



HAL
open science

Comparaison de modélisations numériques appliquées à une expérience de fatigue sous choc thermique

Sébastien Amiable, Andrei Constantinescu, Stéphane Chapuliot, Antoine
Fissolo

► **To cite this version:**

Sébastien Amiable, Andrei Constantinescu, Stéphane Chapuliot, Antoine Fissolo. Comparaison de modélisations numériques appliquées à une expérience de fatigue sous choc thermique. 7e colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2005, Giens, France. hal-01814815

HAL Id: hal-01814815

<https://hal.science/hal-01814815>

Submitted on 13 Jun 2018

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.

Public Domain

Comparaison de modélisations numériques appliquées à une expérience de fatigue sous choc thermique

Sébastien Amiable*, Andrei Constantinescu*, Stéphane Chapuliot**
& Antoine Fissolo**

* Laboratoire de Mécanique des Solides - CNRS UMR 7649,
Ecole Polytechnique, 91128 Palaiseau cedex, France
constant@lms.polytechnique.fr

** DM2S/SEMT, CEA Saclay, 91191 Gif sur Yvette cedex, France

RÉSUMÉ. Ce travail présente une comparaison de plusieurs modèles numériques pour déterminer le cycle mécanique de l'expérience de fatigue thermique SPLASH. On s'intéresse en particulier à la précision des différents modèles lorsqu'on les utilise pour une analyse de fatigue. Les techniques numériques étudiées sont : (i) la résolution du problème élasto-plastique non-linéaire complet par calculs Eléments Finis, (ii) des solutions élastiques approchées couplées à une règle de Neuber modifiée (iii) la méthode de calcul simplifié des structures de Zarka et al. Les critères de fatigue utilisés sont : (1) le critère de Manson, (2) un critère sur l'énergie dissipée par cycle, (3) un critère sur l'énergie dissipée modifiée par la pression hydrostatique. Ce dernier est le plus pertinent du point de vue de la fatigue au regard des résultats obtenus sur une série d'essais multiaxiaux et uniaxiaux. L'analyse présentée ici montre que ce critère est conservatif et ne propage pas les erreurs dues à la technique de calcul du cycle stabilisé utilisé.

ABSTRACT. This paper is dedicated to the comparison of several numerical models for estimating the mechanical state in a thermal fatigue experiment known as the SPLASH test, in terms of their prediction capacity with respect to several fatigue criteria. The numerical methods are either completely nonlinear or combine approximate elastic solutions obtained from minimizing a potential energy or closed form solutions with a Neuber or Zarka technique to estimate directly the elastoplastic state. The fatigue criteria used are Manson, dissipated energy and dissipated energy combined with a hydrostatic pressure term. The latter had provided a best prediction over a series of anisothermal and isothermal LCF experiments in a classical fatigue analysis. The analysis shows that for this criteria we obtain a systematic and conservative error.

MOTS-CLÉS : Fatigue sous choc thermique, cycle stabilisé, méthodes numériques

KEYWORDS: Thermal shock fatigue, stabilized cycle, numerical methods

1. Introduction

On compare dans ce travail plusieurs méthodes d'estimation du cycle stabilisé d'une structure avec pour objectif une application sur une analyse de fatigue. Les motivations de ce travail proviennent de questions récurrentes dans l'industrie au sujet de la complexité des modèles, leur robustesse, leur précision et leur coût. Faut-il privilégier un modèle robuste et coûteux pour le calcul mécanique si on utilise ensuite un modèle de fatigue simple ou à l'inverse, un modèle de fatigue complexe est-il pertinent lorsqu'il est couplé à une analyse mécanique simplifiée ?

Le support de cette étude est l'essai de fatigue sous choc thermique SPLASH du CEA. Nous présentons d'abord différentes techniques de calcul du cycle stabilisé puis nous conduisons une analyse de fatigue avec différents critères pour la prédiction de durée de vie de l'éprouvette.

2. Techniques de calcul du cycle stabilisé de l'expérience SPLASH

Le dispositif de l'expérience SPLASH est décrit dans [MAR 81, MAI 03] et les principaux résultats expérimentaux sont rapportés dans [MAI 03]. Nous rappelons simplement ici que le dispositif SPLASH permet de produire d'important gradients de températures en temps ($\approx 600^\circ C/s$) et en espace ($\approx 100^\circ C/mm$). La zone sollicitée se limite à quelques millimètre carrés en surface et environ deux millimètres en profondeur. On obtient ainsi localement une petite zone plastique qui engendre l'amorçage et la propagation d'un réseau de fissures de type "faïençage".

