

ANALYSE MODALE en ROTATION ASTELAB 2014

C. Marcadet

HGL DYNAMICS France

25 rue du mont olivet

78500 SARTROUVILLE

M. Keil

MAUL-THEET GmbH Germany

Bülowstrasse 66

10783 Berlin / Germany

P. Andersen

Structural Vibration Solutions A/S

NOVI Science Park Niels Jernes Vej 10

DK-9220 Aalborg, Denmark

Résumé

L'analyse modale des structures est depuis plus de 30 ans une technique éprouvée, depuis 10 ans l'analyse modale opérationnelle (OMA) est aujourd'hui une technologie largement utilisée pour extraire les paramètres modaux de structures en cours de fonctionnement. La technique OMA est maintenant une méthode industrielle validée dans l'industrie du génie civil et la surveillance des structures. Dans le cas de l'industrie des machines tournantes il y a un intérêt de connaître les paramètres modaux dans les conditions de fonctionnement car ils sont sensiblement différents de la machine à l'arrêt, nous vous présentons une technique de mesure et d'analyse permettant d'extraire les paramètres modaux sur un arbre avec un disque de frein en rotation.

1) INTRODUCTION

2) Analyse modale "Classique"

L'analyse modale "classique" est mise en œuvre pour une structure en statique et sous les conditions de linéarité et de réciprocité de la réponse par rapport à l'excitation.

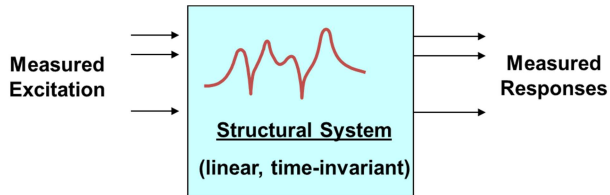


Figure 1 fonction de transfert

Les fonctions de transferts (accélération/effort) ainsi mesurées forment une matrice. Plusieurs algorithmes permettent d'ajuster « FIT » ou calculer les matrices de masse raideurs et d'amortissement.

$$\Phi^T M \Phi = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & 0 & 1 \end{pmatrix} = E \quad \Phi^T K \Phi = \begin{pmatrix} \omega_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \omega_2^2 & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & 0 & \omega_N^2 \end{pmatrix}$$

$$\Phi^T K \Phi = \begin{pmatrix} \omega_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \omega_2^2 & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & 0 & \omega_N^2 \end{pmatrix}$$

Puis de calculer les vecteurs propres (Eigen vector) qui sont proportionnels aux vecteurs de déplacement ce qui permet de calculer les déformées pour chaque fréquence modale.

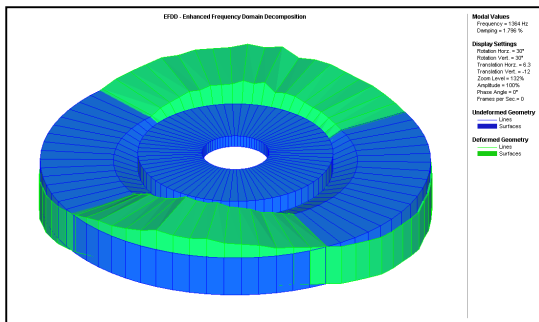


Figure 2 déformée du disque

3) Analyse modale en fonctionnement OMA

En fonctionnement il est très difficile de mesurer les forces d'excitation, donc Le principe de la méthode d'analyse modale opérationnelle OMA, consiste à mesurer la matrice de réponse de la structure. Puis d'extraire les paramètres modaux grâce à une technique mathématiques des sous espaces. Sans rentrer dans les détails, cette méthode permet d'extraire les vecteurs propres de la matrice sachant que les résidus et poles ont des propriétés d'orthogonalité qui permettent de résoudre les solutions des équations de la dynamique.

La méthode développée par SVIBS est largement documentée (voir références) et s'appelle SSI, elle nécessite une grande puissance de calcul mais les calculateurs actuels sont assez puissants, mais cela nécessite beaucoup de points de mesures contrairement à l'analyse modale classique.

