



HAL
open science

Propagation d'une fissure par fatigue dans un fil de câble d'haubanage

Virginie Perier, Lamine Dieng, Laurent Gaillet, Siegfried Fouvry

► **To cite this version:**

Virginie Perier, Lamine Dieng, Laurent Gaillet, Siegfried Fouvry. Propagation d'une fissure par fatigue dans un fil de câble d'haubanage. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. hal-03391255

HAL Id: hal-03391255

<https://hal.science/hal-03391255>

Submitted on 21 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Propagation d'une fissure par fatigue dans un fil de câble de haubannage

V. PERIER^a, L. DIENG^a, L. GAILLET^a, S. FOUVRY^b

a. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), route de Bouaye, 44341 BOUGUENNAIS
b. Ecole Centrale de Lyon (ECL), 36 avenue Guy de Collongue, 69131 ECULLY

Résumé :

Les câbles du Génie Civil sont soumis à des sollicitations qui conduisent à deux principales causes de dégradation : la fatigue et la corrosion. On s'intéresse ici à la propagation d'une fissure dans un fil d'acier entaillé soumis à la fatigue. Cette étude est composée d'une partie expérimentale et d'une partie numérique. La propagation de fissure obtenue expérimentalement a été comparée à la loi de Paris. Les contraintes en fond de fissure ont été obtenues par la méthode des éléments finis.

Abstract :

Civil engineering cables are subject to stresses that may lead to two main causes of damage: fatigue and corrosion. In this paper, the propagation of a crack in a notched drawn steel wire submitted to fatigue is investigated. This study is composed with an experimental part and a numerical one. The propagation of a crack is compared to the Paris' law. The stresses on the crack tip are obtained with the finite element method.

Mots clefs : acier tréfilé, entaille, fatigue, propagation de fissure

1 Introduction

De nombreux ouvrages d'art comme les ponts précontraints, les ponts suspendus ou les ponts à haubans comportent des câbles constitués de fils d'acier tréfilés à haute résistance. Ils subissent diverses sollicitations d'ordre mécanique et chimique et ont deux principales causes de dégradations : la corrosion et la fatigue [2]. Ces dégradations peuvent se manifester en surface par l'apparition de piqûres, crevasses, fissures, etc. Les cycles engendrés par les conditions climatiques et les charges routières peuvent donc endommager voire entraîner la ruine de la structure.

L'objectif de ce travail est d'étudier la propagation d'une fissure au sein d'un fil d'acier. Il s'agit d'une part d'initier des fissures les plus représentatives et reproductibles possibles sur fil d'acier non corrodé et d'autre part d'étudier la propagation sous l'effet de la fatigue.

L'étude de la propagation d'une fissure nécessite tout d'abord d'amorcer cette fissure. Afin de localiser l'amorçage, il a été choisi de réaliser des défauts de surface de type entaille dans les éprouvettes.

2 Etude expérimentale

L'étude expérimentale a été réalisée sur des fils d'acier cylindriques de diamètre 5,4 mm. Les principaux éléments chimiques (% masse) et les propriétés mécaniques sont les suivants : C 0.8, Si 0.23, Mn 0.52, S 0.018, P 0.017 avec un module d'Young de 200 000 MPa, une limite élastique (offset 0.02 %) de 1750 MPa une contrainte à la rupture garantie de 1860 MPa, et une déformation à la rupture de 5.2 % [1]. L'objectif de cette étude est d'étudier l'amorçage et la propagation transversale (en mode I) d'une fissure par fatigue dans un fil de câble en acier entaillé et de déterminer si son comportement obéit aux lois d'évolution classique de la mécanique de la rupture.

Le fil étant inhomogène en section (lié à son processus de fabrication) et de faible diamètre, l'étude est réalisée directement à l'échelle du fil (et non sur des éprouvettes CT).

2.1 Protocole expérimental

Le protocole expérimental mis en place a consisté à déterminer une méthode de production d'entaille, une sollicitation adaptée et à suivre la propagation de la fissure au cours d'essais de fatigue.