La complexité du problème thermo-mécanique de l'expérience SPLASH nous a conduit à introduire plusieurs hypothèses classiques [CON 04] de découplage pour notre analyse : (i) l'analyse thermique est indépendante du comportement mécanique ; (ii) l'analyse mécanique est découplée de l'évolution de l'endommagement ; (iii) l'analyse de fatigue est considérée comme un post-traitement basé sur le comportement cyclique stabilisé de la structure. L'objectif du calcul thermo-mécanique doit être l'obtention d'un cycle stabilisé pour le comportement mécanique de l'éprouvette SPLASH. On considère que le cycle stabilisé est atteint lorsqu'il y a stabilisation des grandeurs mécaniques cycliques telles que l'énergie dissipée par cycle.

Les calculs EF présentés dans la suite ont été effectués avec le logiciel Cast3M sur des PC Linux bi-processeurs 3GHz avec mémoire vive de 4Go. Tout les calculs ont été effectués avec le même maillage : 17000 noeuds et des éléments cubiques et prismatiques avec fonction d'interpolation linéaire. Une étude de sensibilité du maillage a montré qu'une taille de maille de $100 \mu m$ dans la zone la plus sollicitée était un bon compromis entre la précision du résultat et le temps de calcul.

Le problème thermique a été résolu par un modèle EF et on obtient d'excellents résultats confrontés à l'expérience grâce aux moyens de mesures suivants : des thermocouples placés en différents points de la structure (surface et profondeur) ; une caméra thermique enregistrant l'évolution de la tâche thermique en surface.

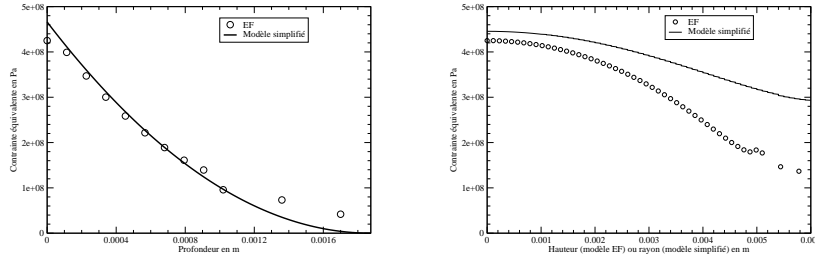


Figure 1. Evolution des contraintes équivalentes suivant la profondeur (à gauche) et la hauteur (à droite) de l'éprouvette

On calcule les grandeurs mécaniques du cycle stabilisé en utilisant 5 méthodes :

- **M1** modèle EF élastoplastique avec écrouissage non-linéaire
- **M2** modèle EF élastoplastique avec écrouissage linéaire
- **M3** mur semi-infini élastique couplé à la méthode du K_ν [MOU 85]
- **M4** minimisation élastique couplé à la méthode du K_ν [SAL 04]
- **M5** technique de calcul simplifié des structures de Zarka et al. [ZAR 90]

Pour **M1** et **M2**, on utilise un modèle EF sous l'hypothèse des petites perturbations avec une loi de comportement caractérisant le matériau dans le domaine de températures de l'essai ($\approx 100^\circ C - 350^\circ C$). Le comportement cyclique de l'acier 304L [MOT 01] est complexe : plusieurs phases de durcissement et d'adoucissement se succèdent avant la rupture finale. Nous avons fait le choix de négliger l'évolution cyclique du comportement après la première phase de durcissement. Nous n'introduisons donc pas d'écrouissage isotrope. Notons que cette approche, dans le cadre d'une analyse de fatigue, est cohérente avec les travaux de Skelton [SKE 91]. Les phénomènes de fluage n'intervenant pas dans la gamme de température de l'expérience nous utilisons une loi élasto-plastique sans terme visqueux :

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{A} : (\boldsymbol{\epsilon}^t - \boldsymbol{\epsilon}^p) \quad \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^p = \lambda \partial_{\boldsymbol{\sigma}} f \quad f = \sqrt{3J_2(\boldsymbol{\sigma} - \mathbf{X})} - \sigma_Y \quad \mathbf{X} = g(\boldsymbol{\epsilon}^p) \quad (1)$$

$$\mathbf{M1} : \dot{\mathbf{X}} = c(2/3 a \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^p - \mathbf{X} \dot{p}) \quad | \quad \mathbf{M2} : \mathbf{X} = H \boldsymbol{\epsilon}^p \quad (2)$$

\mathbf{X} est un écrouissage dont la loi d'évolution est *non-linéaire* (**M1**) ou *linéaire* (**M2**).

L'identification est réalisée sur des essais uniaxiaux de fatigue oligocyclique menés par le CEA [MOT 01]. Pour **M1**, on obtient un excellent accord essais-calculs. Pour **M2**, on obtient un bon accord dans le domaine 0.2 – 0.4% de déformations.

Ces deux méthodes sont complexes et coûteuses mais permettent de connaître précisément l'ensemble des champs mécaniques à tout instant du cycle stabilisé. Les résultats obtenus avec **M1** serviront donc de référence par la suite.