4) Analyse modale en rotation: Cas d'un arbre en rotation avec un disque de frein

Dans le cas des machines tournantes nous avons pu par expérience valider La méthode OMA SSI principalement pour des conditions stationnaires, à une vitesse fixe par exemple ce qui est le cas de génératrices, compresseurs, etc..



Figure 3 Turbocharger diesel

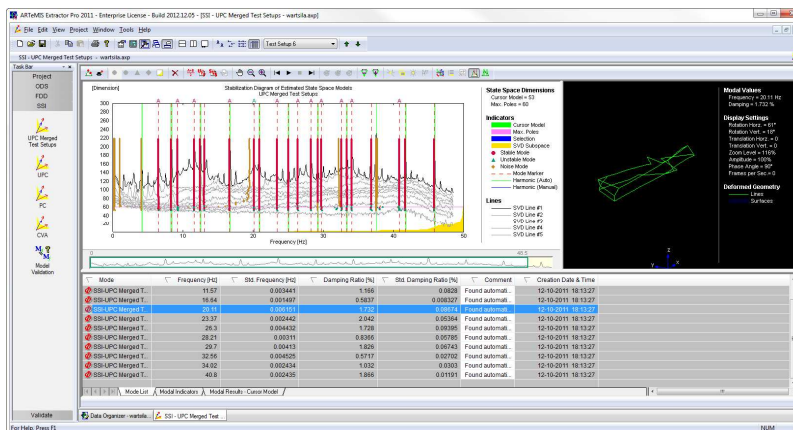


Figure 4 Résultats modal du Turbocharger

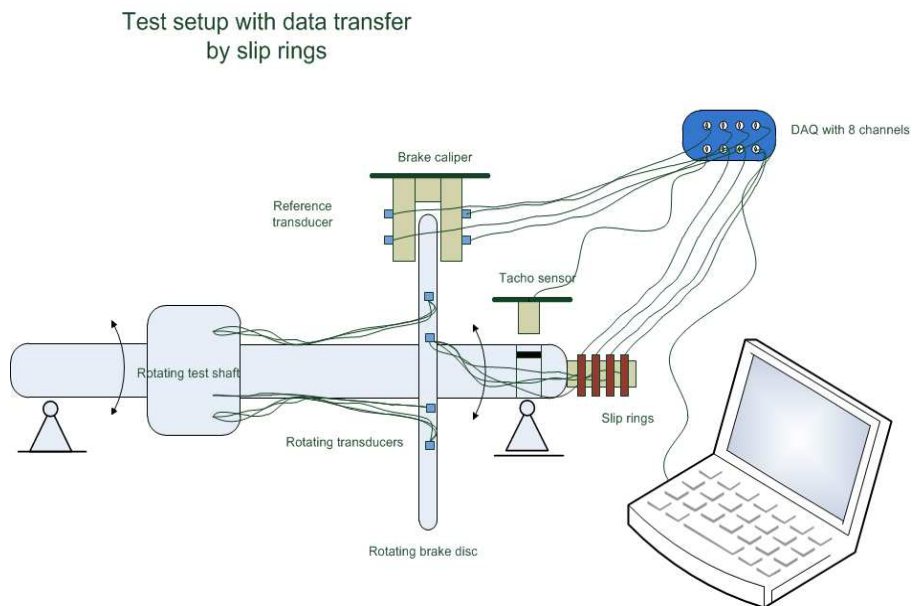
Lorsqu'il y a une montée en régime les conditions ne sont plus stationnaires en fonction du temps, l'idée est de déterminer les réponses proportionnelles à la vitesse et de considérer que pour une vitesse le signal est stationnaire pendant une durée courte.

Nous avons pu développer cette méthode dans le cas d'un disque de frein.

