARD DE PROPAGATION D'UNE FISSURE INDUIT PAR UNE SURCHARGE

Comme on a adopté un plan d'expériences complet de 4 facteurs à 2 niveaux, le modèle de l'expérimentateur est quadratique et a la forme suivante :

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^4 a_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq 4} a_{ij} x_j + \sum_{i=1}^4 a_{ii} x_i^2 + e$$

On utilise le logiciel MODDE pour faire les différents calculs statistiques. Il y a deux méthodes pour faire la régression dans MODDE : la régression 'PLS' (Partial Least Squares) est utilisée quand il manque des données et la régression 'MLR' (Multiple Linear Regression). La méthode retenue est MLR, régressions des moindres carrés sur plusieurs facteurs.

#### A. Choix du plan expérimental

Après une première étude des différents facteurs qui ont une influence sur retard, on va maintenant essayer d'établir une relation entre les grandeurs d'entrée et les grandeurs de sortie. Pour cela nous proposons un plan du deuxième degré appelé « plan composite à faces centrées » qui offre une modélisation par des surfaces de réponse (RSM), en plus du modèle mathématique.

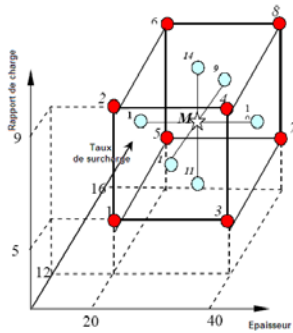


Figure 02 : représentation graphique de 17 points d'expérience

#### B. Résultats des expérimentations

Les résultats des 23 expériences effectuées selon le plan d'expériences composite sont reportés au tableau 3.

Expérience	Rapport de charge R	Taux de surcharge	Epaisseur (mm)	Limite élastique	Nombre de cycle de retard Nd
------------	---------------------	-------------------	----------------	------------------	------------------------------

1	0,2	1,5	4	137	317247
2	0,4	1,5	4	137	441239
3	0,2	2,1	4	137	340000
4	0,4	1,5	8	137	334434
5	0,2	2,1	8	137	250901
6	0,4	2,1	8	137	341428
7	0,2	1,5	4	359	386545
8	0,2	2,1	4	359	440775
9	0,4	2,1	4	359	660183
10	0,2	1,5	8	359	288804
11	0,4	1,5	8	359	469956
12	0,4	2,1	8	359	492317
13	0,2	1,8	6	248	289947
14	0,4	1,8	6	248	443514
15	0,3	1,5	6	248	337404
16	0,3	2,1	6	248	405225
17	0,3	1,8	4	248	406453
18	0,3	1,8	8	248	325405
19	0,3	1,8	6	137	401677
20	0,3	1,8	6	359	304570
21	0,3	1,8	6	248	343401
22	0,3	1,8	6	248	343000
23	0,3	1,8	6	248	343125

Tableau 1 : les 23 Expérience du plan composite

Après avoir calculé les coefficients du modèle de régression, il faut vérifier la validité de ce modèle. Une première méthode pour contrôler la pertinence du modèle est le 'Normal probability plot' du résidu des réponses ou bien N-plot. Le résidu 'e' est la différence entre la valeur de modèle 'y' et la valeur d'essai 'y' :  $e = y - \hat{y}$ . Cette technique graphique, pour vérifier si les résidus ont une distribution normale ou non, est un bon outil pour détecter les points 'hors modèle' figure 02.

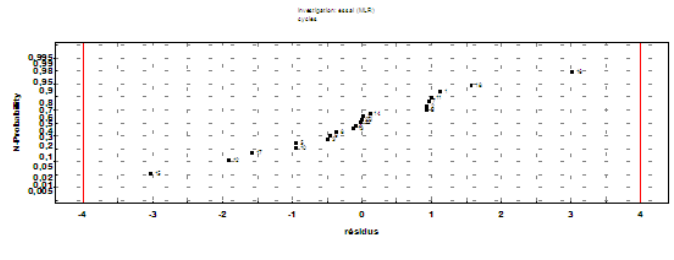


Figure 02 : Intervalle de confiance du modèle

L'axe vertical de ce graphe donne la probabilité normale de la distribution des résidus des réponses. L'axe horizontal présente les valeurs des résidus moyennés par l'écart type.

