



**HAL**  
open science

## **L'excitateur 6-axes de l'Equipex PHARE pour analyser et maîtriser la dynamique de systèmes embarqués**

Simon Chesné, Eric Chatelet, Jarir Mahfoud, Kevin Billon, Franck Legrand,  
Clément Jarroux, Yvon Briend, Régis Dufour

► **To cite this version:**

Simon Chesné, Eric Chatelet, Jarir Mahfoud, Kevin Billon, Franck Legrand, et al.. L'excitateur 6-axes de l'Equipex PHARE pour analyser et maîtriser la dynamique de systèmes embarqués. Congrès Français de Mécanique, CFM 2019, Aug 2019, Brest, France. hal-02949002

**HAL Id: hal-02949002**

**<https://hal.science/hal-02949002>**

Submitted on 18 Dec 2023

**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.

# L'excitateur 6-axes de l'Equipex PHARE pour analyser et maîtriser la dynamique de systèmes embarqués

S. CHESNE<sup>a</sup>, E. CHATELET<sup>a</sup>, J. MAHFOUD<sup>a</sup>, K. BILLON<sup>a</sup>, F. LEGRAND<sup>a</sup>, C. JARROUX<sup>a</sup>, Y. BRIEND<sup>a</sup> et R. DUFOUR<sup>a</sup>

a. Univ. Lyon, CNRS INSA-Lyon, LaMCoS UMR5259, 69621 Villeurbanne, France

## Résumé :

*L'excitateur 6-axes de grandes capacités de l'Equipex PHARE<sup>1</sup> est ici mis en valeur grâce à trois applications expérimentales liées principalement aux domaines du transport aéronautique et de l'énergie.*

(i) *Absorbeur de vibration hybride d'hélicoptère. Cette recherche montre l'évolution d'un système passif de contrôle des vibrations développé par Airbus Helicopters (un DVA de 10kg à amortissement interne réglable) en un système hybride. L'hybridation associe une boucle active de rétroaction directement sur l'absorbeur passif afin d'assurer performances et stabilités (systèmes dit « fail-safe »). Le transducteur électromagnétique et les lois de contrôle spécifiquement développées ont pu être testés et validés expérimentalement à l'échelle 1 sur l'excitateur 6-axes avant son opérationnalité sur un hélicoptère.*

(ii) *Dynamique non linéaire de rotors embarqués montés sur paliers magnétiques actifs (PMA). L'objectif du projet est d'étudier le comportement d'un rotor lors d'une phase transitoire faisant intervenir des contacts non linéaires rotor / stator au niveau des paliers atterrisseurs, alors que le contrôle des paliers magnétiques reste actif afin d'évaluer la stabilité du système. La cause première de l'initiation d'un contact rotor / stator était un mouvement brutal de la base. Les applications ciblées par l'entreprise BHGE sont les machines tournantes embarquées de type FPSO, ou soumises aux séismes. Plusieurs types d'excitations ont été appliquées (chocs, harmonique, sismique) sur un rotor embarqué directement sur l'excitateur. En parallèle, un modèle de comportement a été développé, la phase expérimentale a permis de le valider.*

*BHGE: Baker Hughes a company of GE*

*FPSO: Floating Production Storage and Offloading*

(iii) *Essais aggravés pour machines tournantes. Il s'agit de développer un modèle de comportement et d'éprouver de nouvelles techniques d'essais pour qualifier l'intégrité de machines tournantes sous sollicitations dynamiques extrêmes comme les séismes, les chocs. Un modèle de dynamique des rotors est actuellement développé pour prévoir le plus précisément possible les contraintes subies dues à l'impact de leurs conditions opératoires. En parallèle, un prototype de rotor académique et des protocoles d'essais utilisant l'excitateur 6-axes sont en cours de réalisation. Les*

---

<sup>1</sup> [www.ec-lyon.fr/campus/vie-campus/grands-projets/equipex-phare](http://www.ec-lyon.fr/campus/vie-campus/grands-projets/equipex-phare)

travaux de recherche sont menés dans le cadre du Labcom ANR-PME AdViTAM ANR-16-LCVI-0006, laboratoire commun au LaMCoS-INSA Lyon et à la PME AVNIR.

