

# Virtual Shaker Testing : développement et utilisation en vue d'améliorer la stratégie de contrôle

## *Virtual Shaker Testing : development and application to assess control strategy issues*

S. Hoffait<sup>1</sup>, F. Marin<sup>1</sup>, D. Simon<sup>1</sup> et J.-C. Golinval<sup>2</sup>

1V2i s.a., Avenue du Pré-Aily, 25 B-4031 Liège Belgique, e-mail : [s.hoffait@v2i.be](mailto:s.hoffait@v2i.be), [f.marin@v2i.be](mailto:f.marin@v2i.be), [d.simon@v2i.be](mailto:d.simon@v2i.be)

2LTAS, Université de Liège, Quartier Polytech 1, Allée de la Découverte 9, B-4000 Liège, e-mail : [jc.golinval@ulg.ac.be](mailto:jc.golinval@ulg.ac.be)

**Mots clés :** Essai virtuel, table vibrante, modèle électromécanique, prédiction essai, recalage, contrôle en boucle fermée.

**Keywords :** *Virtual Shaker Testing, electromechanical model, testing prediction, updating, closed-loop control*

### Résumé

*La faisabilité des tests vibratoires ne peut pas être uniquement évaluée à partir des capacités du pot vibrant. Le couplage entre la structure testée, le vibreur électrodynamique et le système de contrôle peut induire des comportements inattendus pouvant mettre à mal la bonne mise en œuvre des essais. Ce travail a pour but de développer un outil de simulation numérique des tests vibratoires sur le moyen d'essai installé dans les locaux de V2i. Le modèle électromécanique ainsi que le recalage à partir de mesures sont décrits dans cet article. L'introduction du modèle de la structure à tester (modèle réduit) et la fermeture de la boucle de contrôle à l'aide du modèle de contrôleur fourni par Siemens LMS sont également abordés. La validation de la méthode est démontrée en confrontant la simulation d'un essai sur une structure industrielle aux résultats expérimentaux obtenus. Les possibilités offertes par le simulateur dans la recherche de solutions lors, par exemple, du contrôle au passage d'une antirésonance seront brièvement décrites.*

### 1 Introduction

La faisabilité des tests vibratoires ne peut pas être uniquement évaluées à partir des capacités du pot vibrant. Le couplage entre la structure testée, l'excitateur électrodynamique et le système de contrôle peut induire des comportements inattendus allant jusqu'à mettre à mal la bonne mise en œuvre des essais. Ce travail a pour but de développer un outil de simulation numérique des tests vibratoires sur le pot vibrant installé dans les locaux de V2i. La simulation permet de juger de la faisabilité d'un test et/ou d'explorer des pistes de modification dans la stratégie de contrôle.

Une approche de modélisation type masse-ressort est considérée pour la représentation du comportement dynamique du pot vibrant. En comparaison des travaux présentés dans la littérature [1-4], les degrés de liberté en rotation sont ajoutés à ceux de translation verticale. Cet ajout permet de représenter des phénomènes observés tel que, par exemple, le mode de torsion de la bobine qui peut induire des niveaux d'accélération transverses non négligeables. Un modèle de type coque éléments-finis est créé pour la représentation du comportement de la table vibrante utilisée pour la réalisation des essais selon les axes horizontaux. Une série de mesures (analyse modale au marteau d'impact et balayages sinus) ont permis l'identification des caractéristiques dynamiques du système électromécanique et le recalage du modèle numérique. Un modèle du contrôleur est fourni par Siemens LMS dans le cadre d'un projet de recherche financé par la Région Wallonne (Advanced

Operational Certification). Un modèle réduit (« super-élément ») de la structure à tester est introduit dans la boucle. Les différents blocs sont assemblés (voir Fig. 1) et la simulation peut être exécutée à partir d'une interface graphique.