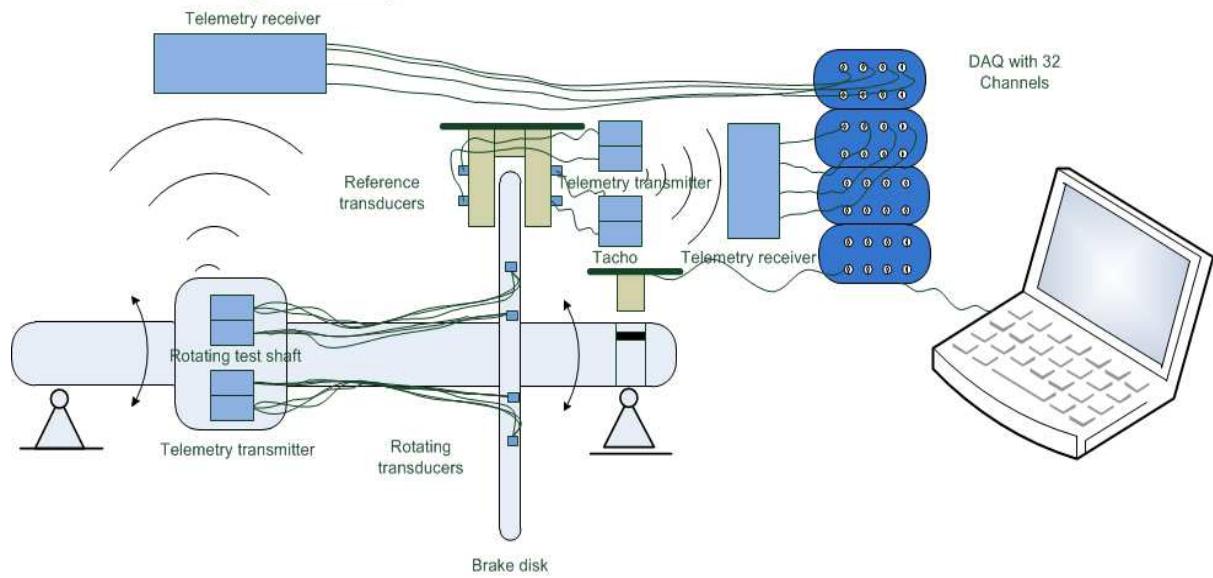
Dans une première partie nous avons réalisé l'analyse modale du disque avec un vibromètre laser OPTOMET et marteau de choc. Et calculés les modes via le logiciel de SVIBS (EFDD).

Puis nous avons instrumenté le disque et l'arbre en capteurs de proximité pour la vitesse et d'accéléromètres pour les réponses vibratoires.

Pour la transmission des données nous avons utilisé plusieurs méthodes, le joint tournant, la télémétrie et testé le WIFI. La deuxième méthode a donnée le meilleur rapport signal sur bruit.



Test setup with data transfer by telemetry



Pour la mesure de la vitesse une précision angulaire et temporelle est importante. Nous avons opté pour une résolution angulaire de l'ordre de 7° . Le capteur a aussi un temps de réponse très court plus important que les capteurs de proximité classiques



- Si vitesse = 30 RPM, fréquence = 0.5 Hz
- Echantillonnage = 51200 Hz, Bande passante= 20 kHz
- 102400 échantillons par tour
- Pour chaque échantillon synthèse du signal temporel en fonction de l'angle