Dans **M3** l'éprouvette SPLASH est considérée comme un *mur semi-infini* soumis localement à une variation de température ΔT . Une analyse élastique du problème conduit rapidement aux résultats suivants :

$$\sigma_{eq} = E\alpha\Delta T/(1 - \nu) \quad \epsilon_{eq} = (2/3)(1 + \nu)/(1 - \nu)\alpha\Delta T \quad (3)$$

Ces résultats peuvent être couplés avec la *méthode du K_ν* [MOU 85] qui est dérivée des techniques de Neuber ; la déformation totale élasto-plastique est estimée à partir de la déformation élastique grâce à un paramètre K_ν . Appliquée à l'éprouvette SPLASH la méthode donne des déformations plastiques comparables aux résultats EF de référence mais surestime les déformations élastiques. La contrainte est aussi surestimée car elle résulte d'une simple analyse élastique. De plus, les hypothèses sous-jacentes à ce modèle, equibiaxialité des contraintes et contrainte constante dans l'épaisseur, semblent très éloignées du problème réel.

Dans **M4** nous réalisons une *minimisation de l'énergie élastique complémentaire* sur un domaine spatial réduit à un cylindre. Le champ de température est interpolé dans cet espace par un polynôme d'ordre 2 en r et z et on cherche un champ de contraintes de la même forme et statiquement admissible. Sur la Figure 1 on compare la contrainte ainsi obtenue avec la contrainte calculée par un modèle EF élastique : l'évolution suivant la profondeur est très bien représentée. En utilisant ensuite la *méthode du K_ν* , on obtient des déformations plastiques légèrement sous-estimées par rapport aux résultats EF de référence. Comme pour le modèle du mur semi-infini, les contraintes sont surestimées car elles proviennent d'une analyse purement élastique.

Dans **M5** nous utilisons le calcul EF pour calculer une solution purement élastique. On détermine ensuite les zones adaptées et les zones accommodées de la structure dans lesquelles on peut estimer un encadrement de l'amplitude des déformations plastiques ainsi que de l'amplitude des contraintes sur le cycle stabilisé. Cette méthode est basée sur la théorie de l'adaptation et le formalisme des matériaux standards généralisés. Deux hypothèses permettent l'utilisation de celle-ci : le trajet de chargement de l'éprouvette SPLASH est quasi-radial et on peut modéliser le comportement du matériau avec un écrouissage cinématique linéaire. Les champs mécaniques ainsi obtenus sont proches des résultats EF de référence, autant du point de vue des valeurs que de la répartition spatiale.

3. Application pour l'estimation des durées de vie

Dans cette partie on compare les différentes méthodes de calculs décrites ci-avant dans le cadre d'une analyse de fatigue. Nous ne discuterons pas ici de la pertinence des critères de fatigue utilisés. Rappelons simplement que le critère de Manson ($\Delta\epsilon^p$) est un critère uniaxial historique et encore largement utilisé dans l'industrie aéronautique. Le critère sur l'énergie dissipée par cycle ($W_p = \int \sigma : \epsilon^p dt \approx \Delta\epsilon^p \Delta\sigma$) est un critère multiaxial utilisé notamment dans l'industrie automobile. Le critère sur l'énergie dissipée modifiée par la pression hydrostatique ($W_p + \alpha P_{max}$) permet de prendre en compte l'influence du taux de triaxialité. Cette dernière approche a été appliquée

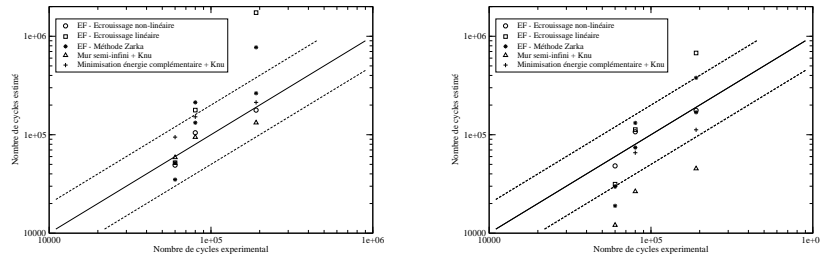


Figure 2. Comparaison des différentes méthodes de calcul en utilisant un critère de Manson (à gauche) et un critère sur l'énergie dissipée par cycle (à droite)

avec succès sur une série d'essais uniaxiaux et multiaxiaux ainsi que sur l'expérience SPLASH (cf. Figure 3 à gauche). Nous avons identifié les différents critères de fatigue sur la modélisation EF de référence. Ensuite nous avons appliqué chaque critère avec les résultats des différentes techniques de calcul du cycle stabilisé. Les durées de vie ainsi estimées sont présentées sur les Figures 2 et 3.