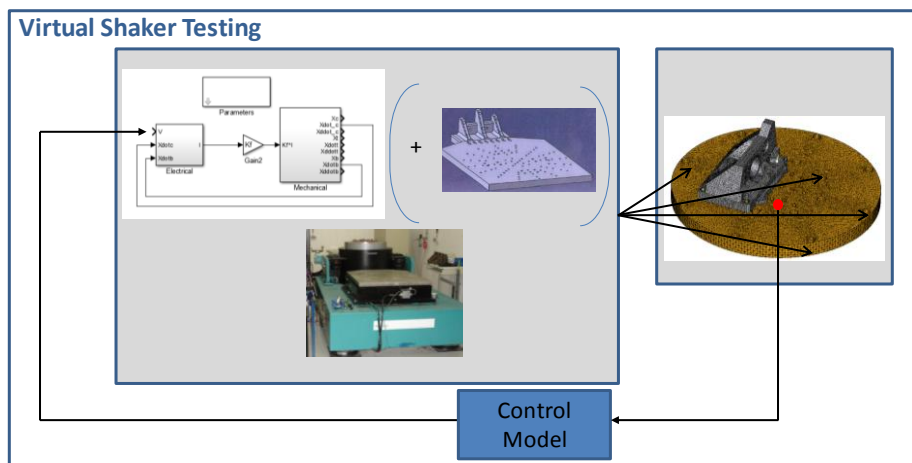


Fig. 1. Schéma du simulateur d'essai sur pot vibrant.

La validité de la simulation est testée sur un cas-test industriel (luminaire Schröder). La confrontation des résultats théoriques et expérimentaux conduit à une corrélation très satisfaisante. Des pistes de modification dans la stratégie de contrôle (paramètres de contrôle, moyenne sur plusieurs points de contrôle, ...) sont présentées sur un cas problématique d'anti-résonance.

## 2 Description du modèle virtuel de pot vibrant

Le modèle électromécanique, les mesures réalisées, le recalage ainsi que l'introduction du modèle du spécimen et du contrôleur sont brièvement décrits dans ce document. Une plus large description est disponible dans [5-6].

### 2.1 Modèle électromécanique

De manière identique aux modélisations décrites dans [1-4], un modèle de type masse-ressort est considéré pour la représentation du comportement dynamique du pot vibrant (Fig. 2).

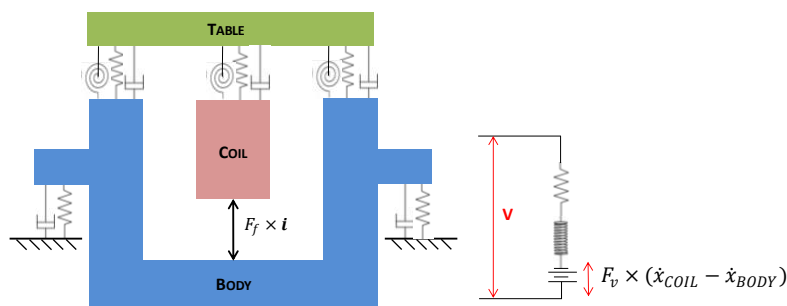


Fig. 2. Modèle électromécanique du pot vibrant.

En comparaison des travaux cités, certains degrés de liberté en rotation de la partie mobile sont ajoutés afin de permettre la prise en compte de l'effet des modes de basculement et de torsion de la tête de la bobine. Ces modes sont observables à l'aide d'un balayage sinus et peuvent induire des excitations transverses non désirées au spécimen testé. Le modèle mécanique comprend donc 7 degrés de liberté (eq. 1) tandis que le modèle électrique ne comprend que l'intensité du courant comme degré de liberté (eq. 2).