## **Abstract :**

*The 6-axis shaker of the Equipex PHARE (ANR-10-EQPX-43) of the cluster of Lyon (Ecole Centrale Lyon, INSA Lyon, ENS Lyon) has 6 real-time pilots able to reproduce various combinations of solicitations around the 3 axes (translations and rotations) with exceptional levels in terms of displacement, speed and acceleration in a frequency range up to 250 Hertz*

*This equipment offers new prospects for Accelerated Stress Testing mono and / or multiaxial tests of on board structures with a maximum mass of 450 kg in a range [0-250] Hz with sine, random, shock excitations or replication of signals previously recorded and with maximum levels of acceleration of 10g, displacement in translations of +/- 50 mm and rotation of +/- 4 °.*

*This paper presents this equipment and its abilities through various projects.*

**Mots clefs : Vibrations, Expérimentations, excitateur mult-axes, Equipex Phare**

## **1 L'excitateur 6-axes de l'Equipex PHARE**

L'excitateur 6 axes est un des trois bancs d'essais de l'Equipex PHARE (Plate-forme machines tournantes pour la maîtrise des Risques Environnementaux, ANR-10-EQPX-0043, programme regroupant principalement par les UMR CNRS Lyonnaises LTDS, LMFA et LaMCoS). Installé à INSA Lyon, cet excitateur multiaxial hydraulique fabriqué par Team Co, possède de grandes capacités. Avec une force dynamique de 62 kN sur la gamme de fréquence 0-250 Hz et des débattements pouvant atteindre +/- 5 cm en translation et +/- 5° en rotation, l'excitateur peut embarquer une masse de 450kg. Son objectif principal est de tester l'intégrité de structures soumises à des sollicitations par la base. Leurs accélérations, en s'opposant à la gravité, modifient les forces de restitution des paliers hydrodynamiques. Leurs fréquences enrichissent l'environnement vibratoire, et peuvent dérégler le fonctionnement des paliers magnétiques actifs. Leurs rotations conduisent à des instabilités latérales des lignes d'arbre car les dotent de coefficients périodiques. Enfin, leurs niveaux d'amplitude fragilisent la robustesse de la chaîne Observabilité – Algorithmie – Actionnement des machines et des structures intelligentes. Les trois recherches présentées dans cette communication mettent en œuvre l'excitation 6-axes pour caler tout d'abord les paramètres d'un absorbeur de vibration hybride d'hélicoptère, puis quantifier les efforts dans les paliers atterrisseurs d'un rotor monté sur paliers magnétiques actifs et enfin présenter un modèle cinématique à 6 degrés de liberté utile au pilotage de l'excitateur pour maîtriser le positionnement et l'orientation de l'axe de rotation à imposer.

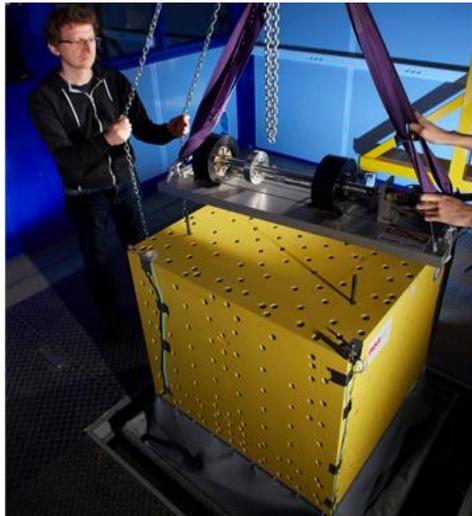


Fig. 1. Excitateur 6-axe de l'Equipex PHARE

## 2 Cas d'étude

### 2.1 Absorbeur hybride pour hélicoptères

Cette étude, associée à l'Equipex PHARE, a permis le développement d'un nouveau transducteur électromagnétique et sa loi de commande associée. Dédié aux contrôles des vibrations d'une structure type hélicoptère, le transducteur a été conçu dans le cadre du projet CoRoS en partenariat avec Airbus Helicopter. Son objectif est d'augmenter l'efficacité d'un absorbeur de vibration traditionnel à amortissement passif en contrôlant activement sa réponse dynamique. Le contrôleur associé, dit à double boucle (Dual Loop Controller) ainsi que cet amortisseur hybride (Hybrid Mass Damper) sont présentés et discutés. Le but étant de combiner le meilleur des deux technologies en augmentant activement les performances du dispositif passif. Basé sur un système passif optimisé, le système résultant est sécurisé en cas de défaillance électrique.