Avec le critère de Manson, les résultats sont tous compris dans l'intervalle $N_f \pm N_f/2$ sauf pour le modèle **M2** lors d'un essai à faible variation de température. Cette exception est directement liée à l'identification de l'écrouissage linéaire qui n'a pas été réalisée pour le domaine des déformations induites par un faible ΔT .

Le critère sur l'énergie dissipée conduit à une large dispersion des résultats et ne permet pas de conclure sur la propagation des erreurs induites par l'utilisation d'une méthode simplifiée. Ainsi pour la méthode **M4**, les déformations plastiques sont sous-estimées tandis que les contraintes sont surestimées. Avec le critère sur l'énergie dissipée les erreurs se compensent et la solution est proche du calcul EF de référence !

Le critère sur l'énergie dissipée modifiée par la pression hydrostatique conduit à une dispersion ordonnée des résultats. L'erreur est systématique et provient directement de la technique d'estimation du cycle stabilisé utilisée. Par ailleurs les durées de vie sont toutes sous-estimées donc le critère est conservatif.

4. Conclusion

Le travail rapporté ici permet d'une part la révision de plusieurs méthodes d'obtention des grandeurs mécaniques du cycle stabilisé pour une expérience de chocs thermiques répétés. Parmi celles-ci, seule le calcul EF complet permet d'obtenir tous les champs mécaniques à tout instant du cycle stabilisé. Néanmoins, nous avons montré que de simples calculs analytiques ou semi-analytiques permettent d'estimer certaines grandeurs mécaniques avec une précision raisonnable. D'autre part, nous avons utilisé

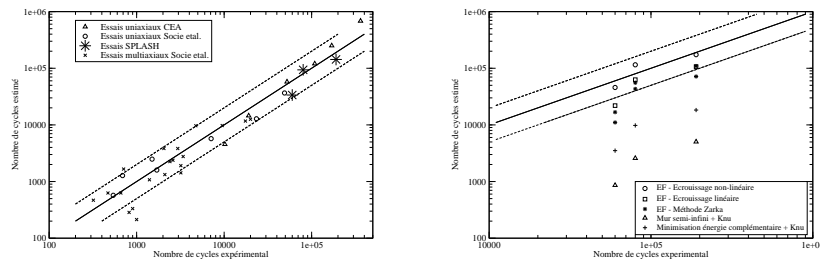


Figure 3. Critère sur l'énergie dissipée modifiée par la pression hydrostatique ; utilisation sur plusieurs expériences de fatigue uniaxiales et multiaxiale (à gauche) et comparaison des différentes méthodes de calcul (à droite)

les résultats des différentes méthodes testées sur plusieurs critères de fatigue pour une estimation de durée de vie. Nous montrons ici que le critère sur l'énergie dissipée modifiée par la contrainte hydrostatique peut être utilisé sur la base de résultats obtenus par une technique simplifiée. C'est un critère conservatif et il ne propage pas l'erreur due à la méthode de calcul du cycle stabilisé.

5. Bibliographie

- [CON 04] CONSTANTINESCU A., CHARKALUK E., LEDERER G., VERGER L., « A global computational fatigue design method for structures under thermomechanical loading : Application to cast iron exhaust manifolds », *International Journal of Fatigue*, vol. 26, 2004, p. 805-818.
- [MAI 03] MAILLOT V., « Amorçage et propagation de réseaux de fissures de fatigue thermique dans un acier inoxydable austénitique de type X2 CrNi18-09 (AISI 304L) », PhD thesis, Ecole Centrale de Lille, 2003.
- [MAR 81] MARSH D., « A thermal-shock fatigue study of type-304 and type-316 stainless-steels », *Fatigue of engineering materials and structures*, vol. 4, n° 2, 1981, p. 179-195.
- [MOT 01] MOTTOT M., « Etude du comportement en fatigue oligocyclique à 165 et 320°C du 304L (tole T112) pour de faibles niveaux de déformation ($\Delta\epsilon_t \leq 1\%$) », TN n° SRMA 2001-2403, Janvier 2001, CEA.
- [MOU 85] MOULIN D., ROCHE R., « Correction of the Poisson Effect in the Elastic Analysis of Low-cycle Fatigue », *International Journal of Pressure Vessel & Piping*, vol. 19, 1985, p. 213-233.
- [SAL 04] SALENÇON J., *Mécanique des milieux continus*, Ecole Polytechnique, 2004.
- [SKE 91] SKELTON R., « Energy criterion for high temperature low cycle fatigue failure », *Materials science and technology*, vol. 7, 1991, p. 427-439.
- [ZAR 90] ZARKA J., FRELAT J., INGLEBERT G., KASMAI-NAVIDI P., *A new approach in inelastic analysis of structures*, Ecole Polytechnique, 1990.