



FROM VIBRATIONS  
TO IDENTIFICATION

**V2i S.A.**

Avenue du Pré-Aily, 25  
Liège Science Park  
4031 LIEGE - BELGIUM

T. +32 (0)4 287 10 70  
F. +32 (0)4 287 10 71  
info@v2i.be  
www.v2i.be

# VIRTUAL SHAKER TESTING : DÉVELOPPEMENT ET APPLICATION EN VUE D'AMÉLIORER LA STRATÉGIE DE CONTRÔLE

---

AVE2016 – BLOIS – 16 Novembre 2016

S. Hoffait, F. Marin, D. Simon : V2i  
J.-C. Golinval : Ulg

Projet de recherche: "Advanced Operational Certification " subventionné par la région Wallonne DGO6

## La simulation des tests de vibration peut être utile

---

### 1. Introduction

#### 2. Simulateur

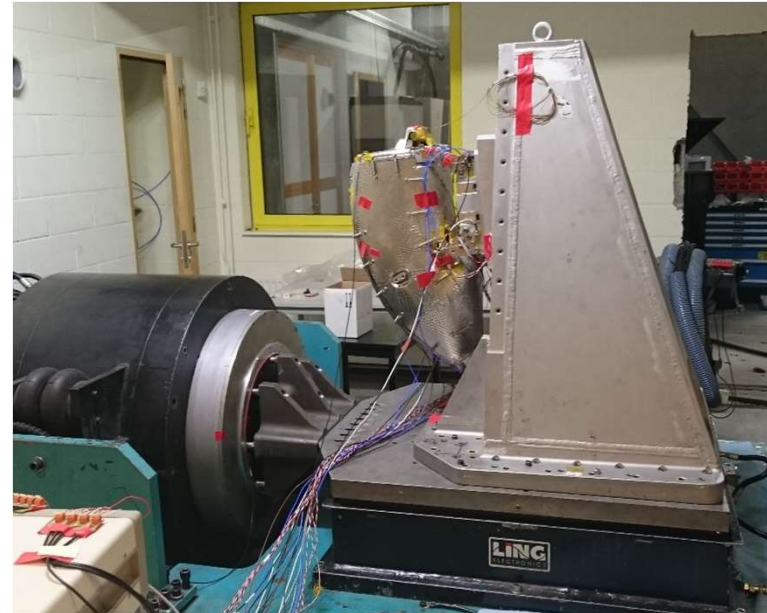
- Principe de fonctionnement
- Modèle EM
- Identification
- Recalage
- Modèle du contrôleur
- Couplage du spécimen

#### 3. Cas tests

- Poutre encastrée
- Structure industrielle

#### 4. Conclusions

- Equipement complexe de très grande valeur
- Pièces massives
- Haut niveau de consigne
- Désalignement du centre de gravité
- Anti-résonance



Peuvent induire des comportements non désirés (battement, accélérations transverses, sous ou sur testé,...)

Des outils permettant de simuler le système complet couplé (spécimen, pot vibrant et système de contrôle) sont développés afin d'aider l'ingénieur de test à prévoir ces difficultés et tester des solutions en avance de phase

# L'ensemble des parties doivent être intégrées dans le Virtual Shaker Testing

## 1. Introduction

## 2. Simulateur

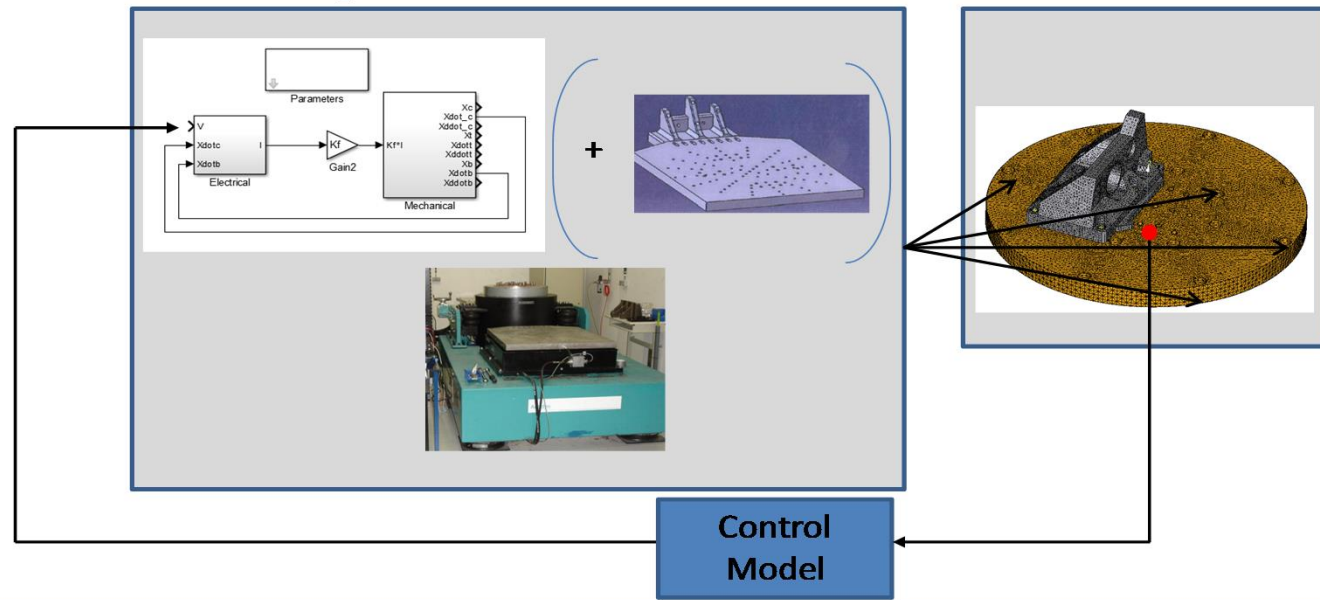
- Principe de fonctionnement
- Modèle EM
- Identification
- Recalage
- Modèle du contrôleur
- Couplage du spécimen

## 3. Cas tests

- Poutre encastrée
- Structure industrielle

## 4. Conclusions

## Virtual Shaker Testing



## En partant de mesures expérimentales jusqu'à la validation

---

### 1. Introduction

### 2. Simulateur

- Principe de fonctionnement
- Modèle EM
- Identification
- Recalage
- Modèle du contrôleur
- Couplage du spécimen

### 3. Cas tests

- Poutre encastrée
- Structure industrielle

### 4. Conclusions

## 1) Simulateur de test vibratoire sur pot vibrant

- Principe de fonctionnement du pot vibrant
- Modèle électromécanique
- Identification
- Recalage
- Modèle du contrôleur
- Couplage du modèle du spécimen

## 2) Validation sur deux cas tests

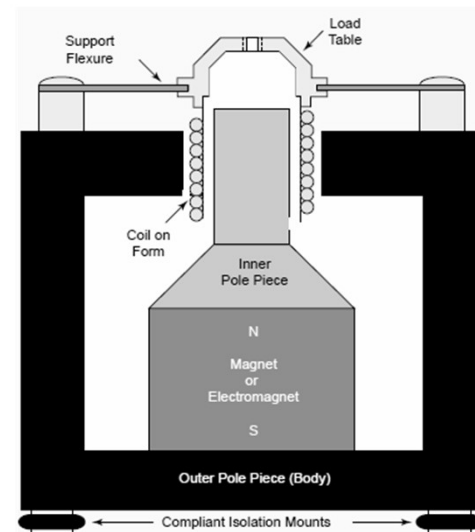
# Un pot vibrant est semblable à une version robuste d'un haut-parleur

## Système électromécanique couplé

- Circuit magnétique + courant circulant dans la bobine = force
- Vitesse relative de la bobine dans le champ magnétique = back EMF

## Limitations:

- A basses fréquences: déplacement max (butée)
- A fréquences moyennes: vitesse max (courant max)
- A hautes fréquences: forces max admissibles et tension max
- + couples maximales admissibles