#### 2.1.1 Loi de contrôle et absorbeur hybride

Considérons une structure initiale, à contrôler, simplifiée à un système à un degré de liberté (Fig.2). Un TMD standard optimisé selon la loi de Den Hartog [1] est associé à cette structure. La force de contrôle est introduite entre les deux masses du fait du choix de la transduction électromagnétique. Le concept de ce contrôleur à double boucle, présenté brièvement dans [2], consiste à combiner deux lois de commande utilisant deux entrées différentes. Les deux boucles sont parallèles (Fig 2) et agissent sur le même transducteur. Contrairement à de nombreux contrôleurs à double boucle, il n'y a pas de boucle «interne» ou «externe» et aucun accéléromètre n'est nécessaire sur le TMD pour mesurer son accélération ou sa vitesse absolue. Ces deux boucles permettent d'utiliser le TMD comme une AMD (Active Mass Damper) sans les problèmes inhérents de stabilité. La théorie de ce contrôleur est abondamment décrite dans [3].

Le principe de l'absorbeur ainsi que le prototype final sont illustrés en Fig 2. Fondamentalement, il s'agit d'un système à un degré de liberté mécanique conçu sous la forme d'un TMD électromagnétique. La masse en mouvement est guidée par deux ensembles de membranes flexibles. Deux aimants sont fixés aux extrémités de la masse en mouvement. Chaque aimant est entouré d'une bobine. Un

ensemble est dédié au comportement passif du TMD, l'autre au comportement actif. Ce dispositif s'est avéré parfaitement adapté pour un contrôleur à double boucles.

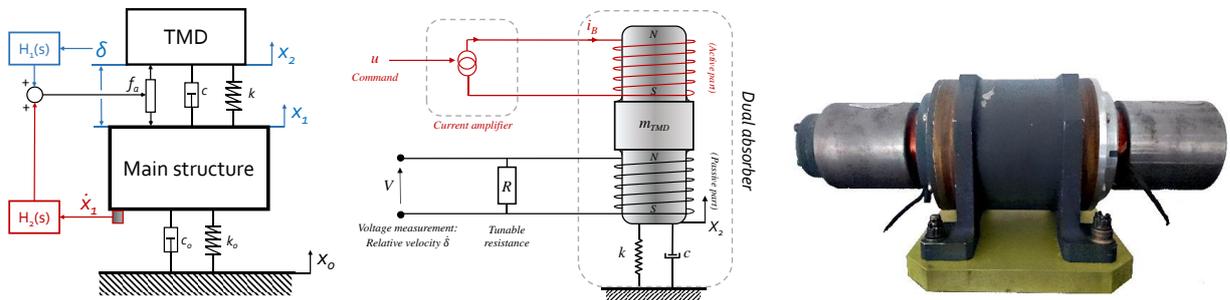


Fig. 2 a. Modèle IDDL d'une structure et son absorber b Schéma multiphysique de l'absorbeur hybride, c Prototype final.

### 2.1.2 Validation en laboratoire

L'absorbeur pesant plus de 10kg, une masse de 150 kg suspendue par des lames flexibles est utilisée comme structure principale à contrôler. La rigidité est assurée par les lames travaillant en flexion (voir fig. 3). Sa fréquence de résonance est réglée de manière expérimentale autour de 16Hz en testant diverses pales de largeurs et de raideurs différentes. Les lames sont fabriquées dans un acier spécifique afin de résister aux fortes contraintes.

L'ensemble du système est posé sur l'excitateur 6 axes de l'Equipex PHARE. Le mouvement imposé est un mouvement sinusoïdal de translation de 100 micromètres C-C dans une bande de fréquence de [5-25] Hz.



Fig. 3 Dispositif expérimental installé sur l'Equipex PHARE.

