HAL open science

Caractérisation de zones critiques pour le dimensionnement en fatigue d'une pièce mécanique

Olivier Coudray, Christine Keribin, Patrick Pamphile, Miguel Dinis, Philippe Bristiel

To cite this version:

Olivier Coudray, Christine Keribin, Patrick Pamphile, Miguel Dinis, Philippe Bristiel. Caractérisation de zones critiques pour le dimensionnement en fatigue d'une pièce mécanique. SFdS2020 - 52èmes Journées de Statistiques de la Société Française de Statistique, May 2020, Nice, France. hal-03079350

HAL Id: hal-03079350

https://inria.hal.science/hal-03079350v1

Submitted on 17 Dec 2020

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.

Caractérisation de zones critiques pour le dimensionnement en fatigue d'une pièce mécanique

Olivier Coudray [1,2] & Philippe Bristiel [1] & Gilles Celeux[2] & Miguel Dinis [1] & Christine Keribin [2] & Patrick Pamphile [2]

olivier.coudray@math.u-psud.fr

[1] *Groupe PSA - Centre d'Expertise Métiers et Régions, 2 à 10 Boulevard de l'Europe, 78300, Poissy, France.*
[2] *Université Paris-Saclay, CNRS, Inria, Laboratoire de mathématiques d'Orsay, 91405, Orsay, France.*
Collaboration OpenLab IA entre le Groupe PSA et Inria.

Résumé. Pour dimensionner une pièce en fatigue, les ingénieurs ont besoin d'identifier des zones critiques. Ils ont alors recours à des calculs numériques à l'aide de modèles par éléments finis et utilisent des critères de fatigue déterministes. Cependant, les essais sur des prototypes ne valident pas toujours les résultats numériques. L'objectif de ce travail est alors d'améliorer l'identification des zones critiques à l'aide de méthodes statistiques.
Mots-clés. dimensionnement en fatigue, critère de Dang Van, analyse multivariée.

Abstract. To design a mechanical part, engineers need to identify critical areas. They resort to numerical calculations based on finite element models and use deterministic fatigue criteria. However, tests on prototypes do not always validate numerical results. The objective of this work is to improve the identication of critical areas using statistical methods.
Keywords. fatigue design, Dang Van criterion, multivariate analysis.

Introduction

Sur une pièce mécanique soumise à des efforts faibles ou modérés, on note parfois l'apparition de fissures après une durée importante d'utilisation. Ce phénomène, connu sous le nom de fatigue mécanique, est dangereux parce qu'il peut amener une pièce à rompre de manière soudaine dans des conditions d'utilisation normales, sans sollicitation excessive. Le bureau d'étude chargé du dimensionnement des pièces lors de leur conception doit alors garantir la sûreté de la pièce lors de l'utilisation, tout en minimisant son coût de production. Formellement, on évalue la durée de vie d'une pièce comme le nombre de cycles de chargement auxquels elle peut résister avant de rompre. La durée de vie se décompose en une phase d'amorçage de la fissure suivie d'un phase de propagation jusqu'à la rupture de la pièce. Dans l'industrie automobile on s'intéresse à la partie amorçage en considérant que la phase de propagation est négligeable.

Le phénomène de fatigue mécanique est bien connu aujourd'hui (cf [4]) et pris en compte dans le dimensionnement d'une pièce mécanique. La phase de conception d'une pièce démarre par une modélisation par éléments finis d'une géométrie correspondant au cahier des charges. Cette modélisation sert à identifier des zones critiques de la pièce, c'est-à-dire pour lesquelles le risque d'amorçage est élevé sur le long terme. Cette phase est suivie d'essais effectués sur plusieurs prototypes afin de valider la résistance à la fatigue de la pièce dans diverses conditions de sollicitations opérationnelles. Si, lors des essais, on observe des fissures, alors on procède à une modification de la pièce donnant lieu à un nouveau calcul. Ces aller-retours impactent les coûts de développement et retardent la date de production.

Aussi, il est intéressant de disposer d'outils permettant d'estimer la tenue en fatigue à partir de la modélisation numérique de la pièce. L'objectif est de réduire la phase de conception en facilitant l'identification des zones critiques à l'aide de méthodes statistiques. Idéalement, une seule phase d'essai devrait ensuite permettre de valider la pièce sans modification ultérieure.

Dans un premier temps, nous présenterons les données à disposition. Nous verrons ensuite un exemple de critère de fatigue, communément utilisé pour identifier les zones critiques d'une pièce mécanique et nous en analyserons les limites. Enfin, nous présenterons une analyse en composantes principales (ACP) des données afin de tirer partie de l'ensemble des variables disponibles pour améliorer le critère de fatigue.