### IV. INFLUENCE DES FACTEURS CHOISIS SUR LA REPONSE

#### IV.1 ANALYSE AVEC UN SEUL EFFET

##### A. Influence du rapport de charge R

Les essais sont menés à amplitude de charge  $\Delta P$  constante. Les résultats, illustrés dans la figure 3, montre que Nd augmente avec l'augmentation du rapport R, ce résultats en bon accord avec la littérature [6,7]. En effet, la diminution de l'amplitude de la charge contribue fortement à l'accroissement du retard. Cependant, il faut constater que la zone plastique de surcharge

est maintenue constante, seule la zone cyclique due au chargement initial varie. Cette zone plastique diminue lorsque R augmente. Cependant, les contraintes résiduelles de compression à la pointe de fissure sont plus importantes cela peut expliquer l'augmentation du retard.

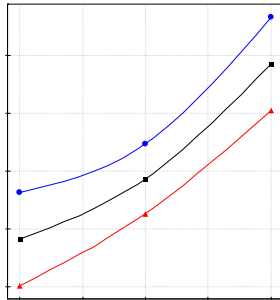


Figure 03 : Evolution du nombre de cycles de retard en fonction du rapport de charge

**B. Influence de l'épaisseur e**

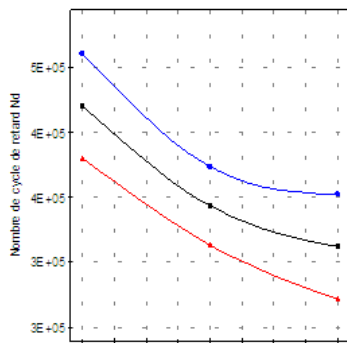


Figure 04: Evolution du nombre de cycles de retard en fonction de l'épaisseur

Nous avons analysé l'influence de l'épaisseur d'éprouvette sur le retard après un cycle de surcharge. Nous constatons que le nombre de cycles de retard décroît quand l'épaisseur de l'éprouvette augmente en accord avec les résultats de [8]. Ce comportement résulte du passage de l'état de contraintes planes à déformations planes quand l'épaisseur augmente.

**C. Influence du taux de surcharge**

Nous avons étudié l'effet du taux de la surcharge sur la propagation d'une fissure de fatigue. La Figure 5 montre qu'une augmentation du taux de surcharge influe sur le nombre de cycle de retard  $N_d$ , que le retard est une fonction croissante du taux de surcharge.

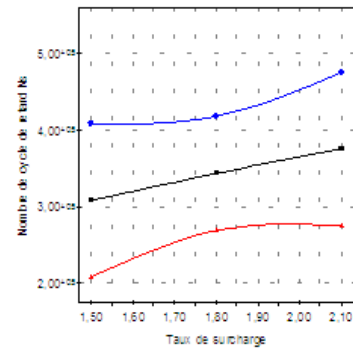


Figure 05 : Evolution du nombre de cycles de retard en fonction du taux de surcharge

**IV.2 ANALYSE AVEC TROIS EFFETS**

**A. Interaction entre le taux de surcharge et le rapport de charge**

Dans cette étape d'analyse nous élargissons nos commentaires en prenant en compte cette fois-ci une interaction entre les facteurs tout en gardant l'un des 3 constant cette décision nous permet de visualiser la variation du retard par un graphe en 3 dimensions.

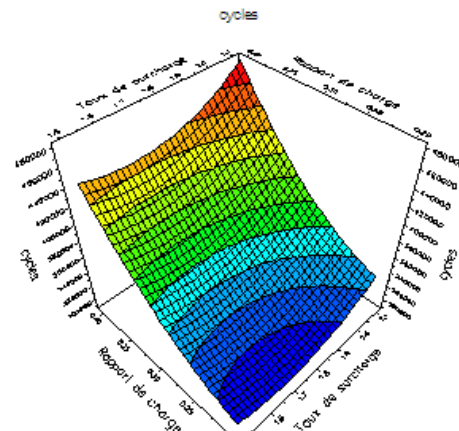


Figure 06 : Surface de réponse avec rapport de charge et taux de surcharge variable

Il s'agit donc de faire varier le taux de surcharge de 1.5 à 2.1 ainsi que le rapport de charge de 0.2 à 0.4, l'épaisseur étant prise égale à 6 mm.

On constate dans la figure 6 que la surface de réponse est plane. Cette figure nous montre l'effet du rapport de charge, du taux de surcharge et de l'épaisseur prise constante. Bien entendu, il y a l'interaction des 2 facteurs, nous constatons que l'augmentation du rapport de charge et du taux de surcharge augmente le nombre de cycles de retard.