Les entailles ont été produites par électro-érosion. Cette méthode permet de réaliser des entailles reproductibles et faciles à mettre en œuvre. Après des essais avec différentes dimensions d'entailles, nous avons retenu les dimensions suivantes (FIG. 1) : une ouverture de 320 μm et une profondeur d'environ 360 μm ($\pm 20 \mu\text{m}$ dus à une légère dispersion).

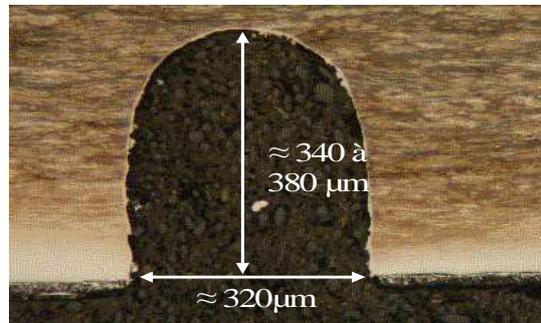


FIG. 1 – Entaille par électro-érosion

Le fil entaillé est soumis à un chargement en traction ondulée avec une contrainte moyenne de 700 MPa et une variation de contrainte crête-à-crête de 200 MPa, ce qui correspond au domaine de fonctionnement réel des ouvrages.

Des essais de fatigue ont alors été réalisés sur des fils entaillés. Afin de suivre la propagation de la fissure, un marquage mécanique a été réalisé en cours d'essai, ce marquage a été effectué grâce à une modification de la fréquence (de 7,5 Hz à 15 Hz) et à une augmentation des contraintes (contrainte moyenne : 900 MPa, variation de contrainte : 400 MPa) après un certain nombre de cycles.

2.2 Résultats

28 essais de fatigue sur fil entaillé ont été réalisés (FIG. 2). Sur le graphique de la figure 2, on constate une certaine dispersion des résultats, cette dispersion est inhérente au phénomène de fatigue ainsi qu'à l'hétérogénéité du matériau.

Il est intéressant de comparer les résultats obtenus avec les lois de propagation de la mécanique linéaire élastique de la rupture même si a priori ses hypothèses d'application ne sont pas respectées.

La loi de Paris (1) [3][4] a été utilisée pour lisser les points expérimentaux.

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m \quad (1)$$

Où a est la longueur de la fissure, N le nombre de cycles, C et m des constantes qui dépendent du matériau et ΔK l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte.

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = \beta \sqrt{\pi \cdot a} \cdot \Delta \sigma = 200 \cdot \beta \sqrt{\pi \cdot a} \quad (\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}) \quad (2)$$

Où β est un facteur correcteur sans dimension qui dépend des caractéristiques du problème, $\Delta \sigma$ la variation de contrainte appliquée. On pose $C' = C \cdot \beta$ et on intègre la loi de Paris en prenant comme borne inférieure 360 microns (ainsi on considère que l'entaille est un début de fissuration). Les deux résultats peuvent alors être comparés.

Deux couples de valeurs théoriques pour C' et m semblent coïncider avec les résultats expérimentaux sous l'hypothèse de prendre β constant et de considérer l'entaille comme une fissure (FIG. 2).

$C' = 1,1 \cdot 10^{-11}$	$C' = 1,5 \cdot 10^{-11}$
$m = 2,6$	$m = 2,45$

Au vu des résultats expérimentaux, on peut dire que dans les conditions d'essais retenues, les fils d'acier tréfilé obéissent à la loi de Paris.