$$\mathbf{x}_{mec} = [z_{Coil} \quad z_{table} \quad z_{body} \quad \theta_{z,table} \quad \theta_{x,table} \quad \theta_{y,table} \quad \theta_{z,Coil}]^T \quad (\text{eq. 1})$$

$$\mathbf{x}_{elec} = \mathbf{i} \quad (\text{eq. 2})$$

La dynamique de l'ensemble est décrite par le système d'équations (eq. 3) tenant compte du couplage électromécanique à l'aide du paramètre  $F$  (force électromagnétique engendrée par le courant dans la bobine et force électromagnétique en fonction liée à la vitesse de la partie mobile).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} + \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{0} \\ \mathbf{F}^T & \mathbf{L} \end{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} + \begin{bmatrix} \mathbf{K} & -\mathbf{F} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R} \end{bmatrix} \mathbf{q} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{V} \end{Bmatrix} \quad (\text{eq. 3})$$

$$\text{avec } \mathbf{q} = [\mathbf{x} \quad \mathbf{i}]^T$$

Un modèle éléments-finis (coque, éléments de ressort et d'amortisseur) est créé (Fig. 3) pour la modélisation de la table vibrante qui est accouplée à l'excitateur lorsque des vibrations dans le plan horizontal sont appliquées. Ce modèle est lié au système masse-ressort du pot vibrant.

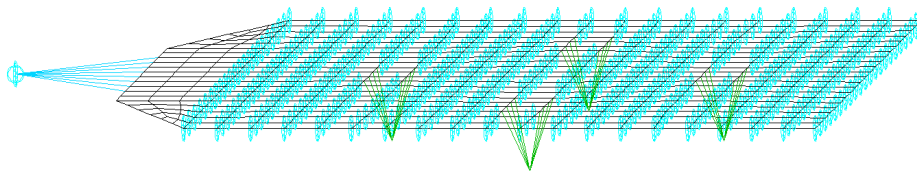


Fig. 3. Modèle éléments-finis de la table vibrante.

## 2.2 Identification du comportement du pot vibrant

Afin d'acquérir des données suffisantes pour le recalage des modèles numériques, différentes mesures ont été mises en œuvre sur le pot vibrant Ling 80 kN installé dans les locaux de V2i, à savoir :

- 1) des analyses modales au marteau d'impact pour la caractérisation de la dynamique du pot vibrant et de la table vibrante. Le mode de torsion de la tête de la bobine identifié est montré à la Fig. 4. Le mode dit de pompage de la table vibrante est, quant à lui, illustré à la Fig. 5.

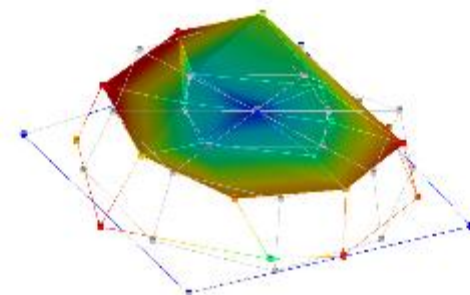


Fig. 4. Mode de torsion de la tête de la bobine à 434 Hz (0.8% d'amortissement).

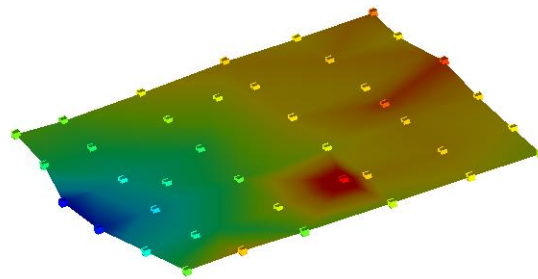


Fig. 5. Mode de pompage de la table vibrante à 886 Hz (1% d'amortissement)

- 2) des balayages sinus en vue de la caractérisation du couplage électrodynamique. Le mode de bobine n'a pas pu être identifié à l'aide de l'analyse modale mais est clairement observable sur les fonctions de réponses fréquentielles (accélération de la tête de la bobine sur voltage d'entrée) mesurés lors d'un balayage sinus.

### 2.3 Recalage des modèles

Le recalage est réalisé manuellement en vue d'obtenir :

- une différence minimale entre les fonctions de réponse fréquentielle (balayage sinus) mesurées et simulées ;
- une bonne corrélation entre les caractéristiques modales mesurées et simulées (fréquences et déformées modales).

Les figures suivantes (Fig. 6 à Fig.8) montrent quelques résultats du recalage (déformées modales et comparaison des fonctions de réponse fréquentielle). Le recalage n'est pas parfait pour l'ensemble des modes identifiés de la table vibrante. Cependant, les modes comportant la plus grande proportion de masses effectives selon l'axe de vibration sont correctement corrélés.