G. Fox et al., *Understanding the physics of electrodynamic shaker performance*, Sound. Vib, Oct. 2001

### 1. Introduction

### 2. Simulateur

#### - Principe de fonctionnement

- Modèle EM
- Identification
- Recalage
- Modèle du contrôleur
- Couplage du spécimen

### 3. Cas tests

- Poutre encastrée
- Structure industrielle

### 4. Conclusions

## Modèle à 7 +1 degrés de liberté ...

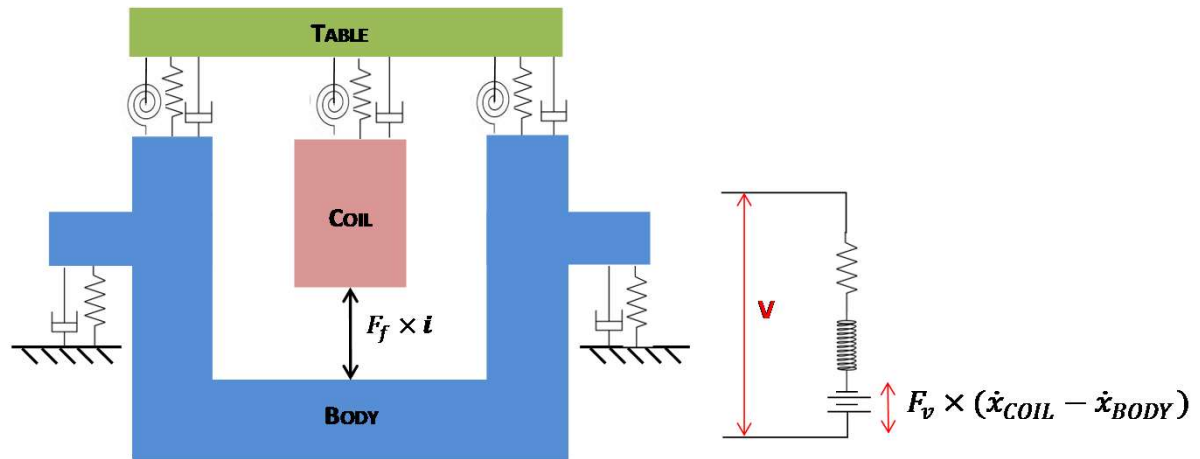
$$F = B l n i = K_F i$$

$$E_{bemf} = B l n \dot{x}_{bobine} = K_F \dot{x}_{bobine}$$

$$\mathbf{x} = [z_{bobine} \quad z_{table} \quad z_{Corps} \quad \theta_{z,table} \quad \theta_{x,table} \quad \theta_{y,table} \quad \theta_{z,bobine}]^T$$

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

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 0 \end{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} + \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{0} \\ \mathbf{F}^T & L \end{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} + \begin{bmatrix} \mathbf{K} & -\mathbf{F} \\ \mathbf{0} & R \end{bmatrix} \mathbf{q} = \begin{Bmatrix} 0 \\ V \end{Bmatrix}$$



### 1. Introduction

### 2. Simulateur

- Principe de fonctionnement
- **Modèle EM**
- Identification
- Recalage
- Modèle du contrôleur
- Couplage du spécimen

### 3. Cas tests

- Poutre encastrée
- Structure industrielle

### 4. Conclusions

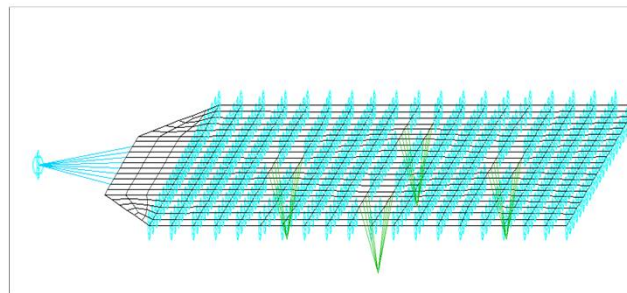
## ... lié au modèle éléments-finis de la table glissante

---

Le pot vibrant peut être tourné et accouplé à un table glissante

Modèle éléments-finis (*Samcef*):

- Table: éléments de coque
- Effet du film d'huile: ressorts distribués
- Palier/guidage: ressorts/amortisseurs



1. Introduction

### 2. Simulateur

- Principe de fonctionnement
- **Modèle EM**
- Identification
- Recalage
- Modèle du contrôleur
- Couplage du spécimen

3. Cas tests

- Poutre encastrée
- Structure industrielle

4. Conclusions

## Mesures à la base du recalage des paramètres

---

Pour la configuration verticale et horizontale:

- Analyse modale au marteau d'impact
- Balayage sinus bas niveau [5-2500 Hz]

Information nécessaire pour le recalage:

- Caractéristiques modales: fréquences de résonance, déformées modales et pourcentages d'amortissement
  - Configuration verticale:
    - *Mode de « bobine »*
    - *Mode de suspension*
    - *Modes de rotation de la table* (inclinaison et torsion)
  - Configuration horizontale:
    - *Mode de « pompage »*
- Couplage électromécanique et identification des paramètres du système électrique de type RL

1. Introduction

### 2. Simulateur

- Principe de fonctionnement
- Modèle EM
- **Identification**
- Recalage
- Modèle du contrôleur
- Couplage du spécimen

3. Cas tests

- Poutre encastrée
- Structure industrielle

4. Conclusions



## Modes de rotation détectés et identifiés

- Mode de bobine non détecté à l'aide de l'analyse modale
- Modes de rotation dans le plan (inclinaison) x2
- Mode de torsion

### 1. Introduction

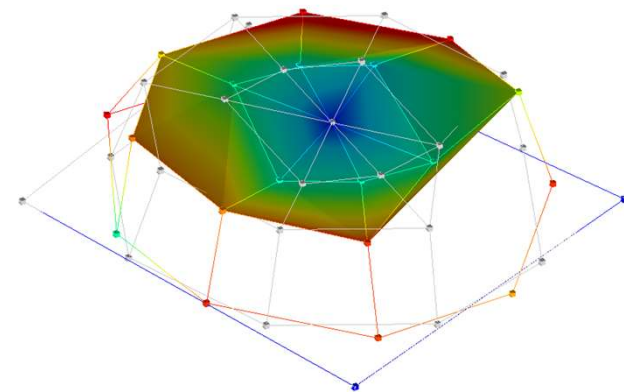
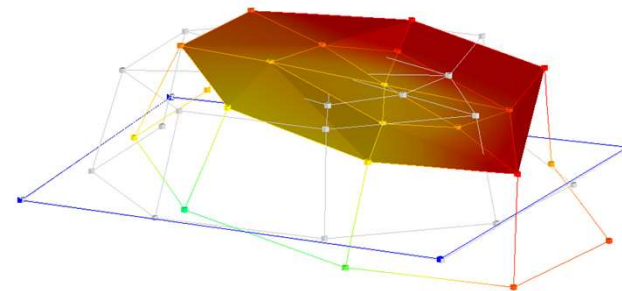
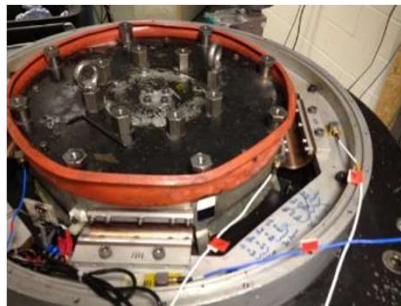
### 2. Simulateur

- Principe de fonctionnement
- Modèle EM
- **Identification**
- Recalage
- Modèle du contrôleur
- Couplage du spécimen

### 3. Cas tests

- Poutre encastrée
- Structure industrielle

### 4. Conclusions



## Modes de rotation détectés et identifiés

- Modes de rotation également observés lors des balayages sinus (mode présent lors des tests)
- Sensibilité importante de ces modes vis-à-vis du montage

