

LABORATOIRE

Essais multi-axiaux aggravés pour la qualification des équipements embarqués

Avnir Engineering et le LaMCoS de l'Insa Lyon ont monté un laboratoire commun en octobre 2017, nommé AdViTAM pour Advanced Vibration Tests for the Analysis of rotating Machines (ANR-16-LCV1-0006). AdViTAM a reçu du programme Labcom ANR-PME un financement pour ses trois premières années d'existence et entre maintenant dans une phase de consolidation, de pérennisation et de valorisation des travaux.

Un grand nombre de secteurs industriels a aujourd'hui recours aux machines tournantes, tels que les transports terrestres et maritimes, l'aéronautique, le spatial ou encore l'énergie. Lorsque ces machines tournantes sont embarquées, elles subissent des sollicitations provenant des mouvements de leur base. C'est notamment le cas des turbomoteurs d'avion lors des mouvements de l'aile pendant le passage de turbulence ou lors d'atterrissages, ou de la turbopompe dans le domaine spatial lors du décollage du lanceur.

Le développement des systèmes embarqués a en outre tendance à croître en raison d'un besoin de portabilité des systèmes, contraignant les constructeurs à faire fonctionner leurs machines sur des infrastructures mobiles (hydroliennes, turbocompresseurs automobiles...) et à des vitesses de fonctionnement élevées où se situent les hauts rendements énergétiques.

Les mouvements par la base subis par ces machines entraînent des comportements dynamiques parfois dangereux, comme les phénomènes de résonance et d'instabilité, pouvant générer l'apparition de défauts voire menacer l'intégrité des structures.

L'INTÉRÊT DES ESSAIS VIBRATOIRES MULTI-AXIAUX

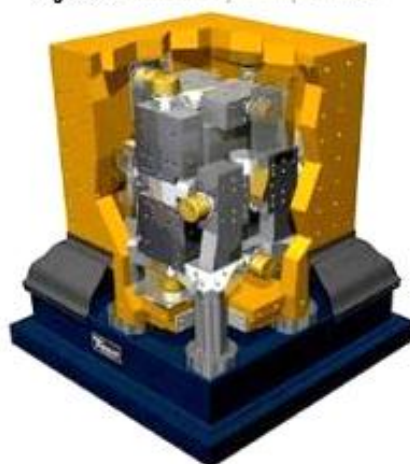
Lors de la conception des machines tournantes, deux approches complémentaires sont ainsi mises en œuvre pour améliorer leur fiabilité : la simulation numérique et les essais. D'un point

de vue numérique, on observe une croissance des travaux sur les rotors embarqués ces dernières années mais des lacunes restent à combler, notamment lorsqu'il s'agit de sollicitations sévères de la base induisant des comportements non-linéaires. Au niveau des essais, ceux-ci sont généralement réalisés sur des structures complètes ou des sous-ensembles, mais peu sur les rotors isolés. Ils sont, en outre, majoritairement restreints à des excitations mono-axiales, ce qui n'est pas représentatif des conditions réelles d'excitation des systèmes embarqués, qui sont multi-axiales.

C'est dans ce contexte qu'a été créé le laboratoire commun AdViTAM dont l'objectif est de définir et proposer des essais aggravés pour qualifier l'intégrité des machines tournantes et des structures soumises par la base à des sollicitations dynamiques extrêmes. Les nouvelles méthodologies basées sur des modèles et des techniques expérimentales doivent aider à la conception de nouvelles architectures conciliant l'augmentation des performances, la réduction des nuisances, la garantie d'intégrité des machines tournantes et avant tout la sécurité des usagers.

AdViTAM allie Avnir Engineering, une entreprise innovante qui possède une expérience reconnue dans la conduite des essais pilotés pour les domaines de l'aéronautique-spatial-défense et le LaMCoS qui dispose d'une grande expertise dans le domaine de la dynamique des machines. Ce laboratoire commun s'appuie sur l'excitateur

Figure 1 : Excitateur hydraulique 6-axes



hydraulique 6 axes de l'Equipex PHARE (ANR-10-EQPX-43), moyen d'essai vibratoire unique dans la recherche publique, dont s'est doté le LaMCoS, offrant une force de 62kN en dynamique sur une plage fréquentielle de 0 à 250Hz (figure 1).