Mode 5: Freq =432 Hz -  $\zeta$  =0.7 %

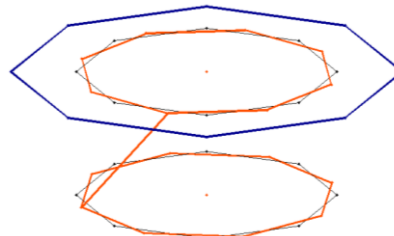


Fig. 6. Mode de torsion – Modèle numérique

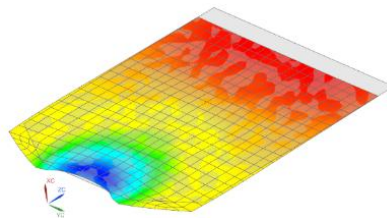


Fig. 7. Mode de pompage – Modèle éléments-finis

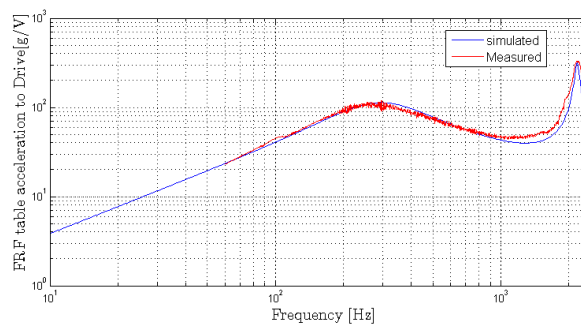


Fig. 8. Comparaison FRFs mesurées et simulées

## 2.4 Simulateur et modèle du spécimen

Le modèle électromécanique recalé est couplé à un modèle du spécimen et la boucle de contrôle est fermée à l'aide d'un modèle numérique du contrôleur développé et fourni par Siemens LMS (permettant la simulation de balayage sinus). Le simulateur travaillant dans le domaine temporel, le temps de calcul peut devenir très important si certaines précautions ne sont pas prises. Le spécimen est dès lors couplé au modèle de pot vibrant au travers d'un modèle réduit de type Craig-Bampton [7-8]. Seuls quelques nœuds sont retenus et notamment les nœuds représentant les interfaces entre le pot vibrant et le spécimen.

Une interface graphique est créée permettant le pilotage virtuel de l'essai d'une manière similaire à celui mené sur pot vibrant : l'ensemble des paramètres de réglage de la stratégie de contrôle sont notamment paramétrables.

## 3 Validation du simulateur de pot vibrant

Une série de cas tests ont été menés afin de valider la faisabilité de simulation sur une structure industrielle et également juger de la justesse de la prédiction [5-6].

La simulation d'un test de balayage sinus sur un luminaire développé par la société Schröder permet de montrer que le simulateur est capable de traiter des modèles relativement complexes grâce à la réduction du modèle du spécimen. Le temps de calcul est de l'ordre de 580 s (Intel i7 @2.5GHz) pour simuler un balayage entre 3 et 50 Hz en comparaison d'une durée de 240 s pour le test réel sur pot vibrant. Ce temps de calcul réduit semble acceptable en vue de tester plusieurs solutions de stratégie de contrôle. La Fig. 10 superpose les courbes de tension d'entrée « Drive » simulée et mesurée lors d'un essai sur le pot vibrant.

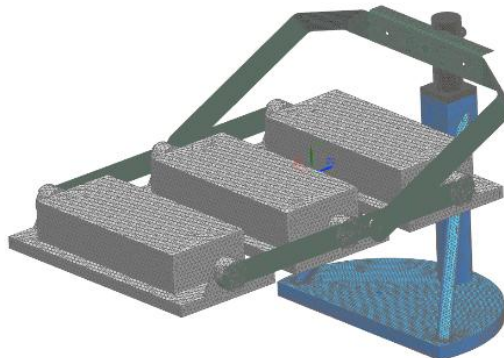


Fig. 9. Modèle EF du luminaire Omniblast (Schröder) installé sur son outillage d'essai (650 000 ddl)