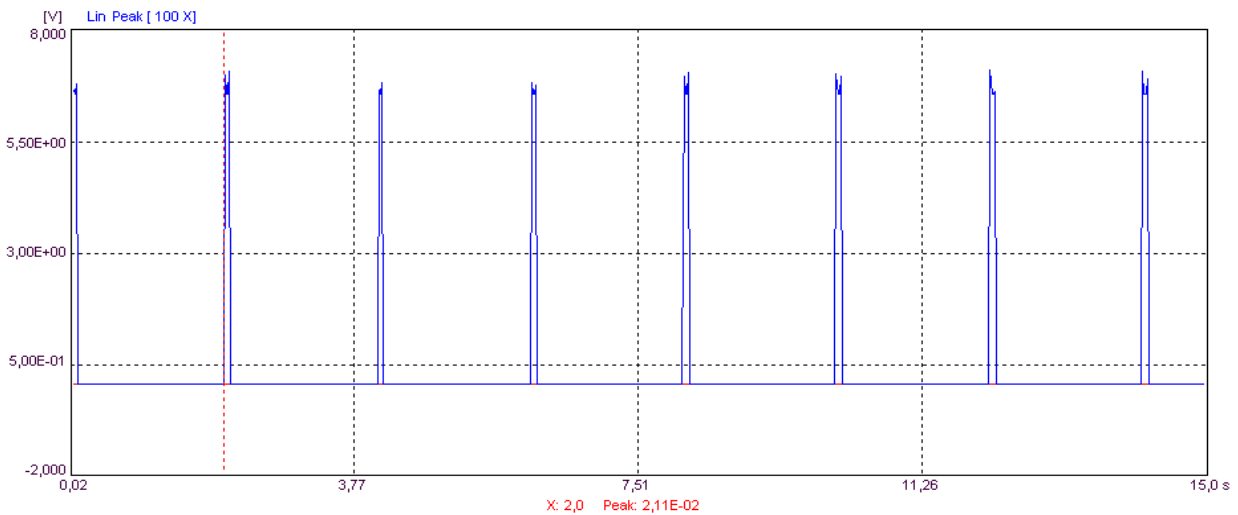
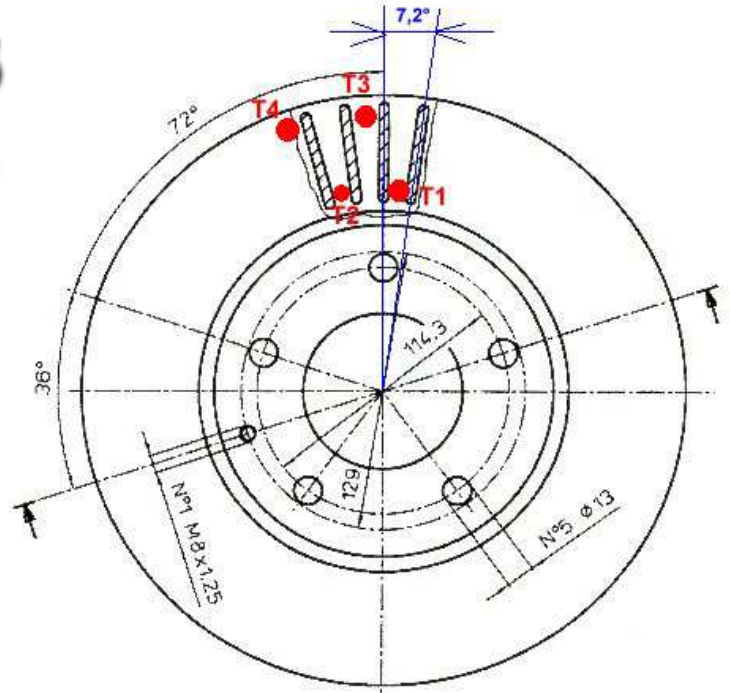
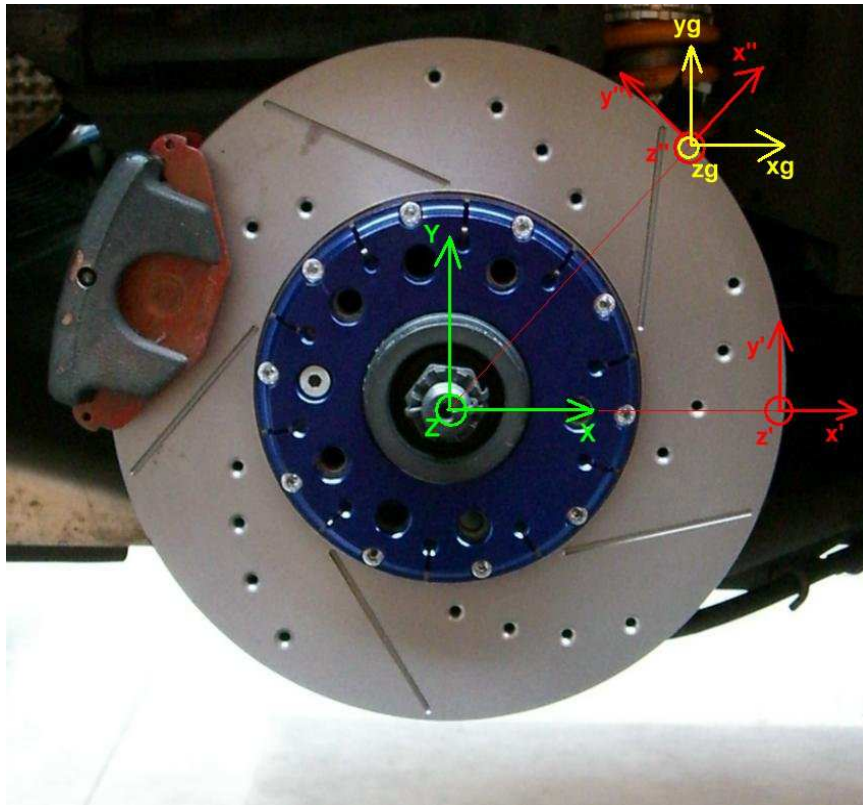