### 1. Introduction

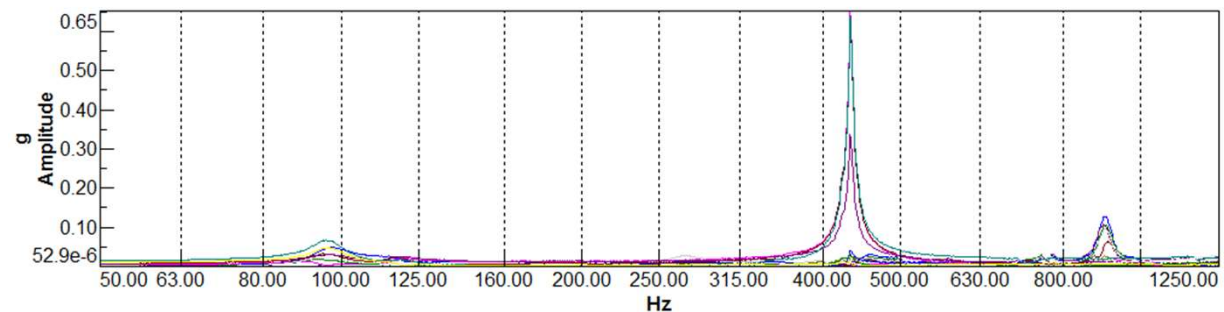
### 2. Simulateur

- Principe de fonctionnement
- Modèle EM
- **Identification**
- Recalage
- Modèle du contrôleur
- Couplage du spécimen

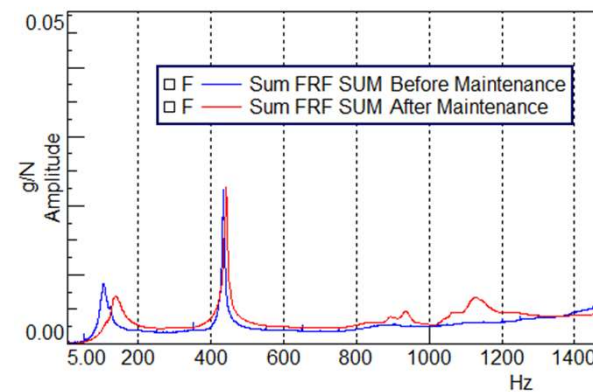
### 3. Cas tests

- Poutre encastrée
- Structure industrielle

### 4. Conclusions



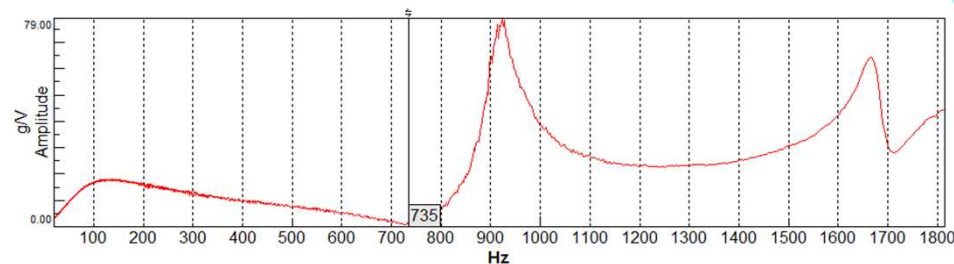
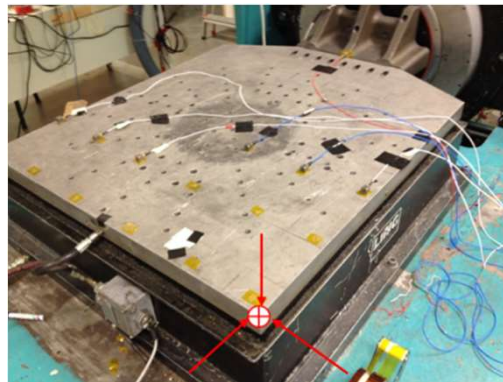
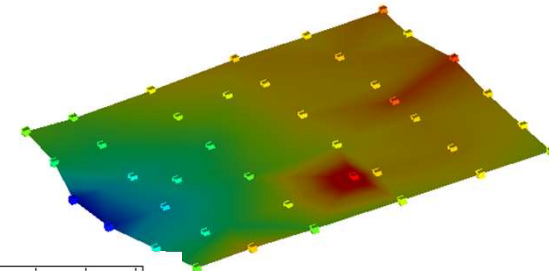
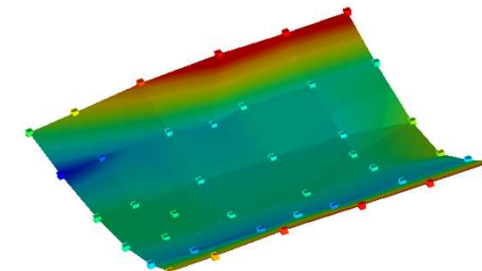
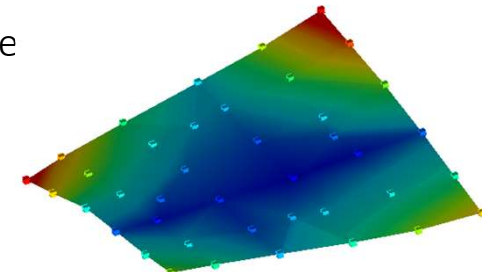
Balayage sinus – Accélération mesurées [g]



Analyse modale – Fonction de Réponse Fréquentielle

## Base modale de la table glissante riche

- Mode de pompage lors de l'analyse modale (pot vibrant OFF) et lors de balayage (pot vibrant ON)
- Mode de pompage détecté au travers de l'anti-résonance (contrôle du niveau au centre de la table)



Balayage sinus- FRF (accélération Driver Bar sur Drive)

### 1. Introduction

### 2. Simulateur

- Principe de fonctionnement
- Modèle EM
- **Identification**
- Recalage
- Modèle du contrôleur
- Couplage du spécimen

### 3. Cas tests

- Poutre encastrée
- Structure industrielle

### 4. Conclusions

## 1. Introduction

## 2. Simulateur

- Principe de fonctionnement
- Modèle EM
- Identification
- **Recalage**
- Modèle du contrôleur
- Couplage du spécimen

## 3. Cas tests

- Poutre encastrée
- Structure industrielle

## 4. Conclusions

# Processus de recalage du modèle

---

- Pour la configuration verticale, des valeurs initiales pour les masses, raideurs, résistance électrique et inductance sont retirées des fiches techniques
- Pour la configuration horizontale, seulement des mesures des dimensions géométriques sont disponibles
- Recalage réalisé à l'aide d'études de sensibilité

### En vue d'obtenir :

- Une représentation fidèle du contenu modal
- Une différence minimale entre les FRF mesurées et simulées

L'effort s'est concentré sur les caractéristiques induisant des effets non désirables (mode de bobine, mode de pompage, mode de torsion,...)

# Recalage : Configuration Verticale

## 1. Introduction

## 2. Simulateur

- Principe de fonctionnement
- Modèle EM
- Identification
- **Recalage**
- Modèle du contrôleur
- Couplage du spécimen

## 3. Cas tests

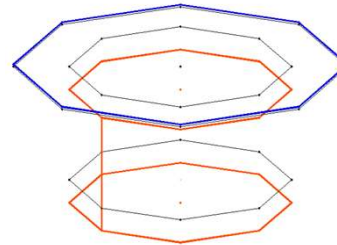
- Poutre encastrée
- Structure industrielle

## 4. Conclusions

### Mode de Suspension

- Non-mesuré
- Ajusté au donnée des fiches techniques

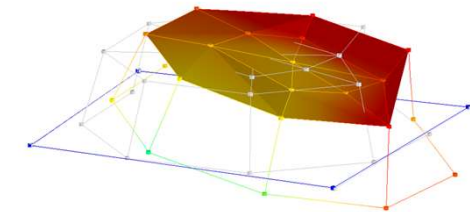
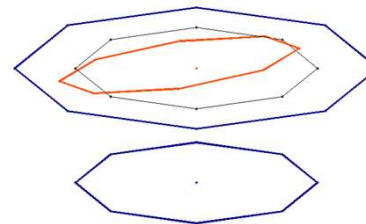
Mode 2: Freq =7.4 Hz -  $\zeta$  =11.8 %