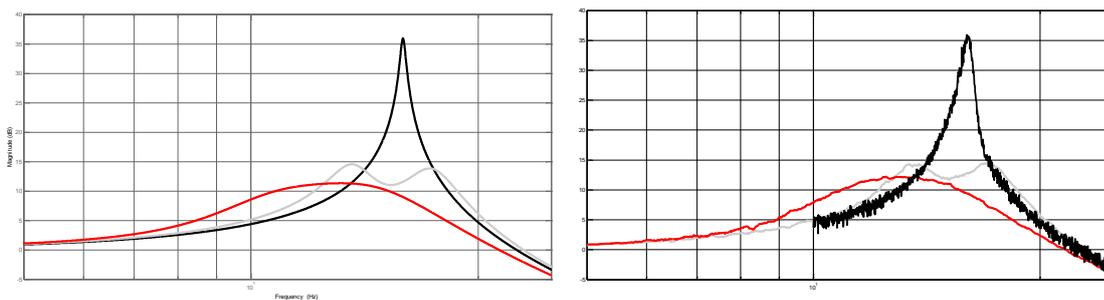


Fig. 4 Transmissibilités, gauche: simulations, droite: mesures. Noir : Sans TMD, gris : avec TMD, rouge : avec HMD.

Les figures 4 montrent les performances de ce type de systèmes. On y observe (simulation et expérimentations) la transmissibilité entre le déplacement imposé de l'excitateur et le déplacement résultant sur la masse à contrôler. Le système passif montre déjà de très bonnes atténuations. L'hybridation apporte un amortissement supplémentaire sur un système déjà très performant. Cette expérimentation en laboratoire montre la faisabilité, la stabilité et l'efficacité de la loi de commande proposée et de son transducteur double. La structure, massive a permis de valider un système à l'échelle 1 et d'accéder rapidement à une expérimentation in situ, sur hélicoptère.

### 2.1.3 Essais sur hélicoptère

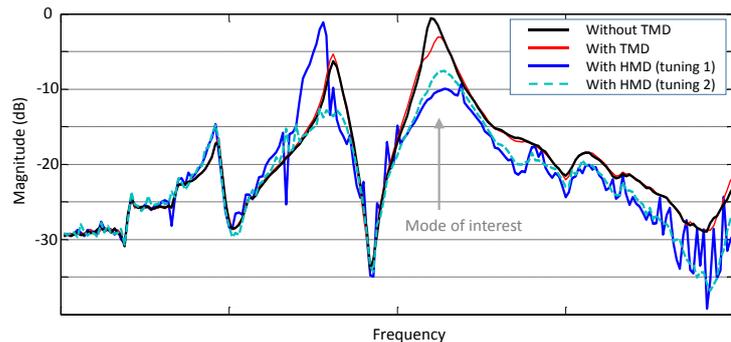


Fig. 5 a. AH225 utilisé pour les essais b. Fonctions de transferts normalisées sans et avec systèmes de contrôle.

On illustre ici l'efficacité du dispositif proposé sur une structure réelle. Pour des raisons de confidentialité, toutes les données ne peuvent pas être affichées. Cette partie ne donne qu'un aperçu des applications potentielles. Un hélicoptère Airbus AH225 a été mis à disposition pour les tests. C'est une structure de 11 tonnes qui a été suspendue par le rotor principal par une liaison souple. La figure 5 montre les performances du système à partir d'une fonction de réponse en fréquence, avec ou sans TMD passif et avec HMD. Deux réglages des boucles de contrôle ont été testés avec succès. (Plus de détails sont donnés dans [3]).

## 2.2 Dynamique non linéaire de rotors embarqués

L'objectif du projet est d'étudier le comportement d'une machine tournante montée sur PMAs, lors d'une phase transitoire faisant intervenir des contacts rotor / stator au niveau des paliers atterrisseurs alors que le contrôle des paliers magnétiques reste actif afin d'évaluer la stabilité du système. Ce comportement doit être étudié expérimentalement afin de valider la capacité des paliers à maintenir le système stable, et numériquement, afin d'avoir un outil fiable de conception et de dimensionnement de machines futures.

Pour la partie expérimentale, et comme la capacité dynamique de l'excitateur est limitée, nous avons conçu un banc d'essai dont la densité dynamique correspond à une turbomachine avec 2 modes rigide dans sa plage de vitesse de fonctionnement (Fig. 6).