1 Données

1.1 Données issues de calculs par éléments finis

Les pièces étudiées ici sont des composants du châssis (berceaux et traverses), pièces importantes pour la sûreté d'un véhicule. La modélisation par éléments finis permet la résolution numérique des équations mathématiques d'un problème physique, ici celui de la réponse d'une pièce mécanique soumise à des contraintes données. La pièce est maillée (figure 1) et les caractéristiques des matériaux des éléments sont définies. Les résultats de calculs comportent des informations physiques (contraintes, invariants de contrainte, gradients de contrainte) en chaque élément du modèle. Pour chaque observation (élément du modèle), on dispose de huit variables descriptives relatives au maillage et de cinquante variables physiques. Pour chaque pièce, on compte plusieurs centaines de milliers d'observations.

1.2 Données issues de bancs d'essais

Les prototypes testés en conditions opérationnelles sur des bancs d'essais apportent des informations supplémentaires. On dispose de comptes rendus sur lesquels ont été notées et photographiées les fissures apparues sur les prototypes testés (figure 2). On

connaît également le nombre de cycles et le chargement auxquels a été soumise la pièce avant l'amorçage de chaque fissure. Pour chaque campagne d'essai, entre trois et sept prototypes identiques sont testés.

Les données d'essais sont incorporées aux données de calculs sous la forme de deux variables par prototype testé : l'une booléenne codant la présence de l'amorçage d'une fissure sur l'élément, l'autre quantitative mesurant l'effort appliqué à la pièce au moment d'apparition de la fissure correspondante ou par défaut, l'effort appliqué à la pièce à la fin de l'essai.

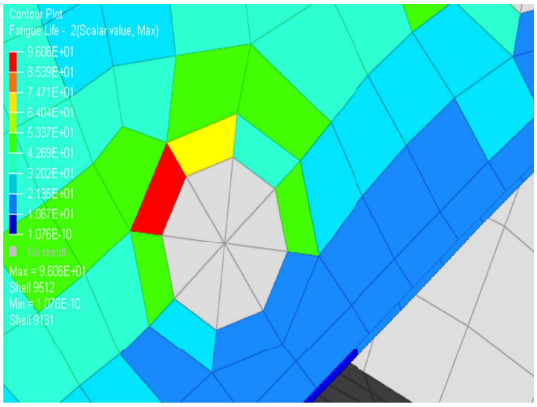

FIGURE 1 – Visualisation des résultats de calcul (taux de cisaillement critique) sur le modèle par éléments finis.

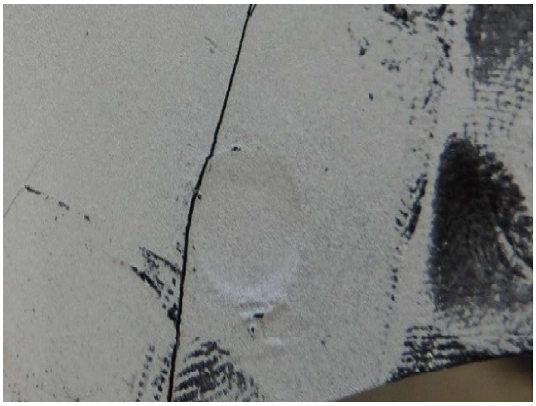

FIGURE 2 – Photographie d'une zone de la pièce (correspondant au modèle de la figure 1) après essai.

2 Le critère de fatigue de Dang Van

Classiquement, l'identification de zones critiques sur un modèle par éléments finis se fait à l'aide de calculs numériques et de l'utilisation de critères de fatigue. Un critère de fatigue est une évaluation, en chaque élément du modèle, du degré de criticité de cet élément à partir des contraintes calculées. Il est admis que l'amorçage de fissures de fatigue est principalement lié au cisaillement (contraintes tangentielles) et que les contraintes normales de traction accélèrent (extension) ou retardent (compression) leur apparition (cf [4], chap. 2). Le critère de Dang Van est utilisé comme critère de fatigue bien qu'il soit imparfait.

2.1 Définition

On note E l'ensemble des éléments du modèle et pour chaque élément e de E, on note respectivement Ph_e et τ_e la pression hydrostatique critique et le taux de cisaillement critique (invariants de contrainte calculés à partir du modèle par éléments finis). Le critère

de Dang Van est une frontière linéaire dans le plan formé par ces deux variables (cf [1]). Avec ce critère, un élément e de matériau m est critique s'il est situé au-dessus de la frontière, soit :

$$\tau_e + \alpha_m \cdot Ph_e > \tau_{0,m}$$

où $\alpha_m = 3 \cdot \left(\frac{t_m}{f_m} - \frac{1}{2}\right)$ et $\tau_{0,m} = t_m$.