### Rotation dans le plan

- x2 (symétrique)
- Haut niveau d'amortissement

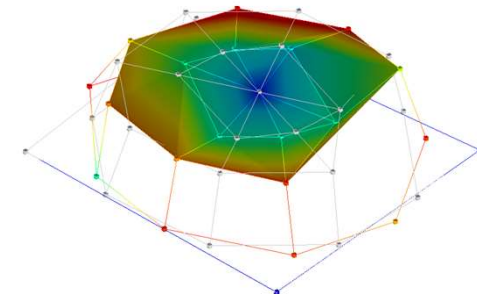
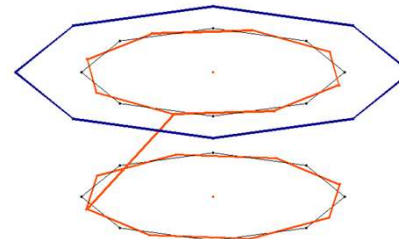
Mode 3: Freq =102.5 Hz -  $\zeta$  =8.7 %



### Mode de torsion

- Faible niveau d'amortissement
- Supposé être en opposition de phase

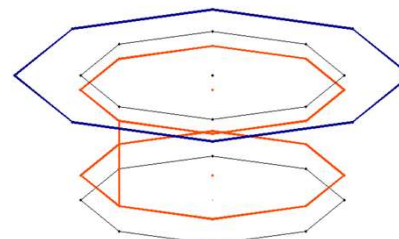
Mode 5: Freq =432 Hz -  $\zeta$  =0.7 %



### Mode de bobine

- Détecté sur les balayages sinus
- Cohérent avec les fiches techniques

Mode 6: Freq =2159.1 Hz -  $\zeta$  =2.2 %



## Recalage : Configuration Verticale

Paramètres électriques et coefficient de couplage F recalés à l'aide de la FRF de l'accélération verticale sur le Drive

Recalage permet de représenter de manière satisfaisante la dynamique

### 1. Introduction

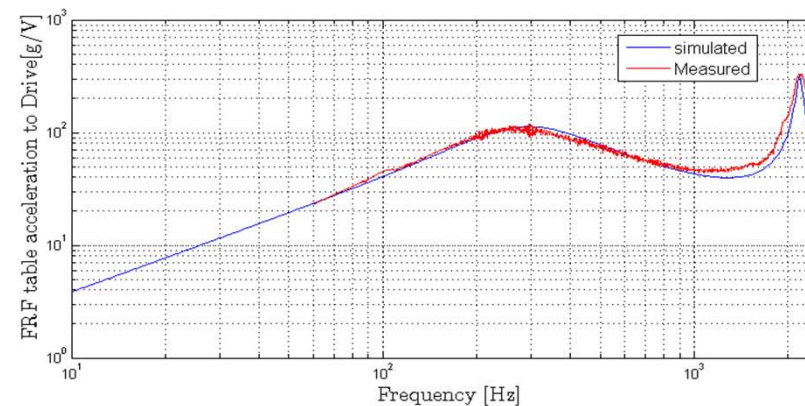
### 2. Simulateur

- Principe de fonctionnement
- Modèle EM
- Identification
- **Recalage**
- Modèle du contrôleur
- Couplage du spécimen

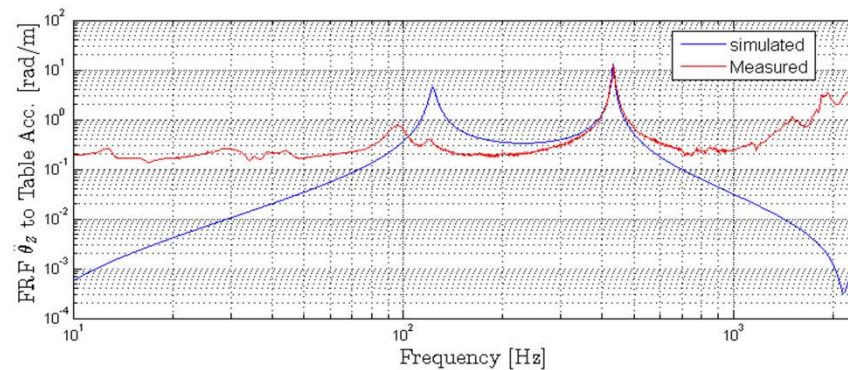
### 3. Cas tests

- Poutre encastrée
- Structure industrielle

### 4. Conclusions



Comparaison entre les FRF (accélération verticale sur Drive) mesurées et simulées



Comparaison entre les FRF (accélération rotation autour de l'axe vertical sur Drive) mesurées et simulées

## Recalage : Configuration Horizontale

- Mode de pompage corrélé (sur la base modale lorsque le pot vibrant est au repos)
- Difficulté pour obtenir un niveau de corrélation satisfaisant ( $MAC < 0,7$ ) pour les autres modes de la table glissante (modélisation du film d'huile)

### 1. Introduction

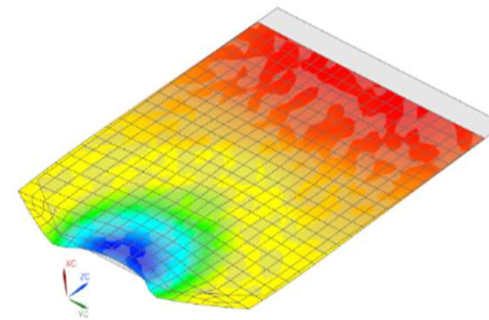
### 2. Simulateur

- Principe de fonctionnement
- Modèle EM
- Identification
- **Recalage**
- Modèle du contrôleur
- Couplage du spécimen

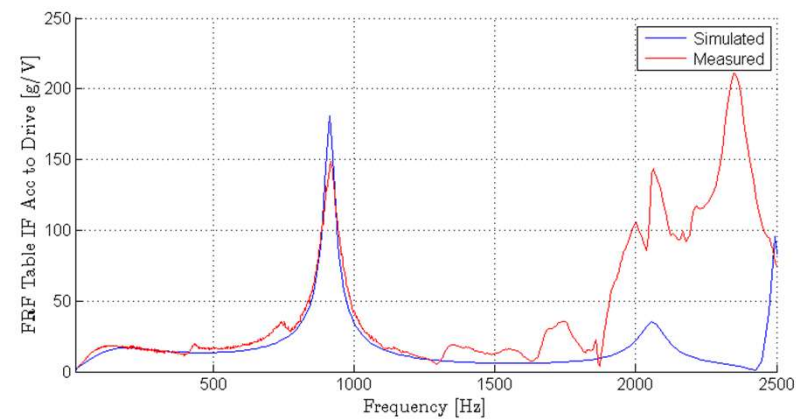
### 3. Cas tests

- Poutre encastrée
- Structure industrielle

### 4. Conclusions



Mode 881 Hz



## Contrôleur qui imite l'environnement LMS

- Modèle du contrôleur créé et validé par une équipe de développement de Siemens LMS
- Permettant la simulation un balayage sinus
- Paramètres de contrôle disponible et ajustable:

### 1. Introduction

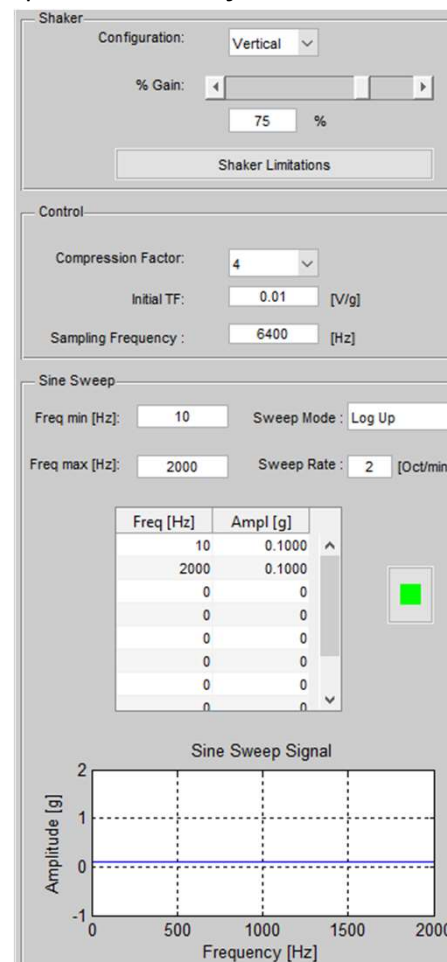
### 2. Simulateur

- Principe de fonctionnement
- Modèle EM
- Identification
- Recalage
- **Modèle du contrôleur**
- Couplage du spécimen