La figure 7, appelée habituellement 'Iso courbes' et qui est la projection de la surface 6 sur le plan, l'analyse de la courbe 7 montre que l'augmentation du rapport de charge et du taux de surcharge augmente le nombre de cycles de retard.

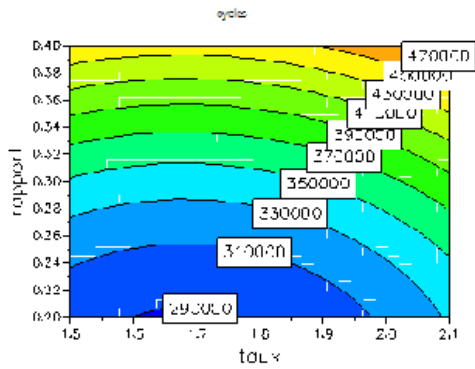


Figure 07 : Contour de retard rapport de charge et taux de surcharge variable

### B. Interaction entre l'épaisseur et le rapport de charge

Il s'agit dans ce cas de laisser le taux de surcharge constant et de faire varier l'épaisseur et le rapport de charge.

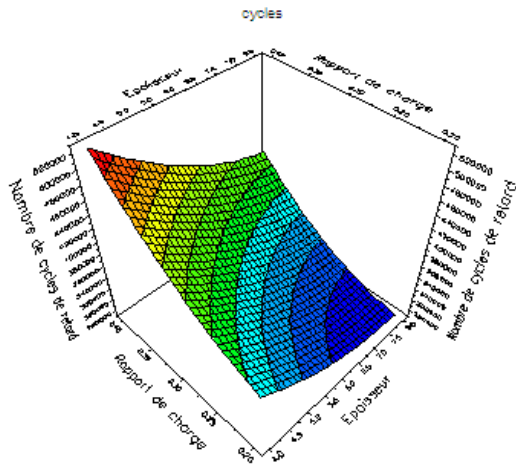


Figure 08 : Surface de réponse avec rapport de charge et l'épaisseur variable

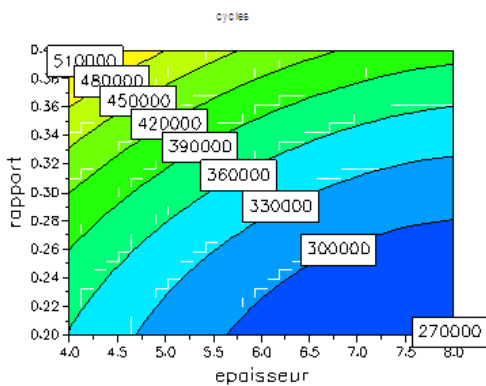


Figure 09: Contour de retard rapport de charge et l'épaisseur variable.

Nous constatons que l'augmentation du rapport de charge augmente le nombre de cycles de retard et que par contre l'augmentation de l'épaisseur diminue le retard.

### C. Interaction entre l'épaisseur et taux de surcharge

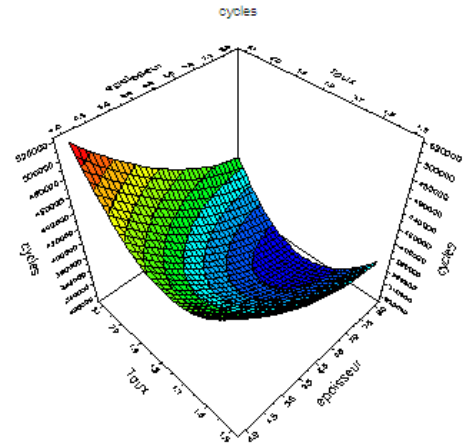


Figure 10 : Surface de réponse avec taux de surcharge et l'épaisseur variable

La surface de réponse est obtenue en gardant comme valeur constante arbitrairement choisie le rapport de charge et en variant cette fois-ci l'épaisseur et le taux de surcharge.

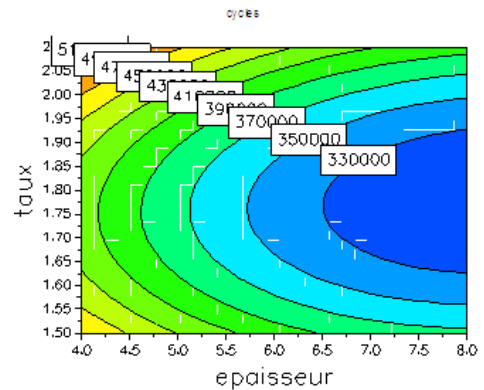


Figure 11: Contour de retard avec taux de surcharge et l'épaisseur variable

L'analyse de ces courbes montre que lorsque le taux de surcharge augmente le retard augmente et par contre l'augmentation de l'épaisseur diminue le retard.