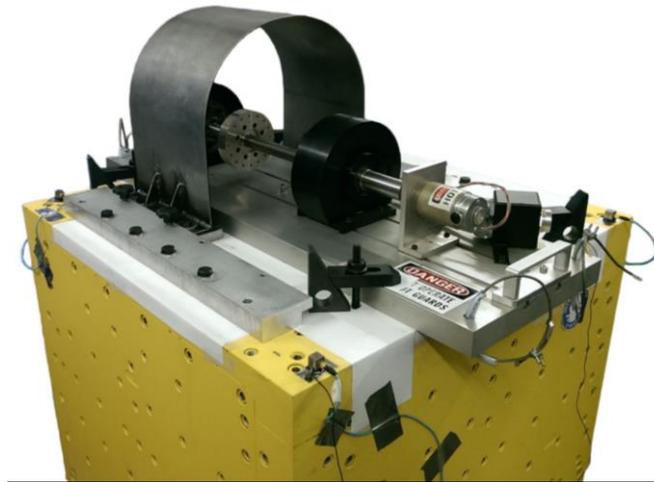


Fig.6 Dispositif expérimental

Le modèle numérique a été développé en parallèle en prenant en compte les différents phénomènes dus à l'excitation par la base, aux efforts non linéaires générés lors du contact rotor/stator, aux forces de contrôle générées par les PMA ainsi que le balourd. Toutes les grandeurs qui dépendent du temps, de la fréquence ou présentant de nonlinéarités sont considérées comme force de restitution (Fig. 7).

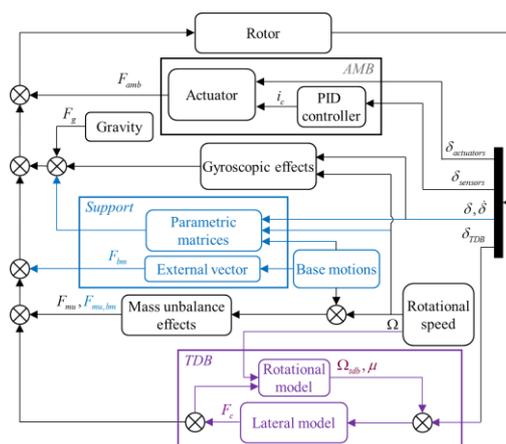


Fig.7 Approche de modélisation

Plusieurs configurations d'excitation ont été réalisées (Chocs, Harmoniques, Aléatoires) et ceci à l'arrêt et pour différentes vitesses dans la plage de vitesse de fonctionnement de la machine.

Les niveaux de sollicitations appliqués expérimentalement ont été mesurés pour être appliqués sur le modèle numérique. Seuls les résultats obtenus (déplacements et forces de contrôle) dans la configuration excitation harmonique 20 Hz d'amplitude 1.1 G à 6000 tr/min sont présentés ici. On constate sur ces résultats (Fig. 8) que :

- 1- les PMA étaient capables de maintenir le système stable pendant et après l'application de la sollicitation ;
- 2- le modèle décrit d'une façon assez fidèle le comportement mesuré à la fois sur les niveaux et les fréquences observés ;
- 3- pas de saturation des forces de contrôle pendant et après l'application de l'excitation.

Les mêmes tendances ont été observées pour les différentes configurations de sollicitation. Plus de détails sont donnés dans [4,5,6].

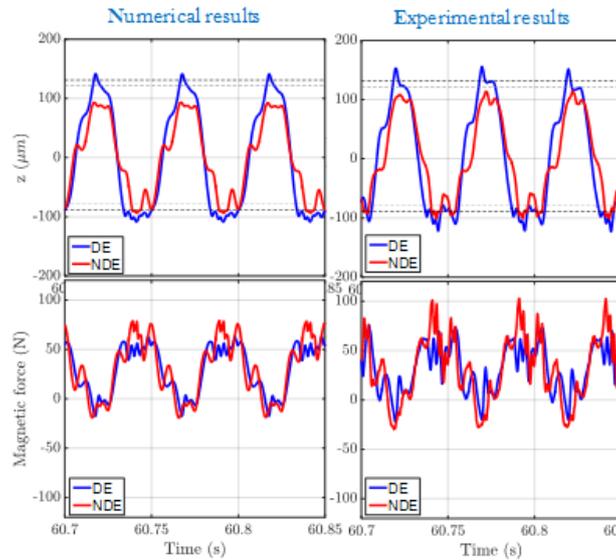


Fig.8 Déplacements et efforts, sollicitation harmonique

## 2.3 Essais aggravés pour machines tournantes

Un des axes principaux autour de la mise en place d'essais aggravés appliqués à la machine tournante concerne l'aspect multi-axial des excitations pouvant être générées par l'excitateur 6 axes. En effet, si les normes de qualifications d'équipement actuelles sont plutôt restreintes aux sollicitations mono-axiales, il semble raisonnable de penser que l'imposition de contraintes simultanées selon différents axes soit responsable de l'apparition plus précoce de modes de défaillance. Dans le cadre de la machine tournante embarquée, il s'agit donc d'être capable de réaliser des mouvements combinés en translation et rotation, pour différentes fréquences, amplitudes et phases, avec des profils d'excitation de type sinus, choc ou aléatoire. Ce pilotage représente en soit un important défi. Et pour le mettre en place de façon simple et efficace, un modèle cinématique à six degrés de liberté (ddls) de l'excitateur considéré comme un solide rigide a été développé (Fig.9).