### 3. Cas tests

- Poutre encastrée
- Structure industrielle

### 4. Conclusions





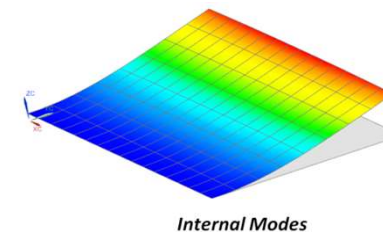
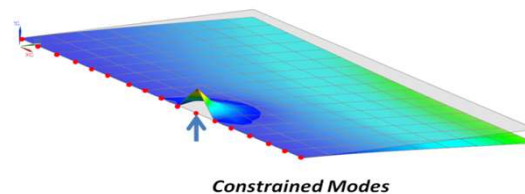
## Modèle réduit couplé au modèle de pot vibrant

Faisant les hypothèses suivantes :

- Un modèle éléments-finis de la structure à tester est disponible
- Les caractéristiques modales sont connues (idéalement avec la structure placées dans ces conditions de test): fréquences, déformées modales et pourcentages d'amortissement modale
- Le recalage du modèle est réalisé

la procédure pour intégrer le spécimen au modèle de pot vibrant est :

- Définition d'un nœud maître rigidement relié aux interfaces de la structure
- Calcul d'un super-élément de type Craig-Bampton : Ddls retenus au niveau du nœud maître (translation verticale et rotation) et nombre de modes internes retenus suffisants (masses effectives cumulées)



### 1. Introduction

### 2. Simulateur

- Principe de fonctionnement
- Modèle EM
- Identification
- Recalage
- Modèle du contrôleur
- **Couplage du spécimen**

### 3. Cas tests

- Poutre encastrée
- Structure industrielle

### 4. Conclusions

## Modèle réduit couplé au modèle de pot vibrant

- Liaison du modèle réduit du spécimen aux degrés de liberté de la table en imposant le respect des conditions de compatibilité et d'équilibre

### 1. Introduction

### 2. Simulateur

- Principe de fonctionnement
- Modèle EM
- Identification
- Recalage
- Modèle du contrôleur
- **Couplage du spécimen**

### 3. Cas tests

- Poutre encastrée
- Structure industrielle

### 4. Conclusions

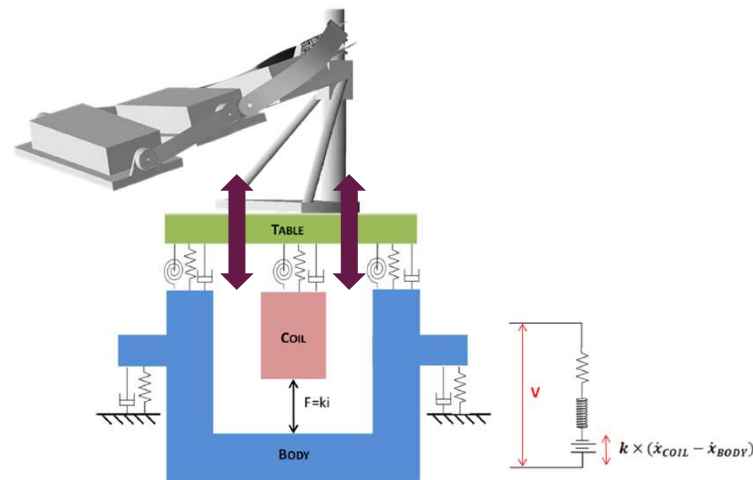
Compatibilité

$$q_{spec_i} = q_{tab_i} \text{ avec } i = 3, 4, 5 \text{ \& } 6$$

Equilibre

$$F_{reac:specimenToShaker} + F_{reac:ShakerToSpecimen} = 0$$

avec  $F_{reac} = \underbrace{\left\{ M_{FI} \times \begin{bmatrix} -\frac{K_{II}}{M_{II}} & -\frac{C_{II}}{M_{II}} \end{bmatrix} \right\}}_C \times \begin{Bmatrix} p \\ \dot{p} \end{Bmatrix} + \underbrace{\left\{ M_{FI} \times \frac{M_{FI}}{M_{II}} \right\}}_D \times \ddot{q}_F$



# Outil de simulation "maison"

Paramètres de contrôle et définition du niveau de consigne

Importation du modèle réduit  
Niveau amortissement

Post-traitement:  
- Filtré  
- temporel

## 1. Introduction

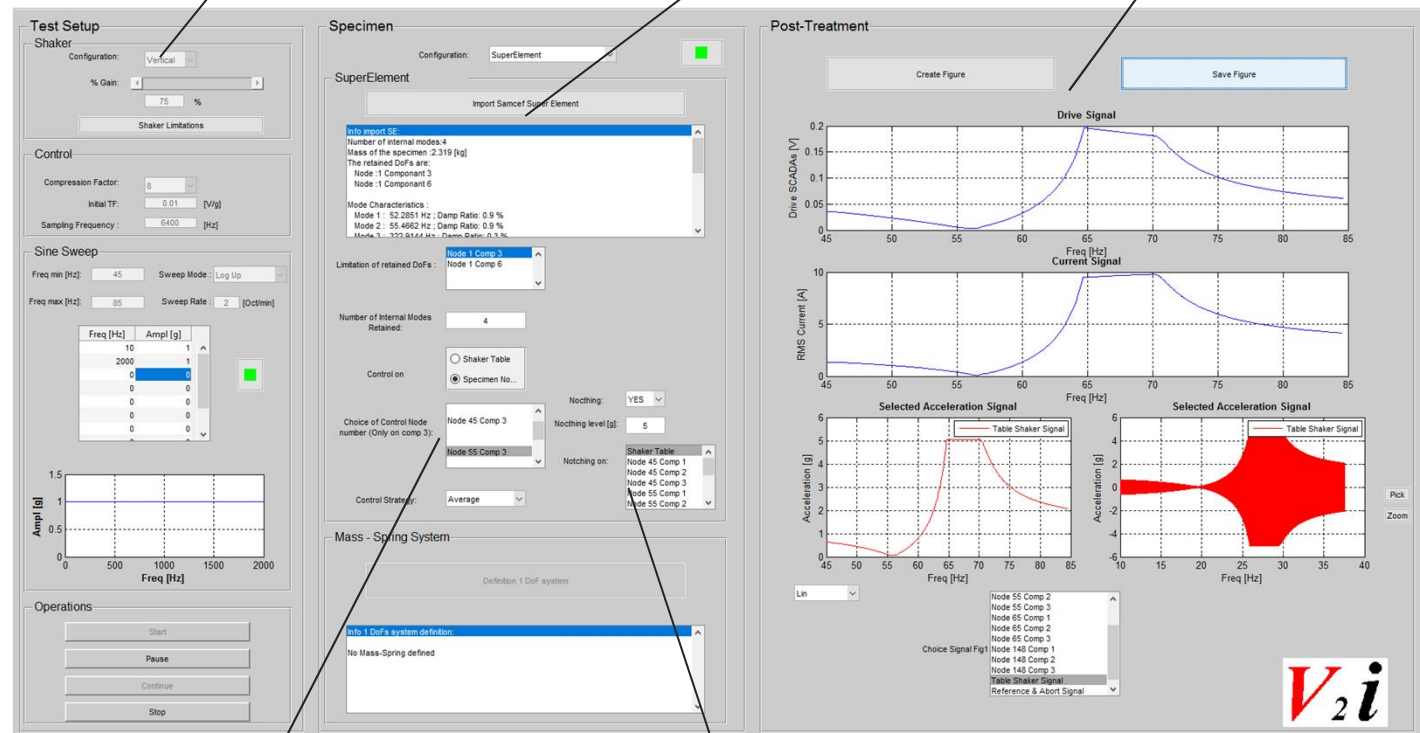
## 2. Simulateur

- Principe de fonctionnement
- Modèle EM
- Identification
- Recalage
- Modèle du contrôleur
- Couplage du spécimen