Figure 5 signal tachymétrique

Pour les accéléromètres ils mesurent les accélérations dans l'axe du capteur. Donc comme le montre la figure ci-dessous les mesures sont radiales. Afin de transformer une vibration dans un repère

cartésien nous avons donc calculé une matrice de transformation en fonction de la position angulaire du disque (d'où la nécessité d'avoir une précision importante)



Transformation des capteurs radiaux en cartésien

$$\begin{pmatrix} x_g(t) \\ y_g(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \end{pmatrix}$$

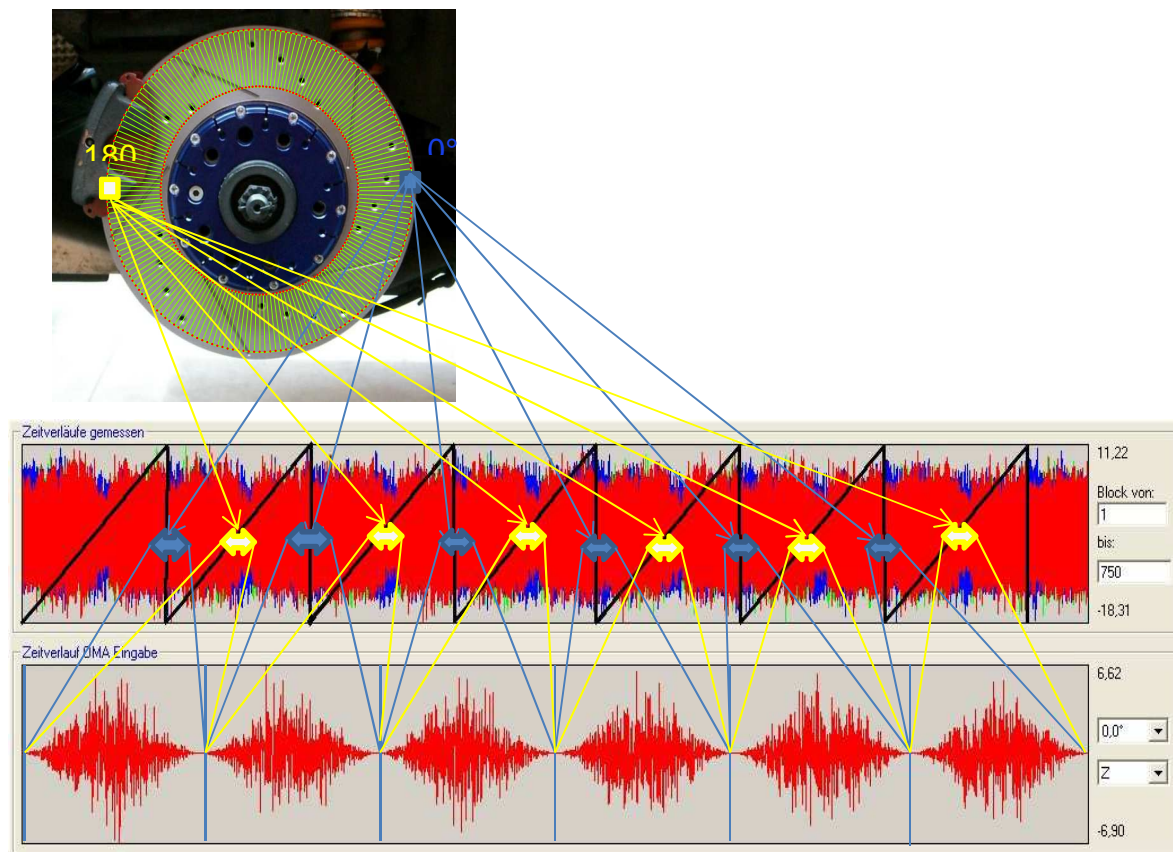



Figure 6 Résultats du temporel synthétisé

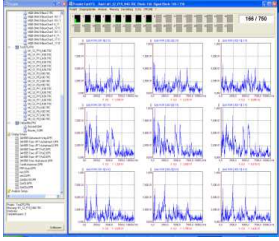
Donc le signal ainsi transformé peut être exploité par les algorithmes d'extraction modale.

Le processus de traitement est schématisé ci-dessous.



vAnalyzer


- Enregistreur
- Analyseur de spectre



Matériel

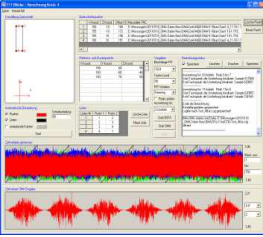
- 8-32 voies synchrones
- 20 Khz de BP
- 24 bit
- IEPE