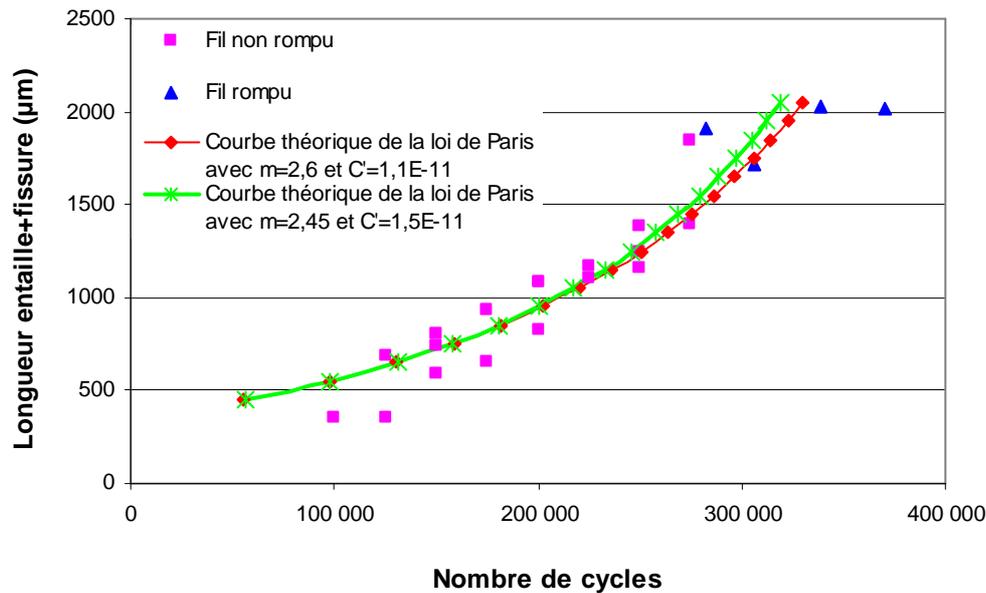


FIG. 2 – Comparaison résultats théorique et expérimental

Néanmoins, cette étude expérimentale ne permet pas de connaître les contraintes en fond d'entaille, c'est pourquoi une étude numérique a été menée parallèlement aux essais expérimentaux.

3 Étude numérique

La partie numérique est scindée en deux grandes étapes :

- Tout d'abord la réalisation du modèle qui s'effectue à l'aide du logiciel industriel de modélisation par éléments finis MSC.Marc.Mentat 2005 [10],
- Ensuite l'exploitation des modèles et des résultats obtenus en réalisant des études de fatigue à l'aide du logiciel MSC.Fatigue 2005 [11].

Deux paramètres sont généralement utilisés en mécanique linéaire de la rupture pour décrire le comportement en fond de fissure, ces paramètres sont : $K_{i(i=I, II, III)}$ facteur d'intensité de contrainte des modes I, II et III et G énergie dissipée en fond de fissure due à l'augmentation de la surface de fissure. Pour le mode I, K et G sont reliés aux propriétés du matériau (E , ν) et à l'état de contraintes :

$$\frac{G}{1-\alpha\nu^2} = \frac{K^2}{E} \quad (3)$$

avec $\alpha = 0$ en contrainte plane et $\alpha = 1$ en déformation plane.

La propagation de la fissure est généralement évaluée en utilisant un de ces deux paramètres K ou G . Pour la propagation de fissure de fatigue, la loi la plus simple utilisée est celle de Paris :

$$\frac{da}{dn} = f(\Delta K) \text{ ou } \frac{da}{dn} = f(\Delta G) \quad (4)$$

Le logiciel MSC.Fatigue utilise la relation $\frac{da}{dn} = f(\Delta G)$ fonction du taux d'énergie dissipée pour l'amorçage et la propagation de fissure. L'énergie dissipée est facilement calculable en utilisant la méthode des éléments finis. La direction de la propagation de fissure est donnée par le maximum du taux d'énergie dissipée.

L'équation de Paris en termes de ΔK pour le mode I est ainsi reformulée en terme de ΔG . La direction de la

propagation de fissure est généralement donnée par la direction du taux d'énergie dissipée.

L'approche utilisant l'énergie dissipée a l'avantage de tenir compte automatiquement d'effets comme l'anisotropie, la plasticité, le fluage et autres non-linéarités matérielles. Pour prendre en compte ces effets, on évalue l'intégrale J par la méthode de Lorenzi. Utilisant la distribution du taux d'énergie dissipée, la direction et l'amplitude de la propagation de fissure est évaluée utilisant le schéma d'intégration de Lorenzi et la loi de propagation de type Paris. Cette intégration est contrôlée par les pas Δt et Δn entre deux incréments de temps.

Suite à une étude du maillage, un modèle 2D comportant des éléments triangulaires avec 57 noeuds en fond d'entaille a été retenu (FIG. 3).

