

OPTIMISATION DES ESSAIS D'ENDURANCE VIBRATOIRE A L'AIDE DES ESSAIS VIRTUELS

Utilizing virtual tests to optimize physical endurance shaker tests

Frédéric KIHM¹

1 HBM-Prenscia, St James Park, 3 chemin de la dime– 95700 Roissy-En-France, France, e-mail :

frederic.kihm@hbmncode.com

Mots clés : Fatigue, vibrations, éléments-finis, essais, virtuel.

Keywords : Fatigue, vibrations, FEA, test, virtuel.

Résumé

Les essais physiques sont et resteront nécessaires mais ils sont souvent difficiles de mise en œuvre, longs et coûteux. Ceci est particulièrement vrai pour les essais d'endurance. Les essais virtuels sont de plus en plus employés. Ils ne doivent cependant pas être considérés comme un remplacement mais bien comme un complément aux essais physiques. Cette présentation montrera les intérêts des essais virtuels pour investiguer par exemple le pourquoi d'une casse prématurée ou évaluer la fiabilité par analyse de sensibilité ou encore donner les marges de durée de vie en fin d'essais. Nous montrerons donc comment utiliser les essais virtuels pour enrichir l'exploitation des essais physiques, tout en rappelant l'importance de certaines hypothèses de calcul – qui nécessitent typiquement d'être validées par ... des essais physiques !

1 Introduction

Il existe un besoin croissant de créer des composants ou sous-systèmes de plus en plus sophistiqués, légers, endurants et fiables. Dans ce cadre, les essais vibratoires de qualification doivent être plus rapides et doivent permettre d'obtenir plus d'information sur la fiabilité du produit testé.

Au niveau de la conception d'un produit, la prédiction de sa durée de vie par simulation numérique (méthode des éléments-finis) prend une place majeure. La précision des résultats de fatigue issus d'une simulation numérique par éléments-finis peut être grandement améliorée à l'aide d'essais physiques. L'inverse est également vrai : les essais physiques peuvent être optimisés à l'aide de la simulation numérique.

Cette publication présente comment la simulation numérique peut aider à concevoir des essais plus efficaces.

2 Les essais physiques

L'objectif des essais de qualification est de valider que le produit est apte aux conditions d'utilisation en service. Il faut donc s'assurer que la spécification d'essais est réaliste et qu'elle est susceptible de répliquer les mêmes mécanismes de rupture. En pratique, les spécifications d'essais en vibrations sont souvent obtenues dans des standards industriels tels que MIL STD 810 [1], RTCA DO 160G [2], etc. ou synthétisées à partir de mesures vibratoires en conditions opérationnelles en utilisant une méthode de personnalisation des essais [3].

Il existe différents types de profils d'excitation. Les chargements longs et réputés aléatoires sont souvent représentés par des Densités Spectrales de Puissance (DSP). Les machines tournantes produisent souvent des environnements mécaniques de type sinus sur bruit. Il est également possible de générer des excitations aléatoires mais avec fort kurtosis afin de reproduire un environnement mécanique plus impulsif, ce qui permet d'être parfois plus proche des caractéristiques de certaines situations de la vie du produit. Enfin, les chargements déterministes sont représentés par des données temporelles.

Quel que soit le type d'environnement vibratoire, il est impératif de réduire la durée de l'essai au maximum. Cette accélération de l'essai se fait souvent par sévérisation des niveaux vibratoires. Il faut cependant prendre soin de ne pas altérer les mécanismes de rupture, ce qui pourrait rendre l'essai inutile car non-représentatif des conditions réelles d'utilisation.

3 Les essais virtuels

Les contraintes mécaniques et le niveau d'endommagement par fatigue cumulé par le produit au cours de l'essai peuvent être simulés par calcul numérique. L'endommagement par fatigue peut être calculé à partir de données spectrales (issues de réponses forcées en fréquence) ou temporelles (réponses forcées transitoires) [4, 5].