↓
Fichiers bruts

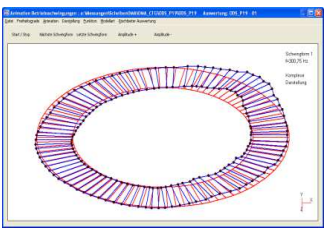


vModal Analysis


- Synthèse du signal t
- Channel assignment
- DOF
- Module ODS



→ ODS →

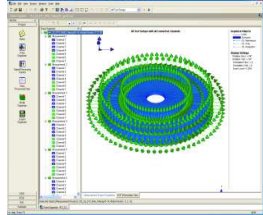


↓
Fichiers pour OMA+Géométrie

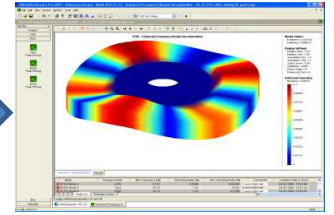


OMA ARTeMIS SVIBS

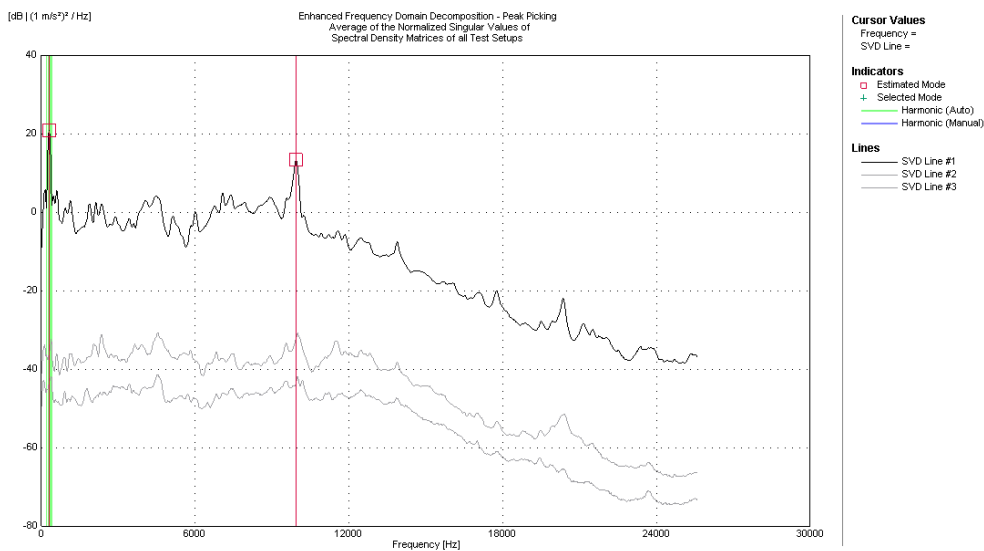
- Operational Modal Analysis-



→ EFDD SSI →

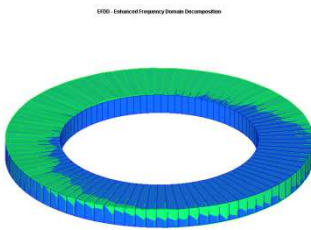


Les résultats de l'analyse spectrale sont présentés ci-dessous, bien sur nous n'avons analysé que les fréquences intéressantes. Ci-dessous quelques déformées

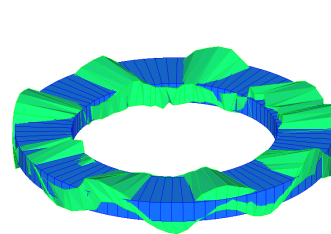


300 Hz

9950 Hz



Model Values
 Frequency = 300.0 Hz
 Damping = 0.100 %
Display Settings
 Display = 1000
 Rotation Angle = 0°
 Translation X = 0
 Translation Y = 0
 Translation Z = 0
 Coordinate System = Cartesian
 Units = mm
 Precision = 0.000
Unfiltered Geometry
 Surfaces
Enhanced Geometry
 Surfaces



Model Values
 Frequency = 9950.0 Hz
 Damping = 0.100 %
Display Settings
 Display = 1000
 Rotation Angle = 0°
 Translation X = 0
 Translation Y = 0
 Translation Z = 0
 Coordinate System = Cartesian
 Units = mm
 Precision = 0.000
Unfiltered Geometry
 Surfaces
Enhanced Geometry
 Surfaces

Le point intéressant est la comparaison avec la mesure statique et la mesure dynamique. Nous observons ci-dessous une assez bonne corrélation entre la méthode statique et opérationnelle

EFDD		SSI UPC		Difference	
Frequency [Hz]	Damping [%]	Frequency [Hz]	Damping [%]	Frequency [Hz]	Damping [%]