## 3. Cas tests

- Poutre encastrée
- Structure industrielle

## 4. Conclusions



Stratégie de contrôle:  
- En moyenne  
- Min ou Max

Définition de notching

# Une simple poutre encastrée pour valider la procédure

---

Poutre en acier (30x30x4x4 mm) encastrée sur la tête du pot vibrant

Caractéristiques modales identifiées:

- 0,9% d'amortissement pour les modes 1F
- 0,3% d'amortissement pour les modes 2F

Modèle éléments-finis recalé:

- Éléments de poutre

Deux points de contrôle testés:

- À l'encastrement
- Au centre de la poutre



1. Introduction

2. Simulateur

- Principe de fonctionnement
- Modèle EM
- Identification
- Recalage
- Modèle du contrôleur
- Couplage du spécimen

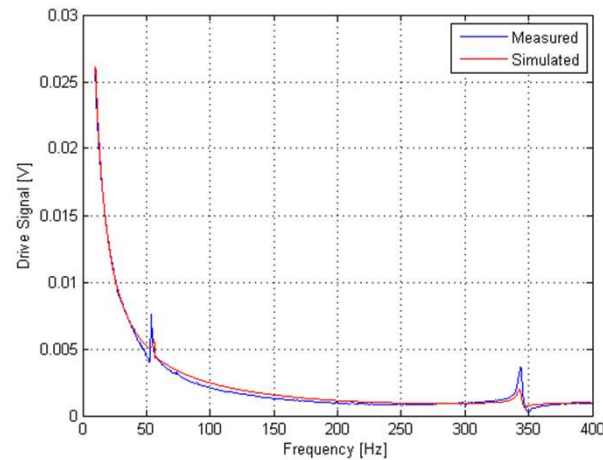
**3. Cas tests**

- **Poutre encastrée**
- Structure industrielle

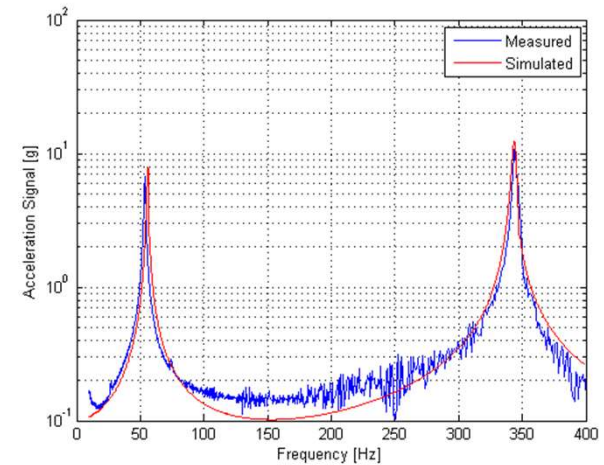
4. Conclusions

# Bonne prédiction du système complet

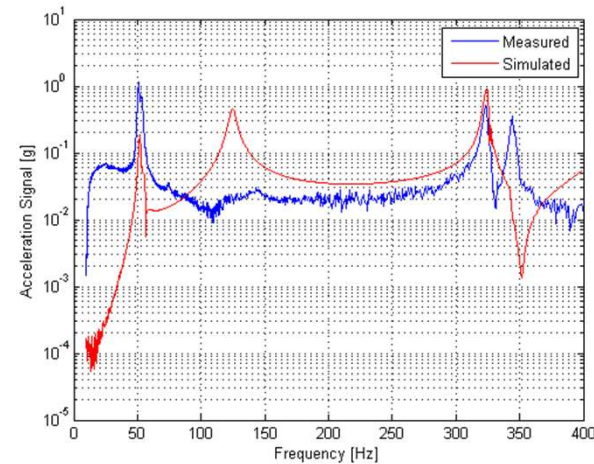
## 1) Point de contrôle à l'encastrement



*Tension Drive*



*Accélération verticale en bout de poutre*



*Accélération transverse en bout de poutre*

1. Introduction

2. Simulateur

- Principe de fonctionnement
- Modèle EM
- Identification
- Recalage
- Modèle du contrôleur
- Couplage du spécimen

3. Cas tests

- **Poutre encastrée**
- Structure industrielle

4. Conclusions

# Difficultés prédites lors du passage d'une anti-résonance

## 2) Point de contrôle au centre de la poutre

- Lors de l'essai, une modification des paramètres de contrôle au cours du balayage ont été nécessaire pour passer l'anti-résonance

### 1. Introduction

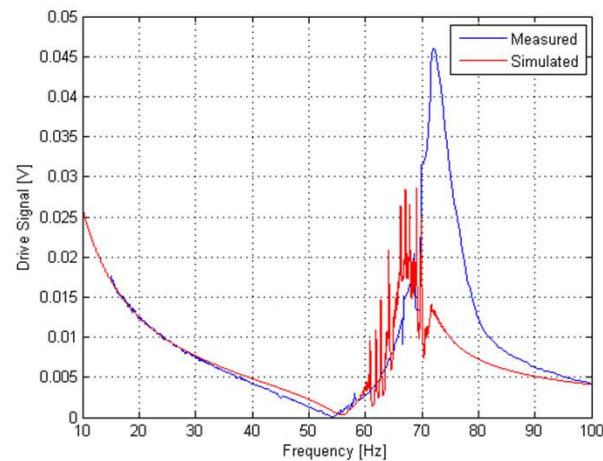
### 2. Simulateur

- Principe de fonctionnement
- Modèle EM
- Identification
- Recalage
- Modèle du contrôleur
- Couplage du spécimen

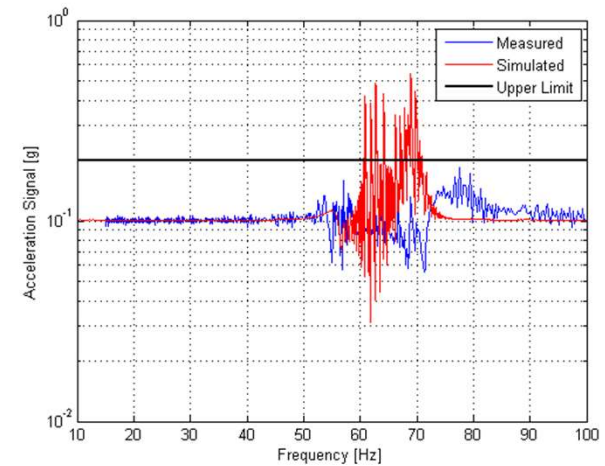
### 3. Cas tests

- **Poutre encastrée**
- Structure industrielle

### 4. Conclusions



Tension Drive



Accélération verticale en bout de poutre

## Des solutions peuvent être testées

### 2) Point de contrôle au centre de la poutre

- Influence des paramètres de contrôle
- Influence de la stratégie de contrôle

#### 1. Introduction

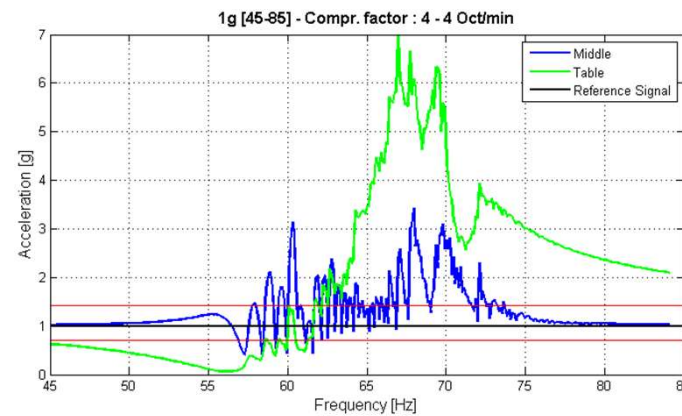
#### 2. Simulateur

- Principe de fonctionnement
- Modèle EM
- Identification
- Recalage
- Modèle du contrôleur
- Couplage du spécimen