Dans le cas spectral, les cycles de contrainte sont obtenus de manière statistique à partir de la DSP de réponse en contrainte. De nombreuses expressions donnent la densité de probabilité (DP) des valeurs de pics de contraintes à partir de la DSP. Par exemple, Rice [8] proposa une formulation donnant la DP des pics de contraintes. Celle-ci fut utilisée par Lalanne [9] pour déterminer la DP des étendues de contraintes. Dirlik [7] propose une expression semi-empirique pour estimer directement la DP des étendues de contraintes. Pour les environnements de type sinus sur bruit, une approche statistique similaire existe [10], de même que pour les chargements aléatoires à fort kurtosis [11].

Pour les environnements décrits dans le domaine temporel, les temporels de contraintes sont passés directement au travers d'une routine de comptage rainflow [6]. Les endommagements par fatigue des différents cycles sont sommés en utilisant la règle de Palmgren-Miner [12, 13].

L'application de profils de température ou de pression isostatique peuvent être pris en compte dans le calcul de fatigue. Par exemple, une température élevée peut ajouter des contraintes thermiques de type statique et peut également modifier les propriétés de fatigue des matériaux [14].

4 La corrélation calcul-essais

La précision des durées de vies calculées à partir de la méthode par élément-finis dépend de la qualité de la modélisation. La modélisation peut être améliorée grâce à l'analyse modale expérimentale et grâce à la mesure des réponses en contraintes et déformations.

Une première validation consiste à comparer les fréquences propres et les déformées modales obtenue par calcul avec celles constatées sur banc d'essais. Cette première étape permet de valider et de mettre à jour le cas échéant les conditions aux limites, les propriétés de raideur (module d'Young) et de masse (densité) du modèle éléments-finis. La Fig. 1 illustre une comparaison de déformées modales entre le calcul et la mesure pour un silencieux.

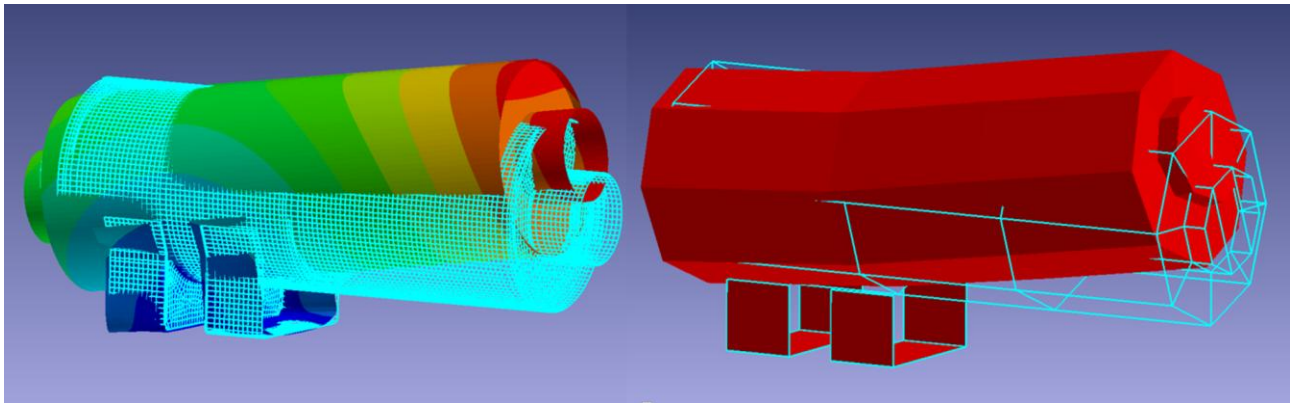


Fig. 1. Comparaison de déformées modales entre le calcul et la mesure pour un silencieux.

La prochaine étape est de calculer les niveaux de contraintes obtenus quand la structure est excitée. Une analyse de type réponse forcée – nécessitant des ratios d'amortissement – est nécessaire. L'amortissement gouverne en effet l'amplitude de réponse à la résonance et donc le niveau de fatigue cumulé. Le fait de choisir des valeurs par défaut pour les ratios d'amortissement peut conduire à des erreurs conséquentes sur la durée de vie. nCode VibeSys™ permet d'extraire les ratios d'amortissement grâce à l'analyse modale expérimentale. La Fig. 7 illustre un exemple de modélisation d'une réponse en fréquence, à partir de laquelle sont extraits les paramètres modaux.