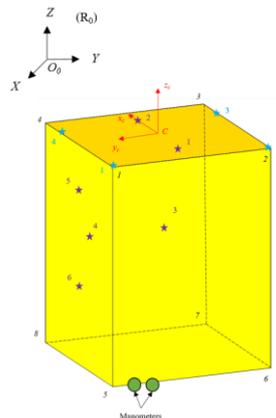
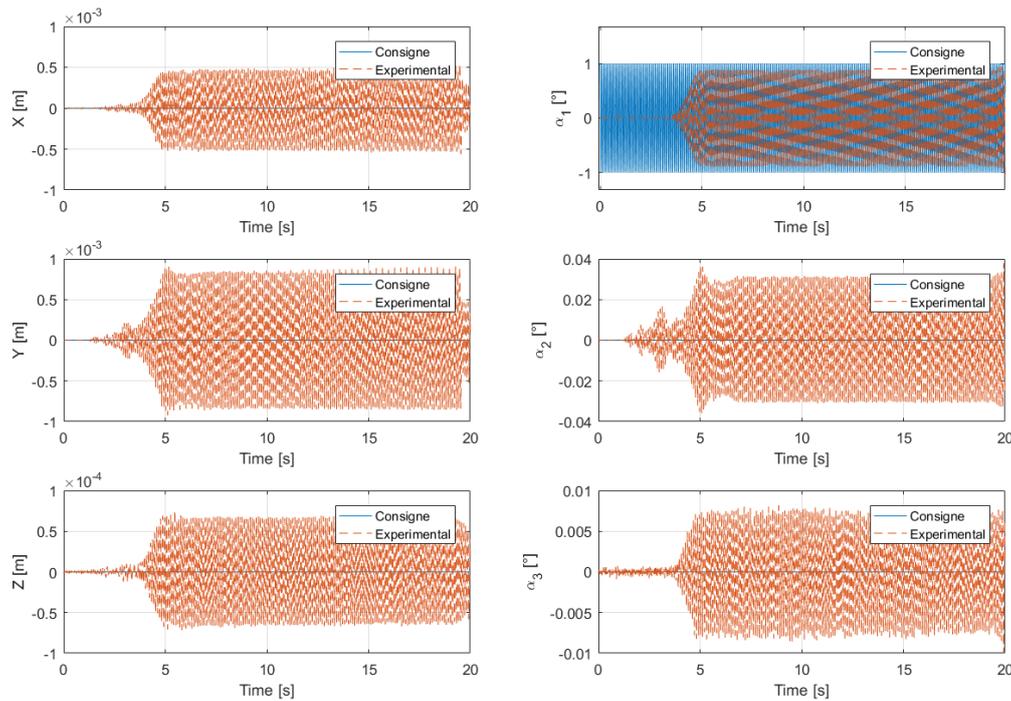


Fig.9 Modèle cinématique de l'excitateur

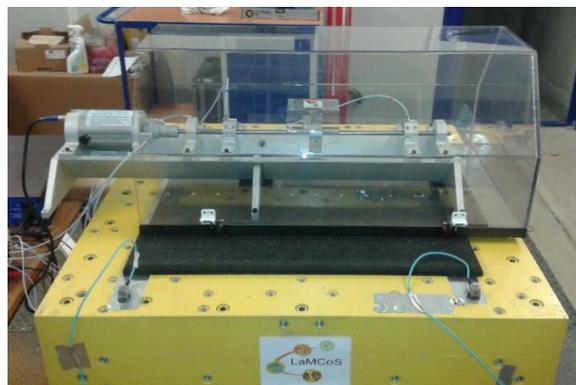
A partir de ce modèle cinématique, il est possible de définir n'importe quel mouvement théorique de l'excitateur, dans la limite de ses capacités réelles (en terme de débattement, charge embarquée, plage de fréquence, accélération max, ...). Les accélérations associées à ce mouvement sont ensuite déduites par dérivation temporelle et repassées dans le repère lié au solide rigide afin de générer les accélérographes qui vont servir de consignes pour le logiciel de pilotage.