Pour les ensembles mécaniques, la plupart des normes spécifient une succession d'essais mono-axiaux qui ont deux inconvénients majeurs. Dans leurs conditions opérationnelles, les équipements embarqués vont subir des sollicitations qui sont par nature multi-axiales. Or la qualification des équipements en mono-axe ne permet pas d'observer l'influence des couplages entre les axes et risque ainsi de cacher des endommagements pouvant se produire dans les conditions réelles de vie du produit. C'est notamment le cas des pièces avec jeux ou des équipements emportant du fluide.

Aussi, les qualifications avec des sollicitations mono-axiales conduisent à augmenter les critères de sécurité dans le dimensionnement des structures. En effet, les contraintes maximales à appliquer sur chaque axe sont surestimées par rapport aux contraintes vues réellement par la structure en opération, afin de compenser la perte de couplage entre les axes. Ceci entraîne un surdimensionnement des structures pouvant être critique

dans les domaines avec un objectif de masse (aéronautique ou spatial notamment).

Les essais vibratoires multi-axiaux présentent donc un intérêt majeur : le LabCom AdViTAM s'est appuyé sur l'excitateur hydraulique 6 axes de l'Equipex Phare afin de mener des campagnes d'essais multi-axiales.

EXEMPLE D'APPLICATION SUR ROTOR EMBARQUÉ

Un des objectifs étant d'allier des possibilités de simulation dynamique des équipements embarqués au potentiel d'essais offert par l'excitateur 6 axes, un banc d'essai de rotor monté sur palier hydrodynamique a été conçu. Présenté à la figure 2, il est composé d'un arbre en acier, de deux disques, de deux paliers hydrodynamiques, d'un accouplement flexible et d'un moteur électrique à courant continu. Le moteur et les paliers hydrodynamiques sont montés sur une plaque considérée infiniment rigide et le tout rigidement arrimé sur la face supérieure de l'excitateur.

Pour avoir accès à la dynamique de l'arbre, le rotor est instrumenté avec plusieurs types de capteurs. On s'intéressera dans la suite aux deux plans de mesures radiales composés chacun de deux capteurs de proximité à courant de Foucault pour tracer les orbites de l'arbre.

Les essais vibratoires multi-axiaux présentent donc un intérêt majeur : le LabCom AdViTAM s'est appuyé sur l'excitateur hydraulique 6 axes de l'Equipex Phare afin de mener des campagnes d'essais multi-axiales.