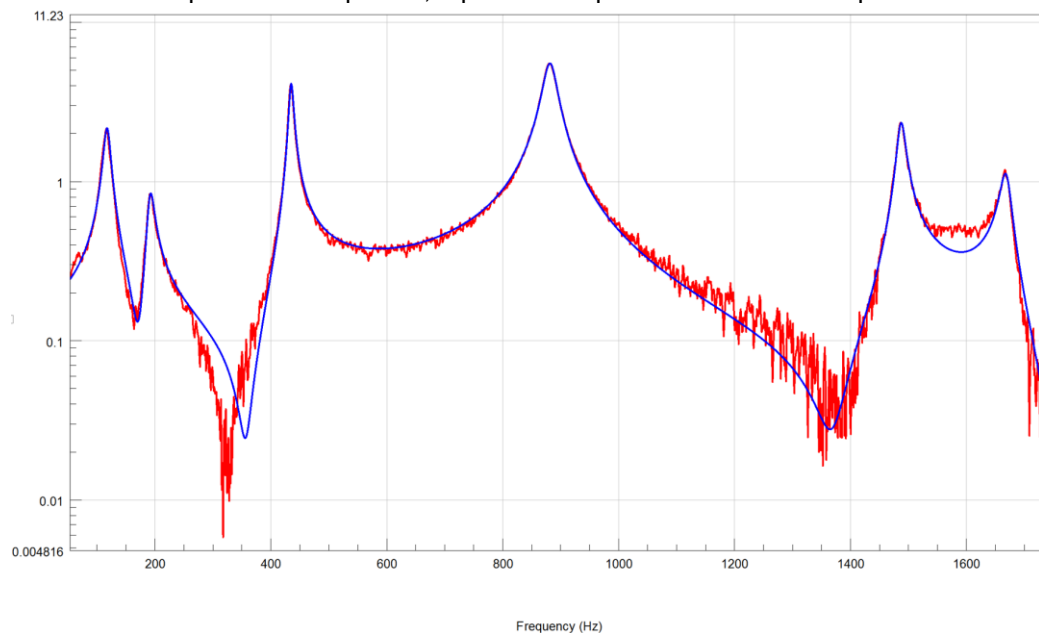


Fig. 2. « Fittage » d'un réponse en fréquence pour extraction des paramètres modaux.

La dernière étape consiste à valider les contraintes mécaniques calculées, particulièrement lorsqu'elles résultent de l'application de plusieurs chargements simultanés. Il est possible d'utiliser une "jauge de déformation virtuelle" pour extraire les contraintes calculées et les comparer à celles mesurées. Une bonne corrélation est attendue dans le cas d'un maillage suffisamment fin et de chargements correctement appliqués. La Fig. 3 illustre l'utilisation d'une jauge virtuelle sur un maillage.

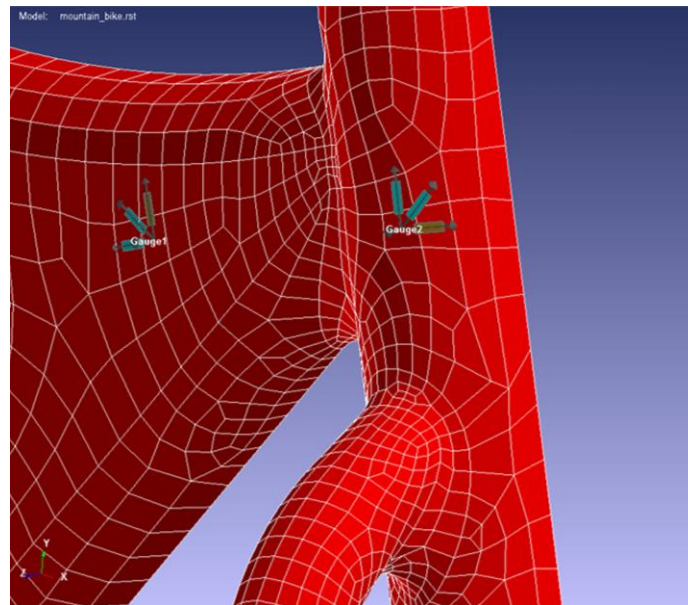


Fig. 3. Exemple d'utilisation d'une jauge virtuelle sur un maillage.