301	5,5	300	1,2	1,0	4,2
2320	0,7	2320	0,3	0,0	0,4
3352	1,2	3446	2,4	-94,0	-1,2
4215	1,5	4192	2,1	23,0	-0,6
4461	0,4	4430	2,5	31,0	-2,1
4708	0,7	4702	1,6	6,0	-0,9
5245	0,6	5228	3,1	17,0	-2,5
6345	0,3	6339	1,2	6,0	-0,9
6970	0,6	6976	0,8	-6,0	-0,2

5) Conclusion.

L'analyse modale classique est une méthode validée et relativement simple à mettre en œuvre. L'analyse modale opérationnelle OMA est maintenant robuste dans le cas de l'industrie mécanique notamment des machines tournantes la technique est bien validée par plusieurs cas concrets, mais avec la nécessité d'une plus grande instrumentation et un régime stationnaire. Lorsque nous voulons analyser le fonctionnement non stationnaire comme les montées en régime, l'instrumentation est beaucoup plus complexe et nécessite plus de traitement mais les résultats sont assez encourageants. SVIBS, Maul Theet et HGL Dynamics continuent leurs recherches. Aussi une recherche de partenaires industriels.

REFERENCES :

[1] Operation Modal Analysis of a rotating brake disc. Matthias Keil, Maul-Theet, March 2011 Conference Ingolstadt.

[2] M. Goursat, M. Döhler, L. Mevel, P. Andersen. Crystal Clear SSI for Operational Modal Analysis of Aerospace Vehicles. Proceedings of the 28th International Modal Analysis Conference (IMAC) Jacksonville, Florida USA, 2010.

[3] H. R. Schwarz, N. Köckler, Numerische Mathematik, 8th ed., Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2011.

[4] ARTeMIS Modal Users' Manual, Structural Vibration Solutions A/S, 2014.