Un des cotés de la plaque est encasturé en bloquant les déplacements en X et en Y de chaque nœud et l'autre coté est soumis à une pression de 700 MPa sur ces éléments. Ces conditions limites permettent de minimiser les perturbations de contrainte qui sont introduites. Le chargement de 700 MPa correspondant à la contrainte moyenne des expériences est appliqué par la méthode d'une rampe.

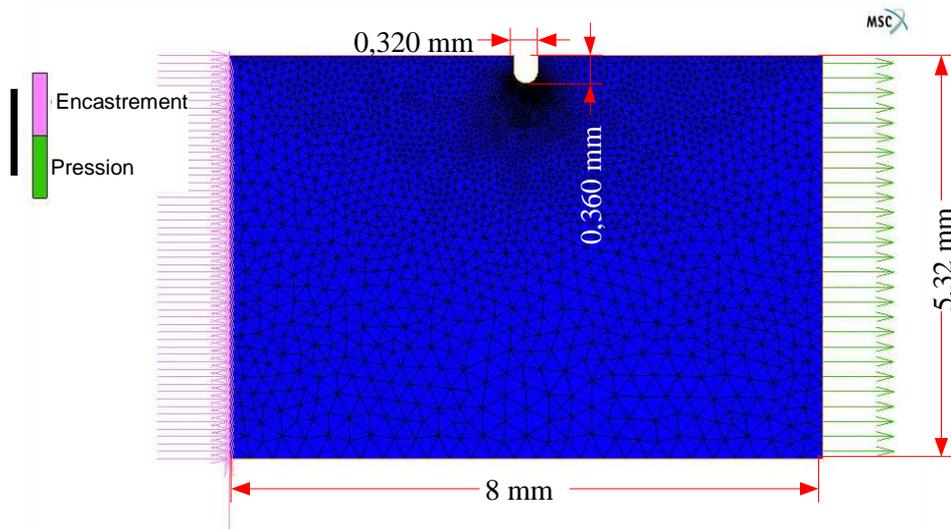


FIG. 3 – Géométrie, maillage et conditions aux limites du modèle 2D

Un modèle 3D a également été réalisé (FIG. 4).

Les caractéristiques du modèle sont les suivantes :

- longueur du cylindre : 8 mm
- rayon du cylindre : 2,6 mm
- profondeur de l'entaille : 0,36 mm
- distance entre les lèvres : 0,32 mm

Les contraintes de Von Mises et de traction des deux modèles sont reportées sur la figure 5. On voit que les 2 modèles donnent des niveaux de contraintes comparables en fond d'entaille.

Les résultats de contraintes et déformations ont ensuite été importés dans le logiciel de fatigue afin d'étudier la durée de vie du fil entaillé. Cette durée de vie se décompose en deux étapes : l'amorçage d'une fissure puis sa propagation jusqu'à rupture.

Ces études nécessitent l'introduction de différents paramètres qui ne sont pas tous connus pour l'acier tréfilé, ils ont donc été interpolés par comparaison avec d'autres aciers à haute résistance et avec les résultats expérimentaux.