5 Apport des essais virtuels aux essais physiques

Une analyse de fatigue par éléments-finis peut aider à valider que l'accélération par sévérisation de l'essai ne modifie pas les mécanismes d'endommagement. Il est par exemple possible de vérifier que le niveau de contrainte n'excède pas la limite élastique ou que la courbe de fatigue est toujours utilisée dans sa zone d'endurance limitée.

De plus, ce type d'analyse numérique peut permettre de comprendre pourquoi le composant a cassé au cours de l'essai et peut également aider à trouver une solution grâce à une analyse de sensibilité.

Dans le cas d'un essai terminé avec succès, une analyse de fatigue par éléments-finis peut être utile pour évaluer la marge de sécurité et s'assurer que le composant n'est pas surdimensionné par exemple.

Enfin, très souvent un faible nombre de produits sont testés. Une analyse de fatigue probabiliste aide dans ce cas à prendre en compte les variabilités géométriques et les variabilités des propriétés matériaux afin d'obtenir une durée de vie probabilisée (moyenne et écart-type ou $B(x\%)$).

6 Conclusion

Il est typique d'améliorer la précision d'un modèle éléments-finis grâce à des mesures physiques. Cette présentation illustre comment des essais physiques peuvent être optimisés grâce à l'utilisation du calcul par éléments-finis.

En effet, un modèle éléments-finis peut être utilisé pour valider une réduction du temps d'essai et extraire plus d'information de l'essai.

La validation du modèle éléments-finis est cependant cruciale. Cette présentation donne des suggestions pour valider et améliorer la modélisation par éléments-finis, basées sur des mesures expérimentales.

Références

- [1] USA Department of Defense, Test Method Standard MIL-STD-810G Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests, 2008.

- [2] "RCA/DO-160 Revision G: Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment", RTCA, 2010.
- [3] A. Halfpenny and F. Kihm, "Mission Profiling and Test Synthesis Based on Fatigue Damage Spectrum. Ref. FT342" in 9th Intl. Fatigue Congress, Atlanta, USA, 2006.
- [4] A. Halfpenny, "Rainflow cycle counting and fatigue analysis from PSD," Proceedings of the ASTELAB Conference, Paris, France, September 25 – 27, 2007.
- [5] "nCode DesignLife theory guide," HBM-nCode Products, Rotherham, UK 2016.
- [6] M.Matsuishi and T. Endo, "Fatigue of metals subjected to varying stress," Japan Society of Mechanical Engineers, Fukuoka, Japan, March, 1968.
- [7] T. Dirlik, "Application of computers to fatigue analysis," PhD Thesis, Warwick University, 1985.
- [8] S.O. Rice, "Mathematical analysis of random noise", Selected papers on noise and stochastic processes, Dover, New York, 1954
- [9] C. Lalanne, "Mechanical vibration & shock (volume 4)," Hermes Penton Ltd, London 2002.
- [10] F. Kihm, A. Halfpenny and N. S. Ferguson, "Fatigue Life from Sine-on-random Excitations," Procedia Engineering, vol. 101, pp. 235-242, 2015.
- [11] F. Kihm, N.S. Ferguson and J. Antoni, "Fatigue life from kurtosis controlled excitations." Procedia Engineering, vol. 133, pp. 698-713, 2015.
- [12] A. Palmgren, "The service life of ball bearings," NASA Technical Translation TT F-13460 (Translation of "Die lebensdauer von kugellagern," Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieurere, Vol. 68, No. 14, pp. 339-341, 1924), 1971.
- [13] M.A. Miner, "Cumulative damage in fatigue," Trans. ASME, Journal of Applied Mechanics, Vol. 67, pp. A159-A164, 1945.
- [14] A. Halfpenny, R. Anderson and X. Lin, "Isothermal and Thermo-Mechanical Fatigue of Automotive Components." SAE Technical Paper, 2015.