Dans cette dernière étape d'analyse, nous élargissons nos commentaires en prenant en compte cette fois-ci une interaction entre 3 facteurs en gardant le quatrième constant. Il s'agit donc de faire varier le taux de surcharge, l'épaisseur et la limite élastique en gardant le rapport de charge constant.

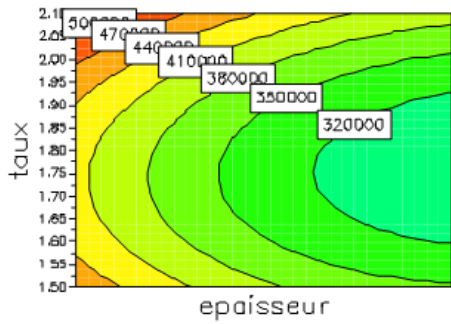


Figure 11 : contour des réponses avec taux de surcharge et l'épaisseur variable pour  $\sigma_e = 137$  MPa

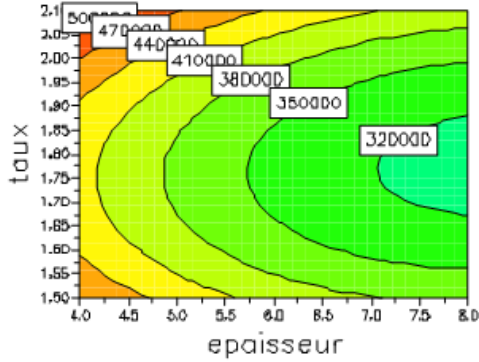


Figure 12 : contour des réponses avec taux de surcharge et l'épaisseur variable pour  $\sigma_e = 248$  MPa

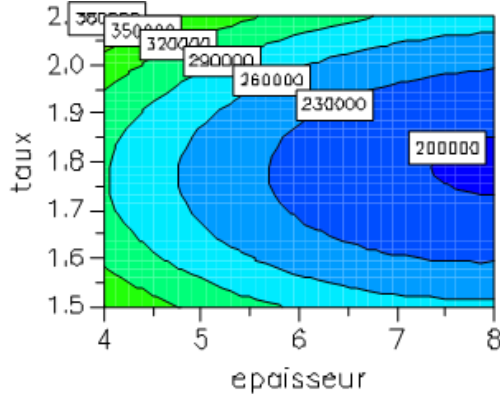


Figure 13 : contour des réponses avec taux de surcharge et l'épaisseur variable pour  $\sigma_e = 359$  MPa

Sur ces figures nous constatons que le nombre de cycles affecté par le retard diminue quand la limite élastique du matériau augmente.

De nombreux auteurs [9, 10, 11, 12, 13] ont montré et il est admis que les tailles des zones plastifiées sont inversement proportionnelles au carré de la limite d'élasticité.

Nous pouvons dire que plus la limite d'élasticité est faible, plus les zones plastifiées sont étendues et on a un nombre de cycles de retard important.

## VI. EFFETS DES FACTEURS SUR LE RETARD

Il est important d'étudier l'effet des différents facteurs sur le retard. Il faut d'abord savoir quels facteurs ont les plus grandes influences et ensuite comment les grandeurs réagissent avec ces facteurs. On présente les effets des facteurs à l'aide d'un diagramme à barres. Ce diagramme donne les effets en ordre décroissant de leur importance en valeur absolue.

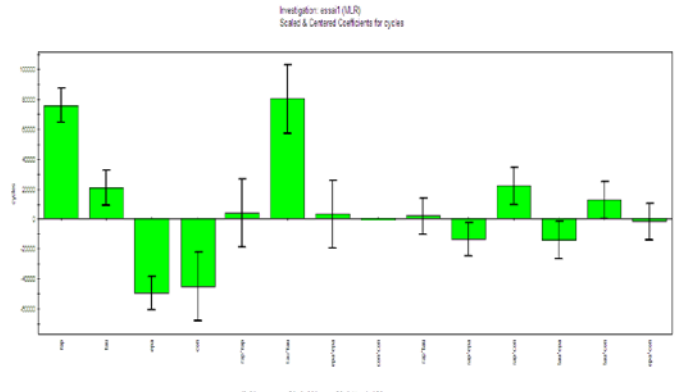


Figure 14 : Effets des différents facteurs

La figure 14 montre que les facteurs dominants sur le retard sont :