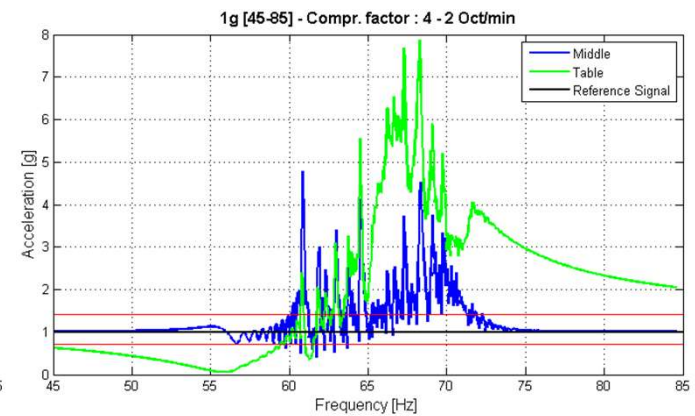
#### 3. Cas tests

- **Poutre encastrée**
- Structure industrielle

#### 4. Conclusions



Comp Factor : 4 – Sweep seed: 4 oct/min



Comp Factor : 4 – Sweep seed: 2 oct/min

Diminution de la vitesse de balayage:  
réduction du battement

## Des solutions peuvent être testées

### 2) Point de contrôle au centre de la poutre

- Influence des paramètres de contrôle
- Influence de la stratégie de contrôle

#### 1. Introduction

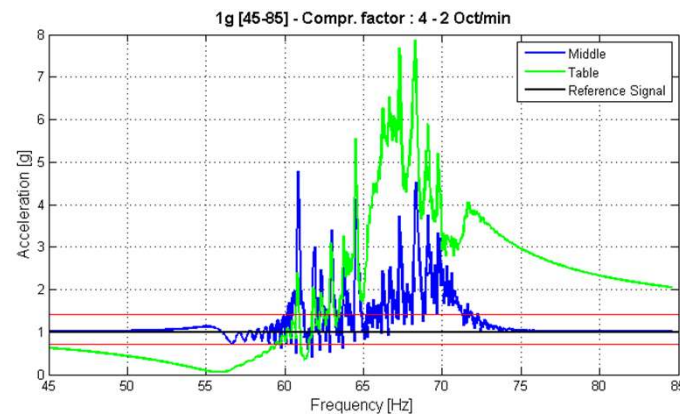
#### 2. Simulateur

- Principe de fonctionnement
- Modèle EM
- Identification
- Recalage
- Modèle du contrôleur
- Couplage du spécimen

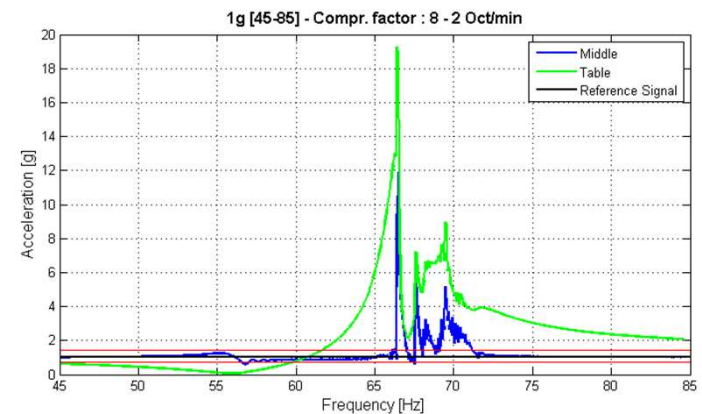
#### 3. Cas tests

- **Poutre encastrée**
- Structure industrielle

#### 4. Conclusions



Comp Factor : 4 – Sweep seed: 2 oct/min



Comp Factor : 8 – Sweep seed: 2 oct/min

Augmentation du facteur de compression:  
meilleure stabilité à proximité de la résonance



## Des solutions peuvent être testées

### 2) Point de contrôle au centre de la poutre

- Influence des paramètres de contrôle
- Influence de la stratégie de contrôle

#### 1. Introduction

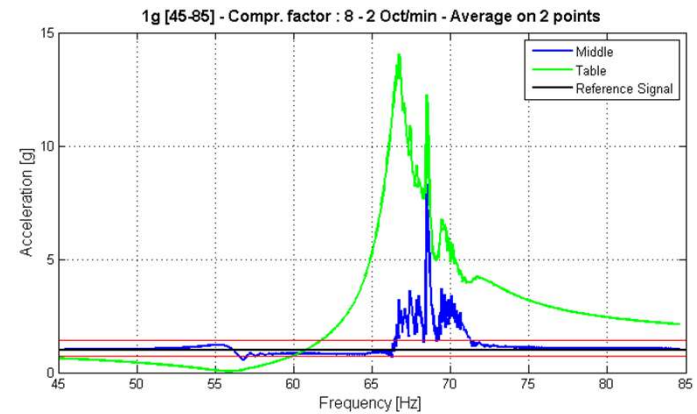
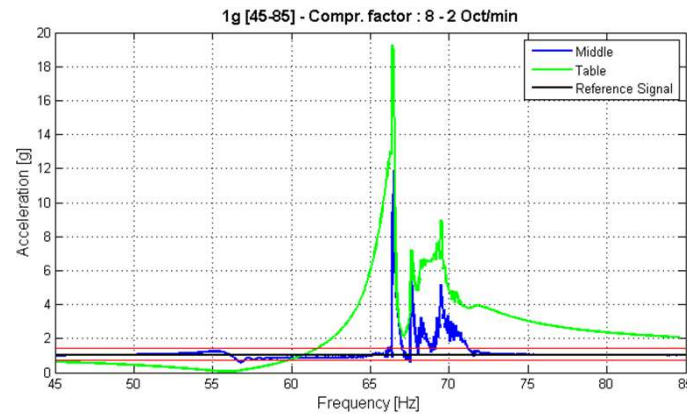
#### 2. Simulateur

- Principe de fonctionnement
- Modèle EM
- Identification
- Recalage
- Modèle du contrôleur
- Couplage du spécimen