Les constantes f_m et t_m représentent respectivement les limites de fatigue en flexion alternée et en torsion alternée. Elles dépendent du matériau m constituant l'élément et sont estimées à partir d'essais de fatigue uniaxiaux sur éprouvettes en flexion et torsion. On introduit alors le coefficient de danger $CD_e = \frac{\tau_e + \alpha Ph_e}{\tau_{0,m}} - 1$, degré de criticité de l'élément compte tenu de sa position à la frontière matériau.

2.2 Normalisation du critère

La frontière sur le plan de Dang Van dépend du matériau m. Or, une pièce peut compter plusieurs matériaux aux propriétés différentes. Aussi, pour pouvoir comparer ces points, nous proposons d'introduire une version normalisée du critère de Dang Van (cf [3]). Les grandeurs normalisées $Ph_e^{(n)}$ et $\tau_e^{(n)}$ sont définies de la façon suivante :

$$\left(Ph_e^{(n)},\ \tau_e^{(n)}\right) = \left(\alpha_m \frac{Ph_e}{\tau_{0,m}},\ \frac{\tau_e}{\tau_{0,m}}\right) .$$

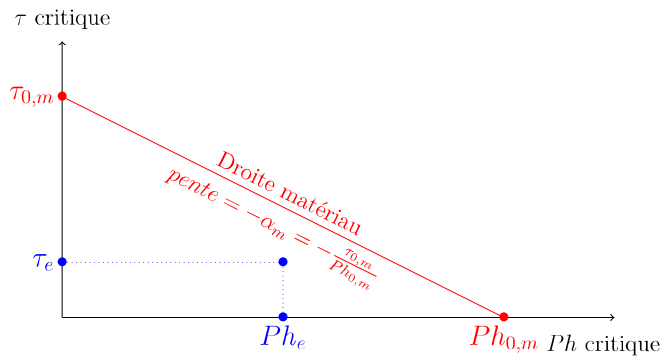

FIGURE 3 – Diagramme de Dang Van classique.

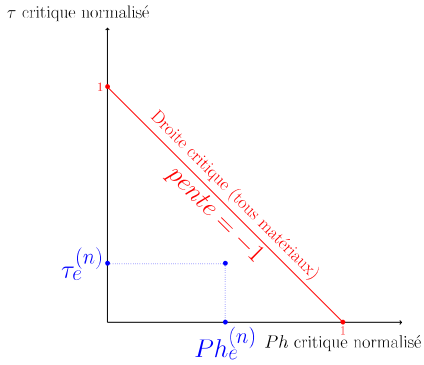

FIGURE 4 – Diagramme de Dang Van normalisé.

Dans ce nouveau plan, tous les matériaux partagent la même frontière (figures 3 et 4). On peut ainsi superposer les données de plusieurs pièces. De plus, le coefficient de danger se réécrit très simplement en fonction des grandeurs normalisées : $CD = \tau_e^{(n)} + Ph_e^{(n)} - 1$.

2.3 Limites du critère

On peut voir sur la figure 5 un premier exemple d'évaluation du critère de Dang Van sur un fichier (450000 observations).

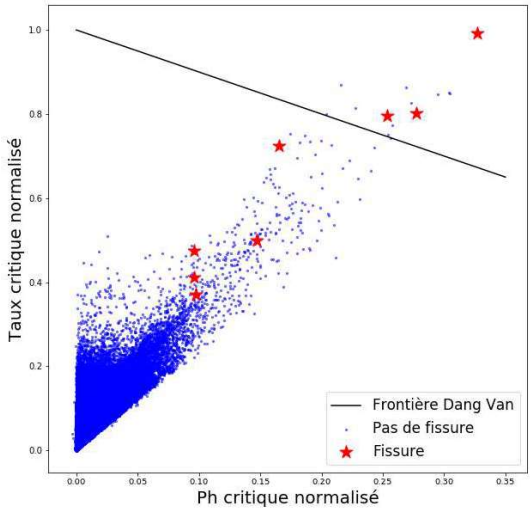

FIGURE 5 – Diagramme de Dang Van normalisé (points bleus issus des calculs numériques ; étoiles : éléments ayant fissurés lors des essais).