- 1- le 'rap' (rapport de charge) au premier degré,
- 2- le 'tau' (taux de surcharge) au deuxième degré,
- 3- l' 'epa' (épaisseur) au premier degré,

## VII. VERIFICATION DU POINT OPTIMALE

Iteration: 1231		Iteration slider: _____				
	1	2	3	4	5	
	rapport	taux	epaisseur	contrainte	cycles	
1	0,4	1,5	4	182,969	495200	
2	0,4	1,5	4,0846	160,799	561422	
3	0,3991	2,0989	4,0036	151,187	657847	
4	0,4	2,1	4,0391	150,01	657402	
5	0,4	2,1	4,0016	148,284	659805	
6	0,4	2,1	4	149	659805	
7	0,4	1,5008	4	320,427	564480	
8	0,3997	2,1	4,0001	350,429	659620	

Figure 15: Intervalle de variation de chaque facteur pour des valeurs rapport, taux, épaisseur et contrainte élaboré par le « Modde 5.0 »

D'après l'analyse effectuée par le logiciel « modde5.0 », on trouve que la vérification de point optimale est simple, selon la figure 15 ; les valeurs données par le programme, on remarque que la maximisation de retard peut réaliser par l'expérience qui comprend les valeurs de rapport de charge égale à 0.4, du taux de surcharge qui est égale à 2.1, de l'épaisseur qui est égale à 4 mm et de la limite élastique qui est égale à 148.284 MPa.

Le procédé consiste à maximiser le rapport de charge et du taux de surcharge et à minimiser la limite élastique et l'épaisseur de l'éprouvette.

#### CONCLUSION

Ce travail est porté sur les effets de l'application d'un pic de surcharge sur la propagation d'une fissure de fatigue sous chargement à amplitude constante. Cette étude a été axée principalement sur l'influence de quatre facteurs qui sont, le rapport de charge, le taux de surcharge, l'épaisseur et la limite élastique. Il s'agit donc de comprendre et d'expliquer comment agissent sur eux et quelle est la prépondérance de chacun d'eux vis-à-vis de l'autre.

Pour étudier l'influence de ces facteurs sur le nombre de cycle de retard on fait appel à la méthodologie des plans d'expérience qui permet d'atteindre une meilleure connaissance des phénomènes observés par un minimum d'essais. L'avantage essentiel de cette méthode, c'est l'interprétation rapide et sans équivoque des résultats des essais.

Cette étude nous a montré que les paramètres les plus influents sont dans l'ordre : rapport de charge, taux de surcharge, l'épaisseur de l'éprouvette et la limite élastique.

#### 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] 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.
- [3] J. Schijve,Eng. Fract. Mech. 11 P. 171, 1979.
- [4] 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 1999 à USTL, Lille
- [5] C.Y. Huo, H.L. Gao,"Strain-induced martensitic transformation in fatigue crack tip zone for a high strength steel" - Materials Characterization 55, pp. 12- 18, 2005.
- [6] X. Huang, T. Moan,"Improved modeling of the effect of R-ratio on crack growth rate" - International Journal of Fatigue 2006.
- [7] F.S. Silva "The importance of compressive stresses on fatigue crack propagation rate", International Journal of Fatigue 27, pp. 1441-1452, 2005
- [8] M. Skorupa, A. Skorupa,"Experimental results and predictions on fatigue crack growth in structural steel" - International Journal of Fatigue 27, pp. 1016-1028, 2005.
- [9] Taheri, D. Trask, N. Pegg,"Experimental and analytical investigation of fatigue characteristics of 350WT steel under constant and variable amplitude loadings" - Marine Structures 16; pp 69-91, 2003.
- [10] M. Feng, F. Ding, Y. Jiang,"A study of crack growth retardation due to artificially induced crack surface contact" - International Journal of Fatigue 27, pp. 1319-1327, 2005.
- [11] Alizadeh, D.A. Hills, P.F.P. de Matos, D. Nowell, M.J. Pavier, R.J. Paynter, D.J. Smith, S. Simandjuntak,
- [12] A.J. McEvily, S. Ishihara, Y. Mutoh,"On the number of overload-induced delay cycles as a function of thickness" - International Journal of Fatigue 26, pp. 1311-1319, 2004.
- [13] Viggo Tvergaard,"Effect of underloads or overloads in fatigue crack growth by cracktip blunting" - Engineering Fracture Mechanics 73, pp.869-879, 2006.