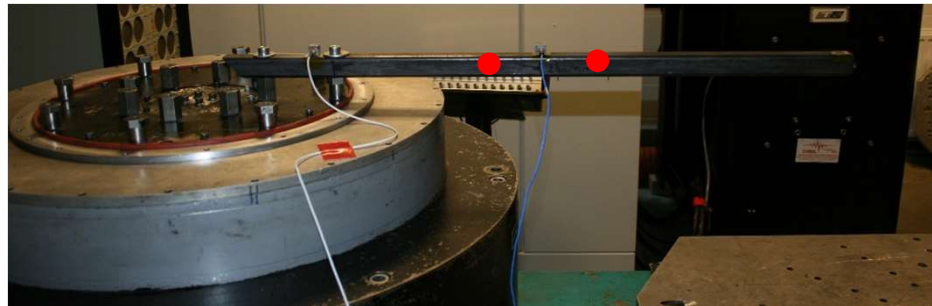
#### 3. Cas tests

- **Poutre encastrée**
- Structure industrielle

#### 4. Conclusions



Moyenne sur deux points : faible apport



## Des solutions peuvent être testées

### 2) Point de contrôle au centre de la poutre

- Influence des paramètres de contrôle
- Influence de la stratégie de contrôle

#### 1. Introduction

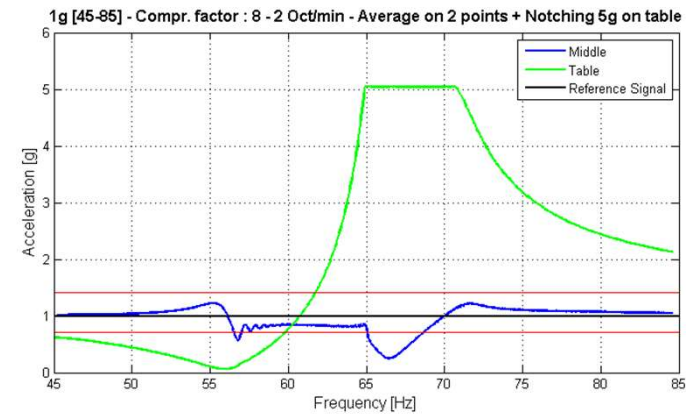
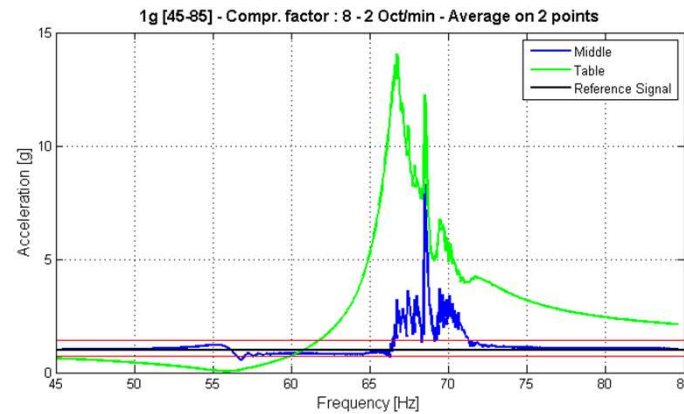
#### 2. Simulateur

- Principe de fonctionnement
- Modèle EM
- Identification
- Recalage
- Modèle du contrôleur
- Couplage du spécimen

#### 3. Cas tests

- **Poutre encastrée**
- Structure industrielle

#### 4. Conclusions



Notching sur l'accélération de la tête du pot vibrant :  
Niveau de consigne non respecté au passage de l'anti-résonance  
mais stable

# L'étude sur une structure industrielle est envisageable

---

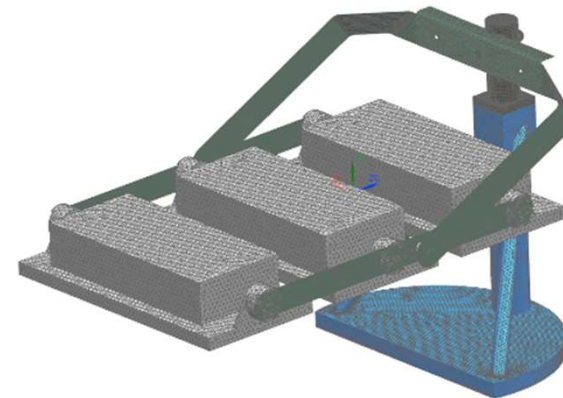
Luminaire conçu et commercialisé par Schröder

Modèle éléments-finis recalé:

- 650 000 dds
- Assemblage par collage de maillage et par corps rigides
- Détermination du pourcentage d'amortissement modale (à l'aide de résultats de balayage sinus)

Test de qualification selon la norme IEC:

- 0,5 g imposé au niveau de la fixation du luminaire à une fréquence correspondant à la première fréquence propre
- Balayage sinus entre 5 et 55 Hz



1. Introduction

2. Simulateur

- Principe de fonctionnement
- Modèle EM
- Identification
- Recalage
- Modèle du contrôleur
- Couplage du spécimen

**3. Cas tests**

- Poutre encastrée
- **Structure industrielle**

4. Conclusions

# L'étude sur une structure industrielle est envisageable

Temps de calcul: 580 s à comparer au 240 s du test physique

Non-linéarité observée vers 40 Hz (mode impliquant l'ouverture d'un assemblage)

## 1. Introduction

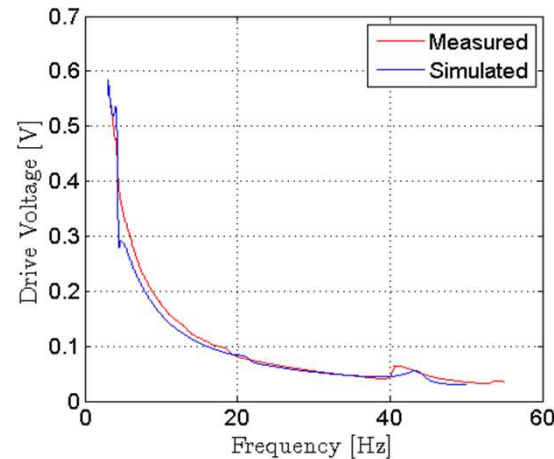
## 2. Simulateur

- Principe de fonctionnement
- Modèle EM
- Identification
- Recalage
- Modèle du contrôleur
- Couplage du spécimen

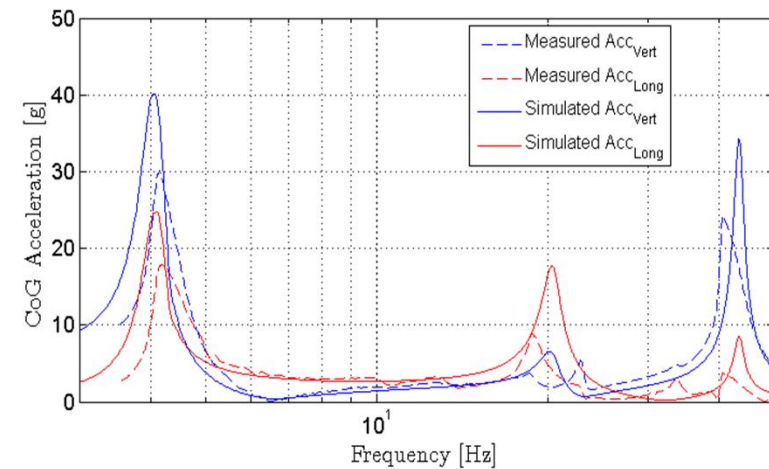
## 3. Cas tests

- Poutre encastrée
- **Structure industrielle**

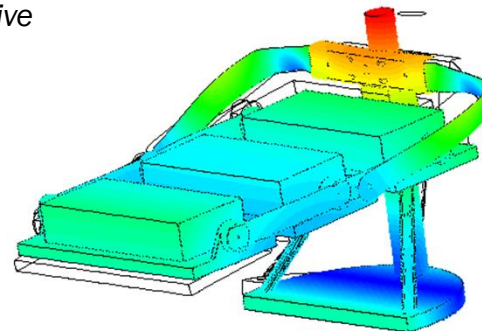
## 4. Conclusions



Tension Drive



Accélération au CdG



Mode - 41 Hz

## Conclusions

---

Toutes les parties constituant le simulateur de test de vibration sont créées et assemblées:

- Modèle à 7 + 1 degrés de liberté pour le modèle électromécanique du pot vibrant
- Modèle du contrôleur fourni par Siemens
- Modèle réduit du spécimen permettant de traiter des structures industrielles (recalage nécessaire)

Des travaux additionnelles sont nécessaires en vue d'améliorer le recalage du modèle de la table glissante

Validation sur deux cas tests: la dynamique du système couplé est correctement prédite

Modification des paramètres de contrôle peut être testées pour trouver des solutions aux possibles difficultés

### 1. Introduction

### 2. Simulateur

- Principe de fonctionnement
- Modèle EM
- Identification
- Recalage
- Modèle du contrôleur
- Couplage du spécimen

### 3. Cas tests

- Poutre encastrée
- Structure industrielle

### 4. Conclusions

**Merci !**

Sébastien HOFFAIT  
R&D Engineer

Tel: +32 42 87 72 90  
Mob: +32 495 61 09 20  
Website: [www.v2i.be](http://www.v2i.be)