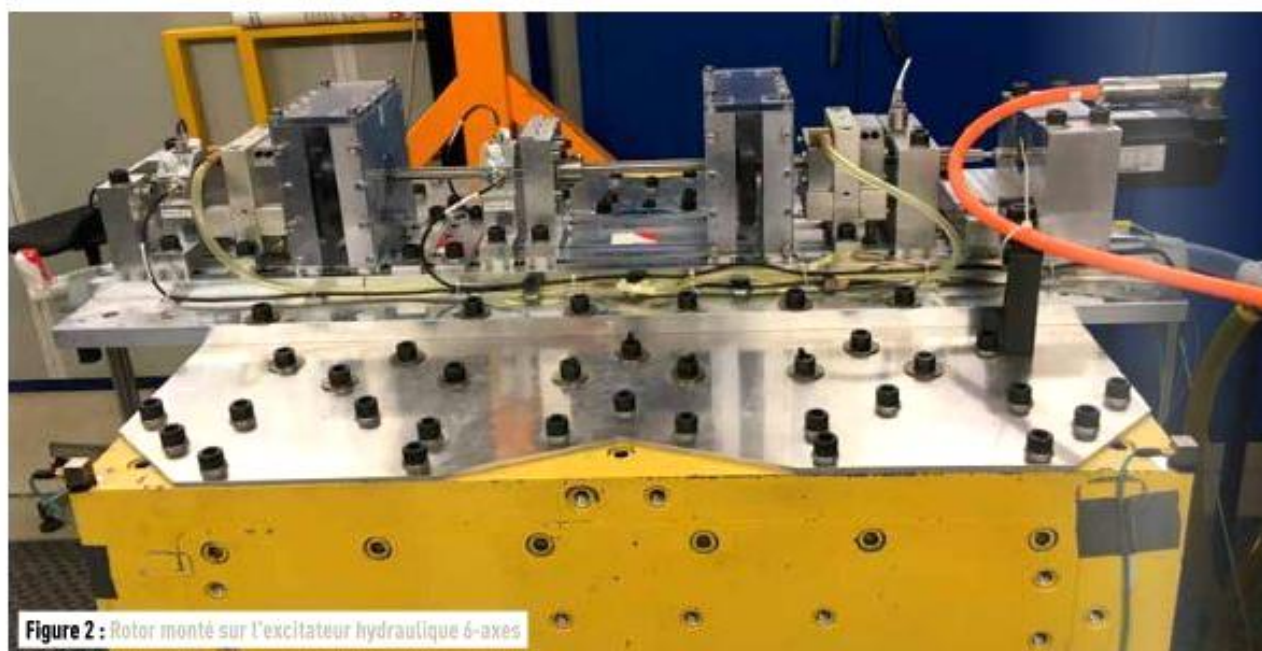


Figure 2 : Rotor monté sur l'excitateur hydraulique 6-axes

Dans sa version linéarisée, le modèle a été validé par des essais en base mobile. La simulation numérique de la dynamique du rotor a ainsi pu être démontrée en termes d'orbites et de spectres complets.

Afin d'établir des comparaisons calcul/mesure, ce banc d'essais a été modélisé tout d'abord dans une version linéarisée autour de la position d'équilibre statique (pour des sollicitations par la base à des niveaux d'accélération raisonnables), puis par l'intégration de lois non linéaires pour la corrélation dans des cas d'essais dits aggravés où les niveaux de sollicitations par la base sont augmentés progressivement. Dans sa version linéarisée, le modèle a été validé par des essais en base mobile avec des mouvements de translations et rotations multi-axiales de type harmonique, aléatoire et sinus balayé. La simulation numérique de la dynamique du rotor a pu être démontrée en termes d'orbites et de spectres complets.

Une augmentation de la sévérité des excitations par la base a ensuite été appliquée afin de valider le modèle dans sa version non-linéaire, allant jusqu'à la mise en évidence de modes de défaillance. Les partenaires se sont tout particulièrement intéressés au phénomène de touche rotor-stator. Une bague de touche a ainsi été ajoutée au banc d'essai pour caractériser le contact, à 500 microns de l'arbre. La figure 3 présente une comparaison calcul-mesure des orbites en réponse à un balourd (positionné sur les disques) à une vitesse de 1700 tr/min et à une excitation par la base de type sinus (à 14Hz) en translation horizontale. Cet essai a généré un contact unilatéral effectivement visible sur les orbites expérimentales et numériques fort similaires.

Des essais de type choc par la base en translation combinée verticale et horizontale ont également été réalisés, avec une augmentation progressive du niveau d'accélération, jusqu'à l'obtention d'un contact rotor-stator pour un choc de niveau 3g. Le contact a généré une inversion du sens de précession de l'arbre, passant d'une précession directe à une précession inverse, conduisant à freiner l'arbre et provoquant la destruction de l'accouplement moteur. Les instabilités et l'inversion du sens de précession ont

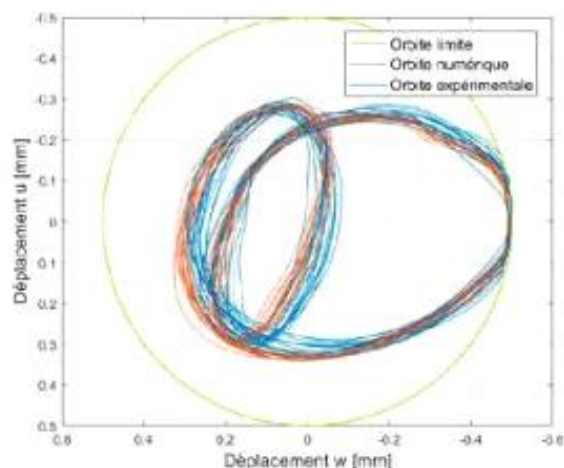


Figure 3 : Comparaison simulation (rouge) - essais (bleu) des orbites obtenues pour un cas d'essai avec contact unilatéral.

pu être observées numériquement sur les orbites de l'arbre et sur des spectres fréquentiels complets. Expérimentalement, une caméra rapide a été utilisée afin de visualiser d'une part la casse de l'accouplement (figure 4) et d'autre part l'inversion du sens de précession en plaçant la caméra en bout d'arbre.

Ces travaux ont permis de progresser dans la prévision du comportement dynamique des rotors embarqués soumis à des sollicitations sévères de la base et dans la conduite et l'analyse d'essais spécifiques pour la fiabilisation des équipements. Dans le cas d'un système industriel, l'application des essais aggravés et multi-axiaux est rendue d'autant plus intéressante par le grand nombre de modes de défaillance pouvant se manifester. Conformément à l'essence même d'AdVITAM, les outils numériques et expérimentaux développés permettent potentiellement de modéliser et tester toute structure industrielle.



Figure 4 : Observation de la casse de l'accouplement