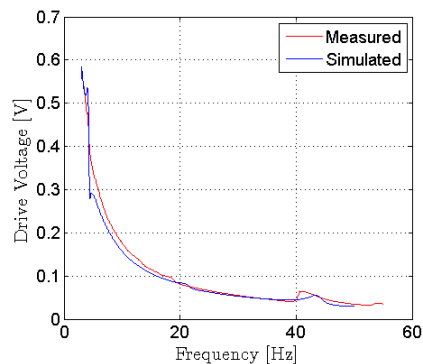


Fig. 10. Comparaison des tensions « Drive » mesurée et simulée

## 4 Choix de stratégie de contrôle

Dans le cas de la détection de possibles problèmes lors de la mise en œuvre de simulations à l'aide de l'outil développé tel que ceux observés lors du passage d'antirésonance (au niveau du point de contrôle), l'ingénieur peut tester l'impact de la modification de la stratégie de contrôle. Dans un premier temps, l'effet de la modification des paramètres de contrôle tels que la vitesse de montée du balayage et le facteur de compression (paramètre représentant la vitesse de correction de l'erreur entre le signal de consigne et le signal mesuré [9]). Si la simulation montre qu'une modification de ces paramètres n'est pas suffisante (avec des marges de sécurité suffisantes), une des modification de la stratégie de contrôle peut être proposée au client comme par exemple le contrôle en moyenne entre plusieurs points afin de rendre le passage des antirésonances plus stable et moins demandeurs en termes de niveau injecté. Un exemple de ces essais de modification de stratégie sera présenté lors de l'exposé.

## 5 Conclusions

Le simulateur d'essais relatif au pot vibrant Ling 80KN installé chez V2i est présenté. L'introduction de degrés de liberté en rotation permet la prise en compte des modes de basculement et de torsion de la bobine. L'outil créé assure la prédiction de la dynamique de l'ensemble spécimen/pot vibrant/contrôleur et ceci pour des modèles de spécimens relativement bien détaillé (utilisation de « super-élément »). Le simulateur est validé à l'aide d'un cas test industriel et permet de tester l'influence des stratégies de contrôle sur le comportement de l'ensemble.

## Remerciement

Le travail présenté est réalisé dans le cadre du projet de recherche « Advanced Operational Certification » subventionné par la DGO6 de la Région Wallonne (convention n°6894).

## Références

- [1] M. Appoloni (ESA), *Use of advanced integrated CAE tools to provide an end-to-end simulation of S/C virtual testing with ESTEC shakers, Virtual shaker approach for spacecraft vibration testing workshop*, Noordwijk, November 2014.
- [2] S. Ricci, B. Peeters, R. Fetter, D. Boland, J. Debille, *Virtual shaker testing for predicting and improving vibration test performance, Proceedings of The IMAC-XXVII, February 9-12, Orlando, Florida (2009)*

- 
- [3] George Fox Lang, Dave Snyder, *Understanding the physics of electrodynamic shaker performance*, Sound Vib., October 2001
  - [4] P.S. Varoto, L.P.R. De Oliveira, *Interaction between a vibration exciter and the structure under test*, Sound Vib, October 2002
  - [5] S. Hoffait, F. Marin, D. Simon, B. Peeters, J.-C. Golinval, *Measured-based shaker model to virtually simulate vibration sine test*, Case Studies in Mechanical Systems and Signal Processing (2016), pp. 1-7.
  - [6] . Hoffait, F. Marin, D. Simon, B. Peeters, J.-C. Golinval, *Virtual Shaker Testing at V2i: measured-based model and industrial test case*, *Proceedings of The ISMA-2016, September 19-21*, Leuven, Belgique (2016)
  - [7] M. Geradin, D. Rixen, *Mechanical Vibrations, Theory and Application to Structural Dynamics*, (Third Edition) Wiley (2015)
  - [8] Samcef, Siemens PLM Software (Samtech), Liège Belgium
  - [9] LMS Test.Lab Environmental, Siemens PLM Software, Leuven Belgium