Une fois le mouvement réel reproduit par l'ensemble de trois paires de vérins hydrauliques, il est possible de le caractériser de manière précise en résolvant un problème de cinématique inverse. Ce dernier permet de retrouver à partir des accélérations mesurées expérimentalement sur l'excitateur lors du mouvement l'évolution temporelle des six ddls. Cette étape est significative car elle fournit de manière détaillée l'erreur commise entre le mouvement théorique et le mouvement réel. Par exemple, pour un mouvement théorique de rotation mono-axe sinusoïdale d'amplitude  $1^\circ$  et de fréquence 10 Hz avec un centre instantané de rotation fixe passant par le centre C de l'excitateur, on sait que le mouvement réel est en fait composée d'une rotation d'environ  $0,87^\circ$  avec notamment des mouvements additionnels de translation de l'ordre de 1 mm dans le plan horizontal (C,xc,yc) (Fig. 10).



**Fig.10** 6 ddls réels de l'excitateur pour un mouvement théorique de rotation mono-axe sinusoïdale pur

La prochaine étape du projet consiste alors à reproduire ce processus de pilotage et de résolution de problème de cinématique inverse sur des mouvements théoriques multiaxiaux, et d'étudier le comportement dynamique de flexion/torsion/axial d'un rotor embarqué (Fig. 11), et ce pour des sollicitations augmentées de manière graduelle jusqu'à l'obtention d'un mode de défaillance (de type touche rotor-stator, plastification de l'arbre, apparition de fissure, ...).



**Fig.11** Exemple de rotor embarqué sur l'excitateur 6 axes

### 3 Conclusions et futurs projets

Les recherches présentées ici montrent une partie des potentialités de l'excitateur 6 axes. Son pilotage actuel est capable de générer des excitations sinus ou à larges bandes fréquentielles, des chocs mais aussi de répliquer des signaux enregistrés. De forme cubique sa plateforme peut accueillir plusieurs structures pour des essais de reproductibilité et d'analyse des dispersions dues à la fabrication. Sans opération de démontage/remontage, il est aussi possible d'effectuer des essais unidirectionnels séquentiels ou simultanés, notamment pour être force de propositions pour des normes multidirectionnelles dans la cas d'essais personnalisés ou aggravés. La force hydraulique de cet excitateur lui confère une grande endurance pour les essais de fatigue. Mais ce sont surtout les capacités de grands débattements qui intéressent les recherches du LaMCoS pour exhiber les phénomènes non linéaires et mettre à l'épreuve les modèles de prévisions du comportement dynamique et les algorithmes des lois de contrôle.

### Remerciements

L'Equipex a été financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) sous la convention ANR-10-EQPX-43.



### Références

- [1] J. DenHartog, Mechanical Vibrations, 4th ed., Mc Graw-Hill, New York, 1956.
- [2] A. Preumont, K. Seto, Active Control of Structures, John Wiley and sons, West Sussex, United Kingdom, 2008.
- [3] S. Chesné, G. Inquieté, P. Cranga (Airbus Helicopter), F. Legrand, B. Petitjean, Innovative Hybrid Mass Damper for Dual-Loop Controller Mechanical Systems and Signal Processing, Elsevier, 2019, 115, pp.514 – 523
- [4] C. Jarroux, R. Dufour, J. Mahfoud, B. Defoy, T. Alban ; A. Delgado, Touchdown bearing models for rotor-AMB systems, Journal of Sound and Vibration, 440, 51-69, 2019
- [5] C. Jarroux, 2017, "Prédiction du comportement dynamique d'une turbomachine supportée par Paliers Magnétiques Actifs durant un événement critique", Thèse CIFRE avec la société GE Oil & Gas.
- [6] C. Jarroux, J. Mahfoud, R. Dufour, F. Legrand, B. Defoy, T. Alban, 2018, "Dynamic behavior of a rotor-AMB system due to strong base motions", 10th IFToMM International Conference on Rotor Dynamics. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-99270-9\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99270-9_24)