La figure 5 montre que des éléments sur lesquels une fissure a amorcé sont bien des points dans la partie supérieure droite du plan de Dang Van. Pourtant, certains de ces points se situent en-dessous de la droite critique. On voit donc clairement que le critère de Dang Van ne permet pas d'identifier tous les points d'amorçage de fissure. Cela peut s'expliquer par le caractère aléatoire de l'amorçage mais aussi par le fait que le critère ne tient pas compte des spécificités géométriques de certains points de la pièce qui peuvent pourtant favoriser grandement l'amorçage de fissure (extrémités de cordons de soudure, bords de tôle avec courbure importante...).

3 Étude multidimensionnelle des données de fatigue

Nous avons vu les limites de l'utilisation du critère de Dang Van. Celui-ci n'utilise que deux informations alors qu'on dispose de cinquante variables qui pourraient contribuer à définir un critère de fatigue plus efficace.

On effectue une analyse en composantes principales des données (ACP, cf [2] chap. 1) pour repérer d'éventuelles directions d'observation intéressantes et complémentaires à celles déjà considérées. Dès le premier plan principal, l'ACP permet non seulement de retrouver les informations du critère de Dang Van (corrélation avec les pression hydrostatique et taux de cisaillement critiques) mais aussi d'amener à une possible caractérisation des fissures (voir figure 6). En effet, le second axe apporte une information supplémentaire à la représentation de Dang Van puisqu'il permet d'identifier deux «types» de fissures : du point de vue des variables, c'est l'orientation des contraintes qui les différencie.

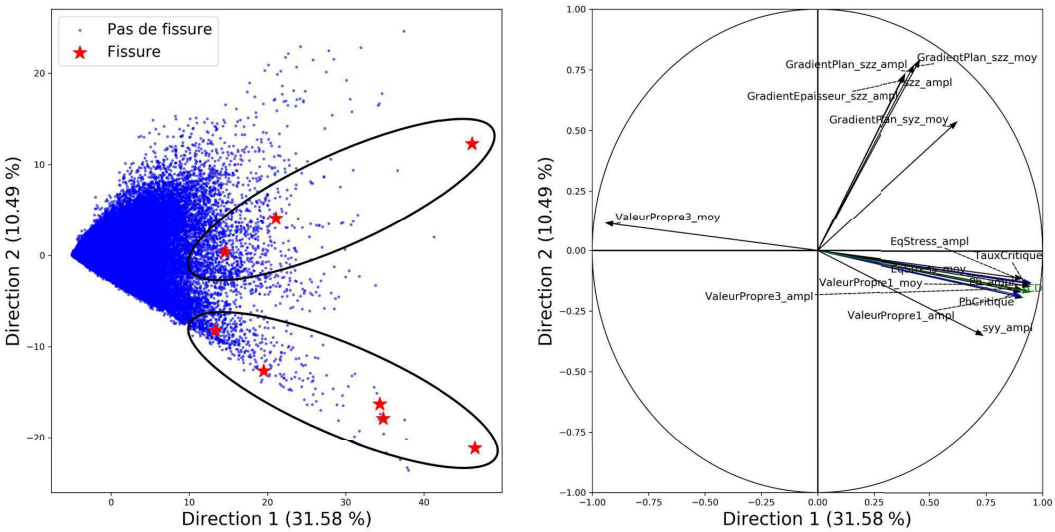

FIGURE 6 – Deux premières composantes principales (étoiles : points d'amorçage) et cercle des corrélations (représentation des 15 variables contribuant le plus) : identification de deux groupes de fissures.

Conclusion

Nous avons montré que l'analyse multivariée enrichit la caractérisation des zones critiques. En revanche, certains points restent relativement mal caractérisés, même en prenant en compte les différents axes de l'ACP. L'ajout d'un nouveau type de variable, prenant notamment en compte des informations sur la forme géométrique des zones considérées, est une piste intéressante. Dans une première approche, on envisage de définir des variables catégorielles indiquant la présence ou non de chaque type de singularité (cordon de soudure, bord de tôle) à proximité de l'élément. Cette étude va nous permettre de guider la construction d'un nouveau critère de fatigue probabilisé.

Références

[1] P. Ballard, K. Dang Van, A. Deperrois, and Y. V. Papadopoulos. High cycle fatigue and a finite element analysis. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 18(3) :397–411, Mar 1995.

[2] Brigitte Escofier and Jérôme Pagès. *Analyses factorielles simples et multiples.* May 2016.

[3] S. Fouvry, P. Kapsa, and L. Vincent. A Global Methodology to Quantify Fretting Damages. *ASTM International*, Jan 2003.

[4] J. Schijve. *Fatigue of Structures and Materials.* Springer Netherlands, 2009.