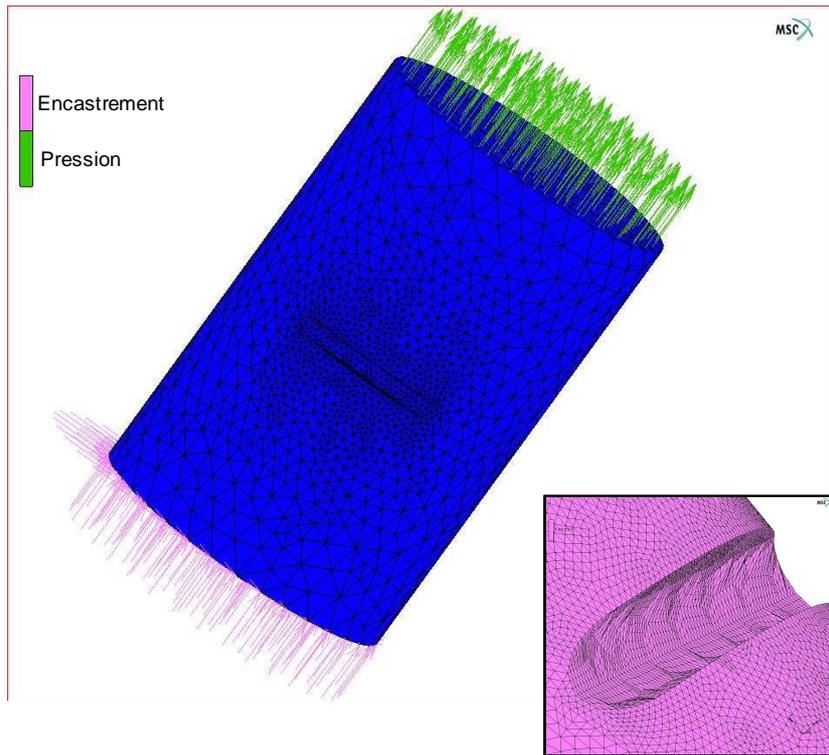


FIG. 4 – Géométrie, maillage et conditions aux limites du modèle 3D

En ce qui concerne l'amorçage, des tests arrêtés permettent d'estimer le nombre cycles réalisés avant fissuration : ce nombre est compris entre 90 000 et 130 000 cycles. Ces tests consistent à réaliser des essais cycliques sur fils entaillés, et de les arrêter après un certain nombre de cycles. Un essai de traction à rupture est ensuite réalisé sur ces mêmes fils. L'observation métallographique des faciès de rupture permet de voir si des fissures se sont amorcées. Un recalage des paramètres du modèle a donc été réalisé afin d'obtenir un nombre de cycles de 119 000 cycles aussi bien en 2D qu'en 3D.

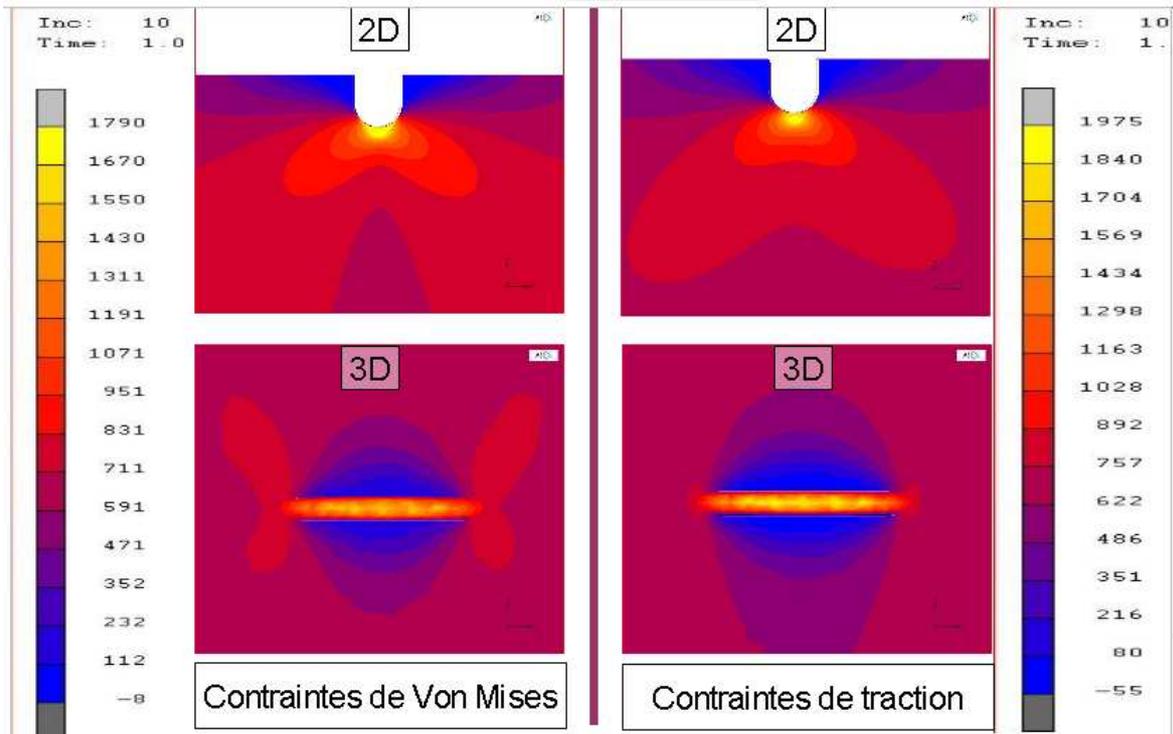


FIG. 5 – Résultats des modèles 2D et 3D

Au niveau de la propagation, l'étude se base sur une loi de Paris « améliorée » (5), elle nécessite donc la connaissance des coefficients C et m de cette loi.

$$\frac{da}{dn} = C \cdot (\Delta K_{eff})^m \quad (5)$$

La loi de Paris est modifiée par l'introduction d'une variation du facteur d'intensité de contrainte effective qui prend en compte les effets de fermeture de la fissure, l'histoire du chargement, les effets d'entaille, les influences environnementales et la contribution du mode statique de rupture [12]. Les essais expérimentaux donnent des durées de propagation de fissure comprises entre 200 000 et 300 000 cycles. Suite à de nombreux tests, un couple de valeurs semble donner des résultats cohérents :

$$C \approx 1,9 \cdot 10^{-11}$$

$$m \approx 2,75$$

En effet, avec ce couple de valeurs et une ténacité $K_{Ic} = 80 \text{ MPa}\sqrt{m}$, on obtient un nombre de cycles de propagation de fissure d'environ 230 000 pour une longueur finale de fissure d'environ 2 mm.

4 Conclusion

Les fils d'acier tréfilé constitutifs des câbles de haubans sont soumis à deux principales causes de dégradations : la fatigue et la corrosion. Cette étude a consisté à étudier la propagation d'une fissure dans un fil d'acier tréfilé présentant un défaut de surface, ici une entaille réalisée par électro-érosion.

L'étude expérimentale a montré qu'une fissure s'amorce en fond d'entaille après un nombre de cycles compris entre 90 000 et 130 000. La phase de propagation, quant à elle dure entre 200 000 et 300 000 cycles. Les résultats obtenus ont été comparés à la loi de Paris, pour laquelle deux couples de paramètres ont été calés. Un modèle numérique a permis d'obtenir les contraintes en fond d'entaille. Ces résultats, importés dans un logiciel de fatigue, ont permis de caler des paramètres afin de retrouver numériquement les résultats expérimentaux.

Afin de valider la détermination des différents paramètres et l'application de la loi de Paris pour ce matériau, il faudra reproduire cette étude pour différents niveaux de contraintes.

Références

- [1] Brevet P. Olivie F. Guilbaud J-P. et Raharinaivo A., Microstructure et propriétés mécaniques des aciers pour câbles - Synthèse des travaux du LCPC de 1970 à 2000 Plasticité et endommagement, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°249, 2004
- [2] Brevet P. Olivie F. Siegert D. et Raharinaivo A., Microstructure et propriétés mécaniques des aciers pour câbles - Synthèse des travaux du LCPC de 1970 à 2000. Ténacité, fissuration sous contrainte et fatigue, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°250, 2004
- [3] Bathias C., Bailon J-P., La fatigue des matériaux et des structures, Editions Hermes, 1997.
- [4] Raharinaivo A. et Krasucki F., Mécanisme et mécanique de la rupture, Université de Paris-Sud Orsay, 1986
- [5] K. Becker, La résistance à la fatigue des câbles d'acier, Le tréfilé 29-5 (1979) 212-215
- [6] Lemaître J. et Chaboche J-L., Mécanique des matériaux solides, Dunod 2001
- [7] C.R. Chaplin, Failure mechanisms in wire ropes, Engineering Failure Analysis, Vol. 2, (1995) 45-57
- [8] AFNOR, NF EN ISO 12737 détermination du facteur d'intensité de contrainte critique, AFNOR février 2006
- [9] Francois D., Essais de rupture, Techniques de l'Ingénieur, M126, 1997
- [10] MSC.Software, MSC.Marc Mentat 2005 r3 - Release guide, MSC Software corporation 2006
- [11] MSC.Software, MSC.Fatigue Standalone 2005 r2 – Quick start guide, MSC Software corporation 2006
- [12] MSC.Software, MSC.Fatigue User's Guide, MSC Software corporation 2006